



Guilherme Vieira Cosentino

**Proposição de políticas públicas para inserção de
usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil: uma abordagem
multicritério**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rodrigo Flora Calili

Rio de Janeiro,
outubro de 2022



Guilherme Vieira Cosentino

Proposição de políticas públicas para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil: uma abordagem multicritério

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Rodrigo Flora Calili

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Rafael Kelman

PSR Consultoria

Rio de Janeiro, 11 de outubro de 2022.

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Guilherme Vieira Cosentino

Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ.

Ficha Catalográfica

Cosentino, Guilherme Vieira

Proposição de políticas públicas para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil: uma abordagem multicritério / Guilherme Vieira Cosentino; orientador: Rodrigo Flora Calili. – 2022.
149 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2022.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Armazenamento de energia. 4. Usina hidrelétrica reversível. 5. Política energética. 6. Análise de impacto regulatório (AIR). 7. Métodos multicritério de apoio à decisão. I. Calili, Rodrigo Flora. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. III. Título.

CDD: 389.1

Agradecimentos

Em um primeiro momento, gostaria de agradecer a Deus por tudo que me proporcionou ao longo da minha vida. Agradeço também aos meus familiares pelo apoio moral dado durante este curso de mestrado.

Posteriormente, faço um agradecimento especial ao meu orientador de mestrado, professor Rodrigo Calili, por todo o conhecimento e pelo suporte providos.

Além disso, agradeço também pela oportunidade que foi dada de participar do projeto de P&D ANEEL 00678-0120/2020, no qual, obtive um imenso aprendizado sobre o panorama regulatório do setor elétrico.

Ademais, faço um agradecimento para todos os outros professores e integrantes (alunos e membros da secretaria) do departamento da pós-graduação em metrologia da PUC-RIO pelos ensinamentos promovidos nas disciplinas realizadas e por todo o auxílio promovido para resolução de questões burocráticas.

Aliás, faço um especial agradecimento à empresa PSR (*Energy Consulting and Analytics*), em especial, aos colegas Tarcísio Castro; Rafael Kelman e Luiz Rodolpho de Albuquerque, pela parceria realizada no projeto de P&D ANEEL 00678-0120/2020, a qual, propiciou que existissem discussões construtivas no âmbito regulatório em relação às usinas hidrelétricas reversíveis.

Vale a pena também fazer um outro agradecimento para a mesma empresa por todo o conteúdo (estudos e publicações) compartilhado durante esta parceria no projeto de P&D, a qual, possibilitou a elaboração de importantes relatórios e a construção do artigo intitulado “Desafios Regulatórios para Inserção das Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil” que foi apresentado no XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE) a ser realizado em maio de 2022.

O autor desta dissertação agradece também às empresas EDF NORTE FLUMINENSE, CTG BRASIL, ELERA RENOVÁVEIS e LIGHT pelo suporte financeiro via Programa de P&D ANEEL.

Por fim e não mais importante, gostaria de promover um agradecimento ao governo federal brasileiro, em especial ao Ministério da Educação (MEC), o qual, por meio da fundação para a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) promoveu o fomento deste curso de mestrado, durante o período

de dois anos, pela concessão da bolsa de fomento, a qual, contribuiu bastante para o desenvolvimento desta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Cosentino, Guilherme Vieira; Calili, Rodrigo Flora (Orientador). **Proposição de políticas públicas para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil: uma abordagem multicritério.** Rio de Janeiro, 2022. 149p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A inserção de sistemas de armazenamento de energia é uma tendência global observada no cenário de diversificação energética de vários países no mundo. Considerando a predominância da geração hídrica centralizada na matriz elétrica brasileira, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis possuem uma tendência à utilização dentro do Sistema Interligado Nacional (SIN). Entretanto, tal processo de inserção deve considerar as possíveis alterações no marco regulatório advindas de novas políticas regulatórias para o setor elétrico brasileiro. A seleção destas políticas deve considerar diversos critérios e várias dimensões. Além disso, a política escolhida deve considerar uma Análise de Impacto Regulatório para sua efetividade. O objetivo principal desta dissertação é propor um modelo de seleção e avaliação dessas políticas, utilizando um processo de análise de impacto regulatório (AIR), com o auxílio de métodos multicritério de apoio à decisão (MCDM). O modelo definido foi proposto em seis etapas: definição do problema regulatório; determinação do *framework* regulatório; mapeamento das alternativas de ação; análise benefício-custo conduzida com o método *AHP*; seleção da política preferida com o método *fuzzy-TOPSIS* e monitoramento e avaliação desta política. A modelagem foi aplicada para as seguintes cinco políticas definidas: criação de um mercado de capacidade; criação de um mercado de flexibilidade; implementação de um leilão multiatributos; implementação de um leilão de capacidade; e adoção de uma política de incentivos. Os resultados foram comparados com algumas referências, confirmando a aplicabilidade da metodologia e indicando que o desenvolvimento do modelo proposto preencheu lacunas na literatura referente às aplicações de abordagem multicritério para políticas energéticas.

Palavras-chave

Armazenamento de energia; usina hidrelétrica reversível; política energética; análise de impacto regulatório (AIR); métodos multicritério de apoio à decisão.

Abstract

Cosentino, Guilherme Vieira; Calili, Rodrigo Fora (Advisor). **Proposal of public policies for inserting pumped storage hydroelectric plants in Brazil: a multi-criteria approach.** Rio de Janeiro, 2022. 149p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The insertion of the energy storage systems is a global trend observed in the energy diversification scenario of several countries in the world. Considering the predominance of centralized hydroelectric generation in the Brazilian electric matrix, Pumped Storage Hydroelectric Plans tend to be used within the National Interconnected System (SIN). However, such insertion process must consider the new changes in the regulatory framework arising from Brazilian regulatory policies for the sector. The selection of these policies must consider several and several dimensions. In addition, the chosen policy must consider a Regulatory Impact Analysis for its own. The main objective of this dissertation is to propose a model for the selection and evaluation of these policies, using a Regulatory Impact Analysis (RIA) process, with the aid of multicriteria decision making methods (MCDM). The defined model was proposed in six stages: definition of the regulatory problem; determination of the regulatory framework; mapping of action alternatives; benefit-cost analysis with the AHP method; selection of preferred policy with the fuzzy-TOPSIS method and monitoring and evaluation of this policy. The modeling was applied to the following five policies: creating a capacity market; creation of a flexibility market; implementation of a multi-attribute auction; implementation of a capacity auction; and adoption of an incentive policy. The policies were compared with some references, confirming the applicability of the methodology and indicating the development of the proposed model, gaps in the literature regarding the applications of multicriteria for energy.

Keywords

Energy storage; pumped storage hydroelectric plant; energy policy; regulatory impact analysis (AIR); multicriteria decision support methods.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Definição do problema de pesquisa	18
1.2. Objetivos: geral e específicos	19
1.3. Metodologia	20
1.3.1. Fase exploratória e descritiva	22
1.3.2. Fase de pesquisa aplicada	24
1.3.3. Fase conclusiva	24
1.4. Estrutura da dissertação	24
2. Sistemas de armazenamento de energia	27
2.1. Conceito do armazenamento de energia	27
2.2. Características dos sistemas de armazenamento de energia	27
2.3. Armazenamento: foco nas Usinas Hidrelétricas Reversíveis	32
2.3.1. Classificação quanto ao modo de operação	33
2.3.2. Caracterização conforme a configuração eletromecânica	34
2.3.3. Arranjos físico-construtivos para usinas reversíveis	36
2.4. Considerações sobre o capítulo	37
3. Aspectos regulatórios do armazenamento de energia	39
3.1. Status regulatório do armazenamento de energia	39
3.1.1. Regulação no mundo	41
3.1.2. Regulação no Brasil	44
3.2. Principais mecanismos de mercado ou políticas que viabilizem o armazenamento de energia	47
3.2.1. Mercado de capacidade	49
3.2.2. Mercado de flexibilidade	52
3.2.3. Leilão de capacidade	54
3.2.4. Leilões multiatributos	55
3.2.5. Política de incentivos	58
3.3. Serviços Ancilares	59
3.4. Considerações sobre o capítulo	64

4. Métodos multicritério para avaliação e seleção de políticas públicas	65
4.1. Métodos multicritério de apoio à decisão sob incerteza	65
4.2. Métodos multicritério para avaliação e seleção de políticas públicas	69
4.3. Dimensões e critérios para avaliação de políticas públicas	72
4.4. Considerações sobre o capítulo	78
5. Modelo de Análise de Impacto Regulatório para seleção e avaliação de políticas públicas	80
5.1. Teoria de Análise de Impacto Regulatório	80
5.2. Visão geral do modelo de AIR para avaliação e seleção de políticas públicas	82
5.3. Descrição da fase 1 - Definição do problema	84
5.4. Descrição da fase 2 - Framework regulatório	85
5.5. Descrição da fase 3 - Mapeamento das alternativas de ação	86
5.6. Descrição da fase 4 - Análise benefício-custo conduzida com o método AHP	86
5.7. Descrição da fase 5 - Seleção da política preferida com o método <i>fuzzy-TOPSIS</i>	91
5.8. Descrição da fase 6 - Monitoramento e avaliação da política	98
5.9. Considerações sobre o capítulo	98
6. Demonstração da aplicabilidade do modelo para seleção de políticas públicas	100
6.1 Coleta dos dados	100
6.2 Formatação, análise e apresentação dos resultados	102
6.2.1 Fase 1 - Definição do problema	102
6.2.2. Fase 2 - Framework regulatório	104
6.2.3. Fase 3 - Mapeamento das alternativas de ação	105
6.2.4. Fase 4 - Análise benefício-custo conduzida com o método <i>AHP</i>	105
6.2.5. Fase 5 - Seleção da política preferida com o método <i>fuzzy-TOPSIS</i>	111
6.2.6. Fase 6 - Monitoramento e avaliação da política	118
6.3. Discussão dos resultados	125

7. Conclusões e recomendações	129
8. Referências Bibliográficas	133
Apêndice 1- Formulário enviado aos especialistas	143

Lista de Figuras

Figura 1- Princípio de funcionamento de usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs)	15
Figura 2 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos	21
Figura 3 - Mapa conceitual da pesquisa	23
Figura 4 - Classificação do armazenamento de energia quanto ao tipo	28
Figura 5- Ciclos de vida versus eficiência para sistemas de armazenamento de energia	30
Figura 6 - Comparação potência versus tempo de descarga para sistemas de armazenamento de energia	31
Figura 7- Arranjos físico-construtivos de usinas hidrelétricas reversíveis	37
Figura 8 - Modelo proposto para avaliação e seleção de políticas públicas - Fases 1 a 3	83
Figura 9 - Modelo proposto para avaliação e seleção de políticas públicas – Fases 4, 5 e 6	84
Figura 10 - Estrutura hierárquica do método AHP em problemas de decisão	88
Figura 11 - Exemplo didático de matriz de julgamentos AHP	89
Figura 12 - Conjunto fuzzy trapezoidal	92
Figura 13 - Número fuzzy triangular	93
Figura 14 - Estrutura hierárquica para o modelo de avaliação e seleção de políticas públicas voltadas à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil	106

Lista de Quadros

Quadro 1- Características e principais vantagens, desvantagens e aplicações de configurações eletromecânicas de UHRs	35
Quadro 2 - Regulação do armazenamento de energia em alguns países do mundo	42
Quadro 3 - Principais mecanismos de mercado para armazenamento de energia	48
Quadro 4 - Principais políticas para o armazenamento de energia	49
Quadro 5 - Características típicas para mecanismos de remuneração por capacidade	51
Quadro 6 - Relação entre as possíveis configurações eletromecânicas de usinas reversíveis e os possíveis serviços entregues na rede elétrica brasileira	60
Quadro 7 - Comparação entre a remuneração dos serviços ancilares brasileiros com àquela em outros países	62
Quadro 8 - Quadro-resumo dos métodos multicritério de apoio à decisão	67
Quadro 9 - Referências de políticas energéticas com base em métodos multicritério	71
Quadro 10 - Dimensões dos principais critérios utilizados em trabalhos relevantes da literatura	74
Quadro 11 - Revisão da literatura sobre dimensões e critérios	75
Quadro 12 - Revisão da literatura sobre dimensões e critérios (continuação)	76
Quadro 13 - Revisão da literatura sobre dimensões e critérios (continuação)	77
Quadro 14 - Dimensões e critérios propostos com base na literatura	78
Quadro 15 - Escala de Saaty para avaliação da importância de dimensões e critérios	89
Quadro 16 - Índice de consistência aleatória (IR)	90
Quadro 17- Termos linguísticos e respectivos valores numéricos para os critérios qualitativos	94

Quadro 18 -Termos linguísticos e correspondentes números fuzzy triangulares para avaliação quantitativa dos indicadores	95
Quadro 19 - Estrutura hierárquica do instrumento de coleta de dados	101
Quadro 20 - Julgamento relativo do grau de importância entre dimensões	107
Quadro 21 -Julgamento relativo de grau de importância entre os critérios	108
Quadro 22 - Metodologia para determinação do requisito de segurança no suprimento	120

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Razão de consistência das matrizes de dimensões e critérios	109
Tabela 2 - Pesos das dimensões e critérios calculados pelo método AHP	110
Tabela 3 - Exemplo de consolidação de respostas dos especialistas	112
Tabela 4 - Matriz de decisão fuzzy das políticas públicas versus critérios	113
Tabela 5 - Matriz de decisão fuzzy normalizada	114
Tabela 6 - Matriz de decisão normalizada e ponderada	115
Tabela 7 - Matriz de distâncias positivas e negativas	116
Tabela 8 - Matriz de distância total positiva e negativa	117

Um dos maiores erros que existem é julgar os programas e as políticas públicas pelas intenções e não pelos resultados.

Milton Friedman

1. Introdução

Recursos hídricos e energéticos são essenciais para o desenvolvimento da sociedade e da indústria. Um balanço estável entre fornecimento de energia e demanda energética vem enfrentando maiores desafios, com a integração de fontes renováveis intermitentes, nos casos, da energia solar e da energia eólica (Hunt et al., 2020). Isto vem provocando um crescimento de demanda por opções flexíveis e estáveis de geração, tais como os sistemas de armazenamento de energia. Uma maneira de otimizar a integração entre água, energia e recursos terrestres é por meio da utilização de plantas de usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs) para sistemas de gerenciamento de água e energia em curto e longo prazo (Hunt et al., 2020).

Ao invés de construir reservatórios de armazenamento em um rio principal, o que pode causar maiores impactos ambientais e requer a compra de grandes áreas, uma estação de bombeamento pode armazenar parte da água no rio principal e transferi-la para um reservatório paralelo localizado em outro rio. Num caso limite os reservatórios podem estar fora de um rio, com a água circulando entre os reservatórios superior e inferior (UHR em “circuito fechado”). Estes reservatórios, tendem a necessitar de um menor espaço para alocar uma maior quantidade de água, pois o nível de água no reservatório superior permitiria uma variação da quantidade de água muito maior do que em uma represa convencional (Hunt et al., 2020). O esquema de funcionamento de uma UHR é detalhado abaixo.

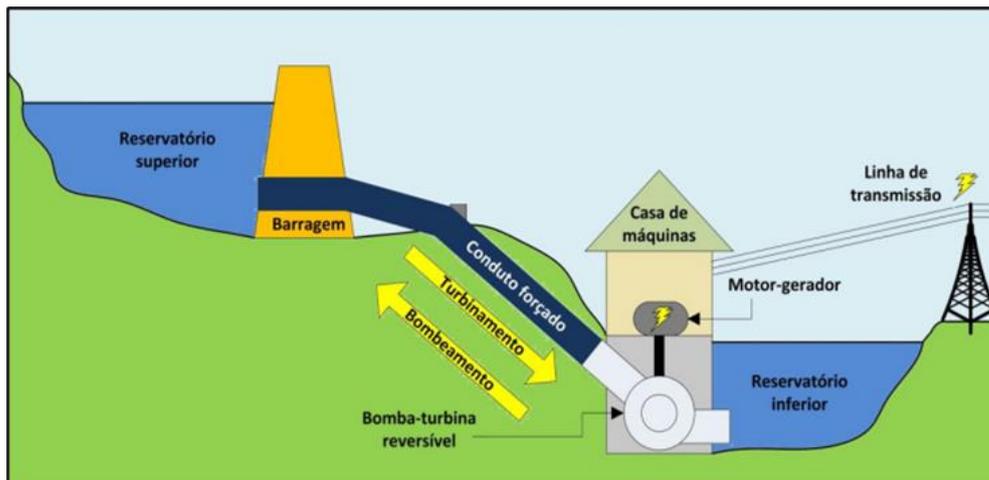


Figura 1- Princípio de funcionamento de usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs)

Fonte: Canales et al., 2015, p.1233

As usinas hidrelétricas reversíveis possuem o mesmo princípio de funcionamento das usinas hidrelétricas convencionais, porém, com algumas particularidades (Canales et al., 2015). Na usina hidrelétrica reversível, o sistema de armazenamento funciona da seguinte forma, a água é bombeada de um reservatório inferior para um superior, durante um determinado horário (e.g., horário fora de ponta do sistema elétrico). A quantidade de água armazenada pode ser utilizada para movimentar as turbinas hidráulicas, a fim de produzir eletricidade no horário de ponta do sistema, no qual, a demanda de energia elétrica é alta (Hunt et al., 2020).

A energia hídrica pode assumir uma nova posição no cenário energético. O armazenamento de energia hídrica em períodos de baixo consumo ou excesso de produção, além da produção da eletricidade obtida pela energia armazenada em períodos de alta demanda ou de produção reduzida são cruciais para a manutenção da estabilidade, da confiabilidade e da eficiência do sistema elétrico de potência, permitindo a otimização de redes elétricas, prevenindo apagões e limitando as variações de frequência (EPE, 2019).

Muitas tecnologias devem ser consideradas para a conversão de eletricidade e para o armazenamento, porém a única tecnologia de armazenamento energético atual de maior relevância é baseada em plantas de armazenamento de energia por

bombeamento hídrico, dada a sua efetiva capacidade (potência) e o adequado tempo de armazenamento (Gajic et al., 2019).

Sistemas de armazenamento de energia mitigam incertezas, tais como variações de preços de mercado, maximizando a rentabilidade da operação e gerando maior segurança financeira aos investidores. Além disso, estes sistemas possuem menores custos construtivos e operativos, quando comparados a outros tipos de sistemas de armazenamento de energia (Hunt et al., 2018).

Por ser uma tecnologia madura, as plantas tradicionais de UHRs têm sido usadas para promover o equilíbrio entre a produção energética e a demanda de carga na rede elétrica. A operação habitual consiste em atuar no modo de bombeamento no período fora da ponta (normalmente durante a noite) e produzir/turbinar energia no horário de ponta. (Hunt et al., 2020).

As possibilidades de expansão e diversificação da matriz energética brasileira aliadas ao mecanismo de resposta à demanda de energia elétrica, decorrente do fornecimento de água e energia para regiões com baixos valores de IDH (índice de desenvolvimento humano), as quais necessitam destes suprimentos, constituem potenciais benefícios da utilização de usinas hidrelétricas reversíveis no panorama energético brasileiro. Além destes benefícios, existem outros decorrentes da operação de usinas hidrelétricas reversíveis, sendo estes: o controle do fluxo e do abastecimento da água armazenada no reservatório e a utilização da mesma para expansão da frota de transportes marítimos (Hunt et al., 2018).

No aspecto econômico, os principais benefícios das usinas hidrelétricas reversíveis são as diversas possibilidades de modelos de negócio, dentre estes, os serviços ancilares promovidos por estas usinas, o estabelecimento de contratos de entrega de energia em planos com fluxo de caixa pré-definidos e a possibilidade de participação dessas usinas como mecanismo de arbitragem de preços de energia, em razão da comercialização do excesso de energia armazenada no horário de ponta do setor elétrico. Estes modelos de negócio podem contribuir para a estabilidade no horizonte do planejamento e da operação do sistema elétrico brasileiro (EPE, 2019), mas necessitam de mudança do arcabouço regulatório para sua viabilização.

A necessidade do estabelecimento de um arcabouço regulatório é de extrema importância para qualquer mudança na política energética de um país. Os sistemas de armazenamento de energia ainda não são considerados parte integrante da matriz energética brasileira e, portanto, não existem políticas regulatórias que

fomentem a inserção desses sistemas no horizonte de planejamento e operação do setor elétrico brasileiro (EPE, 2021). Trabalhos da literatura realizados por Guittet et al. (2016); Barbour et al. (2016); Yang e Zhao. (2018); Zablocki. (2019); Sani et al. (2020) descrevem os benefícios da utilização de sistemas de armazenamento de energia, bem como, detalham políticas regulatórias adotadas para estas tecnologias em alguns países do mundo.

Dentre os trabalhos com fins de definição de políticas a serem aplicadas em um determinado setor da sociedade, muitos utilizam ferramentas multicritério de apoio à decisão, tais como Alizadeh et al. (2020); Aryanfar et al. (2020); Caporale et al. (2020); Brodny and Tutak (2021); Da Ponte (2021); Saraswat et al. (2021), dentre outros, que têm aplicação no setor de energia, mas não especificamente em políticas para viabilizar sistemas de armazenamento.

No tocante à utilização de ferramentas multicritério a fim de determinar as melhores tecnologias de armazenamento para a política energética de um país, há o trabalho desenvolvido por Colak and Kaya (2020). Entretanto, foram encontradas lacunas na literatura no âmbito da aplicação da análise multicritério relacionada ao estabelecimento de políticas para inserção de tecnologias de armazenamento de energia, o que motiva a definição do problema de pesquisa e os objetivos geral e específico desta dissertação de mestrado.

A lacuna mais evidente da aplicação de métodos multicritérios para definição destas políticas está relacionada ao estabelecimento de um arcabouço regulatório que considere a análise de impacto regulatório (AIR). Consiste num processo sistemático para definir um problema regulatório, avaliar os possíveis impactos das alternativas de ação disponíveis para alcançar os objetivos para orientar e subsidiar a tomada de decisão. A AIR visa uma regulação efetiva, eficaz e eficiente (Ministério da Casa Civil, 2018).

Na literatura, no que diz respeito à AIR, os trabalhos mais relevantes para esta pesquisa de dissertação, destacados na realidade internacional são (OCDE, 2018; OCDE, 2019; OCDE, 2021). Estes documentos refletem a importância da interação das partes envolvidas em um processo regulatório e como uma boa interação pode elevar o nível de indicadores de boas práticas regulatórias, aumentando a eficiência do processo de análise de impacto regulatório.

No contexto do setor elétrico, a evolução do processo regulatório é cada vez mais necessária, o que reitera a necessidade de interação entre os agentes do

setor elétrico e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Esta necessidade, a fim de aprimorar o processo regulatório, se torna fundamental para a inserção de novas tecnologias na matriz energética brasileira, em especial, no contexto de usinas hidrelétricas reversíveis.

Ainda inexistem no Brasil políticas públicas do setor elétrico voltadas para a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis que sejam embasadas por uma análise multicritério. Assim, há a necessidade de que sejam realizados estudos com este teor de análise, buscando avaliar, além dos efeitos da inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no marco regulatório, os benefícios desta inserção nos aspectos político, econômico, ambiental e social. Esta dissertação de mestrado busca realizar um estudo de inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, considerando uma metodologia baseada em análise multicritério, a fim de propor mudanças no marco regulatório e estimular a produção de benefícios para todos os setores da sociedade brasileira.

Esta dissertação insere-se na linha de pesquisa “Redes Elétricas Inteligentes” do Programa de Pós-graduação em Metrologia (PósMQI) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

1.1. Definição do problema de pesquisa

Considerando o aumento da demanda global de energia elétrica, a necessidade de diversificação da matriz elétrica brasileira, com a inserção de novas tecnologias renováveis de armazenamento e geração de energia e a expansão da matriz energética brasileira, visando à maior estabilidade no horizonte do planejamento e da operação do sistema elétrico brasileiro, foi definida a seguinte questão principal a ser respondida ao longo da pesquisa:

“Quais políticas públicas devem ser adotadas no contexto do setor elétrico brasileiro a fim de estimular a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis?”

1.2. Objetivos: geral e específicos

Com o intuito de contribuir com a inserção de novas tecnologias de geração renovável de energia, a partir da proposição de alterações no marco regulatório, o objetivo geral da dissertação é definir políticas públicas que viabilizem a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis na matriz elétrica brasileira, com a utilização das metodologias de análise multicritério AHP e fuzzy -TOPSIS.

Em termos específicos, a dissertação busca:

- ✓ Identificar as contribuições de referenciais normativos e notas técnicas existentes aplicáveis à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis na matriz energética brasileira;
- ✓ Mapear as regras e normas adotadas por países que promoveram a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis e discutir os motivadores para esta inserção;
- ✓ Definir os aspectos legais que devem ser considerados no Brasil, a partir da análise das regulamentações de outros países;
- ✓ Levantar quais são as abordagens metodológicas usadas pelos países para fins de avaliação de políticas públicas;
- ✓ Selecionar os métodos (nacionais e internacionais) que vêm sendo utilizados nos estudos empíricos de análise multicritério para o setor elétrico, em especial para seleção de políticas públicas;
- ✓ Propor um modelo que utilize ferramentas de análise multicritério para a definição de políticas públicas do setor elétrico brasileiro, visando à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis;
- ✓ Consultar especialistas do setor elétrico brasileiro a fim de estimar o grau de importância de políticas públicas voltadas à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil;
- ✓ Definir as políticas públicas mais viáveis para diversificação da matriz energética brasileira em um cenário de operação de usinas hidrelétricas reversíveis; e

- ✓ Propor alterações no marco regulatório por meio de uma análise de impacto regulatório realizada para as políticas públicas com as melhores avaliações advindas da análise multicritério.

1.3. Metodologia

Com base na taxonomia proposta por Vergara (2002), a pesquisa pode ser classificada quanto aos fins em descritiva, metodológica e aplicada. Quanto aos meios de investigação, a metodologia compreende: Revisão bibliográfica e documental que compreende a primeira fase da pesquisa (exploratória e descritiva);

- ✓ Definição de políticas públicas que permitam a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis e avaliação destas políticas por meio de simulações que usam as ferramentas multicritério AHP e fuzzy-TOPSIS, com discussão dos resultados, conforme indicado na segunda fase da pesquisa (aplicada); e

- ✓ Proposição de mudanças no marco regulatório através de uma análise de impacto regulatório aplicada às políticas públicas que apresentaram melhores resultados nas simulações (conclusivo-propositiva).

A figura 2 apresenta o desenho da pesquisa, destacando-se seus componentes e métodos, de acordo com três fases principais: (i) exploratória e descritiva; (ii) aplicada; e (iii) conclusiva.

O desenvolvimento de cada fase e os resultados esperados em cada bloco da figura 2 são detalhados a seguir. O desenho da pesquisa foi desenvolvido em total alinhamento com os objetivos enunciados na seção 1.2 deste capítulo.

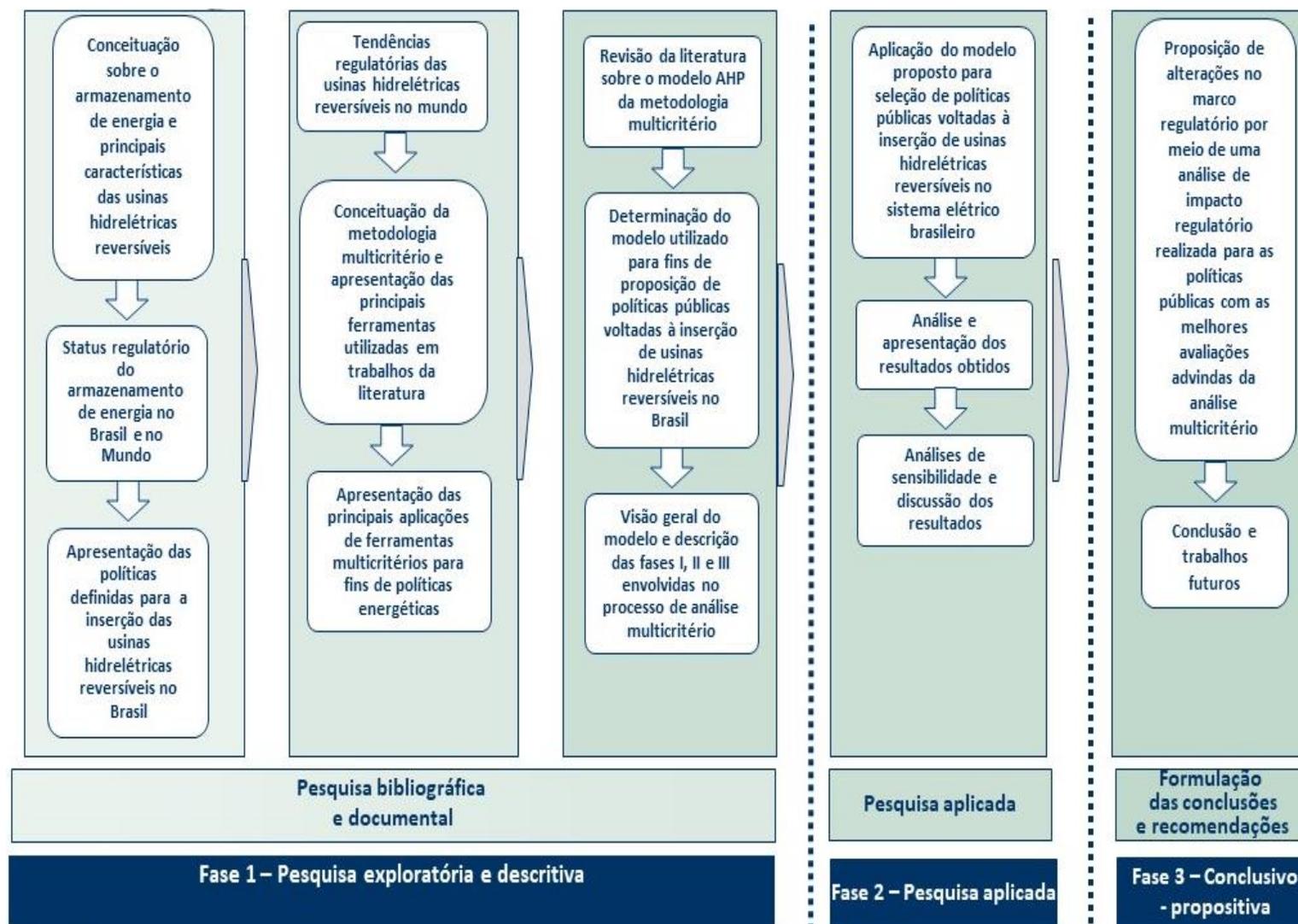


Figura 2 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos

Fonte: Elaboração própria

1.3.1. Fase exploratória e descritiva

A fase exploratória e descritiva foi iniciada com a realização da pesquisa bibliográfica e documental, com o intuito de obter trabalhos conceituais e documentos de referência para determinação do tema da pesquisa, sendo este: Inserção das Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil: proposição de mudanças no marco regulatório. Foram levantados trabalhos de revisão da literatura relacionados ao estado-da-arte de sistemas de armazenamento de energia, com ênfase dada para as usinas hidrelétricas reversíveis. Em seguida, foram levantados documentos do estado-da-arte sobre metodologia multicritério.

Com vistas a realizar um aprofundamento na pesquisa, foram observados estudos empíricos que relacionassem a aplicação de ferramentas multicritérios à definição ou hierarquização de políticas públicas voltadas ao segmento energético.

Tal processo possibilitou identificar que muitos dos trabalhos encontrados tratavam da aplicabilidade dessas ferramentas para políticas relacionadas ao planejamento energético com o objetivo de transição para um desenvolvimento sustentável em alguns países do mundo.

Foram encontradas lacunas no tocante à aplicação destas ferramentas para as políticas relacionadas com o armazenamento de energia advindo das usinas hidrelétricas reversíveis.

Na figura 3, apresenta-se uma visão geral e esquemática dos resultados desta primeira fase.

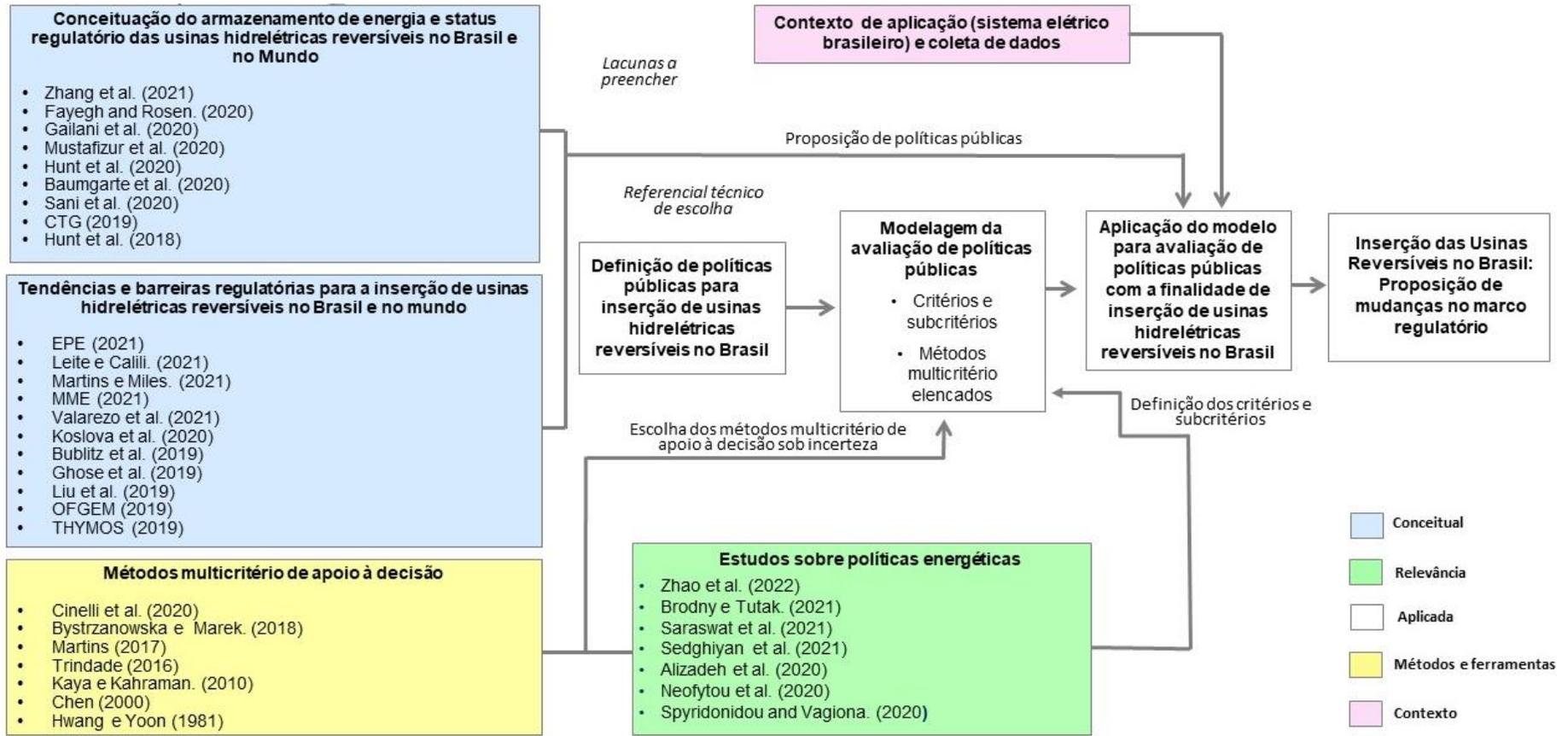


Figura 3 - Mapa conceitual da pesquisa

Fonte: Elaboração própria.

O referencial teórico permitiu uma diretriz conceitual para a pesquisa, ao auxiliar na elaboração do vocabulário especializado e organizar o conhecimento necessário sobre sistemas de armazenamento de energia, usinas hidrelétricas reversíveis e metodologia multicritério.

1.3.2.

Fase de pesquisa aplicada

A pesquisa aplicada propriamente dita, foi estabelecida a partir dos resultados da revisão bibliográfica e documental que fomentaram a construção dos objetivos da pesquisa e a possibilidade da definição de políticas públicas a serem avaliadas por meio de simulações realizadas com as ferramentas multicritério *AHP-fuzzy-TOPSIS* a fim de verificar o grau de importância dessas políticas para um cenário de inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.

1.3.3.

Fase conclusiva

Na terceira fase, foram elaboradas as considerações finais e recomendações de trabalhos futuros, fomentadas por uma análise dos resultados das simulações realizadas, acompanhada de uma análise de impacto regulatório realizada a política pública melhor avaliada dentro do modelo proposto.

1.4.

Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, incluindo a introdução.

O capítulo 2 apresenta uma abordagem genérica sobre sistemas de armazenamento de energia. O capítulo está estruturado em três seções: Na primeira, ocorre a abordagem do conceito de armazenamento de energia. Na segunda seção, há a apresentação dos tipos e das caracterizações dos sistemas de armazenamento de energia. Na terceira seção, ocorre o foco na abordagem sobre usinas hidrelétricas reversíveis, com o detalhamento de suas classificações quanto ao modo operativo, configurações eletromecânicas e arranjos físico- construtivos. Já na quarta seção, são realizadas as considerações finais do capítulo.

No capítulo 3, ocorre a abordagem dos aspectos regulatórios do armazenamento de energia. Tal processo ocorre em três seções: a primeira seção trata da definição generalizada para tal status regulatório, com a descrição de tal processo no Brasil e no mundo; na segunda seção, há a exibição dos principais mecanismos de mercado ou políticas que viabilizem o armazenamento de energia, com a explicação detalhada daquelas políticas selecionadas para a análise multicritério realizada nessa dissertação de mestrado. As considerações finais do capítulo são apresentadas na terceira sessão.

O capítulo 4 explora os métodos multicritério para avaliação e seleção de políticas públicas. A primeira seção apresenta este método aplicado para fins de apoio à decisão sob incerteza. A segunda seção trata da abordagem dos métodos mais utilizados na literatura internacional para fins de avaliação e seleção de políticas públicas, com a descrição dos autores dos principais trabalhos, bem como dos objetivos desses trabalhos para o cenário de políticas públicas. Já na terceira seção, são mostrados as dimensões e critérios para avaliação de políticas públicas. As considerações finais acontecem na quarta seção.

O capítulo 5 detalha o modelo de análise de impacto regulatório para seleção e avaliação de políticas públicas. A primeira seção apresenta o conceito teórico sobre a análise de impacto regulatório. A segunda seção mostra o modelo geral de análise de impacto regulatório (AIR) para seleção e avaliação de políticas públicas. A terceira seção descreve a primeira fase do modelo, com a definição do problema regulatório. Na quarta seção (fase 2), o framework regulatório é apresentado. A quinta seção (fase 3) contempla o mapeamento das alternativas de ação dentro do processo de análise de impacto regulatório (AIR). Já na sexta seção (fase 4), ocorre o detalhamento da análise de benefício-custo conduzida com o método *AHP* de análise multicritério. A sétima seção trata da fase 5 que define a seleção da política escolhida com o método *fuzzy-TOPSIS* de análise multicritério. A oitava seção aborda a sexta fase, referente ao monitoramento e avaliação da política selecionada. Por fim, na nona seção, ocorrem as considerações finais do capítulo.

No capítulo 6, ocorre a aplicação do modelo proposto para seleção de políticas públicas. A primeira seção apresenta a coleta de dados utilizados para a análise multicritério. Por sua vez, a segunda seção aborda à formatação, à análise e à apresentação dos resultados obtidos na análise multicritério. Dentro dessa seção,

há seis subseções que explicam as fases 1 a 6, apresentadas nas seções do capítulo 5 e discutem os resultados obtidos.

Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões da dissertação de mestrado e as recomendações para trabalhos futuros.

2. Sistemas de armazenamento de energia

Os sistemas de armazenamento de energia vêm sendo utilizados há mais de um século e receberam melhorias contínuas a fim de alcançarem o nível desejado de maturação tecnológica (Fayegh and Rosen, 2020). A conceituação desses sistemas é importante para a escolha dos possíveis tipos desses sistemas que serão considerados na expansão da geração de energia elétrica do país. Os tópicos a seguir abordam a conceituação dos principais sistemas de armazenamento de energia.

2.1. Conceito do armazenamento de energia

O princípio de funcionamento de um sistema de armazenamento de energia consiste na conversão da energia de uma forma a outra que pode ser armazenada e injetada na rede elétrica, quando houver necessidade (Rahman et al., 2020). As principais aplicações deste sistema são os setores de transporte, dispositivos móveis e de geração de energia (Rahman et al., 2020).

Uma aplicação importante do armazenamento de energia é a capacidade dos sistemas com essa tecnologia fornecerem potência de energia elétrica em momentos quando há a necessidade de maior consumo de carga em um sistema elétrico. Também podem prover serviços na rede elétrica como regulação de frequência, nivelamento de carga e descongestionamento da transmissão (Rahman et al., 2020).

Na subseção a seguir, é feita a caracterização dos sistemas de armazenamento de energia, em relação às suas funções e tipologias.

2.2. Características dos sistemas de armazenamento de energia

Antes de se discutir algumas das características dos sistemas de armazenamento, nesta seção, será feita uma classificação estes sistemas quanto ao tipo (Zhang et al., 2021): mecânico; térmico; eletroquímico; elétrico; e químico.

Como pode ser visto na figura 4, o armazenamento mecânico engloba tecnologias como as usinas hidrelétricas reversíveis, sistemas de ar comprimido e flywheel (volante de inércia). Já o armazenamento elétrico envolve tecnologias como supercapacitor e SMES (armazenamento por bobina supercondutora de campo magnético). O armazenamento químico agrupa tecnologias como os sistemas de armazenamento por hidrogênio. As outras classificações de sistemas de armazenamento de energia podem ser vistas na figura abaixo:

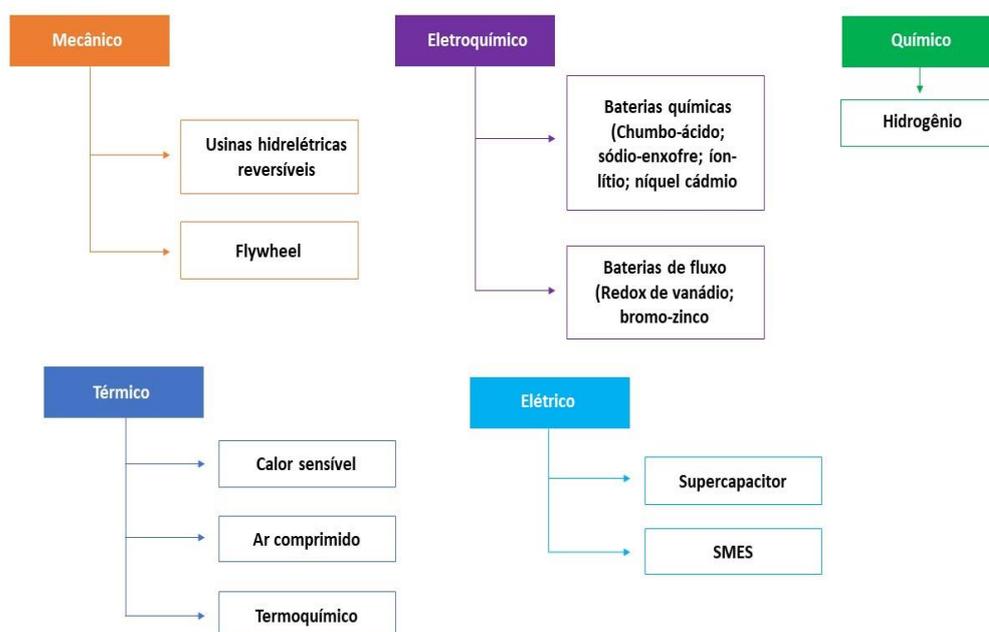


Figura 4 - Classificação do armazenamento de energia quanto ao tipo

Fonte: Adaptado de Rahman et al. (2020) e Zhang et al. (2021)

As principais características dos sistemas de armazenamento de energia, de acordo com Zhang et al. (2021), que permitem a comparação entre estes sistemas são as seguintes:

1. Densidades de energia e potência (por unidade de volume);
2. Energia e potência específicas (por unidade de peso);
3. Capacidades nominais de energia e potência: energia total obtida após 100% do carregamento e potência nominal relacionada para dado tempo de descarga;
4. Ciclo de eficiência de carga e descarga: porcentagem das potências (saída e entrada) utilizadas durante os ciclos de carga e descarga

5. Taxa de autodescarga: percentual de energia desperdiçada quando o sistema de armazenamento não está em operação;
6. Ciclo de vida: total de ciclos que podem ser obtidos após um carregamento completo;
7. Custo de capital: custo de energia por kWh ou custo de potência por kW.

Em relação às comparações mais usuais, estas costumam ser dos tipos: densidade de energia versus densidade de potência; energia específica versus potência específica; eficiência versus ciclo de vida; custo de capital anual versus custo de operação e manutenção anual e potência versus tempo de descarga.

Essa dissertação de mestrado abordará as comparações entre eficiência versus ciclo de vida e potência versus tempo de descarga, as quais serão vistas na figura 5 e na figura 6.

Ciclos de Vida

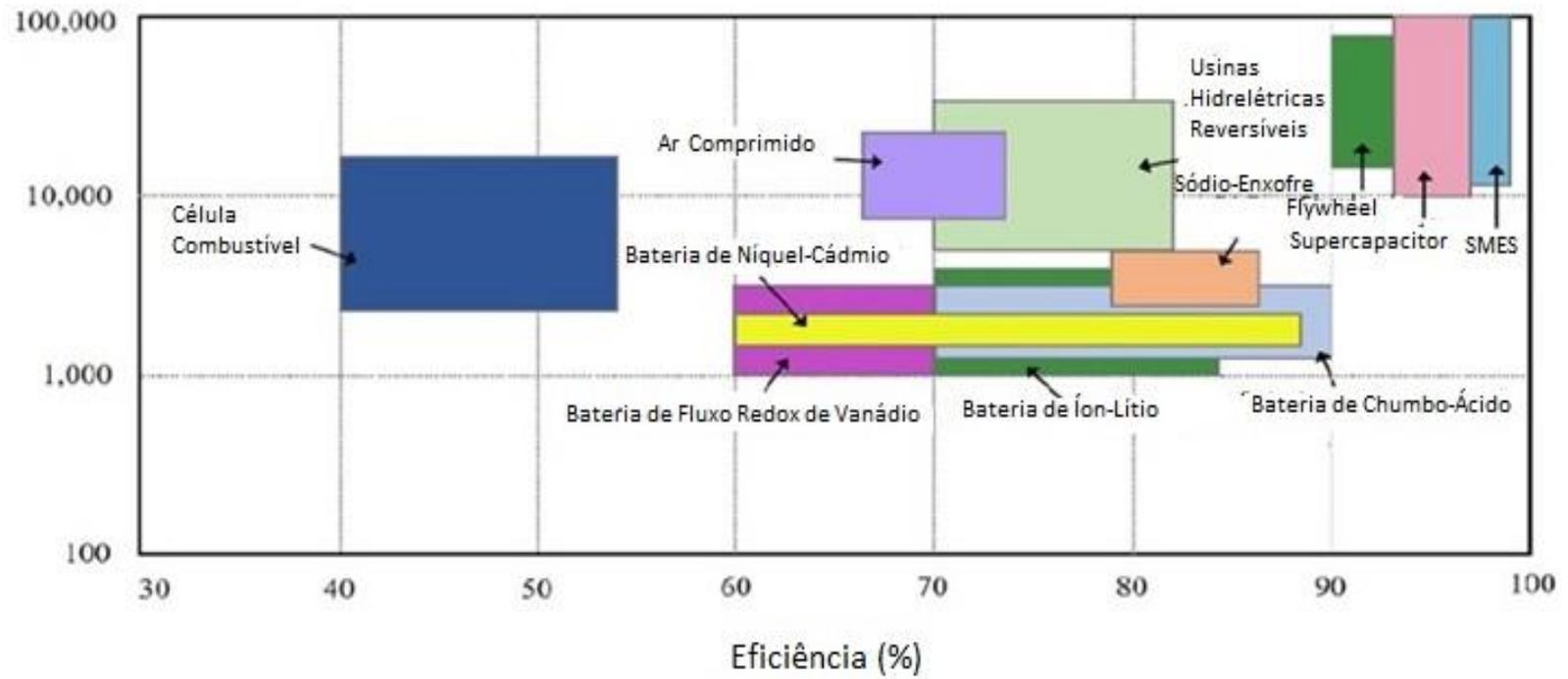


Figura 5- Ciclos de vida versus eficiência para sistemas de armazenamento de energia

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2021), p.24

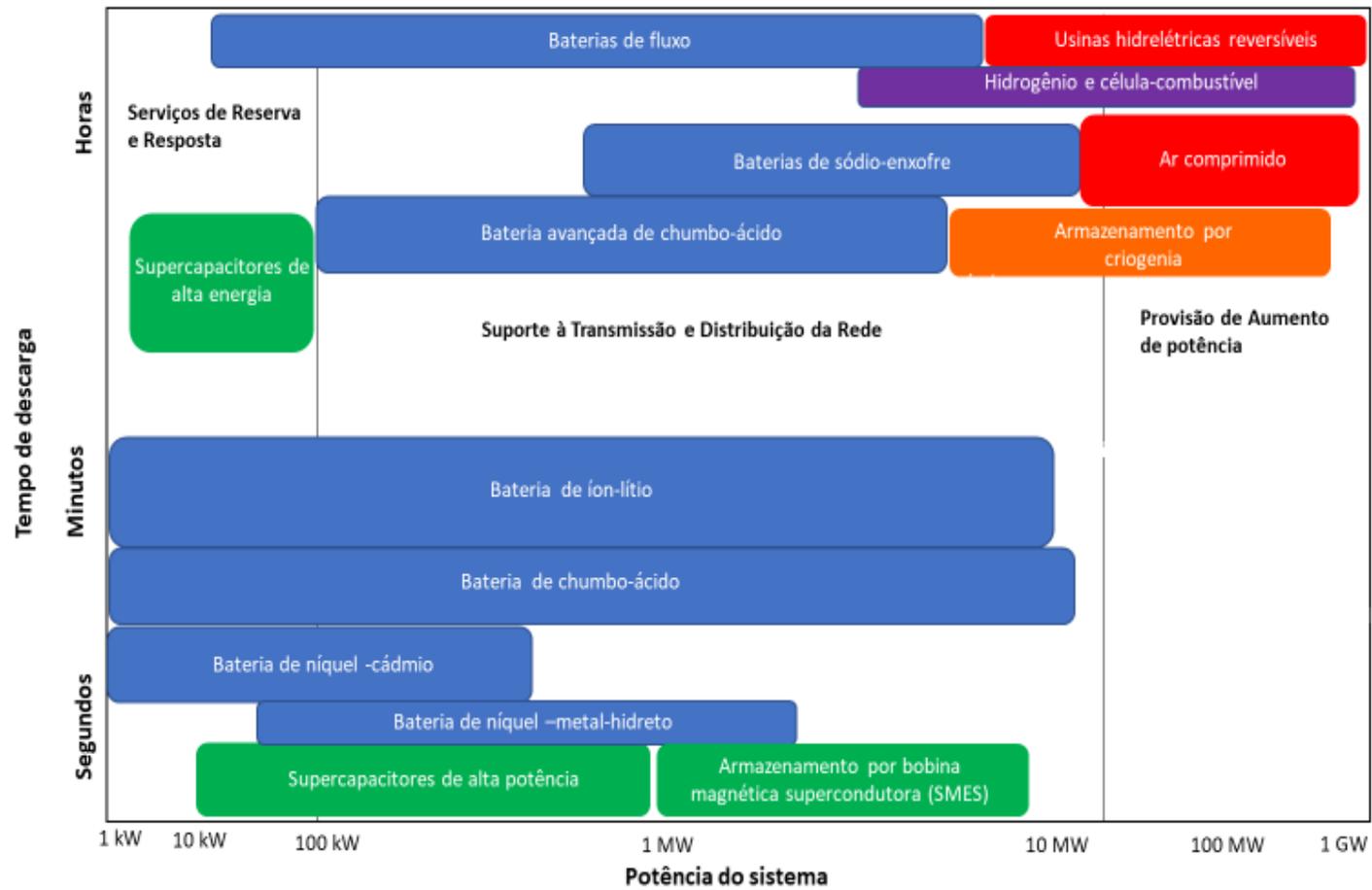


Figura 6 - Comparação potência versus tempo de descarga para sistemas de armazenamento de energia

Fonte: Adaptado de Grøn, 2016

Sobre a figura 5, as usinas reversíveis, os sistemas de ar comprimido, as baterias de sódio-enxofre, íon-lítio e chumbo-ácido, além de sistemas com flywheel, supercapacitores e SMES (bobina armazena energia por meio de campo magnético) se destacam por possuírem o maior percentual de eficiência (%) relacionado a um maior ciclo de vida.

Entretanto, dentre todas as tecnologias mencionadas, as usinas reversíveis, conforme destacado por Olabi et al. (2021), predominam no cenário do armazenamento de energia, muito em função por possuírem maior capacidade de armazenamento em termos de volume e pelo fato destas apresentarem menores custos (construção e operação) quando comparadas às demais tecnologias de armazenamento.

Além disso, conforme descrito por Grøn (2016) na figura 6, essas usinas apresentam elevado tempo de descarga para altas potências nominais, o que justifica o predomínio destas para fins de armazenamento, considerando que muitos sistemas elétricos mundo afora ainda necessitam de geração centralizada para entrega de capacidade ou lastro, o que pode ser provido por esta tecnologia de armazenamento de energia.

Segundo esse mesmo autor, as usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs) representam a maior capacidade instalada de armazenamento no mundo, atingindo 95% de tal capacidade. Essa dissertação de mestrado visa propor políticas que permitam a inserção das usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, para tal proposição, há a necessidade de que as suas principais características sejam conhecidas, sendo abordadas no próximo tópico.

2.3.

Armazenamento: foco nas Usinas Hidrelétricas Reversíveis

A energia hidráulica representou em 2019 cerca de 60% da capacidade instalada de energia elétrica no Brasil, conforme dados publicados no Balanço Energético Nacional 2022 (EPE, 2022). Considerando o perfil atual da matriz energética brasileira e em razão do imenso potencial hídrico nacional, . Segundo Blakers et al. (2021), as UHRs representam cerca de 99% do volume global de armazenamento de energia, sendo assim, estas usinas, dentre as tecnologias de armazenamento de energia, tendem a ser as com maior potencial para inserção

dentro do sistema elétrico brasileiro, até pela possibilidade de aproveitamento da estrutura de geração hidrelétrica já existente.

Existem várias tipologias para as usinas hidrelétricas reversíveis, relacionadas aos tipos de reservatórios utilizados e à forma de aproveitamento do leito do rio. Os conceitos das usinas hidrelétricas reversíveis costumam ser estabelecidos em função de tais tipologias, sendo assim, há a necessidade de que estes sejam devidamente apresentados.

O subtópico seguinte tratará de apresentar as características das usinas hidrelétricas reversíveis no que diz respeito ao modo de operação dessa tecnologia

2.3.1. Classificação quanto ao modo de operação

Quanto ao modo de operação, as UHRs se classificam em plurianuais, sazonais, semanais, diárias e horárias (Hunt et al., 2020).

As usinas reversíveis plurianuais apresentam uma capacidade do reservatório superior entre 5 e 100 km³ para fins de armazenamento e geralmente são utilizadas para bombeamento em períodos de estiagem com baixas demandas hídricas e de energia e para fins de geração em momentos em que há déficit anual de disponibilidade hídrica (Hunt et al., 2018; Hunt et al., 2020).

Segundo Raimundo. (2019) e Hunt et al. (2020), a operação sazonal destas usinas costuma ser ativada para o processo de bombeamento em períodos de alta geração renovável advinda de fontes eólica e solar. Contudo, a geração ocorre quando há alta demanda de energia. A operação é ativada geralmente em certas épocas do ano, tais como àqueles referentes aos tipos de geração aqui mencionados e aos períodos de chuva. O volume do reservatório está entre 1 e 30 km³.

As UHRs com operação semanal possuem seu bombeamento ativado nos finais de semana com a diminuição da demanda de energia, normalmente em períodos de intensa chuva. Já a geração ocorre durante a semana, em cenários de baixa disponibilidade hídrica e com maior demanda de energia. Entretanto, o volume do reservatório superior é menor do que nas usinas sazonais e plurianuais, variando entre 0,1 e 5 km³ (Hunt et al., 2018; Hunt et al., 2020).

Conforme definido pelos mesmos autores, as UHRs diárias possuem reservatório superior com volume entre 0,001 e 1 km³ e são bombeadas durante o

dia em momentos de geração de energia solar ou durante a noite, em caso de menor demanda energética. A geração ocorre durante o dia em caso de maior demanda energética ou à noite para o serviço de arbitragem de preços de energia.

Por fim, as usinas hidrelétricas reversíveis horárias podem operar em qualquer momento do dia para ambos os modos de operação (bombeamento e geração). Costumam ser utilizadas para a realização de serviços na rede elétrica tais como controle de frequência, auto reestabelecimento e qualidade de energia. Essas usinas apresentam o mesmo volume do reservatório superior quando comparadas às usinas diárias (Hunt et al., 2018; Hunt et al., 2020).

O modo de operação das UHRs conforme depende da aplicação. A revisão da literatura internacional permitiu constatar que a definição das configurações eletromecânicas dessas usinas é extremamente relevante para suas definições de projeto haja vista que tais arranjos podem impactar no custo final de uma planta reversível. Essas configurações serão apresentadas no próximo subtópico.

2.3.2.

Caracterização conforme a configuração eletromecânica

As configurações eletromecânicas das usinas hidrelétricas reversíveis são classificadas em três categorias: sistema binário; sistema ternário; sistema quaternário (Argonne National Laboratory, 2014; EERA (European Energy Research Alliance), 2014).

Estas classificações são apresentadas de forma detalhada no quadro a seguir **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com as suas respectivas características, principais vantagens e desvantagens.

Quadro 1- Características e principais vantagens, desvantagens e aplicações de configurações eletromecânicas de UHRs

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1920724/CA	Configurações eletromecânicas	Características	Principais vantagens e aplicações	Principais desvantagens
	Sistema binário	Formado por um conjunto turbina / bomba e uma máquina elétrica com as funções simultâneas de motor e gerador. Pode ser utilizada com máquinas de velocidade fixa ou variável. Utilizado para os circuitos <i>CFSM</i> (<i>converter fed synchronous machine</i>) e <i>DFIM</i> (<i>Doubly-fed induction machine</i>), sendo o último associado à velocidade variável (Argonne National Laboratory, 2014).	Para o circuito CFSM: possibilidade de controle de velocidade até uma faixa de alto valor; regulação de capacidade (potência) no bombeamento tempo de inicialização da unidade muito rápido, sem a necessidade de curto-circuito no estator da máquina; rápida transição dos modos de operação (geração/ bombeamento); controle de potência reativa pelo conversor. No circuito DFIM, a principal vantagem é a regulação de capacidade no modo de bombeamento (Argonne National Laboratory, 2014; EERA (European Energy Research Alliance), 2014). Esta configuração eletromecânica é àquela com menor custo de implementação (Argonne National Laboratory, 2014).	Menor eficiência elétrica do que nos sistemas ternário e quaternário; alto tempo de transição operativa, indo de 4 até 8 minutos (Argonne National Laboratory, 2014).
	Sistema ternário	Composto por um arranjo com uma turbina, uma bomba e uma máquina elétrica com as funções de motor e gerador, além disso, possui tanto turbinas do tipo Pelton quanto do tipo Francis para fins de operação (Argonne National Laboratory, 2014).	Acoplamento de bomba e turbina no mesmo eixo, com mesmas velocidades e sentidos de rotação, eliminando a necessidade de alteração no fluxo rotacional para fins de transição operativa, aumentando a flexibilidade do sistema (Argonne National Laboratory, 2014). Possibilidade desta configuração receber um curto-circuito hidráulico (by-pass), criando um fluxo bidirecional no conduto. Outra vantagem desta configuração é o rápido tempo de transição operativa, com valores de 0,5 até 0,75 minutos (Argonne National Laboratory, 2014). Ademais, a separação entre bomba e turbina aumenta a inércia do sistema eletromecânico, melhorando a taxa de regulação de frequência em um cenário de distúrbios da rede elétrica (Argonne National Laboratory, 2014).	Alto custo de implementação, em razão de maior complexidade do design hidráulico; maior capacidade hídrica requerida, resultando em maiores custos de implementação, operação e manutenção (Argonne National Laboratory, 2014).
	Sistema Quaternário	Caracterizado pela separação total entre os conjuntos bomba/turbina e motor/gerador. O gerador fica conectado à turbina e a bomba, ao motor (EERA - European Energy Research Alliance).	Nesta configuração, o modo de geração é similar a aquele do sistema ternário, sem a necessidade de ar comprimido na câmara da turbina. O ciclo de eficiência e a entrega da capacidade à rede elétrica também são semelhantes em comparação ao sistema ternário. Uma das suas vantagens é a regulação dos níveis de tensão e frequência da rede elétrica, quando utilizado com o conversor back to back. A separação entre os conjuntos (bomba/ turbina; motor/ gerador) permite maior estabilidade operativa e flexibilidade na geração do sistema elétrico (Argonne National Laboratory, 2014; EERA - European Energy Research Alliance).	Custos elevados para implementação e operação, muito justificado pela inicialização das bombas ser realizada por meio de um conversor back to back ou com a ajuda de um conversor de frequência; alto tempo de transição operativa, indo de 4 até 8 minutos (Argonne National Laboratory, 2014).

Fonte: Elaboração própria a partir de Argonne National Laboratory, 2014, p. 20-31; EERA, 2014, p.35 -52

Visando verificar de forma estratégica quais os serviços ancilares poderiam ser remunerados no Brasil (ANEEL, 2019), caso estes fossem aventados como produtos alternativos para usinas hidrelétricas reversíveis, foi proposta uma relação entre as possíveis configurações eletromecânicas de usinas reversíveis e os possíveis serviços da rede elétrica, considerando o cenário atual dos mesmos no Brasil (ANEEL, 2019). O quadro 6 apresenta tal relação e será mostrado no capítulo 3.

A eficiência na transição operativa de uma usina reversível pode estar relacionada aos arranjos físico-constructivos destas, pois dependendo da maneira que o curso do rio é utilizado para a construção de uma planta dessa tecnologia de armazenamento energético, nem sempre a configuração eletromecânica com maiores benefícios operativos ou com melhor custo-benefício pode ser utilizada. Tais arranjos físico-constructivos serão abordados no tópico seguinte, segundo conceitos estabelecidos por Nadler. (2009), Canales et al. (2015) e Hunt et al. (2020).

2.3.3. Arranjos físico-constructivos para usinas reversíveis

Em relação aos arranjos físicos existentes das UHRs, segundo Hunt et al. (2020), existem três arranjos físicos principais para a construção destas usinas: circuito aberto; circuito fechado e bomba reversa.

De acordo com Canales et al. (2015), as UHRs em circuito aberto utilizam o leito do rio para a construção dos reservatórios, sendo estes, utilizados por usinas hidrelétricas convencionais durante o dia, por sua vez, a utilização noturna é para o bombeamento de excedente de geração renovável.

Já as UHRs em circuito fechado não utilizam leito do rio para a construção dos reservatórios, sendo menos impactante do ponto de vista ambiental, além disso, os reservatórios que possuem um determinado volume de água circulando entre eles, necessitam de uma pequena quantidade de água fluindo, a fim de reestabelecer as perdas por evaporação e infiltração (Canales et al., 2015).

No arranjo em bomba reversa, uma máquina de bombeamento é instalada na barragem, enquanto há um outro reservatório localizado a jusante desta máquina, assim, o fluxo de água pode ocorrer nos dois sentidos (direto e reverso) entre os

reservatórios superior e inferior (Nadler, 2009). Este arranjo possibilita o aumento da flexibilidade e uma maior faixa operacional, haja vista que uma máquina de bombeamento pode ser utilizada tanto para geração hidrelétrica convencional quanto para armazenamento de energia. Este arranjo é pouco utilizado, porém, pode se tornar viável pela ausência de túneis nessa tipologia física (Hunt et al., 2020).

Os arranjos descritos no parágrafo acima podem ser visualizados na figura 7, onde T1 representa o circuito aberto; T2 define o circuito fechado e T1 (PB - *pump back*), o arranjo com bombeamento reverso.

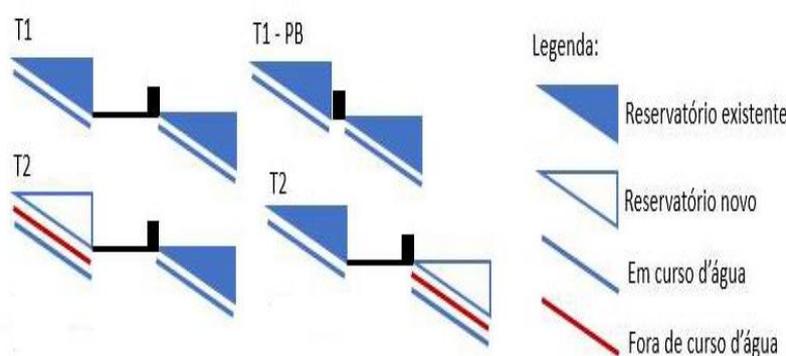


Figura 7- Arranjos físico-constructivos de usinas hidrelétricas reversíveis

Fonte: Albuquerque, 2021, p.68

A experiência na literatura internacional permitiu inferir que as usinas reversíveis em circuito fechado e bomba-reversa apresentam menor impacto ambiental e maior flexibilidade, respectivamente. Entretanto, a escolha do arranjo físico-constructivo depende das condições locais e do orçamento disponível.

2.4. Considerações sobre o capítulo

Uma vez conhecida a conceituação básica do armazenamento de energia, foi possível identificar as principais classificações de sistemas com essa função, sendo possível realizar comparações entre eles. No tocante à comparação eficiência versus ciclo de vida (figura 5), tecnologias como *flywheel*, *SMES* e supercapacitores apresentaram maiores percentuais de eficiência para maiores ciclos de vida.

Em relação à comparação mostrada na figura 6, foi possível denotar a capacidade das usinas hidrelétricas reversíveis proverem aumento de potência

sistêmica, possuindo maiores tempos de descarga em relação às outras tecnologias, o que contribui para a entrega de confiabilidade ao sistema elétrico.

A análise do panorama internacional demonstra que as usinas reversíveis possuem custos construtivos e operativos menores do que as outras tecnologias de armazenamento. Além disso, essas tecnologias são exploradas há mais de um século no mundo e compreendem uma maior gama de aplicações dentro do setor elétrico, tais como utilização para serviços no mercado de capacidade, flexibilidade e em serviços auxiliares, sendo assim, considerando o contexto atual de abertura do mercado brasileiro de energia elétrica e os estudos atuais publicados por agentes do setor elétrico brasileiro, as UHRs possuem maior viabilidade para inserção dentro da matriz energética brasileira.

Todavia, para tal processo de inserção, há a necessidade de que as características operativas, a configuração eletromecânica e os arranjos físico-construtivos sejam conhecidos, haja vista que a criação de um marco regulatório para usinas reversíveis irá provocar um aumento de demanda para projetos que envolvam essas tecnologias, desde que haja algum tipo de subsídio ou incentivo para tal, os quais podem ser fomentados por meio de políticas propostas nessa dissertação.

Considerando o contexto favorável para a criação do marco regulatório das usinas reversíveis dentro do setor elétrico brasileiro, algumas políticas regulatórias possibilitam tal processo e envolvem os conceitos abordados neste capítulo. Tais políticas serão apresentadas no próximo capítulo.

3. Aspectos regulatórios do armazenamento de energia

As políticas de armazenamento de energia podem ser definidas em função de dois parâmetros: criação de mercados e definição de objetivos (Sani et al., 2020). Estes podem ser nacionais, regionais, estaduais ou municipais. O alcance da política em termos territoriais e de jurisdição depende dos órgãos envolvidos em sua elaboração. Conforme Sani et al. (2020), de uma maneira geral, apesar da jurisdição e do alcance territorial, as políticas de armazenamento de energia podem ser classificadas segundo tais princípios:

- ✓ Definição de objetivos;
- ✓ Incentivos financeiros;
- ✓ Adaptação regulatória;
- ✓ Proteção ao consumidor;
- ✓ Projetos de demonstração.

Segundo o mesmo autor mencionado no parágrafo anterior, esses princípios devem ser compreendidos como interdependentes, visto que a adoção de uma determinada política pública necessita de definição de seus objetivos e em alguns casos, requer algum incentivo financeiro para estimulá-la. Ademais, a conclusão de seu ciclo regulatório pode depender de garantias de proteção ao consumidor e da execução de projetos de demonstração.

A revisão da literatura possibilitou que fossem conhecidas políticas de armazenamento de energia em alguns países do mundo, os quais, figuram entre as maiores economias globais. A exposição dessas políticas será feita no tópico seguinte, considerando o uso dos princípios abordados no início desse capítulo.

3.1. Status regulatório do armazenamento de energia

De acordo com He et al. (2021), as principais aplicações de sistemas de armazenamento de energia compreendem a utilização em serviços da rede elétrica. As estratégias mais utilizadas para remuneração dessas tecnologias são a arbitragem

de energia, os serviços ancilares, os serviços de infraestrutura das redes de transmissão e distribuição e de provisão de capacidade firme ao sistema elétrico (He et al., 2021).

A arbitragem de energia consiste na comercialização da energia armazenada durante o período de pico onde os preços de eletricidade são maiores do que a média do mercado (He et al., 2021). Para atuação no mercado de arbitragem de energia, há a necessidade de que os sistemas de armazenamento participem do mercado de preços de eletricidade “*intraday*”, ou seja, as cobranças de preço são realizadas por meio de simulações executadas a cada 30 min durante o dia.

Por sua vez, os serviços ancilares visam a garantia de estabilidade e de segurança da rede elétrica, por meio de várias operações como controle de frequência; reservas girantes e reservas operacionais (He et al., 2021).

Esses serviços podem ser classificados conforme o tempo de resposta do armazenamento de energia que promove os mesmos (He et al., 2021). Sendo assim, estes podem ser denominados de serviços com respostas primária, secundária e terciária, com o intuito de restauração da frequência e da tensão para valores nominais após flutuações repentinas na carga e na geração (He et al., 2021).

Os sistemas de armazenamento de energia podem ainda promover serviços de infraestrutura das redes de transmissão e distribuição como descongestionamento das mesmas e resposta da inércia, além disso, tais sistemas têm a possibilidade de realizarem a resposta da demanda pela provisão de capacidade ou por meio da entrega de garantia física à estas redes (He et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Tais serviços ou aplicações são consolidados na regulação sobre armazenamento de energia no mundo, abarcando políticas, leis, além de regulações, normas técnicas e outros instrumentos infralegais como decretos, resoluções e resoluções normativas.. A regulação do armazenamento de energia em alguns países do mundo será apresentada na sequência e na subseção subsequente será apresentada a regulação no Brasil.

3.1.1. Regulação no mundo

Com base em uma revisão sistemática da literatura, composta pela análise de vários artigos e documentos acadêmicos técnicos, foi possível identificar quais são as principais políticas regulatórias para o armazenamento de energia no mundo. Seis países foram objeto de estudo e terão seus processos regulatórios apresentados no quadro 2.

Quadro 2 - Regulação do armazenamento de energia em alguns países do mundo

País	Política de armazenamento
Alemanha	Definição de subsídio pelo banco KfW (Banco de desenvolvimento alemão) com empréstimo a juros baixos para sistemas de baterias químicas integradas com energia solar e conectadas à rede (International Energy Agency, 2016). Sob o ato alemão referente às fontes de energia renovável (EEG), há isenção das tarifas de uso da rede e de impostos para empreendimentos de armazenamento de energia localizados atrás do medidor, enquanto a energia armazenada for injetada na rede elétrica, além das mesmas isenções para faltas de energia (California ISO, 2019). No tocante às tendências de negócio para sistemas de armazenamento, a companhia TenneT, operadora de transmissão do sistema, em países como Holanda e Alemanha, desenvolveu em 2018, um software que permite aos usuários identificarem potenciais modelos de negócio para armazenamento de energia. Dentre os modelos de mercado para negócios, podem ser destacados: mercado day ahead e mercado de balanço energético (Sani et al., 2020).
Austrália	A estratégia de desenvolvimento para a indústria renovável (REIDS) é uma iniciativa para expandir o crescimento da economia verde, unindo o armazenamento de energia à geração de energia renovável (Sani et al., 2020). Treze reformas de mercado foram sugeridas como estímulo ao armazenamento de energia (Sani et al., 2020). As reformas foram categorizadas nas seguintes diretrizes: regular o campo de atuação; remover barreiras regulatórias para sistemas de armazenamento de energia atrás do medidor (armazenamento distribuído); compensar e reconhecer o valor do armazenamento de energia atrás do medidor; proteger os consumidores e garantir padrões de estabilidade (Sani et al., 2020).
China	A partir de 2005, o governo federal chinês promoveu várias políticas para a promoção de indústrias de sistemas de armazenamento de energia. As políticas tinham como alvo aspectos que pudessem garantir o rápido desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia. Entre estes aspectos podem ser citados: desenvolvimento de mercado; operação de gerenciamento da conexão com a rede elétrica; desenvolvimento de padrão sustentável e suporte financeiro (Yang and Zhao, 2018). Em 2015, a China iniciou uma nova reforma de mercado com o intuito de formar um mecanismo de preço orientado para eletricidade e incorporar o armazenamento de energia ao seu plano nacional energético (Zhang et al., 2021).
Estados Unidos	Em 2018 foi aprovado o despacho nº 841 e seu principal propósito foi remover barreiras para a entrada de tecnologias de armazenamento de energia pelos operadores independentes do sistema e pelas organizações regionais de transmissão de energia. A comissão reguladora de comércio federal (FERC) ao promover este despacho, acreditou que o mesmo possibilitaria criar uma competição saudável no setor energético (Federal Energy Commission, 2018). No início de 2020, o ato americano de inovação energética (AEIA) autorizou o investimento de 1,4 bilhões de dólares para pesquisa e desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia a serem realizados pelo departamento de energia dos Estados Unidos (DOE). Este ato deve durar pelo menos cinco anos (Sani et al., 2020). A Comissão das Utilitárias Públicas da Califórnia (CPUC) adota programas de incentivo ao armazenamento de energia, dentre os quais, podem ser citados os programas de corte permanente de carga e de incentivo à auto-suficiência na geração. Ademais, há o contínuo financiamento por parte da Comissão de Energia da Califórnia (CEC), destinado aos projetos de pesquisa avançada para sistemas de armazenamento de energia, buscando caracterizá-los como recursos viáveis para a rede elétrica. Este tipo de subsídio é regulamentado por meio do programa de investimento em carga elétrica (EPIC) (California ISO, 2019).
França	A França possui uma meta para alcance de 40% de energia renovável na matriz energética até 2030, com o armazenamento de energia sendo um dos meios para atingir tal propósito (Sani et al., 2020). O plano de hidrogênio foi iniciado em 2018 com fundos de 100 milhões de euros para um período de cinco anos, com a intenção de desenvolver a tecnologia de armazenamento de energia e o seu potencial. A injeção direta na rede elétrica ao invés do armazenamento é favorecida por tarifas <i>feed in</i> . Há três artigos do código de energia francês que tratam dos sistemas de armazenamento de energia (Sani et al., 2020). No artigo L142–9-I, o registro para empreendimentos de armazenamento de

	energia e geração de eletricidade foi colocado no registro nacional. O artigo L315–1 cria a determinação estatal de que uma planta ou unidade de autoconsumo pode requerer um sistema de armazenamento de energia. O terceiro artigo L121–7 determina que a contribuição da eletricidade de serviços públicos (CSPE) irá compensar qualquer custo de empreendimentos de armazenamento gerenciados por operadores da rede em áreas não conectadas (isoladas)- (Sani et al., 2020). Empreendimentos de armazenamento são considerados como consumidores quando estão em carregamento e como produtores, quando descarregam na rede elétrica (Sani et al., 2020).
Itália	Os sistemas de armazenamento de energia na Itália estão orientados para os mercados de energia e de serviços ancilares. O governo italiano, em 2018, submeteu o desenho de seu Plano Nacional Integrado de Clima e Energia (NECP) para a Comissão Europeia, com o planejamento das intenções do país, relativas à contribuição global de descarbonização através de energia renovável (California ISO, 2019). Com o intuito de atuar em um futuro setor elétrico dominado por fontes renováveis intermitentes, a companhia Terna identificou uma série de fatores para melhorar a flexibilidade do sistema, Entre as iniciativas sugeridas, encontram-se a resposta à demanda e o armazenamento de energia distribuída (California ISO, 2019).

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas no quadro acima

Com relação à regulação do armazenamento de energia no mundo, pela análise do quadro acima, foi possível constatar algum tipo de subsídio governamental ou desconto na tarifa para o incentivo desses sistemas nas matrizes energéticas dos países.

Contudo em mercados liberalizados, não há essa tendência de adoção de políticas de subsídios. Considerando o processo de transição do mercado de energia elétrica do ambiente de contratação regulada para o livre no Brasil, uma política de subsídio para o armazenamento de energia não parece a opção mais viável. Sendo assim, alternativas regulatórias poderiam ser adotadas, como a implementação dos mercados de capacidade e de flexibilidade, dentre outras. As iniciativas regulatórias para o armazenamento de energia no Brasil serão abordadas no tópico seguinte.

3.1.2. Regulação no Brasil

No mercado de energia elétrica brasileiro, a inserção de sistemas de armazenamento de energia tende a enfrentar algumas barreiras políticas e regulatórias, tais como (NT- 094/2020- ANEEL):

1. Competição e defesa da concorrência: Os sistemas de armazenamento devem participar de um cenário de mercado com competição em benefício dos consumidores. A instalação desses sistemas quando provida por agentes reguladores deve ser limitada e acompanhada, a fim de não haver abuso de posição dominante;
2. Multiplicidade de receitas: Os recursos de armazenamento devem competir com os recursos tradicionais de oferta e demanda nos mercados de capacidade e de serviços ancilares, seja no segmento de transmissão ou de distribuição. Poderiam ainda ser remunerados por outros serviços, como a redução de emissão de carbono;
3. Adaptação do mercado atacadista de energia: Os sistemas de armazenamento devem estar atrelados à ampliação da granularidade temporal e espacial dos preços e à revisão dos limites de preços do mercado;
4. Adaptação do papel das distribuidoras: O gestor dos ativos de distribuição deve ser paulatinamente substituído por operadores de um sistema de distribuição mais complexo, com recursos de geração e armazenamento

- distribuídos. Neste contexto, a distribuidora de energia deixa de atuar como entidade central responsável pelo suprimento de energia para fazer a gestão da rede, considerando a abertura para o mercado livre de energia;
5. Regulação econômica: Utilização de medidores inteligentes e adoção de modelos tarifários com para promover uma maior resposta da demanda;
 6. Agregadores: Considerando que parte da capacidade instalada de armazenamento será provida por consumidores de pequeno porte, é preciso criar condições para que esses consumidores obtenham receitas de serviços prestados às redes de distribuição e transmissão;
 7. Acesso: Necessidade de estabelecer como os sistemas de armazenamento acessam os sistemas de distribuição e transmissão, quais devem ser os contratos realizados, os direitos e responsabilidades dos mesmos e suas tarifas aplicáveis, as quais, devem prover previsibilidade e estabilidade para fins de investimentos a longo prazo. Além disso, a permissão de acesso não deve ser discriminatória;

Segundo a Nota Técnica nº 094/2020 da ANEEL, a regulação do armazenamento de energia no Brasil depende de decisões políticas, do planejamento do sistema, dos operadores do sistema e dos agentes reguladores. Entretanto, algumas discussões vêm ocorrendo no setor elétrico brasileiro e envolvem as seguintes iniciativas regulatórias:

✓ Preço da liquidação de diferenças (PLD) horário: Desde janeiro de 2021, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) passou a adotar os PLDs horários nos processos de contabilização e liquidação. Tais preços trabalham com o cenário de ampliação da granularidade temporal (substituem os três patamares de carga anteriores) para a programação diária da operação. Aumentam ainda os sinais de preços, um componente importante para viabilizar a inserção de sistemas de armazenamento;

✓ Preço teto do mercado atacadista: Com a Resolução Normativa nº 858/2019 da ANEEL, foram definidos os novos limites máximo e mínimo do PLD. Na hipótese da média diária dos PLDs horários serem superiores ao limite estrutural, os preços tendem a serem reduzidos até que a média convirja para tal valor. Essa nova metodologia permite que os preços atinjam valores mais elevados, com sinalização de preços mais efetiva para reação da demanda e para a arbitragem de preços, contribuindo para a inserção de recursos de armazenamento;

✓ Usinas híbridas ou associadas: Conforme o Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 002/ 2020 da ANEEL, as diferentes fontes de geração associadas permitirão a existência de recursos complementares para garantia física ou demanda, tais como os sistemas de armazenamento de energia;

✓ Resposta da demanda: A Resolução Normativa nº 1030/2022 da ANEEL define o programa estrutural de resposta da demanda, do qual, poderão participar consumidores livres, parcialmente livres e agregadores. Os participantes habilitados devem, a cada semana, entregar ao ONS suas ofertas de preços e quantidades para a semana operativa seguinte, e diariamente, no dia anterior ao despacho, com as ofertas consistindo em produtos horários de 4 até 17h, com volume mínimo de 5 MW para cada hora de duração. Dessa forma, sistemas de armazenamento de energia como baterias químicas e usinas hidrelétricas poderiam participar do mercado de resposta da demanda, considerando seus horizontes temporais de armazenamento e suas capacidades (MW);

Outros procedimentos regulatórios vêm sendo adotados no setor elétrico brasileiro, tal como o estudo desenvolvido pela EPE em sua Nota Técnica nº 013/2021 que define os desafios de mercado para inserção de sistemas de armazenamento de energia, em especial, usinas hidrelétricas reversíveis, em mercados de energia elétrica. Dentre estes, podem ser listados:

✓ Atratividade financeira: Capacidade de avaliar e criar modelos de negócio para melhores previsibilidade de receita e alocação de riscos;

✓ Outorga: Adaptação de normativos para concessão ou autorização para empreendimentos de armazenamento de energia;

✓ Licenciamento ambiental: Concessão de licença ambiental para operação do armazenamento de energia baseada em estudos de impacto ambiental;

✓ Necessidade de especialização: Tanto na esfera pública quanto na privada, deve haver capacitação para os profissionais envolvidos com o armazenamento de energia;

✓ Valoração e benefícios ao Sistema Interligado Nacional: Devem ser considerados os potenciais custos e benefícios da inserção do armazenamento de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN);

✓ Disponibilidade de projetos: Estudos de inventário devem ser efetuados, considerando critérios técnicos, econômicos e socioambientais a fim de determinar características principais e hierarquizar aproveitamentos;

Outra iniciativa regulatória tomada no Brasil pela ANEEL foi a tomada de subsídios nº 011/2020 que visou obter subsídios para a elaboração de propostas de adequações regulatórias necessárias à inserção de sistemas de armazenamento no setor elétrico brasileiro. Este processo recebeu inúmeras contribuições de agentes do setor elétrico brasileiro (empresas públicas e privadas; universidades e centros de pesquisa). Entretanto, ainda não foi produzida uma técnica que refletisse tais contribuições.

A definição de um marco regulatório é de extrema importância para a inserção dos sistemas do armazenamento de energia no Brasil, contudo, nesse cenário, devem ser considerados os principais mecanismos de mercado que possibilitem tal processo. O próximo tópico apresenta esses mecanismos e detalha os cinco mecanismos escolhidos para utilização em uma análise multicritério com a finalidade de promover a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.

3.2. Principais mecanismos de mercado ou políticas que viabilizem o armazenamento de energia

O armazenamento de energia sob a ótica do processo regulatório, depende de políticas e/ou mecanismos de mercado para a sua viabilidade (IHA, 2018) e (EPE, 2021) apresentam alguns modelos de negócio que tornam os sistemas de armazenamento de energia, tecnologias viáveis dentro da matriz energética de um país. Os modelos definidos foram: custo de serviço; participação direta em mercados competitivos; receita de contrato a longo prazo; armazenamento de energia “atrás do medidor”; arbitragem de energia e serviços ancilares.

O quadro 3 apresenta os principais mecanismos de mercado para armazenamento de energia, seus respectivos conceitos e referências na literatura.

Quadro 3 - Principais mecanismos de mercado para armazenamento de energia

Mecanismos de mercado	Definição	Trabalhos da literatura
Custo de serviço	Custo de investimento é recuperado por uma tarifa fixada pelo regulador. Possui receita previsível, sendo utilizado em mercados monopolistas	EPE (2021); IHA (2018); Barbour et al. (2016)
Participação direta em mercados competitivos	As receitas podem ser obtidas de diferentes formas conforme cada tipo de mercado existente. As mesmas costumam ser combinadas para fins de cálculo da receita total. Os sistemas de armazenamento de energia podem competir com outros empreendimentos participantes do mercado	EPE (2021); CTG (2019); IHA (2018); Barbour et al. (2016)
Receita de contrato a longo prazo	Caracterizado por contratos de longo prazo (plano PPA) ou por arranjos contratuais similares com credores de valor (revendedores de energia, clientes industriais ou agentes governamentais). O modelo de operação dos sistemas de armazenamento de energia depende do tipo de acordo firmado	CTG (2019); Barbour et al. (2016)
Armazenamento de energia atrás do medidor	O sistema de armazenamento é colocado junto a um gerador, consumidor ou usuário do sistema elétrico, possibilitando a modulação do perfil de geração ou consumo de acordo com os preços do mercado	EPE (2021); IHA (2018); Barbour et al. (2016)
Arbitragem de energia	A arbitragem diária dos preços de energia envolve o uso da eletricidade para períodos de baixa demanda de energia, com utilização de preços do horário fora de ponta e o uso da geração quando há alta demanda de energia, com operação no mercado spot, refletida pelos altos preços no horário de ponta	EPE (2021); Martins e Miles. (2021); IHA (2018); Barbour et al. (2016)
Serviços ancilares	Serviços da rede elétrica para entrega de confiabilidade no planejamento e na operação do sistema elétrico de potência	ENTSO-E (2020); CTG (2019); Barbour et al. (2016)

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas

Conforme ressaltado por EPE. (2021) e de acordo com as observações constatadas na literatura internacional, os serviços ancilares apresentam uma maior tendência para utilização como mecanismos associados ao armazenamento de energia. O processo de remuneração desses serviços, bem como suas principais definições e relações com as configurações eletromecânicas das usinas hidrelétricas reversíveis serão abordados na seção 3.3.

Em relação às políticas adotadas ao redor do mundo para inserção de sistemas de armazenamento de energia, foram estas as encontradas na literatura: mercado de capacidade; mercado de flexibilidade; leilão de capacidade; leilão multiatributos; política de incentivos; alocação de energia renovável; valoração pelo lado do consumidor; valoração pelo lado da rede elétrica. Tais políticas serão conceituadas 51 a seguir, com as principais referências da literatura encontradas para a definição das mesmas (ver Quadro 4).

Quadro 4 - Principais políticas para o armazenamento de energia

Políticas	Definição	Principais trabalhos da literatura
Mercado de capacidade	Mercado que entrega o atributo de potência (capacidade) de forma otimizada para fins de segurança do suprimento.	Martins e Miles. (2021); Mertens et al. (2021); Bublitz et al. (2019); European Commission. (2019); Cramton et al. (2013)
Mercado de flexibilidade	Os mercados de flexibilidade são definidos como uma ferramenta que provoca melhor utilização das redes de distribuição locais por meio de plataformas flexíveis como a plataforma "peer to peer" e os serviços de rede	Valarezo et al. (2021); Schittekatte and Meeus. (2020); OFGEM. (2019)
Leilão de capacidade	Leilões de capacidade são mecanismos de mercado em que os volumes requeridos de capacidade podem ser adquiridos de forma centralizada ou descentralizada.	Moraiz and Scott. (2022); Kaszynski et al. (2021);
Leilão multiatributos	Leilões onde podem ser vendidos como bens e/ou serviços, múltiplos atributos tais como impactos socioambientais, preço, segurança operacional, energia, confiabilidade, dentre outros	Leite e Calili. (2021); Liu et al. (2019); Shi et al. (2017)
Política de incentivos	Incentivos financeiros dados para estimular o armazenamento de energia, tais como descontos tarifários ou subsídios	Governo Federal. (2022); Sani et al. (2020); California ISO. (2019);
Alocação de energia renovável	Caracterização do armazenamento de energia como um agente independente de mercado a ser remunerado por ajustes e redução das flutuações de carga e reserva de capacidade em associação com sistemas de energia renovável	CNESA. (2022)
Valoração pelo lado do consumidor	Utilização do armazenamento de energia para valoração de preços refletidos pela resposta da demanda	CNESA. (2022)
Valoração pelo lado da rede elétrica	Definição do sistema de armazenamento de energia para composição de preços em mecanismos orientados ou não pelo mercado	CNESA. (2022)

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas

Considerando o contexto atual do setor elétrico brasileiro e com base na experiência internacional, foram determinadas que as cinco primeiras políticas do quadro acima poderiam permitir a inserção das usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. As mesmas serão detalhadas nos tópicos seguintes.

3.2.1. Mercado de capacidade

A remuneração do produto “capacidade” é essencial para a adequada valoração econômica de sistemas de armazenamento de energia. Bublitz et al. (2019) realiza um estudo extensivo sobre vários mecanismos de remuneração de

capacidade e debate a necessidade de adequá-los a vários diferentes estilos de mercado. Conforme debatido por Chen et al. (2020), a preocupação da resiliência pode ser incorporada aos designs do mercado de capacidade, oferecendo incentivos financeiros no cenário operativo.

Os mercados de capacidade podem ser implementados para serem compatíveis com a melhoria da eficiência dos mercados atacadista à vista, a evolução contínua dos mercados varejistas, bem como, para restaurar os incentivos ao investimento eficiente na capacidade de geração e na resposta à demanda consistente com os critérios de confiabilidade operacional aplicados pelos operadores do sistema (Joskow and Tirole, 2007).

Embora um agente participante do mercado de capacidade não esteja restrito a acessar outros fluxos de receita, como a prestação de serviços auxiliares ou comercialização nos mercados de atacado, por exemplo, eles estão sujeitos a penalidades, o que implica em redução de receitas se a geração adquirida estiver indisponível durante um evento de estresse do sistema (Martin e Miles, 2021).

Os pagamentos de capacidade em muitos mercados são determinados por meio de leilões competitivos, geralmente em horizontes de 1 a 4 anos (Martin e Miles, 2021). Os mercados de capacidade devem ser tecnologicamente neutros, o que significa que estes podem receber em seus leilões, tecnologias de geração, armazenamento de energia, resposta à demanda e agregadores de energia (Martin e Miles, 2021)

Um mecanismo de remuneração por capacidade é definido como uma medida tomada por um agente público ou privado estatal de forma a auxiliar o investimento em segurança do suprimento e na demanda por capacidade do sistema elétrico (Hawker et al., 2017).

A implementação destes mecanismos é dada por receitas dadas pela oferta de capacidade que se somam as receitas provenientes da venda de eletricidade no mercado (Hawker et al., 2017). Os mecanismos variam de uma forma tal que os preços são determinados de acordo com a quantidade de capacidade que é fornecida (Hach et al., 2016; Bublitz et al., 2019).

Ainda que não exista uma definição padrão geralmente aceita, a Comissão Europeia forneceu uma classificação sobre mecanismos de capacidade, a qual, aborda a maioria das peculiaridades dos diferentes mecanismos e pode, portanto,

ser considerada orientativa. Há uma diferenciação entre os mecanismos direcionados e os de mercado.

Os mecanismos baseados no mercado visam todo o mercado, abrangendo todos os seus participantes, enquanto os mecanismos direcionados fazem referência à nova capacidade adquirida ou ao montante adicional de capacidade esperado para aquisição em relação àquele já disponibilizado pelo mercado (Bublitz et al., 2019).

Existe uma outra distinção em função do produto entregue, a partir da quantidade ou do preço da capacidade entregue (Pugl-Pichler et al., 2020). Em relação à quantidade, a capacidade necessária é estabelecida inicialmente e, com isso, o preço do serviço necessário é determinado. Já para os preços, o preço do serviço é determinado previamente ou a partir de outros mecanismos de mercado. Os investimentos subsequentes devem assegurar um montante de capacidade para fins de segurança, disponível para o sistema elétrico (Pugl-Pichler et al., 2020).

O quadro 5 apresenta um resumo geral sobre os mecanismos de remuneração por capacidade e suas principais características.

Quadro 5 - Características típicas para mecanismos de remuneração por capacidade

Mecanismo	Categoria	Tipos de aquisição e de mercado	Participação em outros mercados	Produto	Principais parâmetros regulatórios
Tendência de nova capacidade	Direcionados e baseados em volume	Centralizada/leilão	Sim	Capacidade firme	Volume de capacidade
Reserva estratégica	Direcionados e baseados em volume	Centralizada/leilão	Não	Capacidade para reserva	Volume de capacidade, regra de ativação, evento de gatilho
Pagamento da capacidade almejada	Direcionados e baseados em preço	Centralizada/leilão	Sim	Capacidade firme	Preço de capacidade, critério de elegibilidade
Mercado de capacidade centralizado	Baseados em volume e no mercado	Centralizada/leilão	Sim	<i>Call option</i> (venda obrigatória de quotas em um cenário futuro)	Volume de capacidade, preço de exercício
Obrigação de capacidade descentralizada	Baseados em volume e no mercado	Descentralizada/bilateral	Sim	Certificado de confiabilidade	Margem de segurança, penalidades
Pagamento de capacidade com base no mercado	Baseados em preço e no mercado	Centralizada/leilão	Sim	Capacidade firme	Preço de capacidade

Fonte: Adaptado de Bublitz et al. (2019), p.5

A definição do mercado de capacidade seria adequada para o setor elétrico brasileiro, sobretudo, considerando a abertura para o mercado livre. Poderia ser permitida a contratação do produto capacidade a partir de mecanismos baseados em mercado (obrigação de capacidade descentralizada e pagamentos de capacidade com base em preços de mercado).

Os mecanismos de remuneração por capacidade estão dentre os principais parâmetros regulatórios estudados com o intuito de fomentar políticas para o armazenamento de energia, contudo, outras políticas também vêm sendo objeto de estudo, como no caso do mercado de flexibilidade.

3.2.2. Mercado de flexibilidade

Os mercados de flexibilidade podem ser usados por meio da plataforma "peer to peer" em mercados locais ou com mercados controlados por operadores de transmissão e/ou distribuição (Schittekatte and Meeus, 2020). Algumas características destes mercados são pré-qualificação, ajustes e processos transparentes. A estrutura de organização destes mercados é dividida em cinco fases: preparação; previsão; operação do mercado; monitoramento e ativação; medição e ajustes (Valarezo et al., 2021).

Os ativos necessários para provisão da flexibilidade ao setor elétrico são conectados aos sistemas de transmissão e distribuição. A principal maneira de possibilitar tal flexibilidade é pela criação de mercados que permitam a contratação de serviços de flexibilidade por meio de produtos que tragam valor monetário (OFGEM, 2019).

Plataformas de flexibilidade são definidas como mecanismos que retornam sinais para investimentos, incentivos para a viabilidade de ativos flexíveis na rede elétrica e espaços para compradores de produtos flexíveis oferecerem suas demandas e contratarem tais produtos (OFGEM, 2019). Essas plataformas funcionam como plataforma de TI (tecnologia da informação) onde a coordenação, o despacho, o comércio e o suporte de serviços de flexibilidade para o mercado são os principais parâmetros de funcionamento da mesma (OFGEM, 2019).

Muitas das plataformas de flexibilidade são direcionadas para serviços de distribuição de energia que precisam ser coordenados com outros mercados como

os de balanço e de serviços ancilares. Segundo OFGEM. (2019), existem dois principais tipos de plataformas de flexibilidade:

✓ Plataforma “peer to peer”: A plataforma "peer to peer" facilita o comércio de energia entre os que negociam de forma particular ou “prossumidores” em um mercado local.

✓ Serviços de rede: Os serviços da rede frequentemente envolvem a presença de operadores de transmissão e/ou distribuição e compreendem uma ampla gama de aplicações que estão associadas à empreendimentos de pequeno ou grande porte.

A vantagem da primeira plataforma mencionada é o fato de permitir uma interação entre negociantes individuais, prescindindo de um controle centralizado, onde toda a rede pode ser vista como um único ativo a interagir com outras plataformas, entregando serviços da rede elétrica (OFGEM, 2019).

Segundo (OFGEM, 2019), as funções principais são:

✓ Coordenação: Facilitação do fluxo de dados; harmonização de padrões e princípios; alinhamento com plataformas e mercados externos; conflitos evitados.

✓ Aquisição de flexibilidade: atratividade de provedores e compradores de flexibilidade ao mercado; comunicação de requerimentos e de disponibilidade; combinação ótima entre os serviços de provisão e aquisição de flexibilidade.

✓ Despacho e controle: Envio de sinais de preço aos ativos de despacho dentro das redes de transmissão e distribuição; notificação do ativo de despacho; verificação do ativo de despacho.

✓ Configuração da plataforma de transações: Verificação das restrições para as transações; configuração das transações.

✓ Plataformas de serviços de mercado: Checagem de crédito; pré-qualificação de ativos.

✓ Análise e tempo de resposta dos serviços de flexibilidade; pontuação e revisão das contrapartes; identificação das falhas de mercado.

Os conceitos do mercado de flexibilidade são recentes e importantes para a modernização do setor elétrico brasileiro. Contudo, as discussões envolvendo tais conceitos ainda precisam de aprofundamento. Nessa dissertação apresentamos

apenas os conceitos principais desse mercado, que são tomados como base para a análise multicritério realizada.

3.2.3. Leilão de capacidade

Com a identificação de riscos na segurança do suprimento surge a necessidade de realizar leilões para aquisição de capacidade, sobretudo com a preocupação de que em um sistema elétrico com esse cenário de risco, os preços existentes do mercado de eletricidade sejam insuficientes para remunerar a operação dos geradores, podendo resultar no chamado problema do “dinheiro perdido” (Moraiz and Scott., 2022).

Segundo Newbery (2016), no desenho do mercado de eletricidade, o problema da perda de dinheiro refere-se à ideia de que os preços de energia podem não capturar o valor real do investimento necessário para o alcance das expectativas de confiabilidade, por parte dos consumidores.

A aquisição do volume de capacidade com remuneração (\$/kW) é uma receita adicional aos geradores que vendem potência no mercado de eletricidade.

Os proprietários dos ativos de geração devem passar por um processo de certificação a fim de estarem habilitados para a entrega de capacidade em um ano determinado (Kaszynski et al., 2021). Segundo o mesmo autor, de forma resumida, as etapas de um leilão de capacidade são:

1. Certificação geral;
2. Certificação para o leilão principal;
3. Leilão principal;
4. Certificação para leilões adicionais;
5. Leilões adicionais;

Percebe-se que este tipo de leilão segue a mesma lógica adotada em um leilão de energia.

O horizonte temporal dos leilões varia conforme o tipo de mercado de capacidade de cada país. Na Polônia, diferentemente da Inglaterra, os leilões ocorrem para entrega de capacidade em cinco anos (Kaszynski et al., 2021).

No Brasil, de acordo com a portaria normativa nº 46/ 2022 do Ministério de Minas e Energia, o leilão inicialmente previsto para 30 de setembro de 2022 será

da forma de contratação de reserva de capacidade na forma de energia proveniente de empreendimentos de geração termelétrica a partir de gás natural. Entretanto, tal energia, apesar da reserva de capacidade ser definida MW médio, o que segundo EPE e MME. (2021) caracterizaria um lastro de produção, não haverá lastro para a revenda de energia.

O preço de lance será dado em (R\$/MWh) e será baseado no cálculo do índice custo-benefício (ICB), segundo a equação 1.

$$ICB = \frac{RF}{QL \cdot L.8760} + \frac{COP+CEC}{GF.8760} \quad 1$$

Onde ICB é o índice custo-benefício expresso em R\$/MWh; QL é a quantidade de lotes ofertados; L é o valor do lote em MW médio; RF é a receita fixa, dada em R\$/ ano; COP é o valor esperado do custo de operação em R\$/ ano; CEC é o valor esperado do custo econômico de curto prazo em R\$/ ano; GF é a garantia física em MW médio.

Tal metodologia para determinação do preço do lance possui a finalidade de auxiliar na contratação de capacidade de reserva, contudo, com as correntes discussões sobre a abertura do mercado de energia elétrica, dispostas na nota técnica nº 10/2022 da ANEEL, a adoção de um modelo de leilão de capacidade se torna mais plausível, considerando a futura implementação do mercado de capacidade no setor elétrico brasileiro, sendo assim, tal lance seria dado futuramente, com fins de aquisição de capacidade para uso efetivo e não apenas, para reserva.

Além do leilão de capacidade, outro tipo de leilão também agrega a competição entre diversas fontes e caracteriza os atributos fornecidos por estas para fins de oferta. Os leilões multiatributos serão apresentados na sequência.

3.2.4. Leilões multiatributos

Uma das maneiras de aumentar a competição entre diversas fontes participantes de leilões de energia é pelo cálculo do preço da energia a partir da definição de atributos que podem impactar na geração, dentre os quais estão: impactos socioambientais, segurança operacional, lastro de energia, confiabilidade, dentre outros (Liu et al., 2019; PSR e LACTEC, 2014)

A metodologia é de suma importância para a correta valoração de atributos no mercado de energia. Alguns trabalhos propõem metodologias para identificação e seleção de atributos. Ghose et al. (2019) propõem um gerenciamento proporcional pela integração complexa do método fuzzy (*Fuzzy Complex Proportional Assessment* - COPRAS), apoiado por uma análise multicritério híbrida a ser aplicada a fim de avaliar atributos de seis fontes renováveis de energia no estado de West Bengal, na Índia. O intuito do trabalho desenvolvido por Ghose et al. (2019) é organizar os sistemas energéticos em uma hierarquia que fosse viável para os governos e investidores apoiarem projetos energéticos no país.

Para o desenvolvimento de tal estudo, oito atributos foram selecionados por Ghose et al. (2019), os quais foram divididos nas categorias técnica, econômica, ambiental e social. Os atributos selecionados para aplicação da metodologia COPRAS foram: eficiência, quantidade de energia produzida e confiabilidade (atributos técnicos); custo de construção da planta geradora (milhões / MW), custo da geração (moeda local / MWh) que são atributos econômicos, emissões de gases efeito-estufa e área do terreno utilizada foram definidos como atributos ambientais, para os atributos sociais, foram considerados os benefícios gerados para o setor de empregos.

Quanto aos resultados decorrentes da aplicação de tal metodologia por Ghose et al. (2019), estes mostraram que as fontes renováveis com maior prioridade para utilização no estado de West Bengal eram as fontes solar, hídrica e eólica, seguidas pelas fontes geotérmica, hídrica e biomassa.

Em relação aos estudos sobre leilões multiatributos no Brasil, pode-se destacar um estudo desenvolvido por Leite e Calili. (2021), baseado em referências como Celestino (2017) e PSR e LACTEC (2014).

No estudo de Leite e Calili (2021), é definida uma metodologia para incorporar as externalidades geradas pelos diferentes projetos de geração nos processos de leilões de energia usando uma abordagem multiatributos nos processos de leilões de energia, aplicando o método *Analytic Hierarchy Process (AHP)* ao caso brasileiro.

Segundo estes autores, existem duas maneiras de incorporar os atributos considerados em leilões de energia. A primeira maneira é através da segregação dos leilões por atributos. A outra forma de determinação dos atributos estaria atrelada à incorporação do custo dos atributos ao preço ofertado no leilão. Essa incorporação

poderia ser realizada por meio do acréscimo de uma parcela adicional ao índice custo-benefício (ICB) calculado para cada empresa antes do leilão, ou seja, ao ICB original, utilizado nos leilões no Brasil, seria acrescentado o custo de cada um dos “n” atributos participantes do leilão, dado em R\$/MWh (Leite e Calili, 2021).

Foram selecionados por Leite e Calili (2021) os seguintes atributos identificados na literatura: (i) Atendimento à Ponta do Sistema; (ii) Despachabilidade; (iii) Custos de Transmissão; (iv) Localização; (v) Tempo de implementação; (vi) Impacto ambiental. Alguns destes atributos foram considerados por PSR e LACTEC (2014). Além disso, não foram considerados nessa etapa os investimentos requeridos do projeto, o custo de operação e manutenção das usinas e o potencial da fonte, uma vez que esses itens já são contemplados diretamente nos itens que compõem o ICB.

Em relação às tecnologias, Leite e Calili. (2021) selecionaram as seguintes: UHE – Hidroelétricas de Grande Porte; PCH - Pequenas Centrais Hidroelétricas - PCH; UFV - Usinas Fotovoltaicas de médio/grande porte; EOL - Usinas Eólicas; BIO - Usinas Termoelétricas movidas a Biomassa; TOC - Usinas Termoelétricas a óleo combustível; TGA - Usinas Termoelétricas a gás em ciclo aberto; TGC - Usinas Termoelétricas a gás natural em ciclo combinado; DTE - Demais usinas Termoelétricas.

Em seu trabalho, Leite e Calili (2021) verificaram que a energia solar se destacou nos critérios associados a impacto ambiental, localização, custos de transmissão e tempo de implementação, obtendo as melhores pontuações nesses critérios frente as demais. Embora a matriz de pesos dos critérios alterasse a sua posição relativa no ranking das fontes, essa fonte continua com uma pontuação elevada em ambos os cenários, embora não seja despachável. As fontes térmicas se destacaram nos critérios de atendimento a ponta e despachabilidade, particularmente, as térmicas a gás natural em ciclo aberto, pela sua flexibilidade.

Todavia, conforme ressaltado nos estudos de Leite e Calili. (2021), Celestino. (2017) e PSR e LACTEC (2014), a quantificação dos atributos a serem ofertados em leilões é um processo complexo e sem um consenso metodológico, portanto, em um cenário futuro de abertura de mercado, haveria a necessidade de que existisse uma metodologia padronizada para valorar atributos em leilões a fim de tornar essa política viável para inserção de armazenamento de energia.

Uma outra política adotada por alguns países do mundo como Austrália, China e Estados Unidos é a chamada política de incentivos que será abordada a seguir.

3.2.5. Política de incentivos

As políticas de incentivo adotadas para sistemas de armazenamento de energia no mundo já foram abordadas no tópico 3.1.1. Portanto, neste subtópico, haverá a apresentação de políticas de incentivo para o armazenamento de energia, adotadas no Brasil.

A lei nº 9.427/1996 estabeleceu que os empreendimentos de alta potência e baseados em geração de fontes incentivadas (energia solar, eólica e biomassa) receberiam uma redução mínima de 50% na Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD). Todavia, a Lei nº 14.120/2021 determinou o término destes descontos dados pela lei de 1996. O novo marco da geração distribuída definido pela lei nº 14.300/2022 define um limite de potência instalada de até 5 MW para novos empreendimentos com geração distribuída e, neste marco legal, há subsídio sendo dado à geração distribuída, inclusive com armazenamento, no caso, baterias.

Os sistemas de armazenamento de energia estão definidos por essa lei para utilização com fontes despacháveis, no caso das fontes de geração fotovoltaica, limitadas a 3 MW (três megawatts) de potência instalada para uso com baterias com capacidade de modulação de pelo menos, 20% (vinte por cento) da capacidade de geração mensal da central geradora, sendo o despacho realizado por controle central ou remoto. Tais sistemas também são definidos como microredes, ou seja, um sistema capaz de integrar vários recursos de geração distribuída.

Contudo, considerando a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, as potências utilizadas para instalação teriam de ser maiores do que o limite de 5 MW definido pela lei nº 14.300/2022, haja vista que a experiência internacional mostra que essas usinas operam com altas potências.

Uma sugestão de política, diferentemente do que foi definido pela lei nº 14.120/ 2021 é que o desconto na TUSD seja de 100% para os cinco primeiros anos de operação de um empreendimento com armazenamento de energia, sendo reduzido para 80% e 50% até ser extinto após quinze anos de operação. Entretanto,

considerando a transição para o mercado livre, deve haver maiores discussões sobre a real necessidade de uma política de incentivos.

O mecanismo de serviços ancilares aparece como uma alternativa viável para utilização com sistemas de armazenamento de energia, contudo, há a necessidade de uma regulamentação apropriada para a remuneração desses serviços. O tópico seguinte apresenta uma abordagem sobre serviços ancilares.

3.3. Serviços Ancilares

A definição desses serviços já foi apresentada no quadro 3 dessa dissertação. Enquanto alguns mercados de eletricidade no mundo oferecem oportunidades para os serviços ancilares, melhorando a confiabilidade do sistema e lidando com a variabilidade da geração renovável, o real valor monetário desses serviços ainda não é corretamente compreendido, com exceção de alguns países como Estados Unidos e Inglaterra. (IHA, 2018).

As configurações eletromecânicas das usinas hidrelétricas reversíveis podem oferecer uma gama de serviços ancilares e outros serviços na rede elétrica, com base na experiência observada na literatura internacional, foi possível elaborar um quadro que trata destas aplicações, de forma associativa, conforme o quadro 6.

Quadro 6 - Relação entre as possíveis configurações eletromecânicas de usinas reversíveis e os possíveis serviços entregues na rede elétrica brasileira

Possíveis serviços na rede elétrica e suas causas e efeitos	Sistema binário com máquina síncrona de velocidade fixa		Sistema binário com máquina de velocidade ajustável e circuito DFIM		Sistema binário com máquina de velocidade ajustável e circuito CFSM ("back to back")		Sistema ternário convencional com velocidade fixa		Sistema ternário com <i>by-pass</i> e máquinas síncronas de velocidade fixa	
Tipo de configuração usual para os dois modos de operação	Francis (mais usual)		Francis (mais usual)		Francis (mais usual)		Francis/ Pelton (mais usuais)		Francis/ Pelton (mais usuais)	
Capacidade usual da unidade (MW)	25 - >400		31,5 - >400		31,5 - >400		25 - >400		25 - >400	
Serviços auxiliares (Definidos conforme a nota técnica nº 132/ 2019 da ANEEL)	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento
Controle primário de frequência	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Controle secundário de frequência	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Suporte de reativos	Médio	Baixo	Médio-Alto	Médio	Médio-Alto	Médio-Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Despacho complementar para manutenção da reserva de potência operativa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Auto reestabelecimento parcial (<i>black start</i>)	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não
Auto reestabelecimento integral (<i>black start</i>)	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não
Sistemas especiais de proteção (SEP)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<u>Outros possíveis serviços na rede elétrica para um horizonte futuro que considere a evolução do sistema elétrico brasileiro (Definidos a partir da revisão da literatura baseada na experiência internacional)</u>										
Compensador síncrono	Médio	Baixo	Médio-Alto	Médio	Médio-Alto	Médio-Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Controle da taxa de potência da saída (MW/min ou MW/s)	Sim	Não	Sim	Sim (rápido)	Sim	Sim (rápido)	Sim	Não	Sim	Sim
Inércia Sintética	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Nivelamento de carga	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Descongestionamento da transmissão	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Capacidade de geração	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Resposta rápida de frequência	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não

Fonte: Elaboração própria, a partir de Argonne National Laboratory, ago. 2014, p.40-61; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - Nota técnica nº 132/2019, p.1-20

Conforme observado no quadro 6, os sistemas ternários apresentam o menor tempo de transição dos modos operativos (geração/bombeamento e vice-versa) de uma UHR.

De acordo com a Resolução Normativa n° 697/2015 da ANEEL e conforme as Notas Técnicas n° 132/2019 e n° 251/2020, da mesma Agência, apenas os serviços ancilares de controle primário de frequência e auto reestabelecimento parcial não são ainda remunerados dentro do setor elétrico. Entretanto, os serviços ancilares remunerados estão restritos ao horizonte de operação de usinas térmicas. Além disso, pela análise desses documentos citados e pela observação do contexto atual do setor elétrico brasileiro, foi possível constatar que os serviços ancilares não são devidamente remunerados no Brasil.

Com o intuito de realizar um estudo aprofundado sobre o processo de remuneração dos serviços ancilares, foi possível comparar o processo de remuneração existente no Brasil com outros países, como Alemanha, Espanha, Estados Unidos e França. O quadro 7 apresenta tal comparação.

Quadro 7 - Comparação entre a remuneração dos serviços ancilares brasileiros com àquela em outros países

Serviços ancilares	Remuneração no Brasil	Remuneração na França	Remuneração na Alemanha	Remuneração na Espanha	Remuneração nos Estados Unidos
Controle primário de frequência	Dispensável celebração de contrato de prestação de serviços ancilares (CPSA) com o ONS, sendo provido sem ônus para os demais agentes e consumidores (ANEEL- Nota Técnica 132/ 2019)	O usuário da rede pode participar voluntariamente do mercado (leilão, licitação ou plataforma de mercado), customizando sua oferta. Este modelo resulta em um acordo bilateral, sendo o serviço realizado em um mercado comum (ENTSO-E, 2020).	Idem para o processo de remuneração da França.	Não existe qualquer regulamentação sobre o processo de liquidação tanto para capacidade quanto para a energia, assim como para frequência (ENTSO-E, 2020)	Desde 2019, A ERCOT é a única operadora independente norte-americana a instituir um mercado de serviços ancilares para este serviço, onde a remuneração é dada de acordo com a capacidade de resposta promovida (EPRI, 2019)
Controle secundário de frequência	Remuneração fixa anual com possibilidade de redução da receita em função da qualidade do serviço (indisponibilidade). A unidade geradora terá direito a receber a remuneração referente aos custos de operação e manutenção de seus equipamentos através de ESS, nos termos da regulação vigente (ANEEL- Nota Técnica 132/ 2019)	Modelo híbrido de remuneração que combina mecanismos de mercado com políticas mandatórias. O tipo de política de remuneração varia conforme o estado e região do país. Não há um esquema específico de liquidação para capacidade e /ou energia. Há a permissão para a isenção de tarifas (PWC, 2019)	Modelo de remuneração baseado no mercado, tanto para a capacidade quanto para a energia. As regras de liquidação para capacidade e energia são baseadas em pagamento por oferta. Não há permissão para a isenção de tarifas (PWC, 2019)	As políticas de remuneração para capacidade e energia são baseadas no mercado. Os processos de liquidação relativos à capacidade e energia são baseados na teoria de preços marginais (ENTSO-E, 2020)	Remunerado por tendências horárias e sazonais, geralmente relacionadas com esses fatores: o preço da energia para a reserva girante; o custo de oportunidade e de capacidade; o preço para a reserva não girante. Preços podem ser definidos em horizontes <i>day ahead</i> e <i>intraday</i> (EPRI, 2019)
Suporte de reativos	Remuneração por MVArh gerado/absorvido, conforme a tarifa de Serviços Ancilares - TSA (ANEEL-Nota técnica nº 251/2020)	Serviço parcialmente remunerado pelo operador do sistema (nacional ou regional). O preço do serviço é regulado, sendo definido pela autoridade reguladora competente (ENTSO-E, 2020)	A remuneração é baseada em regras de mercado, sendo tais regras, livres para cada estado/região do país (ENTSO-E, 2020)	O serviço não é remunerado pelo operador de transmissão do sistema, não existindo qualquer regulação sobre o mesmo. E, não há regras de liquidação de ofertas do intercâmbio de potência reativa entre as redes de transmissão e distribuição (ENTSO-E, 2020)	Pagamentos baseados nos preços de energia de mercado, no custo de oportunidade e na remuneração por capacidade (EPRI, 2019)

Serviços ancilares	Remuneração no Brasil	Remuneração na França	Remuneração na Alemanha	Remuneração na Espanha	Remuneração nos Estados Unidos
Despacho complementar para manutenção da reserva de potência operativa	O ONS deverá determinar a programação e efetuar o despacho das usinas termelétricas com vistas a minimizar o custo operacional total do sistema elétrico e respeitar as restrições operativas. As usinas termelétricas receberão mensalmente receita para prestação deste serviço ancilar (ANEEL- Nota Técnica 132/ 2019)	Serviço baseado no mercado, para fins de capacidade e energia (ENTSO-E, 2020). O usuário da rede pode participar voluntariamente do mercado (leilão, licitação ou plataforma de mercado), customizando sua oferta. Este modelo resulta em um acordo bilateral (ENTSO-E, 2020). O monitoramento da prestação deste serviço ancilar é híbrido (<i>ex-post</i> e real time) e o processo de liquidação é baseado em preços marginais, tanto para a capacidade quanto para a energia (ENTSO-E, 2020)	Serviço com remuneração não definida para capacidade e energia (ENTSO-E, 2020). O monitoramento da prestação deste serviço ancilar não é exatamente definido. Não há definição de processo de liquidação para a energia nem para a capacidade (ENTSO-E, 2020)	As políticas de remuneração para capacidade e energia são híbridas e baseadas no mercado, respectivamente. O monitoramento do serviço é híbrido para capacidade e <i>ex-post</i> , para energia. A liquidação das ofertas de capacidade e energia é dada por meio de preço marginal. A regra de ativação para o serviço de energia é baseada no mérito (ENTSO-E, 2020)	Os requisitos de operação para este tipo de reserva são definidos para cada operador independente do sistema. A energia é remunerada pelos preços do mercado de energia. Qualquer operadora independente do sistema, exceto a ERCOT, possui um mercado de serviços ancilares em tempo real, além do mercado <i>day ahead</i> , em algumas operadoras como PJM, os serviços ancilares requeridos para um mercado são diferentes daqueles solicitados por outro (EPRI, 2019)
Auto reestabelecimento (<i>black start</i>)	Auto reestabelecimento parcial: Dispensável celebração de CPSA com o ONS. Não há previsão de receita pela prestação do serviço ancilar (ANEEL- NT 132/ 2019). Auto reestabelecimento integral: Indispensável celebração de Contrato de Prestação de Serviços Ancilares – CPSA com o ONS. As centrais geradoras aprovadas nos ensaios de capacidade receberão anualmente a Receita de Autorreestabelecimento, atualmente igual a R\$ 38.041,63 (ANEEL- NT 132/ 2019)	Não há definição formal para a remuneração deste serviço, pois este praticamente não existe na França (ENTSO-E, 2020)	Este país é livre de regras de remuneração para este serviço (ENTSO-E, 2020)	Não há política de remuneração nem regras de liquidação para este serviço, tendo em vista que o mesmo quase não ocorre neste país (ENTSO-E, 2020)	Cada operador independente do sistema define a forma de compensação para este serviço. No mercado da PJM (Operadora Interconectada de Transmissão Regional), por exemplo, a receita anual do serviço é igual a 110% do montante composto pelos custos fixos, variáveis, de composição do serviço e de abastecimento do mesmo (EPRI, 2019)

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas

Os estudos apresentados no quadro 7 demonstram a necessidade de um processo revisório do marco regulatório com vistas a permitir a remuneração adequada e justa dos serviços ancilares existentes ou de novos serviços ancilares, entregues por tecnologias de armazenamento, como as usinas hidrelétricas reversíveis. Dada a experiência internacional da inserção expressiva de fontes de geração intermitentes (solar e eólica), a necessidade de discussões se torna veemente. Sendo aberta, portanto, uma janela de oportunidades para que os serviços ancilares sejam remunerados de forma justa e adequada.

3.4. Considerações sobre o capítulo

A experiência internacional demonstrou que a implementação de políticas como o mercado de capacidade está madura em vários países do mundo, haja vista que European Commission. (2016) e European Commission. (2019) definiram uma classificação para os mecanismos de remuneração por capacidade, apresentada no subtópico 3.2.1. dessa dissertação de mestrado.

Com relação ao mercado de flexibilidade, apesar de algumas definições de produtos e serviços estarem estabelecidas, essa política ainda é nova e carece de maiores estudos nos cenários nacional e internacional. O leilão de capacidade é uma política específica para cada país, porém, sem maiores dificuldades de implementação, o que seria um facilitador para o marco regulatório brasileiro, no cenário de inserção de usinas hidrelétricas reversíveis.

A definição e quantificação dos leilões multiatributos, por sua vez, é complexa, dificultando a efetivação dessa política no setor elétrico brasileiro. As políticas de incentivo já são utilizadas há bastante tempo para a penetração de novas fontes de energia e com a modernização do setor elétrico, há uma tendência maior de livre competitividade, o que dificulta a adoção desse tipo de política.

As cinco políticas mencionadas serão objeto de um modelo de Análise de Impacto Regulatório (AIR) para utilização e avaliação de políticas públicas, o qual será apresentado no capítulo 5. O modelo de AIR utilizará, para escolha da melhor política uma ferramenta baseada em métodos multicritérios de apoio à decisão. Assim, no capítulo 4, serão apresentados os modelos usualmente adotados na literatura para seleção de políticas públicas.

4. Métodos multicritério para avaliação e seleção de políticas públicas

Um dos principais desafios no estabelecimento de uma política pública é o processo de tomada de decisão, haja vista que suas medidas podem impactar a sociedade. Esse desafio tem sua complexidade aumentada, quando há variáveis subjetivas e julgamentos de valor. Com o intuito de solucionar problemas com essas características, ocorre a utilização dos métodos multicritério de apoio à decisão, que buscam solucionar problemas dessa ordem, caracterizando-se como uma ferramenta instrumental importante e de uso crescente nos ambientes organizacionais (Brodny and Tutak, 2021).

No setor energético, muitas ferramentas multicritério de apoio à decisão são utilizadas para fins de seleção de tecnologias de geração. Contudo, em relação à avaliação e seleção de políticas públicas, há poucos estudos disponíveis nas literaturas nacional e internacional, com essa finalidade (Su et al., 2020).

Haja vista que não foi encontrado na literatura nenhum método para avaliação e seleção de políticas públicas para a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, esse capítulo, dividido em quatro seções, busca preencher esta lacuna. A seção 4.1 apresenta uma visão geral sobre métodos multicritério de apoio à decisão sob incerteza, enquanto a seção seguinte trata da aplicação desses métodos para avaliação e seleção de políticas públicas, de forma generalizada. A seção 4.3 apresenta as dimensões e os critérios a serem considerados nessa avaliação, visando à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis na matriz energética brasileira. Por fim, as considerações sobre o capítulo são apresentadas na seção 4.4.

4.1. Métodos multicritério de apoio à decisão sob incerteza

Segundo Martins. (2017); Zhong et al. (2020) e Wu et al. (2020), os métodos multicritério de apoio à tomada de decisão são ferramentas reconhecidas por sua

efetividade na modelagem de problemas, nos quais, subjetividade, incerteza e ambiguidades estão presentes. Dentre esses métodos, os seguintes podem ser destacados:

✓ AHP (*Analytic Hierarchy Process*): Criado por Saaty (1991) a fim de auxiliar na tomada de decisões complexas, por meio da decomposição e da síntese das relações entre os critérios selecionados, com o intuito de priorizar os indicadores e obter uma melhor resposta.

✓ ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*): Proposto inicialmente por Roy (1968) para avaliar problemas da vida real por meio da soma ponderada, nos quais, as empresas deveriam decidir sobre novas atividades a serem executadas. Este método já foi aprimorado por diversos autores e de acordo com sua aplicação, existem diversas variantes (ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS e ELECTRE TRI);

✓ MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*): Criado por Bana Costa e Vasnick (1994), apresenta uma abordagem baseada somente em julgamentos qualitativos sobre diferenças a fim de auxiliar o tomador de decisão na quantificação da atratividade relativa entre as opções disponíveis;

✓ MULTIMOORA (*Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis Multiplicative Form*): Consiste na aplicação de técnicas de forte modelagem matemática para criar tolerância com desvios de valores no período de análise de consistência;

✓ PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*): Comtempla uma família de métodos, refinada com o tempo. Não se caracteriza por apontar uma decisão correta, mas sim por auxiliar os tomadores de decisão a encontrarem a alternativa mais propícia para o objetivo e entendimento do problema;

✓ TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*): Técnica para avaliar o desempenho de alternativas em função da aproximação com a solução ideal, introduzida por Hwang e Yoon. (1981);

✓ VIKOR (*VIšeKriterijska Optimizacija Kompromisno Rješenje (Solução de compromisso de otimização multicritério)*). Caracterizado pela criação de uma matriz de decisão *fuzzy* a partir da opinião de especialistas, com reversão do processo da lógica *fuzzy* para obtenção de resultados nítidos;

Mello (2015) e Siksnylyte (2018) avaliaram as vantagens e desvantagens de diversos métodos, explicitando estas em um quadro.

Quadro 8 - Quadro-resumo dos métodos multicritério de apoio à decisão

Ferramenta Multicritério	Vantagens	Desvantagens
AHP	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo simples para construir; - Processo lógico por comparações pareadas - Eficiente em lidar com atributos qualitativos e quantitativos - Rápida execução em comparação aos outros métodos - Resultados de fácil entendimento 	<ul style="list-style-type: none"> - Levanta dúvidas se seus fundamentos são realmente claros para teste do método - Necessita de análise adicional para os resultados
ELECTRE	<ul style="list-style-type: none"> - Os defensores argumentam que o seu conceito <i>outranking</i> é mais relevante nas situações práticas do que o conceito de dominação restritiva; - Pode ser usado para escolher, classificar, e ordenar alternativas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Demanda alto conhecimento - Não é transparente - Necessidade de um especialista em metodologia multicritério para realizar a análise
MACBETH	<ul style="list-style-type: none"> - Julgamento comparativo dos decisores entre os diversos critérios e ações - Utiliza um software especializado que fornece os pesos dos critérios de acordo com os julgamentos feitos - Demonstração de preferências de forma qualitativa por parte dos decisores, o que pode ser uma vantagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de não realização de resultados compatíveis com as comparações realizadas - Sugestão de variação de julgamento para a aproximação de um resultado - Método pode se tornar cansativo caso haja muitas comparações efetuadas
MULTIMOORA	<ul style="list-style-type: none"> - Facilmente adaptável para resolver diferentes problemas - Tolerância para desvios em valores dos resultados 	<ul style="list-style-type: none"> - Processo computacional longo - Necessita de domínio de programação computacional, pois seu processo é sofisticado e se aplicado erroneamente, pode gerar erros de cálculo
PROMETHEE	<ul style="list-style-type: none"> - Incentiva mais interação entre o decisor e o modelo na procura de boas opções; - Os defensores argumentam que o seu conceito <i>outranking</i> é mais relevante para situações práticas do que o conceito de dominação restritiva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muito conhecimento necessário.
TOPSIS	<ul style="list-style-type: none"> - Consistência interna e solidez - Fácil de ser seguido - Cálculos simples - Facilmente configurado no EXCEL - Resultados de fácil entendimento - Valor do índice simples dado - Facilidade na representação gráfica dos resultados - Hierarquização de alternativas com a indicação dos valores mais próximos da solução positiva ideal 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige uma gama de procedimentos - Grande quantidade de cálculos - Fornece um resultado genérico
VIKOR	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptável para resolver diferentes problemas - Fácil de ser combinado com outros métodos - Tolerância para desvios em valores dos resultados - Aplicável para comparar resultados advindos de diferentes métodos 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessita de domínio de programação computacional, pois seu processo é sofisticado e se aplicado erroneamente, pode gerar erros de cálculo

Fonte: Adaptado de Mello (2015), p.102 e Siksnylyte (2018), p.13-15

Os métodos mencionados no quadro acima podem ser combinados à teoria dos conjuntos fuzzy, desenvolvida por Zadeh. (1965), permitindo o tratamento das

incertezas existentes nos processos decisórios que possuam fatores complexos e dinâmicos, inerentes ao julgamento humano nas análises, com o intuito de auxiliar os tomadores de decisão (Cowan, et al., 2009).

Segundo Zadeh (1965), a noção de um conjunto *fuzzy* define um ponto de partida para a construção de uma estrutura de trabalho conceitual, muito parecida com àquela que apresenta os aspectos do modelo utilizado no caso de conjuntos comuns, sendo mais genérica do que esta, porém, apresentada de forma mais generalizada e com a possibilidade de ter um maior alcance de aplicabilidade, particularmente nos domínios da classificação de padrões e processamento de informações. Essencialmente, a teoria de conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy* fornecem um conjunto de ferramentas matemáticas para lidar com os problemas imprecisos e com ausência de critérios bem definidos.

Conforme Muller (2016), o termo “imprecisão” não deve ser entendido como falta de precisão em algo, e sim como a ausência de conhecimento sobre um determinado parâmetro, modelando, desta forma, as incertezas inerentes ao processo decisório. Assim, a teoria dos conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy* fornecem uma estrutura matemática para que fenômenos conceituais vagos sejam rigorosamente estudados.

Os conjuntos convencionais são definidos por meio da enumeração de seus elementos ou por uma condição que defina a pertinência ao conjunto. Já os conjuntos *fuzzy* podem ser entendidos como uma generalização da teoria dos conjuntos convencionais, na qual a função de pertinência dos elementos do conjunto pode variar entre 0 e 1, no caso de conjuntos normalizados. Nessa situação, não é possível dizer que um determinado elemento não pertence ao conjunto, e sim que o elemento pertence ao conjunto com certo grau de pertinência.

Um conjunto *fuzzy* é definido por uma função chamada de função de pertinência onde é atribuído a cada indivíduo no universo, um valor entre 0 e 1, o qual, representa o grau de pertinência do mesmo ao conjunto *fuzzy* (Muller, 2016). Em outras palavras, nem todos os problemas reais podem ser tratados de modo binário (sim ou não, tudo ou nada), podendo haver situações intermediárias

Algumas aplicações dessas combinações são encontradas na literatura internacional. Kapoor (2005) associou a lógica *fuzzy* ao método AHP para fins de seleção de robôs em aplicações industriais. Pramanik and Mukhopadhyaya (2011) desenvolveram um método multicritério com lógica *fuzzy* associada com a técnica

de *Grey Relational Analysis (GRA)* para a seleção de professores de nível do ensino médio. Haghghi and Keramak (2012) propuseram uma abordagem multicritério baseada na lógica *fuzzy* para avaliar a incerteza decorrente de um estudo transitório executado para redes de tubulação e assim, otimizar o fluxo de água local. Trindade (2016) desenvolveu um modelo que une os métodos *fuzzy-AHP* e *fuzzy-TOPSIS* para o monitoramento e à avaliação da capacidade inovativa de empresas.

Otay et al. (2017) realizou uma combinação entre a lógica *fuzzy* e os métodos *AHP* e *DEA (Data Envelopment Analysis)* a fim de avaliar a performance de instituições de saúde. Tian et al. (2020) realizou uma análise multicritério com associação da lógica *fuzzy* aos métodos *PROMETHEE II* e *AHP* com o intuito de realizar uma análise de impacto ambiental para avaliar os efeitos do crescimento do turismo na China. Lin et al. (2019), por sua vez, combinou a lógica *fuzzy* com o método *MULTIMOORA* com o intuito de selecionar possíveis locais para implementação de estações de *car sharing* (aluguel de veículos para uso rápido).

Com base nessas experiências internacionais, pode-se perceber que o uso das ferramentas multicritério, sobretudo, quando combinadas à lógica *fuzzy*, pode auxiliar a tomada de decisão referente à avaliação e à seleção de políticas públicas para a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Essa dissertação de mestrado adota o modelo *AHP fuzzy-TOPSIS* proposto por Martins (2017), o qual, combina os benefícios da lógica dos conjuntos *fuzzy*, considerando as incertezas associadas aos processos decisórios e incorporando os potenciais dos métodos *AHP* e *TOPSIS*.

4.2. Métodos multicritério para avaliação e seleção de políticas públicas

Em um estágio inicial, foram pesquisados na literatura, artigos, dissertações e teses que utilizassem métodos multicritério de apoio à decisão com foco no planejamento energético e em políticas públicas, de forma a criar embasamento para o desenvolvimento de um modelo de avaliação e seleção de políticas públicas voltadas à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.

Para tanto, foram utilizadas na pesquisa, as palavras-chave: “*multicriteria*”; “*MCDM*”; “*public policy*”; “*renewables*” e “*energy policy*”, sendo selecionados

trabalhos em língua portuguesa e inglesa e, preferencialmente, e os mais citados e recentes, com publicação a partir de 2020.

Foram encontrados 15 artigos nessa pesquisa e em função da lacuna existente na literatura sobre trabalhos que envolvam a aplicação de ferramentas multicritério para armazenamento de energia, esses artigos foram englobados em uma única categoria: Métodos multicritérios e suas aplicações para fins de políticas energéticas.

Ademais, o objetivo dessa dissertação não é realizar uma revisão sistemática da literatura sobre aplicações de métodos multicritério em políticas públicas e sim, focar nestas, direcionadas para sistemas de armazenamento de energia. Um quadro foi elaborado com esses 15 trabalhos, seus autores, os métodos utilizados e seus objetivos.

Quadro 9 - Referências de políticas energéticas com base em métodos multicritério

Autores	Métodos multicritério	Objetivo do trabalho
Colak and Kaya. (2020)	AHP; VIKOR; DELPHI e TOPSIS	Determinar a melhor tecnologia de armazenamento de energia para a política energética da Turquia
Brodny and Tutak. (2021)	VIKOR; MOORA; COPAS; TOPSIS; entropia de Shannon e método de escala multidimensional	Auxiliar o desenvolvimento energético sustentável nos países da Europa Central e Oriental
Kul et al. (2020)	DELPHI; AHP e FWASPAS	Gerenciar e examinar os fatores de risco para o investimento em projetos sustentáveis de energia renovável na Turquia
Neofytou et al. (2020)	AHP e PROMETHEE II	Criação de um índice para a transição sustentável no setor energético de quatorze países selecionados em diferentes continentes (África, América do Norte, Ásia e Europa)
Zhong et al. (2020)	DANP; TOPSIS e VIKOR	Determinação de estratégias inovativas e apropriadas para o investimento em energia renovável
Tutak et al. (2021)	Entropia - COPRAS	Apresentar a diversidade no desenvolvimento sustentável climático e energético em 27 países europeus
Saraswat et al. (2021)	Entropia de Shannon; AHP; TOPSIS; VIKOR; PROMETHEE II; WSM; WPM e WASPAS	Avaliação de diferentes fontes de geração energética para o desenvolvimento sustentável do setor energético na Índia
Alizadeh et al. (2020)	BOCR e ANP	Apresentar um framework para os agentes políticos baseado em um processo de decisão multicritério a fim de melhorar a política de planejamento para energia renovável, tendo como exemplo, o caso do Irã
Caporale et al. (2020)	FG e OHP	Análise da aceitação social do uso de energia eólica
Aryanfar et al. (2020)	fuzzy logic in decision making	Avaliar o comportamento da geração fotovoltaica a partir da metodologia multicritério a partir de um estudo de caso do Irã
Sedghiyan et al. (2021)	AHP; TOPSIS e SAW	Priorização de opções fontes de energia renovável em cinco zonas climáticas do Irã
Barros et al. (2020)	LCA; MIVES e MONTE CARLO	Definição de um modelo probabilístico para melhorar a performance ambiental de plantas de geração energética
Su et al. (2020)	VIKOR; TOPSIS; WASPAS	Auxiliar o desenvolvimento sustentável do setor energético da União Europeia e da China
Spyridonidou and Vagiona. (2020)	AHP; OWA; WLC; ANN; GA	Identificar as lacunas de informação no campo de estudos de energia eólica, além de apresentar alternativas para seleção de potenciais locais para o uso da tecnologia
Zhao et al. (2022)	AHP; OWA; WLC; ANN; GA	Determinar as fontes de energia renovável para uma economia verde e sustentável

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas no quadro

A revisão da literatura realizada ressalta a importância das linhas de pesquisa associadas com o estabelecimento de políticas públicas para sistemas de armazenamento de energia.

Pela observação do quadro 9, pode-se notar que as referências mencionadas utilizaram diversos métodos multicritério de apoio a decisão, indicando a presença de fatores subjetivos nas avaliações propostas, além de parâmetros mensuráveis e não mensuráveis analiticamente, o que justifica a utilização de tais métodos como uma ferramenta de avaliação.

O método multicritério de apoio à decisão *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*) aparece entre os mais frequentes, estando presente em oito dos dezesseis estudos, enquanto o *TOPSIS* foi adotado em seis destes e o método *VIKOR*, em cinco dos mesmos. Dois dos dezesseis trabalhos ainda utilizaram a teoria dos conjuntos *fuzzy* por meio de combinações, a fim de considerar as incertezas. Haja vista que os três métodos (*AHP*, *fuzzy* e *TOPSIS*) são comumente adotados na literatura, estes foram conjugados em um modelo híbrido multicritério empregando estas três ferramentas para escolha de políticas públicas voltadas para a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Tal modelo será descrito no capítulo 5 dessa dissertação.

Contudo, antes da apresentação deste modelo, apresentamos, as dimensões e critérios definidos em trabalhos relevantes da literatura sobre estudos de políticas públicas.

4.3. Dimensões e critérios para avaliação de políticas públicas

O processo de avaliação de políticas públicas deve considerar todas as dimensões e critérios relevantes à decisão. Segundo Martins (2017), alguns cuidados devem ser observados na definição dos critérios e subcritérios para garantir que todas as dimensões e fatores envolvidos estejam representados de maneira apropriada. Portanto, os critérios selecionados devem ser relevantes, mas sem repetitividade.

Liu *et al.* (2012) reiteram a importância de que os critérios levem em consideração, as percepções dos formuladores de políticas, sejam estes advindos de governos ou de comunidades. Além disso, na visão desses autores, esses critérios

ser tratados de forma individual e interdependente (critério a critério e um critério em relação ao outro).

Sobre a definição de dimensões e critérios para a avaliação e seleção de políticas públicas, Sahin et al. (2019) destaca a importância de tal processo para a seleção de locais para construção de hospitais. Por sua vez, Huovila et al. (2019) define quais indicadores a serem usados, além de quando devem ter seu uso, a fim de criar uma análise comparativa para criar padrões em cidades inteligentes e sustentáveis.

Lyulyov et al. (2020) realiza um estudo, fundamentado pela definição de dimensões e critérios para fins de políticas governamentais voltadas à estabilidade macroeconômica em países de baixo e médio crescimento econômico. Alizadeh et al. (2020) estabelece dimensões e critérios para apresentar um framework voltado aos agentes políticos, sendo baseado em um processo de decisão multicritério a fim de melhorar a política de planejamento para energia renovável, tendo como exemplo, o caso do Irã.

Mastrocinque et al. (2020) descrevem dimensões e critérios empregados em uma análise para que seja estabelecida uma cadeia de suprimentos sustentável no setor de energia renovável do Reino Unido. Brodny and Tutak (2021) destacam a importância dos mesmos para o gerenciamento do nível de desenvolvimento da matriz de energia renovável da União Europeia. Saraswat et al. (2021) apresenta uma análise multicritério para avaliação de diferentes fontes de geração energética com o intuito de promover o desenvolvimento sustentável do setor energético na Índia.

O quadro 10 apresenta o mapeamento das principais dimensões encontradas por meio da revisão da literatura, sendo as mais frequentes: econômica, social, política, técnica e ambiental.

Quadro 10 - Dimensões dos principais critérios utilizados em trabalhos relevantes da literatura

Autores	Dimensões (classificação)
Liu et al. (2012)	Técnica, econômica e social
Martins. (2017)	Técnica, ambiental, econômica, social e política
Huovila et al. (2019)	Técnica, econômica, política, social e ambiental
Sahin et al. (2019)	Técnica, social, ambiental e política
Alizadeh et al. (2020)	Econômica, ambiental, política e social
Lyulyov et al. (2020)	Econômica
Mastrocinque et al. (2020)	Econômica, social e ambiental
Brodny and Tutak. (2021)	Técnica, econômica, ambiental e social
Saraswat et al. (2021)	Econômica, técnica, ambiental, social e política

Fonte: Elaborado a partir das referências mencionadas

De acordo com Martins (2017), a escolha dos critérios deve respeitar os seguintes princípios: Sistêmico; consistência; independência; mensurabilidade e comparabilidade. Em relação ao estabelecimento de políticas públicas para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, as discussões em curso no setor elétrico brasileiro mostram que alguns conceitos são relevantes, tais como confiabilidade, entrega de capacidade, e relação benefício-custo.

O processo de revisão da literatura mostra que a avaliação e seleção de políticas públicas são baseadas, fundamentalmente, em aspectos econômico, técnico, político e social, conforme apresentado no quadro 10.

A fim de delimitar as dimensões e os critérios do modelo para avaliação e seleção de políticas públicas com vistas à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, desenvolvido nesta dissertação, foi realizada uma compilação no quadro 11, com os diversos critérios adotados nos trabalhos de referência.

Quadro 11 - Revisão da literatura sobre dimensões e critérios

Autores	Dimensões	Crítérios
Colak and Kaya. (2020)	Técnica	Eficiência energética; Densidade energética; Maturidade tecnológica; Capacidade de armazenamento; Confiabilidade; Risco
	Econômica	Custo de investimento; custo de operação e manutenção; tempo de vida
	Ambiental	Intensidade de CO2; poluição de ar e água; impacto ecológico; consumo de recursos; transtorno ao terreno
	Sociopolítico	Aceitação social; Aceitação política; Criação de empregos; incentivos governamentais; saúde e segurança
Brodny and Tutak. (2021)	Técnica	Fornecimento total de energia per capita; consumo primário de energia per capita; participação das fontes renováveis no consumo final de energia (%); energia renovável no transporte (%); geração de eletricidade renovável (%); aquecimento e resfriamento a partir de fontes renováveis (%); dependência de importação de energia (%); participação dos combustíveis sólidos no total de energia per capita (%); perdas energéticas (%); taxa de autossuficiência energética
	Econômica	Produto interno bruto per capita; produtividade energética (euros por quilograma de óleo equivalente); gastos do PIB em pesquisa e desenvolvimento; intensidade energética em toneladas por milhões de euros; balança comercial energética (%) do PIB
	Ambiental	Emissões de gases de efeito estufa per capita; intensidade de energia em relação às emissões de gases poluentes (kg CO2 por tonelada equivalente; emissões dos setores energético e de produção relativas à poluição do ar (kg per capita)
	Social	Inabilidade populacional (%) em aquecerem adequadamente suas casas em razão da pobreza; preços de eletricidade para os consumidores residenciais (euro/kW); ajuste de valores brutos de impostos residenciais descartáveis pela paridade do poder de compra por habitante
Wu et al. (2020)	Técnica	Acurácia no planejamento; qualidade no balanço energético; autenticidade das ofertas do mercado; eficiência para geração de energia renovável; grau de satisfação das partes responsáveis no balanço
	Econômica	Eficiência na alocação de custos; eficiência de preço; custo de balanço; utilização da eficiência; impactos no investimento e na construção da geração flexível
Kul et al. (2020)	Econômica	Risco financeiro; ausência de expertise; capacidade de pesquisa e desenvolvimento; contratos; qualidade do serviço; competitividade do mercado; potencial de crescimento do mercado; barreiras de acesso
	Técnica	Acesso à rede; risco de construção; operação e manutenção; desenvolvimento de projeto; risco do recurso
	Política	Política de preços; sistema de aprovação complexa; risco regulatório; incertezas políticas
	Ambiental	Risco de alteração nas políticas energéticas e climáticas; risco de aquisição do terreno; gerenciamento de impacto ambiental
	Social	Falta de aceitação social; Risco de saúde pública; reassentamento físico e econômico

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas

Quadro 12 - Revisão da literatura sobre dimensões e critérios (continuação)

Neofytou et al. (2020)	Social	Consciência e aceitação pública; capital humano
	Política	Desejo político e conformidade com a política energética da União Europeia; indicador regulatório para energia sustentável
	Econômica	Facilidade de fazer negócios; solidez do mercado financeiro
	Técnica	Dependência do carbono; infraestrutura e inovação
Zhong et al. (2020)	Econômica	Competitividade de preço; acessibilidade; flexibilidade;
	Social	Facilidade de acesso; suporte ao consumidor
	Técnica	Segurança, locação e facilidades
Tutak et al. (2021)	Técnica	Consumo primário de energia per capita; consumo final de energia per capita; consumo final de energia residencial; produtividade energética; participação das fontes renováveis no consumo final; dependência de importação de energia por produtos
	Econômica	PIB per capita
		Preços de eletricidade pelo perfil de consumidor (pequeno, médio ou grande);
	Ambiental	Emissões de gases de efeito estufa per capita; intensidade de energia em relação às emissões de gases poluentes (kg CO2 por tonelada equivalente; relação entre as emissões e o PIB (ton CO2 eq/milhões de euros); média de emissões de CO2 por quilômetros para cada novos carros
Social	Inabilidade populacional (%) em aquecerem adequadamente suas casas em razão da pobreza	
Saraswat et al. (2021)	Econômica	Custo de investimento; custo de operação e manutenção; tempo de payback; custo nivelado de energia; vida operacional; vida usual; custo de combustíveis; disponibilidade de fundos e incentivos
	Técnica	Maturidade tecnológica; eficiência; fator de capacidade; confiabilidade; tempo de desenvolvimento; integração com outras fontes de geração energética; capacidade de complemento à demanda na geração de pico
	Social	Benefícios sociais; criação de empregos; aceitação social; impacto na saúde humana
	Ambiental	Necessidade de uso do terreno; emissão de poluentes; impacto no ecossistema; mudança climática
	Político	Aceitação política; dependência estrangeira; compatibilidade com a política energética nacional; disponibilidade de anos para reserva de combustível;
Alizadeh et al. (2020)	Ambiental	Utilização de recursos naturais; proteção do meio ambiente; desenvolvimento de indústrias aliadas; seguimento aos comprometerimentos internacionais como a UNFCCC e o Protocolo de Kyoto
	Social	Desenvolvimento de alternativas baseadas em recursos ambientalmente amigáveis; criação de empregos; redução nos preços de energia
	Econômica	Custos de investimento; custos de operação; custos de manutenção; uso da terra; danos ecológicos
	Política	Dependência de tecnologia estrangeira; ausência de mecanismos financeiros para estimular o desenvolvimento de energia renovável; falta de consciência pública sobre a energia renovável

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas

Quadro 13 - Revisão da literatura sobre dimensões e critérios (continuação)

Caporale et al. (2020)	Técnica	Número de turbinas; distância entre turbinas; dimensão das turbinas; cor das turbinas; locação das turbinas (colinas, rios, mares); vida usual; quantidade de energia produzida; operação média diária; distância da turbina; dimensão da turbina; número de turbinas em uma fazenda eólica
	Ambiental	Impacto de gerenciamento; impacto de implementação; impacto de desmantelamento; alteração da fauna; alteração da produção agrícola
	Econômica	Custos de manutenção; custos de implementação; custos de desmantelamento; lucros
	Robustez	Desinformação; falta de transparência em aquisições públicas
Aryanfar et al. (2020)	Social	Posição geopolítica; densidade de analfabetismo populacional; crescimento populacional
	Técnica	Radiação; temperatura; poeira; umidade;
	Ambiental	Tipo de consumidor; liberação de PM 2.5; consumo de energia
Sedghiyan et al. (2021)	Técnica	Eficiência; maturidade; disponibilidade; capacidade; tempo de espera
	Econômica	Investimento inicial; custo do ciclo de vida; custos de operação e manutenção; valor da tarifa feed in; potencial do mercado em uma escala global
	Segurança energética	Relação entre reserva e produção; recursos renováveis não evitados; diversificação no fornecimento
	Ambiental	Emissões de CO2; refinamento do terreno; poluição da água; poluição do solo; poluição sonora
Barros et al. (2020)	Social	Aceitação pública; criação de empregos
	Ambiental	Acidificação; Mudança climática; toxicidade ecológica; pureza da água; eutrofização; toxicidade humana; radiação ionizante; diminuição da camada de ozônio; partículas relevantes; formação fotoquímica do ozônio; diminuição dos recursos; uso da terra
Su et al. (2020)	Econômica	Uso total da energia; intensidade energética; dependência energética
	Ambiental	Diminuição nas emissões de gases de efeito estufa; participação das fontes renováveis no consumo final de energia (%); diminuição do consumo de energia primária (%); diminuição do consumo de energia final (%);
	Social	Acessibilidade da eletricidade para consumidores residenciais; acessibilidade de gás para os mesmos tipos de consumidores; emissão de CO2 per capita por kg
Zhao et al. (2022)	Técnica	Potencial técnico
	Ambiental	Implicação ambiental
	Econômica	Benefícios econômicos
	Social	Aceitação social

Fonte: Elaborado a partir das referências citadas

A análise dessas informações possibilitou a definição de dimensões e critérios adotados nessa avaliação. Com o intuito de propor um modelo representativo e abrangente para a avaliação e seleção de políticas públicas visando a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e considerando as premissas para a definição das dimensões e critérios, foram adotadas nesta pesquisa, quatro dimensões: (i) econômica; (ii) técnica; (iii) política e (iv) robustez. Além disso, foram propostos 11 critérios que estão agrupados conforme o quadro 14.

Quadro 14 - Dimensões e critérios propostos com base na literatura

Dimensões	Critérios
Econômica	Custo para a sociedade
	Potencial de transformação do mercado
	Aumento de subsídios e encargos
Técnica	Confiabilidade
	Integração com outras fontes de geração energética
Política	Alinhamento às políticas nacionais
	Governança pública e sustentabilidade do setor
Robustez	Dificuldade de implementação
	Experiência prévia
	Possibilidade/ facilidade de monitorar e avaliar as políticas
	Impactos previstos

Fonte: Elaboração própria

Os critérios presentes nessa avaliação estão descritos no “Instrumento de coleta de dados” submetido aos especialistas, o qual, pode ser encontrado no apêndice 1 dessa dissertação.

4.4. Considerações sobre o capítulo

O capítulo 4 realiza uma abordagem inicial sobre as principais características dos métodos multicritérios de apoio à decisão, apresentando alguns dos mais utilizados na literatura.

Foram encontradas referências de utilização desses métodos em diversas áreas de aplicação, sendo alguns desses estudos aplicados às definições de políticas energéticas, outros voltados para inserção e/ou avaliação de sistemas de armazenamento de energia e por fim, alguns direcionados para avaliação e/ou seleção de políticas públicas, não necessariamente, tratando do setor energético.

Com vistas a desenvolver um modelo adequado ao objetivo dessa dissertação de mestrado e assim propor políticas públicas para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, foram combinados as dimensões e os critérios das referências adotadas, selecionando os que fossem mais adequados para a avaliação em pauta.

Entretanto, ainda é necessário selecionar um método adequado e desenvolver o modelo proposto, aplicando essas dimensões e critérios definidos. Tais processos serão apresentados nos capítulos 5 e 6.

5. Modelo de Análise de Impacto Regulatório para seleção e avaliação de políticas públicas

Esse capítulo apresenta um modelo para avaliação e seleção de políticas públicas, baseado em uma análise de impacto regulatório (AIR), sendo a mesma, complementada pela integração dos métodos multicritério de apoio à decisão - AHP-TOPSIS. Na fase TOPSIS do modelo, há a utilização da teoria dos conjuntos *fuzzy*. Esse modelo foi baseado naquele proposto por Martins (2017) que consistiu na avaliação e seleção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis com base em um modelo *fuzzy* AHP-TOPSIS. Além disso, foi adotado também como referência, o modelo estabelecido por Da Ponte (2021) que realizou a hierarquização de políticas públicas para inserção de fontes renováveis no Sistema Isolado (SI).

Trata-se, portanto, de um modelo conceitual genérico para avaliação e seleção de políticas públicas voltadas à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Tal modelo será apresentado na seção 5.2 com base nos métodos, dimensões e critérios apresentados e definidos nas três primeiras seções do capítulo 4.

As fases 1, 2 e 3 do modelo correspondem à definição do problema; framework regulatório e mapeamento das alternativas de ação. Estas são partes integrantes de um processo de análise de impacto regulatório e foram definidas, segundo os parâmetros estabelecidos por Ministério da Casa Civil (2018) como diretrizes gerais do processo de análise de impacto regulatório. Contudo, antes de apresentar o modelo, é importante exibir o conceito de análise de impacto regulatório, o qual será apresentado na seção 5.1 dessa dissertação.

5.1. Teoria de Análise de Impacto Regulatório

A análise de impacto regulatório (AIR) pode ser entendida como a medida central para um processo de tomada de decisão de uma política regulatória, ao passo

que, de forma crítica, conduz a avaliação das opções disponíveis. Um processo de AIR corretamente estruturado permite a efetividade, a eficiência e a coerência de tal política, exibindo de forma clara, os compromissos inerentes de uma proposta regulatória (OCDE, 2021).

Com relação ao estágio inicial da AIR onde ocorre o desenvolvimento de regras e a execução de testes, este deve considerar tais fatores (OCDE, 2021): determinação do escopo da AIR previamente à avaliação do problema regulatório pelos agentes políticos; assessoria ao agente regulador por parte de um órgão de fiscalização, quando há caracterização do problema regulatório e de sua magnitude; análise econômica prévia durante o estágio inicial da AIR, pelos agentes políticos, a fim de determinar o escopo de uma questão; relação de tempo e recursos empregados na regulação com a estrutura econômica do país (ex. impactos *per capita*, flexibilidade política); escolha de patamares inclusivos e com impacto socioeconômico, no caso de uma análise quantificável, dentro de uma AIR (OCDE, 2021).

A estrutura de uma análise de impacto regulatório segue um ciclo de implementação, o qual conforme OCDE. (2020), pode ser definido de acordo com o ciclo abaixo.

1. Definição do problema: Descrição da natureza e do alcance do problema a ser incluído na proposta regulatória, preferencialmente em termos quantitativos;
2. Estabelecimento claro do objetivo da política regulatória dentro do aspecto político de um país, com a descrição do *framework* regulatório, do desenho proposto, destacando a estratégia proposta para adequação regulatória;
3. Identificação das alternativas com listagem daquelas práticas, incluindo abordagens de ordem não regulatória que possam ser soluções para o problema identificado;
4. Análise de benefícios e custos, com abordagem clara daqueles esperados para as alternativas identificadas nos passos anteriores;
5. Escolha da solução preferida, justificando porque a alternativa selecionada é melhor do que as outras analisadas;
6. Monitoramento e avaliação da alternativa selecionada, com detalhamento de que como estes processos serão realizados;

Em relação ao modelo a ser apresentado na seção seguinte, os itens 1 e 2 do ciclo acima estão presentes nas fases 1 e 2 do mesmo. O item 3 está presente na terceira fase do modelo proposto. Os itens 4, 5 e 6 são descritos nas fases 4, 5 e 6 deste, respectivamente. O modelo será conhecido de forma mais detalhada no tópico 5.2.

5.2.

Visão geral do modelo de AIR para avaliação e seleção de políticas públicas

A figura 7 apresenta a visão geral do modelo de análise de impacto regulatório (AIR) para avaliação e seleção de políticas públicas, dividido em seis fases.

A primeira fase possui as seguintes etapas:

- ✓ Definição das políticas a serem propostas;
- ✓ Definição da natureza e do alcance dessas políticas;
- ✓ Identificação da base legal para atuação do órgão regulador.;

Já a segunda fase é composta por esses passos:

- ✓ Definição dos objetivos das políticas;
- ✓ Desenho das políticas;
- ✓ Estratégia proposta para escolha.;

Na terceira fase, há a identificação das políticas propostas, por meio de três etapas:

- ✓ Planejamento da pesquisa;
- ✓ Condução da pesquisa;
- ✓ Documentação da pesquisa.;

A quarta fase contempla uma análise benefício-custo conduzida com o método *AHP* (*Analytical Hierarchical Process*). Nessa fase são definidos as dimensões e critérios para a seleção da política preferida e a partir dessas definições, ocorre o desenvolvimento do cálculo das matrizes de comparação pareada. Tais matrizes têm sua consistência analisada por meio do cálculo da razão de consistência (RC). Tal razão calculada permite a definição dos pesos dos critérios para fins de seleção da política preferida.

A combinação do método TOPSIS com a teoria dos conjuntos fuzzy é realizada na quinta fase do modelo proposto. A primeira etapa dessa fase compreende o cálculo das matrizes fuzzy de avaliação por meio dos conjuntos de TFNs (*triangular fuzzy numbers*). Após essa etapa, há a definição das soluções FPIS (*fuzzy positive ideal solution* (D+)) e FNIS (*fuzzy negative ideal solution* (D-)), além da definição das distâncias D+ e D-. Com isso, é realizada a determinação da proximidade relativa do valor ideal para construir o ranking das alternativas de políticas públicas, com a justificativa da política escolhida.

Na sexta e última fase do modelo há a definição de indicadores para avaliação da política escolhida e determinação das métricas associadas aos indicadores com fins de avaliação dessa política.

O modelo proposto, estruturado em um fluxograma, com a nomenclatura das fases e das etapas, pode ser conferido nas figuras 8 e 9. A figura 9 é uma continuação do processo apresentado na figura 8.

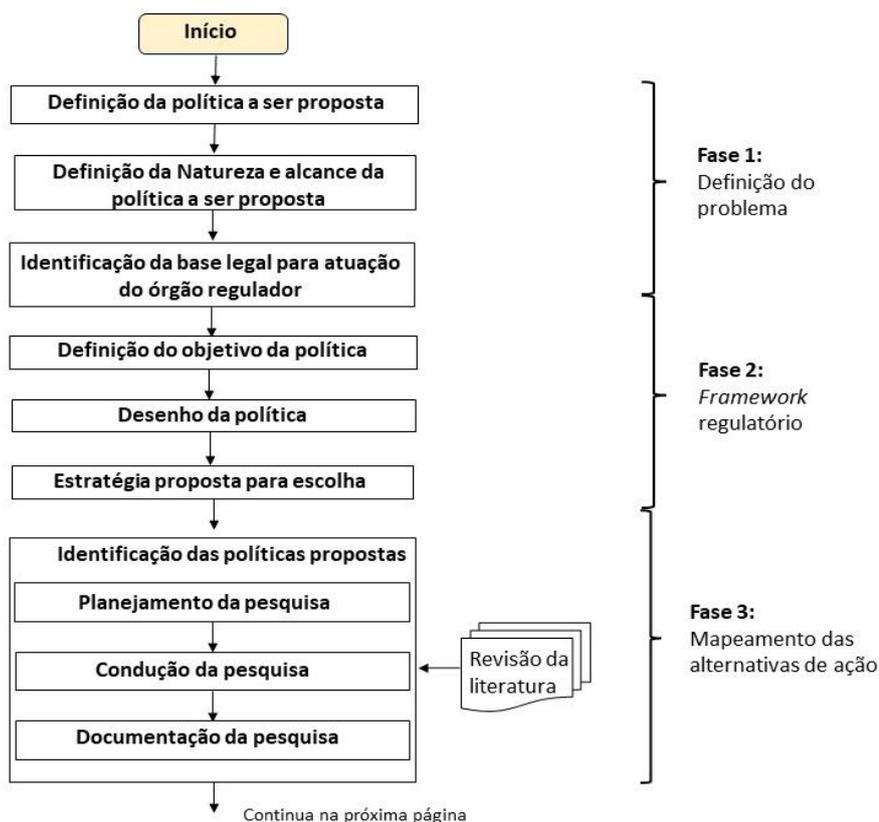


Figura 8 - Modelo proposto para avaliação e seleção de políticas públicas - Fases 1 a 3

Fonte: elaboração própria

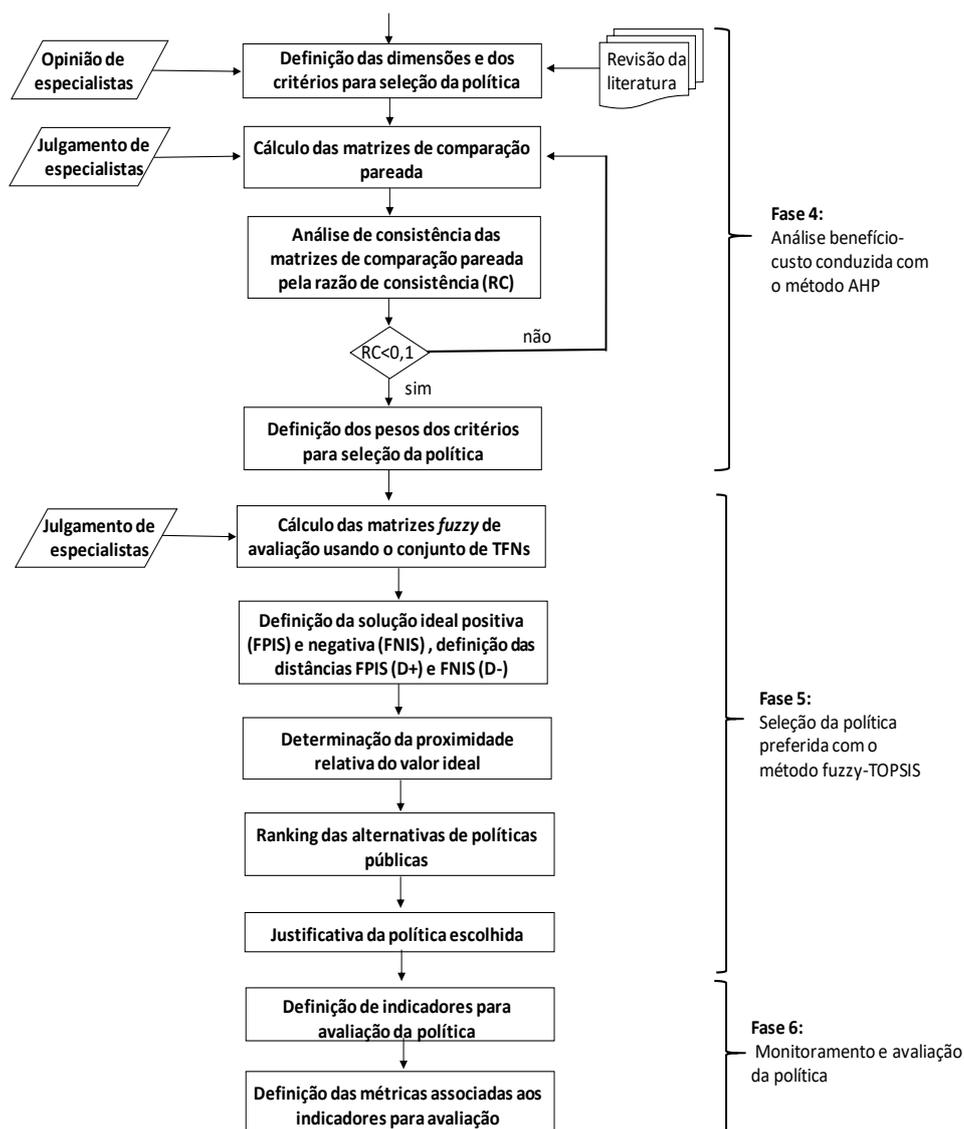


Figura 9 - Modelo proposto para avaliação e seleção de políticas públicas – Fases 4, 5 e 6

Fonte: Elaboração própria

A descrição de cada uma das fases do modelo será realizada nas seções 5.3 a 5.9. A próxima seção trata da descrição da primeira fase (definição do problema).

5.3. Descrição da fase 1 - Definição do problema

Essa etapa consiste na apresentação do problema que despertou a atenção da agência, órgão ou entidade sobre a possível necessidade de uma intervenção regulatória (Ministério da Casa Civil, 2018).

A natureza de um problema regulatório pode ser definida como a causa ou justificativa para a existência do mesmo (Ministério da Casa Civil, 2018). Segundo

Ministério da Casa Civil (2018), os componentes dessa natureza são os seguintes: falha de mercado; falha regulatória; falha institucional; riscos inaceitáveis; contribuição para a garantia de direitos fundamentais; contribuição para o objetivo de políticas públicas. Alguns exemplos desses componentes são preço, entrada de mercado, informação, qualidade, quantidade (Ministério da Casa Civil, 2018).

Para entendimento e tratamento do problema regulatório é necessário que ocorra a identificação dos atores por ele afetados. A análise deve trazer de modo claro quais são os indivíduos, empresas, grupos ou setores impactados pelo problema, descrevendo de que modo eles são afetados, sendo importante conhecer a visão desses atores sobre o problema em questão para entender adequadamente suas causas e extensão. Deste modo, deve-se definir uma estratégia de consulta ou diálogo com os atores impactados (Ministério da Casa Civil, 2018).

Em relação à base legal para atuação do órgão regulador, uma vez definido o problema regulatório e os atores por ele afetados, deve-se verificar se a agência, órgão ou entidade possui competência legal para atuar. O amparo para sua atuação deve ser demonstrado por meio da identificação dos dispositivos de leis, decretos ou outros normativos que lhe atribuam competência sobre o tema do problema e jurisdição sobre todos os atores e grupos afetados (Ministério da Casa Civil, 2018).

Estas etapas mencionadas nos parágrafos acima constituem a primeira fase do modelo que precede o desenvolvimento do framework regulatório, o qual será escrito em linhas gerais, na seção seguinte.

5.4. Descrição da fase 2 - Framework regulatório

O objetivo de uma política define o propósito que a agência, órgão ou entidade pretende alcançar em relação ao problema regulatório identificado. Estes devem estar alinhados às políticas públicas definidas para o setor e ao planejamento estratégico da agência, órgão ou entidade, além disso, devem estar relacionados de forma direta e proporcional ao problema regulatório (Ministério da Casa Civil, 2018). Os objetivos definidos orientarão a análise e a comparação das alternativas de ação mapeadas e servirão de parâmetro para as estratégias de implementação, monitoramento e avaliação política escolhida (Ministério da Casa Civil, 2018).

Já o desenho da política refere-se à caracterização de como realizá-las em um contexto de aplicação (Ministério da Casa Civil, 2018). A estratégia proposta

para a escolha da política consiste na definição da metodologia ou do ferramental que devem ser utilizados para as políticas desenhadas com vistas a escolher àquela preferida (Ministério da Casa Civil, 2018). No que diz respeito à estratégia adotada para escolha da política, ela foi baseada na realização de uma análise multicritério com a utilização dos métodos *AHP -fuzzy-TOPSIS*, a qual será explicada nas seções 5.6 e 5.7, correspondentes à quarta e quinta fase do modelo, respectivamente.

Quanto ao mapeamento das alternativas de ação, tal processo será explicado na seção 5.5, contemplando a identificação das políticas propostas.

5.5.

Descrição da fase 3 - Mapeamento das alternativas de ação

Nesta etapa devem ser levantadas as possíveis alternativas de ação para enfrentamento do problema regulatório e alcance dos objetivos desejados. Para que a AIR seja útil ao processo decisório, é necessário identificar as diferentes possibilidades de se tratar o problema, excluindo as inviáveis, com análise detalhada daquelas que são eficazes (Ministério da Casa Civil, 2018).

Essa fase do modelo é caracterizada pelo mapeamento das alternativas de ação para implementação das políticas regulatórias, ou seja, a fase de identificação das políticas propostas. Tal fase deve ser estruturada em três estágios: planejamento da pesquisa; condução da pesquisa e documentação da pesquisa.

A quarta fase do modelo envolveu a aplicação da ferramenta multicritério *AHP* com fins de realizar uma análise benefício-custo. Tal fase será descrita na próxima seção.

5.6.

Descrição da fase 4 - Análise benefício-custo conduzida com o método AHP

Essa fase consistiu na aplicação do método *AHP* com a finalidade de realizar uma análise benefício-custo, haja vista que sua aplicação foi realizada com vistas a determinar os pesos dos critérios para seleção de políticas públicas.

A relação benefício-custo dessa fase pode ser entendida como o fato de que os critérios que apresentam menor peso tenderem a representar políticas com maiores custos em relação aos seus benefícios, o que pôde ser confirmado ao final

da fase 5 do modelo (seleção da política preferida com o método *fuzzy-TOPSIS*). A confirmação dessa premissa da relação entre os pesos dos critérios e os benefícios e custos das políticas poderá ser vista no capítulo 6 dessa dissertação.

O *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*), é um dos métodos de apoio à decisão mais disseminados, sendo válido tanto para decisões simples quanto em problemas complexos em diferentes áreas com o objetivo de solucionar problemas relacionados à seleção e avaliação subjetiva de alternativas. Esse método foi criado por Thomas L. Saaty na década de 1970.

O fundamento desse método é a decomposição e a síntese das relações entre critérios. Portanto, é possível chegar a uma priorização que estará mais próxima da melhor resposta de medição única (Saaty, 1991). Em linhas gerais, a ideia central da teoria é o estudo de sistemas a partir de uma sequência de comparações aos pares, transformando um problema maior em avaliações mais simples e de menor importância, ou seja, um complexo é dividido em outros menores e a soma das soluções destes um a um, representa a decisão tomada para a solução do problema inicial.

Saaty (1991) reitera que tal método corresponde ao princípio natural de funcionamento da mente humana: quando deparada com muitos elementos, executa comparações e agrupamentos de acordo com determinada propriedade, repetindo esse processo para outros níveis, atingindo seu máximo quando a repetição representa o objetivo do processo decisório, revelando então, a existência de uma estrutura hierárquica (Mello, 2015).

Segundo Saaty (1991), a comparação por pares é a forma mais racional para realizar os julgamentos, haja vista que essa forma captura tanto as medidas objetivas quanto as subjetivas, indicando a intensidade de domínio de uma dada alternativa em relação a outra, ademais, permite a avaliação de aspectos quantitativos e qualitativos do problema, minimizando as falhas nas tomadas de decisões.

Os 3 princípios básicos do método *AHP*, e suas etapas, estabelecidos por Saaty (1991), foram sintetizados por Calili (2018), estes são:

- **Construção de hierarquias** em camadas específicas;
- **Definição de prioridades**, comparando pares à luz de um foco ou critério (julgamentos paritários);
- **Consistência lógica** com o intuito de avaliar o modelo de priorização.

De forma geral, as etapas do método *AHP* podem ser definidas assim:

1. Identificação das alternativas e atributos relevantes;
2. Identificação da significância relativa entre os atributos (pesos);
3. Especificação das preferências para cada um dos pares (atributos e alternativas);
4. Registro das comparações entre os atributos e as alternativas em matrizes na forma de frações entre 1/9 e 9. Cada matriz é avaliada pelo seu autovalor a fim de verificar a coerência dos julgamentos. Esse procedimento gera uma “razão de coerência” que será igual a 1 caso todos os julgamentos sejam coerentes entre si;
5. Cálculo dos valores globais de preferência para cada alternativa.

Os elementos hierárquicos da resolução de problemas de decisão por meio do AHP, segundo Saaty (1991) são a meta (foco principal) que consiste na definição do que o problema trará; o conjunto de critérios, os quais definem as características ou propriedades a partir das quais as alternativas devem ser avaliadas e o conjunto de alternativas viáveis que consistem nas possibilidades de escolha dentro do problema para que a decisão seja tomada.

A figura 10 retrata esses elementos hierárquicos.

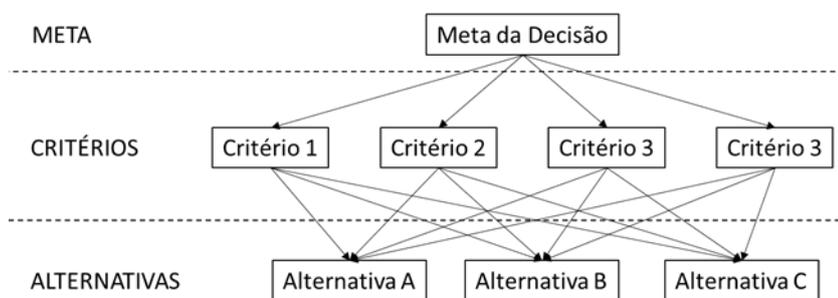


Figura 10 - Estrutura hierárquica do método AHP em problemas de decisão

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Após a hierarquização, o método direciona para os julgamentos de valor, nos quais, o avaliador deve comparar os elementos dois a dois à luz de um determinado critério. O julgamento consiste na representação numérica dessa relação e o grupo de todos os julgamentos, considerando a comparação de todos os elementos em relação a um critério específico, podendo ser representado através de uma matriz quadrada (Saaty, 1991).

A avaliação do nível de importância de cada critério e dimensão nas comparações pareadas foi estruturada por meio de uma escala de 1 a 9, definida por Saaty (1991), a qual, busca capturar a subjetividade existente nos julgamentos dos especialistas. Logo, no julgamento por comparação pareada, os especialistas devem indicar, por meio desta escala, qual dos dois elementos é o mais importante e com qual intensidade, ocorre essa importância, à luz do objetivo pretendido.

O quadro 15 apresenta tal escala.

Quadro 15 - Escala de Saaty para avaliação da importância de dimensões e critérios

1	Mesma importância	Os dois atributos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente um atributo em relação ao outro
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um atributo em relação ao outro
7	Importância muito grande ou demonstrada	Um atributo é muito fortemente favorecido em relação ao outro; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece um atributo em relação ao outro com o mais alto grau de certeza
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes.	Quando se procura uma condição de compromisso entre as duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Tal escala é aplicada na chamada matriz de julgamentos do método *AHP* que possui um exemplo didático definido na figura abaixo .

Matriz A

	A	B	C	D
A	1	5	6	7
B	1/5	1	4	6
C	1/6	1/4	1	4
D	1/7	1/6	1/4	1

Figura 11 - Exemplo didático de matriz de julgamentos AHP

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

A mostra que o critério A é preferível ao critério C, sendo atribuídos ao primeiro, o grau de importância 6 sobre o segundo. Logo, C em relação à A recebe o valor inverso, 1/6, nessa comparação pareada. A partir dessa matriz, podem ser

obtidos, os vetores de prioridades, ou pesos, a partir do cálculo do autovetor normalizado em relação ao máximo autovalor.

Na sequência, ocorre a análise de consistência das matrizes de comparação pareadas, por meio da razão consistência (RC), para se medir quanto os julgamentos foram consistentes em relação às grandes amostras de juízos aleatórios. A Razão de Consistência (RC) é uma medida para avaliar a probabilidade de os julgamentos terem sido realizados puramente ao acaso. Por exemplo, um $RC = 0,4$ indica que há 40% de chance de o especialista responder as perguntas de forma aleatória (Mello, 2015).

$$Aw = \lambda_{max}w \quad 2$$

Onde:

A é a matriz de prioridades; e

w é o vetor de prioridades.

Após calcular λ_{max} , deve-se obter o Índice de Consistência (IC), conforme equação 3, onde “n” é o número de critérios ou alternativas.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad 3$$

Em seguida, determina-se o Índice Randômico (IR) que é um valor tabelado de consistência aleatória, segundo o quadro 16.

Quadro 16 - Índice de consistência aleatória (IR)

Tamanho n	1	2	3	4	5	6	7	8
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40

Fonte: Adaptado de Martins (2017)

Por fim, há o cálculo da Razão de Consistência (RC), dada por:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad 4$$

De acordo com Saaty (1991), a inconsistência é um fato inerente ao ser humano, logo, deve existir uma tolerância para a sua aceitação, sendo proposta a aceitação de julgamentos que gerem uma inconsistência com a razão de consistência $RC < 0,1$.

Mello (2015) definiu que um julgamento pode ser considerado coerente quando $RC \leq 0,1$. Se $0,1 < RC < 0,2$, há um julgamento questionável, devendo ser revisto, buscando melhorar algumas comparações que por ventura, fossem inconsistentes. Porém, se $RC \geq 0,2$, considera-se o julgamento incoerente, ou seja, as comparações pareadas daquela etapa geraram um alto índice de inconsistência e o especialista deve refazer seus julgamentos. Nessa dissertação, foram aceitos valores de $RC \leq 0,1$.

Finalmente, tendo sido obtidos valores de Razão de Consistência aceitáveis, deve-se calcular os pesos relativos de cada dimensão e critério, por meio da multiplicação das matrizes de prioridades, conforme equação 5.

$$F(a) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(a) \quad 5$$

Onde:

$F(a)$ é o valor final de alternativa a ;

w_j é o peso do j -ésimo critério;

v_j é o desempenho da alternativa em relação ao j -ésimo critério.

Todas essas cinco equações apresentadas nessa seção descrevem a quarta fase do modelo. Tal fase será complementada pela aplicação da metodologia *fuzzy-TOPSIS* para fins de seleção da política pública preferida, a qual será descrita na seção seguinte.

5.7.

Descrição da fase 5 - Seleção da política preferida com o método *fuzzy-TOPSIS*

Com base nos critérios definidos na fase anterior do modelo, foi iniciada a fase 5 de seleção da política preferida a partir do uso da metodologia *fuzzy-TOPSIS* na qual, os valores de cada dimensão e critério são fornecidos pelos especialistas.

No modelo *AHP-fuzzy-TOPSIS* desenvolvido, o número *fuzzy* triangular foi adotado como variável para quantificação e operações aritméticas. Contudo, antes de descrever a metodologia desenvolvida nessa fase, deve ser conhecido o conceito sobre lógica *fuzzy*.

Segundo Martins (2017), os números *fuzzy* são advindos de operações matemáticas realizadas a partir de conjuntos *fuzzy*. Um conjunto *fuzzy* F atribui a cada elemento do universo um valor entre 0 e 1, representando o grau de pertinência de um conceito impreciso ao conjunto *fuzzy*. Este valor de pertinência é definido pela equação 6.

$$F = \{(x, \mu(x)) / x \in U\} \quad 6$$

A figura 12 ilustra um conjunto *fuzzy* trapezoidal com domínio constituído pelos números reais; o eixo y representa o grau de pertinência ao conjunto com valores entre 0 e 1 e a curva representa a função de pertinência do conjunto.

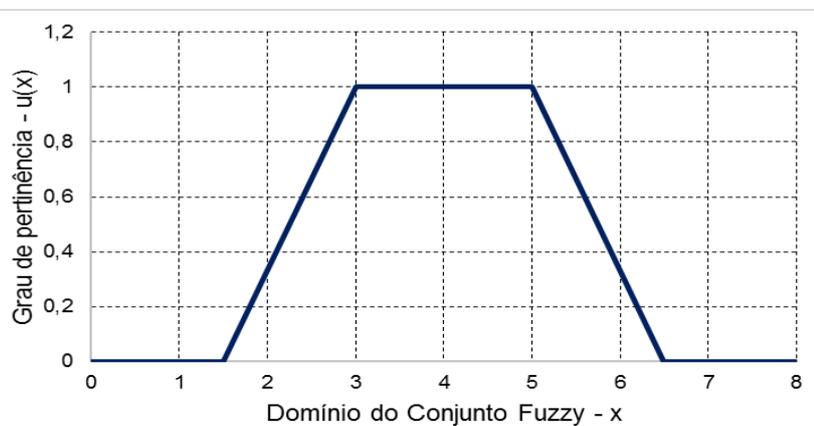


Figura 12 - Conjunto fuzzy trapezoidal

Fonte: Adaptado de Martins (2017)

Um conjunto *fuzzy* deve representar um número *fuzzy*, segundo Martins (2017), caso esteja definido no conjunto dos números reais, possua uma função de pertinência contínua, seja normalizado e convexo.

Souza (2010) definiu que os números *fuzzy* mais comuns são os triangulares, gaussianos e trapezoidais. Um número *fuzzy* triangular mostrado na figura 13, deve ter função de pertinência da seguinte forma:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x \geq a_3 \end{cases} \quad 7$$

Na figura 13, o eixo x contém os parâmetros que definem o triângulo (a_1 , a_2 , a_3) e o eixo y representa o grau de pertinência para cada valor de x .

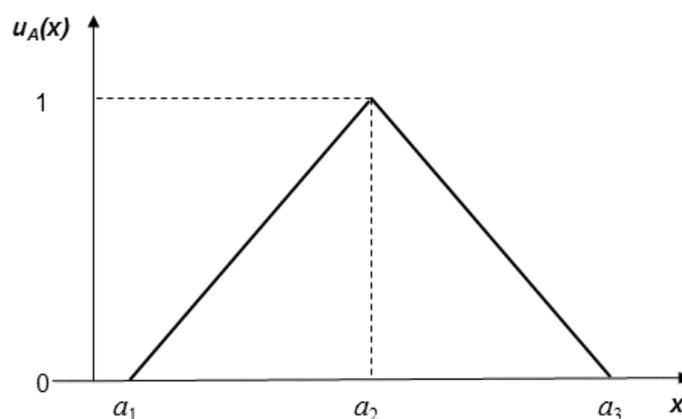


Figura 13 - Número fuzzy triangular

Fonte: Adaptado de Martins (2017)

O número *fuzzy* triangular foi escolhido por representar os dados utilizados neste trabalho mais adequadamente, da mesma maneira desenvolvida por Perera, *et al.* (2013), Martins (2017), Trindade (2017) e Alipour, *et al.* (2018).

Propõe-se que a método *fuzzy* TOPSIS seja utilizado por sua incerteza inerente ao ambiente de decisão, segundo Chen (2000). Para essa classificação vaga e subjetiva, costuma-se utilizar a escala Likert de cinco pontos, mostrada no quadro 17, segundo a qual, cada ponto representa um nível de maturidade, e consequentemente, cada nível recebe um valor numérico triangular *fuzzy*, conforme proposto por Martins (2017) cujo trabalho serviu de parâmetro para o equacionamento do método híbrido *fuzzy* TOPSIS aqui descrito.

Quadro 17- Termos linguísticos e respectivos valores numéricos para os critérios qualitativos

Descrição	Grau de aplicação da política pública
Muito baixa (MB)	1
Baixa (B)	2
Média (M)	3
Alta (A)	4
Muito alta (MA)	5
Não aplicável (NA)	-

Fonte: Adaptado de Chen (2000)

O emprego do método *fuzzy* TOPSIS também requer a participação de especialistas (decisores) para julgar o grau de atendimento de cada indicador aos critérios de decisão previamente ponderados pelo método *AHP* (Chen, 2000).

A literatura não define uma quantidade mínima de especialistas a serem consultados, sendo desejável o maior número possível, para encontrar avaliações mais robustas. Porém essas consultas devem ser direcionadas para os quais realmente entendam do assunto estudado e que tenham disponibilidade de responder a mesma adequadamente, não comprometendo a qualidade dos julgamentos (Chen, 2000).

A fase de aplicação do modelo irá utilizar a escala concebida por Chen (2000) para emprego do método *fuzzy* TOPSIS em ambientes de incerteza. Tal fase possui as seguintes etapas:

- Cálculo das matrizes fuzzy de avaliação usando o conjunto de TFNs (*triangular fuzzy numbers*);
- Definição da solução ideal positiva (FPIS) e negativa (FNIS) e definição das distâncias FPIS (D+) e FNIS (D-);
- Determinação da proximidade relativa do valor ideal;
- Ranking das alternativas de políticas públicas;
- Justificativa da política escolhida.

Após o recebimento das notas dadas pelos especialistas, converte-se seus valores para números triangulares *fuzzy*, conforme o quadro 18 proposto por Chen (2000), porém com outra escala *fuzzy* triangular.

Quadro 18 -Termos linguísticos e correspondentes números fuzzy triangulares para avaliação quantitativa dos indicadores

Grau de atendimento ao critério	Termo linguístico	Escala fuzzy triangular
1	Muito baixa (MB)	(1, 1, 1)
2	Baixa (B)	(1, 2, 3)
3	Média (M)	(1, 3, 2)
4	Alta (A)	(2, 4, 3)
5	Muito alta (MA)	(5, 5, 5)

Fonte: Adaptado de Chen (2000)

Números *fuzzy* triangulares foram incorporados aos termos linguísticos fornecidos pelos especialistas. A equação 8 foi utilizada para agregar as pontuações atribuídas às alternativas de políticas públicas (A_i).

Nessa equação, o termo \tilde{X}_{ij} refere-se ao grau de atendimento ao critério C_j ($j = 1, \dots, m$), atribuído à alternativa A_i ($i = 1, \dots, n$), avaliado pelo decisor DM_r ($r = 1, \dots, k$).

As avaliações dos pesos dos critérios são agregadas por meio da equação 9, na qual, \tilde{W}_j corresponde ao peso do critério, dado por DM_r .

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^r + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad 8$$

$$\tilde{W}_j = \frac{1}{K} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k] \quad 9$$

A partir dos termos linguísticos e respectivos valores *fuzzy*, a matriz de decisão *fuzzy* \tilde{D} é construída, conforme a equação 10.

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & \tilde{x}_{ij} & \dots & \tilde{x}_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \dots & \tilde{x}_{nj} & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad 10$$

Onde A_n são as alternativas de políticas públicas e x_{mm} são os valores apontados pelos especialistas.

Na sequência, a matriz \tilde{D} foi normalizada, utilizando-se uma escala de transformação linear. A matriz normalizada \tilde{R} é dada pela equação 11, sendo \tilde{r}_{ij} obtido por meio das equações 12 ou 13 (referentes aos casos de critérios de benefício ou de custo).

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad 11$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right) \quad 12$$

sendo $u_j^+ = \max_i u_{ij}$ (critérios de benefício)

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right) \quad 13$$

e $l_j^- = \min_i l_{ij}$ (critérios de custo)

Para a construção da matriz normalizada e ponderada \tilde{V} , foi utilizada a equação 14, por meio da multiplicação dos pesos \tilde{w}_j pelos elementos \tilde{r}_{ij} da matriz normalizada, conforme a equação 15.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad 14$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_j \quad 15$$

O próximo estágio da aplicação do método *fuzzy TOPSIS* foi calcular a solução ideal positiva *fuzzy* (*Fuzzy Positive Ideal Solution*, FPIS, A^+) e a solução ideal negativa (*Fuzzy Negative Ideal Solution*, FNIS, A^-), segundo as equações 16 e 17, nas quais, $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$ e $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$.

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_j^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \quad 16$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad 17$$

O cálculo da distância D_i^+ entre os valores de FPIS e as pontuações das alternativas da matriz \tilde{V} foi realizado conforme a equação 18. De forma análoga, o cálculo da distância D_i^- entre os valores FNIS e as pontuações das alternativas foi efetuado de acordo com a equação 19.

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad 18$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad 19$$

$$d(\tilde{x}, \tilde{z}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(l_x - l_z)^2 + (m_x - m_z)^2 + (u_x - u_z)^2]} \quad 20$$

Para cada um dos indicadores avaliados, foi calculado o coeficiente de aproximação CC_i a partir dos valores obtidos para a FPSIS e a FNIS, de acordo com a equação 21.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad 21$$

Por fim, foi obtida a hierarquização das alternativas para cada um dos critérios do modelo, pela ordem decrescente dos valores de CC_i . Quanto mais próximo de 1,0 for valor, melhor é o grau de atendimento do indicador aos critérios de decisão.

As equações descritas nessa seção representaram a quinta fase do modelo utilizada para seleção da política pública preferida. A última fase da análise de impacto regulatório, a qual, corresponde ao monitoramento e avaliação da política selecionada será apresentada na seção 5.8.

5.8.

Descrição da fase 6 - Monitoramento e avaliação da política

Esta fase deve apresentar uma estratégia para o monitoramento dos resultados da alternativa de ação recomendada, caso implementada, indicando como a agência, órgão ou entidade acompanhará se as metas planejadas estão sendo atingidas, com a exibição de indicadores de desempenho para a alternativa escolhida (Ministério da Casa Civil, 2018).

A relação de indicadores não precisa ser extensa, pelo contrário, deve-se focar nos indicadores relevantes para a verificação do desempenho da ação implementada. Os indicadores devem ser compreensíveis e os dados ou informações necessárias para o cálculo deste devem estar disponíveis ou podem ser obtidos sem prejudicar sua viabilidade (Ministério da Casa Civil, 2018).

A descrição dos indicadores compreende as seguintes informações (Ministério da Casa Civil, 2018): elemento a ser mensurado (o que se planeja medir); informação do indicador (com a métrica do mesmo); medição do cenário inicial de referência para o indicador; denominação da área responsável pelo acompanhamento destes; indicação das fontes de dados para os seus cálculos; indicação da frequência da coleta de dados; determinação da frequência de cálculo do indicador para monitoramento adequado; definição de meta para o indicador e estipulação de uma data alvo para atingir tal meta.

Seguindo o resultado obtido na fase 5 decorrente da aplicação da metodologia *AHP-fuzzy-TOPSIS*, determina-se a política preferida a partir dos resultados da análise multicritério, sendo a mesma, àquela identificada com a maior pontuação nos resultados. Para essa determinada política escolhida, são estabelecidos os possíveis indicadores associados respectivas métricas. Esta fase, neste trabalho, contemplou apenas a definição de indicadores e suas métricas para fins de indicação no apoio à possível implementação da política escolhida.

5.9.

Considerações sobre o capítulo

O presente capítulo apresentou o modelo de análise de impacto regulatório para a avaliação e seleção de políticas públicas. Em relação ao modelo, por se tratar de uma AIR, foi necessário apresentar esse conceito, com base nas definições estabelecidas por OCDE. (2021) e OCDE. (2020) na literatura internacional e por Ministério da Casa Civil. (2018).

As fases 1, 2 e 3 contemplaram as definições estabelecidas pelo Ministério da Casa Civil (2018) relativo ao ciclo regulatório onde foi possível identificar o problema regulatório, determinar atores afetados, identificar a base legal para atuação do órgão regulador das políticas, definir os objetivos desejados com as políticas regulatórias desenhadas e mapear as alternativas de ação.

Em relação às fases 4 e 5, para a descrição destas, foi necessário primeiro definir conceitos das metodologias *AHP* e *fuzzy TOPSIS*, pois havia a necessidade de explicar matematicamente, como foi realizado o desenvolvido da análise multicritério que foi executada no *EXCEL*. Sendo assim, com base nos conceitos estabelecidos por Zadeh (1965); Saaty (1991); Chen (2000); Souza (2010); Mello (2015); Muller (2016) e Martins (2017), foi possível definir os conceitos teóricos e o equacionamento da fase 4 da modelagem que utilizou o método *AHP* (análise custo benefício das políticas) e da fase 5 do modelo proposto com auxílio do modelo *fuzzy-TOPSIS*, para a seleção da melhor política, segunda a opinião dos especialistas consultados.

A Fase 4 contemplou a definição dos pesos dos critérios, que trazem as informações relativas aos custos e benefícios das alternativas. Já na fase 5, foi utilizada a ferramenta *fuzzy TOPSIS* para a escolha das alternativas de políticas.

Por fim, a descrição da sexta fase do modelo envolveu a elucidação em linhas gerais de como foram definidos os indicadores para monitoramento e avaliação da política escolhida. O capítulo a seguir apresentará os resultados obtidos nas seis fases desenvolvidas para o modelo de AIR para avaliação e seleção de políticas públicas, com a discussão dos resultados obtidos.

6. Demonstração da aplicabilidade do modelo para seleção de políticas públicas

Este capítulo visa demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto para um caso específico: seleção de políticas públicas com vistas a promover à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Assim, pode-se realizar uma validação do modelo conceitual proposto no capítulo anterior. Para tal objetivo, há a descrição do processo de análise impacto regulatório (AIR) efetuado para fins de seleção e avaliação e seleção de políticas públicas. Ocorre também, a descrição da coleta de dados realizada por meio do instrumento submetido aos especialistas, a análise e formatação destes dados em cada etapa do modelo e, por fim, a discussão dos resultados encontrados.

6.1 Coleta dos dados

A coleta de dados foi realizada com especialistas de diferentes instituições do setor elétrico (empresas privadas, empresas públicas e universidades). Esta foi realizada em duas etapas: a primeira definiu os pesos das dimensões e critérios adotados; e a segunda determinou o desempenho dos atributos relacionados às alternativas de políticas públicas, considerando as quatro dimensões e os onze critérios definidos na seção 4.3.

A primeira etapa foi realizada pelo autor desta dissertação e seu orientador por meio de simulações com o software IPÊ onde foi aplicada o método AHP para definição dos pesos das dimensões e critérios. Os critérios definidos foram agrupados em quatro dimensões: (i) econômica; (ii) técnica; (iii) política e; (iv) robustez.

As definições de cada uma das dimensões são apresentadas a seguir:

- ✓ Econômica: impactos econômicos diretos e indiretos na sociedade, decorrentes da adoção de determinada política pública.

✓ Técnica: avalia o impacto das mudanças da matriz energética brasileira provocados por propostas de políticas públicas.

✓ Política: Dimensão que avalia o alinhamento das propostas de políticas públicas com o cenário político global e setorial, o nível de exposição às influências políticas que possam distorcê-las ou prejudicar à aplicação destas.

✓ Robustez: Aqui é avaliado o poder das políticas propostas, ou seja, se a aplicação destas é factível e razoável e se seus efeitos podem ser mensurados para garantir os resultados desejados.

Na segunda etapa, foi elaborado um formulário de consulta aos especialistas do setor elétrico (empresas públicas; empresas privadas e universidades). O formulário foi submetido à dezoito especialistas, dos quais, sete responderam à consulta, avaliando as cinco políticas públicas e os onze critérios propostos.

Para o instrumento de coleta de dados, utilizou-se uma escala Likert de cinco pontos, de forma a obter a opinião dos especialistas quanto ao desempenho de cada uma das 5 políticas a luz dos 11 critérios propostos. A escala é a seguinte: muito baixo; baixo; moderado; alto; muito alto. Foi dada ainda a opção “não aplicável” (NA), caso o especialista consultado entendesse que a política avaliada não se aplicava a determinado critério ou que não apresenta relação com este.

A estrutura hierárquica desenvolvida nas duas etapas da coleta de dados, com as dimensões e critérios definidos é apresentada no quadro 19.

Quadro 19 - Estrutura hierárquica do instrumento de coleta de dados

Dimensões	Critérios
Econômica	E ₁ - Custo para a sociedade
	E ₂ - Potencial de transformação do mercado
	E ₃ Aumento de subsídios e encargos
Técnica	T ₁ - Confiabilidade
	T ₂ - Integração com outras fontes de geração energética
Política	P ₁ . Alinhamento às políticas nacionais
	P ₂ - Governança pública e sustentabilidade do setor
Robustez	R ₁ - Dificuldade de implementação
	R ₂ - Experiência prévia
	R ₃ - Possibilidade/ facilidade de monitorar e avaliar as políticas
	R ₄ - Impactos previstos

Fonte: Elaboração própria

A partir do resultado da coleta de dados, foram realizadas as etapas de formatação, análise e apresentação dos resultados, as quais serão apresentadas na seção 6.2.

6.2 Formatação, análise e apresentação dos resultados

Os resultados da etapa de coleta produziram uma série de dados a respeito das políticas públicas sugeridas com vistas a promover à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, políticas a serem hierarquizadas conforme o modelo proposto no capítulo 5.

Com estes dados, foi efetuada uma análise preliminar dos julgamentos dos especialistas, considerando as razões de consistência resultantes das comparações pareadas dos critérios (primeira etapa) e, no caso da segunda etapa, foram analisadas a frequência e a dispersão das notas atribuídas pelos especialistas a cada política à luz de cada critério. Dessa forma, foi possível compor os desempenhos das dimensões avaliadas. Na sequência, os resultados desta análise preliminar foram formatados para aplicação propriamente dita do modelo em duas fases: (i) AHP; e (ii) fuzzy-TOPSIS, as quais terão seus resultados apresentados nas seções 6.2.4 e 6.2.5.

Entretanto, antes da apresentação desses resultados presentes nas seções 6.2.4 e 6.2.5, serão apresentados os que fazem referência às primeiras etapas do modelo. A seção 6.2.1 retrata os resultados da primeira etapa do modelo (definição do problema regulatório).

6.2.1 Fase 1 - Definição do problema

Em um contexto de inserção cada vez maior de fontes de geração de energia intermitente, o problema regulatório definido é identificação de cenários regulatórios que viabilizem a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Para tanto, foram definidas as seguintes políticas: (i) criação de um mercado de capacidade; (ii) criação de um mercado de flexibilidade; (iii) implementação de um leilão de capacidade; (iv) implementação de um leilão multiatributos; e (v) implementação de uma política de incentivos.

Quanto à natureza e ao alcance das políticas, estas são de natureza pública e o seu alcance está direcionado para o setor elétrico brasileiro, com a definição de alterações no marco regulatório para a inserção de sistemas de armazenamento de energia.

Em relação às falhas de mercado, para a realidade brasileira, as principais identificadas foram as barreiras de mercado, que estão explicitadas em EPE (2021), tais como a definição de novos modelos de negócio e a abertura do mercado livre de energia para a competição plena entre diversas tecnologias de geração e/ou armazenamento.

Sobre os atores afetados pelas políticas propostas, podem ser listados: governos, órgãos reguladores, geradores, consumidores, comercializadores, transmissoras, distribuidoras, operador do sistema, câmara de comercialização, fabricantes das tecnologias, bancos, investidores, etc. Não foi feita uma aproximação direta com todos os atores envolvidos, alguns deles foram ouvidos e responderam o instrumento de coleta de dados.

Em relação aos normativos existentes, há Tomada de Subsídios nº 11 de 2020 definida pela ANEEL, fomentado pela nota técnica nº 094/ 2020 que buscava obter contribuições para as adequações regulatórias necessárias à inserção de sistemas de armazenamento de energia no Sistema Interligado Nacional

Além disso, há outros documentos publicados por outros órgãos do setor elétrico que são voltados para esses sistemas, tais como a Nota Técnica nº 006/2019 da EPE que apresenta estudos de inventário para usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, contribuindo com a etapa inicial de vários estudos necessários para subsidiar outros estudos de planejamento da expansão do sistema elétrico e auxiliando na definição de aspectos regulatórios específicos para inserção de usinas reversíveis no Sistema Interligado Nacional.

Ademais, o estudo desenvolvido pela EPE no ano de 2021, a Nota Técnica nº 013/2021, busca apresentar os desafios e barreiras para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis em mercados de energia elétrica, a partir da experiência internacional. Dessa forma, a EPE por meio dessa revisão da literatura realizada e com algumas premissas colocadas no documento, contribui para a alterações no marco regulatório do setor elétrico brasileiro.

De forma geral, os três documentos podem apoiar na definição das políticas aqui propostas que serão submetidas a escrutínio de alguns especialistas do setor elétrico, em fases posteriores do modelo proposto

De posse do objetivo proposto, foi possível traçar o framework regulatório das políticas propostas, o qual será apresentado na próxima seção.

6.2.2.

Fase 2 - Framework regulatório

O objetivo das políticas regulatórias apresentadas no tópico 3.2 é possibilitar a identificação de cenários regulatórios que viabilizem a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis na matriz elétrica brasileira, em um contexto de inserção cada vez maior de fontes de geração de energia intermitente, contribuindo para a diversificação dessa matriz elétrica brasileira. Além disso, tais cenários regulatórios, caso sejam regulamentados, possibilitarão maiores níveis de confiabilidade na segurança e no planejamento da operação do setor elétrico brasileiro.

Quanto ao desenho das políticas, este foi fundamentado de acordo com Ministério da Casa Civil (2018), logo, foram mapeadas alternativas regulatórias denominadas na literatura internacional como “regulação responsiva”, isto é, capazes de englobar diferentes comportamentos de modo dinâmico.

Em relação à estratégia proposta, a partir das políticas definidas, foi necessário avaliar se estas eram válidas para o contexto do objetivo de inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Os resultados desta estratégia estão agrupados em duas fases: i) Envio do formulário aos especialistas para avaliação das políticas propostas e definição dos pesos dos critérios e dimensões com o método *AHP*; ii) Utilização do ferramental *fuzzy-TOPSIS* para seleção da política preferida. Tais resultados serão explicados nas seções 6.2.4 e 6.2.5, pois estão diretamente relacionados com os que são decorrentes da aplicação destas metodologias.

A seção a seguir trata da apresentação dos resultados relativos à terceira fase do modelo (mapeamento das alternativas de ação).

6.2.3.

Fase 3 - Mapeamento das alternativas de ação

O mapeamento das alternativas de ação foi realizado por meio da identificação das políticas propostas realizada nos estágios de planejamento, condução e documentação da pesquisa.

O planejamento da pesquisa pode ser desenvolvido a partir de uma revisão da literatura internacional, seguida por um estudo documental internacional. Por fim, houve a seleção dos artigos e/ou documentos mais relevantes a fim de elaborar propostas regulatórias voltadas à inserção de UHRs no Brasil.

Por sua vez, a condução da pesquisa foi determinada pela pesquisa de artigos realizada na base de dados (*SCOPUS*). Feito isso, seus resultados foram restringidos para que fossem encontrados, artigos e/ou documentos de revisão da literatura. Com a análise desses artigos, foi então realizada uma outra pesquisa de documentos publicados por agentes do setor elétrico brasileiro que tratassem de armazenamento de energia e/ou usinas hidrelétricas reversíveis.

Essa pesquisa documental foi complementada por outra do mesmo estilo, porém, realizada nos sites dos ministérios do governo brasileiro. Uma vez analisados todos os documentos (literatura internacional e nacional), foi elaborado o último estágio dessa terceira fase do modelo, o qual, compreende a divulgação da pesquisa.

A divulgação da pesquisa foi realizada em um momento inicial, com a apresentação e discussão sobre artigos de revisão da literatura e documentos. Posteriormente, foram elaboradas as propostas regulatórias para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Esse estágio foi finalizado com as conclusões da pesquisa e recomendações para trabalhos futuros.

Identificadas as políticas propostas a partir destes três estágios, elas foram analisadas por meio da metodologia *AHP* para definição dos pesos dos critérios definidos. Os resultados dessa fase serão mostrados na seção 6.2.4.

6.2.4.

Fase 4 - Análise benefício-custo conduzida com o método *AHP*

Conforme ressaltado na seção 5.6, há a necessidade de atribuir pesos aos critérios (sejam de custos ou de benefícios) previamente estabelecidos. Para isso,

fez-se a comparação pareada entre as dimensões e entre os critérios de uma mesma dimensão. Os critérios referem-se às quatro dimensões adotadas, conforme a estrutura hierárquica da figura 14.

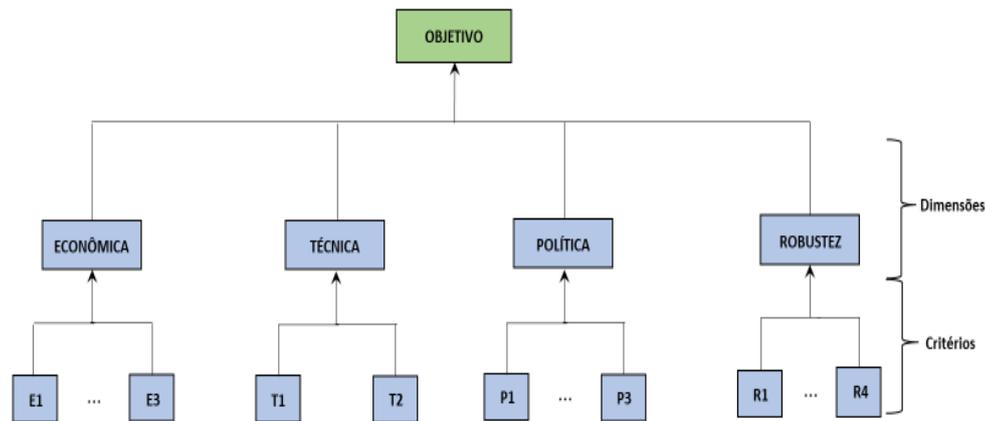


Figura 14 - Estrutura hierárquica para o modelo de avaliação e seleção de políticas públicas voltadas à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil

Fonte: Elaboração própria

Com base na definição desta estrutura hierárquica apresentada acima, foi efetuada a comparação pareada entre dimensões e critérios, considerando a opinião dos especialistas consultados por meio do formulário para avaliação de políticas. O quadro abaixo representa o resultado da comparação pareada entre dimensões. Este quadro foi elaborado pelo software IPÊ que realizou um grau de julgamento de importância entre as dimensões definidas para o estudo dessa dissertação. Por exemplo, a partir da estrutura hierárquica, o software definiu graus de importância (fraco até muito forte) na comparação entre dimensões à luz das políticas públicas definidas.

A dimensão política, por exemplo, apresentou um julgamento entre igual e moderada (grau 2) em relação à econômica. Já para a dimensão robustez, a política apresentou mesmo grau de importância (grau 1).

Quadro 20 - Julgamento relativo do grau de importância entre dimensões

*Preferência				1	2	3	4	5	6	7	8	9
Política	X	Econômica			X							
Política	X	Técnica			X							
Política	X	Robustez		X								
Robustez	X	Econômica		X								
Robustez	X	Técnica			X							
Robustez		Política	X	X								
Técnica		Econômica	X	X								
Técnica		Política	X		X							
Técnica	X	Robustez			X							

Fonte: Elaboração própria

Já no quadro 21 apresenta o julgamento relativo do grau de importância entre os critérios definidos.

Quadro 21 -Julgamento relativo de grau de importância entre os critérios

Dimensões		Critérios / Preferência		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Econômica		E ₁ - Custo para a sociedade	X E ₂ - Potencial de transformação do mercado			X						
		E ₁ - Custo para a sociedade	X E ₃ - Aumento de subsídios/encargos		X							
	X	E ₂ - Potencial de transformação do mercado	E ₃ - Aumento de subsídios/encargos		X							
Técnica	X	T1 - Confiabilidade	T2 - Integração com outras fontes de geração energética			X						
Política	X	P ₁ - Alinhamento às políticas nacionais	P2 - Governança pública e sustentabilidade do setor		X							
Robustez		R1 - Dificuldade de implementação	X R2 - Experiência prévia		X							
	X	R1 - Dificuldade de implementação	R3 - Possibilidade/ facilidade de monitorar e avaliar as políticas		X							
	X	R1 - Dificuldade de implementação	R4 - Impactos previstos	X								
	X	R2 - Experiência prévia	R3 - Possibilidade/ facilidade de monitorar e avaliar as políticas			X						
	X	R2 - Experiência prévia	R4 - Impactos previstos		X							
		R3 - Possibilidade/ facilidade de monitorar e avaliar as políticas	X R4 - Impactos previstos		X							

Fonte: Elaboração própria

Pela análise do quadro 20 e do quadro 21, foi possível notar que nenhuma comparação pareada resultou em grau de importância maior que 5, o que equivaleria a uma importância muito grande ou absoluta. Dessa forma, pode-se perceber uma certa equivalência de importâncias, dificultando a comparação e requerendo o uso de ferramentas adequadas para a avaliação.

Finalizada a etapa de registro das comparações pareadas, verifica-se a coerência dos julgamentos dos especialistas, por meio da Razão de Consistência (RC), que permite estimar o grau de ocasionalidade nos julgamentos (Mello, 2015). Para tanto, foi utilizado o software IPÊ, versão 1.0, desenvolvido pela Universidade Federal Fluminense (UFF), com o objetivo de implementar o algoritmo do AHP. O uso desse software facilitou a análise, dado que em um primeiro momento algumas matrizes de comparação não se mostraram consistentes ($RC > 0,10$), levando à reavaliação dos julgamentos pelos especialistas, de modo rápido. A tabela 1 mostra as razões de consistência encontradas, todas com $RC \leq 0,1$.

Tabela 1 - Razão de consistência das matrizes de dimensões e critérios

Dimensões	Razão de Consistência (RC)
Hierarquização de políticas públicas	0,022
Econômica	0,046
Técnica	0,000
Política	0,000
Robustez	0,081

Fonte: Elaboração própria

Após o cálculo das razões de consistência, são obtidos os pesos das dimensões e critérios pelo método AHP, calculados pelo método descrito na seção 5.6 e apresentados na tabela 2. Os pesos finais, resultantes da multiplicação dos pesos dos critérios pelos pesos das respectivas dimensões serão utilizados na fase fuzzy-TOPSIS a fim de hierarquizar as alternativas de políticas públicas para a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.

Tabela 2 - Pesos das dimensões e critérios calculados pelo método AHP

Dimensão	Peso da dimensão	Critério	Peso Critério	Peso Final
Econômica	0,205	E ₁	0,198	0,04
		E ₂	0,490	0,10
		E ₃	0,312	0,06
Técnica	0,169	T1	0,750	0,13
		T2	0,250	0,04
Política	0,338	P1	0,667	0,23
		P2	0,333	0,11
Robustez	0,288	R ₁	0,269	0,08
		R ₂	0,381	0,11
		R ₃	0,128	0,04
		R ₄	0,222	0,06

Fonte: Elaboração própria

A dimensão de maior peso foi a “Política”, o que mostra a importância atribuída pelos especialistas aos fatores como alinhamento às políticas nacionais e governança pública e sustentabilidade do setor com vistas a promover a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil de forma bem-sucedida. Dentre os critérios desta dimensão, o critério P1 (“Alinhamento às políticas nacionais”) apresenta o dobro do peso em relação ao critério P2 (“Governança pública e sustentabilidade do setor”), o que denota um grau de preferência moderado do primeiro critério em relação ao segundo.

A segunda dimensão com maior peso foi a Robustez, seguida pela dimensão Econômica. Na dimensão Econômica, o peso do critério E2 (“Potencial de transformação do mercado”) apresentou destaque, considerando a capacidade da inserção de sistemas de armazenamento de energia, em especial, usinas hidrelétricas reversíveis criarem novas oportunidades e/ou modelos de negócios no setor elétrico brasileiro, levando em conta, as discussões atuais para abertura do mercado livre de energia elétrica.

O quarto maior peso foi atribuído à dimensão Técnica, com destaque para o critério T1 (“Confiabilidade”), demonstrando a preocupação dos especialistas com a capacidade das usinas hidrelétricas reversíveis promoverem melhorias na segurança do suprimento de energia elétrica para o cenário de planejamento e operação do sistema elétrico. As UHRs são capazes de prover garantia física e lastro de capacidade ao sistema elétrico, além de poderem realizar uma gama de serviços ancilares, fatores esses que permitem aumento de confiabilidade neste sistema.

Com relação aos pesos finais, destacam-se os critérios T1 (“Confiabilidade”) e P1 (“Alinhamento às políticas nacionais”), o que indica uma preocupação dos avaliadores em relação à segurança no suprimento e com a regulação das políticas propostas, tendo em vista que devem estar em conformidade com os normativos já existentes no marco regulatório atual do setor elétrico.

Tendo os pesos calculados, pode-se realizar a seleção da política pública preferida, processo que terá seus resultados apresentados na seção 6.2.5.

6.2.5.

Fase 5 - Seleção da política preferida com o método *fuzzy-TOPSIS*

Nesta fase, a seleção das políticas é feita a partir da implementação de um modelo fuzzy-TOPSIS. Assim, as políticas são avaliadas pelos especialistas ouvidos à luz dos critérios apresentados anteriormente. As respostas dos sete especialistas consultados foram consolidadas, contabilizando a quantidade de votos para cada opção, utilizando a escala Crisp, apresentada no Quadro 17 da seção 5.7, a qual corresponde ao grau de importância de cada uma das políticas públicas avaliadas (apresentadas no capítulo 3), à luz de determinado critério, conforme exemplo mostrado na tabela 3.

Dentre os especialistas consultados, houve a sugestão de uma política pública por um destes, embora esta não tenha sido avaliada com base nos critérios propostos. A política pública sugerida foi a seguinte: Harmonização com políticas regionais e da gestão de bacias hidrográficas.

A preocupação deste especialista era que a inserção de plantas de usinas hidrelétricas reversíveis pudesse provocar alterações nas políticas gestão das bacias hidrográficas e modificar os aspectos de usos consultivos da água, além de poder afetar a população local.

A tabela 3 apresenta um exemplo de consolidação de respostas dos especialistas.

Tabela 3 - Exemplo de consolidação de respostas dos especialistas

R1- Dificuldade de implementação						
Política Pública	Muito baixa (1)	Baixa (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muito alta (5)	NA
Mercado de capacidade	0	0	3	3	1	0
Mercado de flexibilidade	0	0	3	2	2	0
Leilão multiatributos	0	2	4	0	1	0
Leilão de capacidade	0	5	2	0	0	0
Política de incentivos	2	0	3	2	0	0

Fonte: Elaboração própria

Para o exemplo acima, os sete especialistas julgaram as cinco políticas à luz do critério R1 (“Dificuldade de implementação”). Um especialista entendeu que a implantação da política do mercado de capacidade possui uma dificuldade muito alta (grau 5), enquanto outros três definiram uma alta dificuldade (grau 4) para viabilização de tal política. Contudo, outros três destes enxergaram a política com grau moderado de dificuldade (grau 3) em sua implementação, por sua vez, para o caso do leilão multiatributos, dois especialistas apontaram baixa dificuldade para consolidar essa política no setor elétrico brasileiro. Todavia, outros quatro especialistas avaliaram que tal política teria moderada dificuldade para fins de regulação enquanto um destes acredita ser muito difícil que tal política se torne realidade.

No exemplo da tabela 3, para cada política pública, os campos marcados de amarelo correspondem aos de maior frequência, ou seja, que mais votos tiveram, no modelo adotado. Os campos de cor rosa representam os menores valores registrados na escala Likert adotada. Já os campos sem preenchimento indicam valores intermediários desta escala. Para cada um dos onze critérios avaliados foi elaborado uma tabela similar à tabela 3.

A definição dos graus de importância foi ajustada para cada critério com o intuito de sempre representar uma ordem de benefício. No exemplo acima, por se tratar do critério dificuldade de implementação, o grau 5 representada alta dificuldade e o grau 1, pouca dificuldade, o que significa que para esse critério exemplificado, a escala de Likert foi invertida, pois o critério representava um fator “custo”, porém, tal processo de inversão não foi realizado para alguns dos outros critérios, haja vista que estes representam benefícios, por exemplo, os critérios econômicos e técnico (“Potencial de transformação de mercado”; “Integração com outras fontes de geração energética”). Para estes, o grau 5 indicava importância

muito alta e o grau 1, baixa importância, ou seja, a avaliação máxima indicaria maiores benefícios desses critérios enquanto uma avaliação baixa denotaria que os mesmos não seriam tão benéficos.

Para definir os parâmetros a_1 , a_2 e a_3 do número *fuzzy* triangular, mostrados na figura 13, adotou-se o valor de a_1 com menor importância, ou seja, menos votos, a_2 , o valor considerado a mediana da amostra, a fim de obter maior precisão dos resultados e a_3 , aquele de maior importância. Ainda tomando o exemplo do quadro 17 como parâmetro, o valor de a_1 seria 2 (menos votos), enquanto que a_2 seria 3, o valor correspondente à mediana dos dados e a_3 seria 5, o valor com mais votos.

A partir dessa definição foram formados os números *fuzzy* triangulares para cada alternativa/critério, resultando na matriz de decisão *fuzzy* vista na tabela 4.

Tabela 4 - Matriz de decisão fuzzy das políticas públicas versus critérios

\tilde{D}	Mercado de capacidade			Mercado de flexibilidade			Leilão multiatributos			Leilão de capacidade			Política de incentivos		
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
E1	1	3	4	1	3	3	2	3	4	2	3	4	4	5	5
E2	3	4	5	3	4	5	3	4	5	2	3	5	2	3	4
E3	1	3	3	1	3	4	1	3	3	1	3	4	3	4	5
T1	3	4	5	3	4	4	2	3	5	3	4	5	1	3	4
T2	2	4	4	3	4	4	2	4	5	2	4	4	1	2	4
P1	1	4	4	1	4	4	2	3	5	2	3	4	1	3	5
P2	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	5	5	1	2	5
R1	3	4	5	3	4	5	2	3	5	2	2	3	1	3	4
R2	1	3	4	1	2	4	2	3	4	3	4	5	2	4	5
R3	3	3	4	1	3	4	2	4	4	4	4	4	1	2	4
R4	3	3	4	3	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	5

Fonte: Elaboração própria

Conforme explicado na seção 5.7, a matriz \tilde{D} deve ser normalizada, utilizando-se uma escala de transformação linear (equações 12 e 13). A matriz normalizada é mostrada na tabela 5.

Tabela 5 - Matriz de decisão fuzzy normalizada

D	Mercado de capacidade			Mercado de flexibilidade			Leilão multiatributos			Leilão de capacidade			Política de incentivos		
	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃
E1	0,2	0,6	0,8	0,2	0,6	0,6	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,8	1,0	1,0
E2	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,4	0,6	1,0	0,4	0,6	0,8
E3	0,2	0,6	0,6	0,2	0,6	0,8	0,2	0,6	0,6	0,2	0,6	0,8	0,6	0,8	1,0
T1	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	0,8	0,4	0,6	1,0	0,6	0,8	1,0	0,2	0,6	0,8
T2	0,4	0,8	0,8	0,6	0,8	0,8	0,4	0,8	1,0	0,4	0,8	0,8	0,2	0,4	0,8
P1	0,2	0,8	0,8	0,2	0,8	0,8	0,4	0,6	1,0	0,4	0,6	0,8	0,2	0,6	1,0
P2	0,4	0,8	1,0	0,4	0,8	1,0	0,4	0,8	1,0	0,4	1,0	1,0	0,2	0,4	1,0
R1	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,4	0,6	1,0	0,4	0,4	0,6	0,2	0,6	0,8
R2	0,2	0,6	0,8	0,2	0,4	0,8	0,4	0,6	0,8	0,6	0,8	1,0	0,4	0,8	1,0
R3	0,75	0,75	1,0	0,25	0,75	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,25	0,5	1,0
R4	0,6	0,6	0,8	0,6	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	1,0

Fonte: Elaboração própria

A matriz normalizada e ponderada, mostrada na tabela 6 é criada por meio da multiplicação dos pesos (ver tabela 1) pelos elementos da matriz normalizada, de acordo com a equação 15. Assim, tem-se a matriz de decisão para o cálculo das distâncias positiva e negativas.

O passo seguinte consiste no cálculo da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-) com fins de determinação da solução ideal fuzzy positiva e negativa (FPIS e FNIS), seguindo os cálculos apresentados na seção 5.7. Foram calculadas as distâncias entre os valores padronizados e calibrados fuzzy e as soluções ideal fuzzy positiva e negativa, que correspondem, respectivamente, aos valores máximos e mínimos de cada critério. Em seguida foram geradas as matrizes de distâncias A+ e A-, baseadas nas equações 16 e 17 e apresentadas na tabela 7.

Tabela 6 - Matriz de decisão normalizada e ponderada

\tilde{V}	Mercado de capacidade			Mercado de flexibilidade			Leilão multiatributos			Leilão de capacidade			Política de incentivos		
	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁	a ₂	a ₃
E1	0,008	0,024	0,032	0,008	0,024	0,024	0,016	0,024	0,032	0,016	0,024	0,032	0,032	0,041	0,041
E2	0,060	0,080	0,100	0,060	0,080	0,100	0,060	0,080	0,100	0,040	0,060	0,100	0,040	0,060	0,080
E3	0,013	0,038	0,038	0,013	0,038	0,051	0,013	0,038	0,038	0,013	0,038	0,051	0,038	0,051	0,064
T1	0,076	0,101	0,127	0,076	0,101	0,101	0,051	0,076	0,127	0,076	0,101	0,127	0,025	0,076	0,101
T2	0,017	0,034	0,034	0,025	0,034	0,034	0,017	0,034	0,042	0,017	0,034	0,034	0,008	0,017	0,034
P1	0,045	0,180	0,180	0,045	0,180	0,180	0,090	0,135	0,225	0,090	0,135	0,180	0,045	0,135	0,225
P2	0,045	0,090	0,113	0,045	0,090	0,113	0,045	0,090	0,113	0,045	0,113	0,113	0,023	0,045	0,113
R1	0,046	0,062	0,077	0,046	0,062	0,077	0,031	0,046	0,077	0,031	0,031	0,046	0,015	0,046	0,062
R2	0,022	0,066	0,088	0,022	0,044	0,088	0,044	0,066	0,088	0,066	0,088	0,110	0,044	0,088	0,110
R3	0,028	0,028	0,037	0,009	0,028	0,037	0,018	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,009	0,018	0,037
R4	0,038	0,038	0,051	0,038	0,038	0,051	0,026	0,038	0,051	0,026	0,038	0,051	0,026	0,038	0,064

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 - Matriz de distâncias positivas e negativas

Políticas Públicas										
Critérios	Distância total positiva (A ⁺)					Distância total negativa (A ⁻)				
	Mercado de capacidade	Mercado de flexibilidade	Leilão multiatributos	Leilão de capacidade	Política de incentivos	Mercado de capacidade	Mercado de flexibilidade	Leilão multiatributos	Leilão de capacidade	Política de incentivos
E1	-0,9784	-0,9811	-0,9757	-0,9757	-0,9621	0,02390	0,02390	0,02390	0,02040	0,02200
E2	0,9198	0,9198	0,9198	0,9334	0,9399	0,08200	0,08200	0,08200	0,08200	0,08200
E3	-0,9702	-0,9660	-0,9702	-0,9660	-0,9489	0,03220	0,03220	0,03220	0,03770	0,0522
T1	0,8988	0,9071	0,9160	0,8988	0,9329	0,10350	0,10350	0,10350	0,09370	0,0746
T2	0,9719	0,9690	0,9691	0,9719	0,9803	0,02930	0,03120	0,03120	0,03120	0,0224
P1	0,8671	0,8671	0,8516	0,8655	0,8679	0,14950	0,14950	0,14950	0,14950	0,154
P2	0,9179	0,9179	0,9179	0,9105	0,9407	0,08720	0,08720	0,08720	0,08720	0,0712
R1	-0,9381	-0,9381	-0,9485	-0,9639	-0,9589	0,06330	0,06330	0,06330	0,06330	0,0456
R2	0,9419	0,9492	0,9343	0,9124	0,9199	0,06460	0,06460	0,05810	0,05810	0,085
R3	0,9693	0,9755	0,9693	0,9631	0,9786	0,03100	0,02710	0,02710	0,02710	0,0244
R4	0,9574	0,9574	0,9617	0,9617	0,9575	0,04300	0,04300	0,04300	0,04300	0,0455

Fonte: Elaboração própria

Por último, determina-se a proximidade relativa do valor ideal fuzzy, pelo cálculo das distâncias totais positivas (D^+) e negativas (D^-). O resultado desse cálculo, denominado de coeficiente de proximidade (CC_i), é apresentado na tabela 8 e representa o índice de desempenho de cada política pública à luz quatro dimensões.

Tabela 8 - Matriz de distância total positiva e negativa

Políticas Públicas	Distâncias		CC_i
	D^+	D^-	
Mercado de capacidade	4,5573	0,70950	0,1347
Mercado de flexibilidade	4,5778	0,70750	0,1339
Leilão multiatributos	4,5453	0,70100	0,1336
Leilão de capacidade	4,5118	0,69320	0,1332
Política de incentivos	4,6479	0,67890	0,1275

Fonte: Elaboração própria

A ordenação final das políticas públicas se dá por meio do Coeficiente de Proximidade (CC_i). A política de maior de CC_i é considerada a primeira do processo de hierarquização e, assim, sucessivamente, resultando na seguinte ordem:

- (i) Mercado de capacidade (0,1347);
- (ii) Mercado de flexibilidade (0,1339);
- (iii) Leilão multiatributos (0,1336);
- (iv) Leilão de capacidade (0,1332);
- (v) Política de incentivos (0,1275).

Dado que a política com a maior pontuação foi a implementação do mercado de capacidade, esta foi selecionada como política preferida para fins de inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Sendo assim, para completar o modelo de AIR proposto, foram definidos indicadores e suas métricas, os quais serão apresentados na seção 6.2.6.

6.2.6.

Fase 6 - Monitoramento e avaliação da política

Essa fase de monitoramento do modelo foi dividida em duas etapas, que contemplaram a definição de indicadores para avaliação da política selecionada e as métricas associadas a esses indicadores.

Foram definidos 8 indicadores, sendo cinco técnicos, um econômico, um ambiental e um político, considerando a característica da política identificada com a maior pontuação na fase 5 do modelo. Tais indicadores tiveram seus conceitos e métricas determinados a partir de uma revisão da literatura, com uma busca dos artigos associados a esses temas.

Os indicadores técnicos definidos foram o tempo médio de falha do sistema; probabilidade da perda de carga ; segurança no suprimento; capacidade média para diversificação energética e fator de capacidade. A revisão da literatura mostrou que estes indicadores estão associados à potência entregue em um sistema elétrico (capacidade). Desta forma, com a regulamentação do mercado de capacidade no Brasil, tais indicadores poderiam contribuir para a melhoria de fatores como a garantia no suprimento e níveis de confiabilidade sistêmica, tendo em vista que com tal regulamentação, haveria aumento de capacidade ou lastro (potência) injetada no sistema elétrico.

Quanto ao indicador econômico definido, este foi a liquidez de mercado. Este seria importante em um cenário de implementação do mercado de capacidade, pois permitiria que o produto “capacidade” fosse visto como um ativo do mercado, participando ativamente do mercado de preços de eletricidade. Assim, o preço de tal produto poderia estar relacionado com o preço de equilíbrio do mercado, possibilitando melhores ofertas de preço e uma melhor concorrência, contribuindo para uma boa liquidez do mercado.

Já em relação ao indicador ambiental definido (fator médio de emissão de gases de efeito estufa), este poderia contribuir para avaliar o nível de sustentabilidade das plantas de usinas hidrelétricas reversíveis, quando estas provessessem a entrega de capacidade ao sistema elétrico.

Por fim, o indicador político definido foi a contribuição nacionalmente determinada (CND) ou *Nationally Determined Contributions (NDCs)* e em um contexto de viabilização do mercado de capacidade, tal indicador poderia definir o quanto o Brasil contribui para as metas estabelecidas no Acordo de Paris (2016),

no tocante ao estabelecimento de *compliance*, relativa ao atributo capacidade provida por plantas de usinas hidrelétricas reversíveis.

Os indicadores com seus conceitos e métricas definidas serão apresentados a seguir:

Técnicos:

I. **Tempo médio de falha do sistema (segundos):** É o tempo esperado para falha no funcionamento de vários componentes do sistema elétrico. Calculado em função da taxa de falha do sistema (Semenov et al., 2022).

Segundo Semenov et al. (2022), o mesmo pode ser calculado como:

$$\text{Tempo médio de falha} = \frac{1}{\text{Taxa de falha do sistema}} \quad 22$$

Onde a taxa de falha do sistema é dada por:

$\lambda = \sum_i^n \lambda_i$, onde λ_i é a taxa de falha de um determinado componente do sistema elétrico, dada em número de falhas/ hora.

Este indicador pode contribuir para o grau de confiabilidade do sistema elétrico e sob o ponto de vista do mercado de capacidade, o tempo médio de falha do sistema impacta diretamente na entrega do produto “capacidade”, contribuindo para a eficiência das usinas hidrelétricas reversíveis na provisão deste produto.

O monitoramento poderia ser realizado pelo ONS a fim de avaliar quais UHRs poderiam prover capacidade ao sistema em tempo real.

II. **Probabilidade da perda de carga (%):** Definida como o risco de perda de capacidade (MW) para fins de suprimento (Ferdinant et al., 2020).

Seu cálculo, segundo Ferdinant et al (2020) pode ser realizado pela equação:

$$PPC = \sum_i^n p_i \cdot t_i \quad 23$$

Onde p_i define a probabilidade de perda de capacidade (%) e t_i , a duração da perda da capacidade (segundos) e PPC é a probabilidade da perda de carga (%).

Os valores de p_i e t_i são estimados; i é o índice correspondente à uma determinada unidade geradora e n é o número de unidades geradoras.

Tal indicador poderia estimar se as plantas de UHRs teriam efetividade no fornecimento de capacidade uma vez que tal probabilidade definida indicaria uma possibilidade de entrega ou não do montante adequado de capacidade em um cenário de mercado de capacidade. Seu monitoramento poderia ser realizado pelo ONS, seguindo os procedimentos já adotados para o cálculo da probabilidade de perda de carga.

III. **Segurança no suprimento:** Definida como a capacidade em suprir energia de forma confiável, sem riscos sistêmicos (MME - portaria nº 187/2019). Em relação à métrica para segurança do suprimento, segundo a nota técnica nº 037/2021-EPE que trata da determinação dos requisitos de capacidade, tal indicador pode ser definido pelo quadro 22.

Quadro 22 - Metodologia para determinação do requisito de segurança no suprimento

	Métricas	Variáveis que impactam	Método de quantificação
Potência	CVaR a 5% da Potência não suprida \leq 5% da Demanda	Profundidade do déficit de potência nos 5% piores cenários de cada mês	Máximo (CVaR a 5% da Potência não suprida - 5[% Demanda] ,0)
	LOLP \leq 5%	Profundidade do déficit correspondente aos 5% piores cenários de déficit de potência de cada ano = VaR a 5% da Potência não suprida	VaR a 5% da Potência não suprida

Fonte: Nota técnica nº 037/2021 - EPE, p.25

As variáveis apresentadas na tabela acima são medidas utilizadas no setor elétrico para determinação de risco. A variável *VaR* (*Value at risk*) determina a potencial máxima perda (ou pior perda) a um intervalo de confiança especificado (α nível de confiança), a qual, um investidor seria exposto dentro de um horizonte de tempo considerado (Pácola, 2016).

O *CVaR* (*Condiciona Value at Risk* (*CVaR*)) indica a perda média que supera o *VaR*, ou seja, quantifica, o quanto maior, na média, a perda (risco) poderá ocorrer em uma determinada carteira (Pácola, 2016).

A métrica *CVaR* parte da média dos valores extremos da distribuição, considerando os piores cenários da variável que será analisada, onde a média desses

piores cenários deve ser inferior ou igual ao limite definido para um determinado critério (Pácola, 2016).

Neste caso, a métrica de *CVaR* envolve a avaliação, para cada mês, dos piores cenários de potência não suprida (PNS), no quantil de 5%. Sendo assim, o método de quantificação do requisito do sistema é o montante do *CVaR* a 5% de PNS que exceder o limite definido como aceitável. No critério utilizado, determina-se como limite, o valor de 5% da demanda máxima instantânea mensal (EPE, 2019b).

Quanto à métrica *LOLP* (*Loss of load probability*), esta é definida como a probabilidade de perda de carga (PPC), no que diz respeito à interrupção do fornecimento de energia elétrica, já definida nesse documento, anteriormente (Saleh et al., 2019).

Tais métricas definiriam se o déficit de potência e a potência não suprida poderiam impactar no volume de capacidade disponibilizado por plantas de usinas hidrelétricas reversíveis. Para um futuro mercado de capacidade, a segurança de suprimento seria ideal para valorar o risco de entrega de tal produto. O processo de monitoramento adotado para este indicador poderia ser o mesmo em uso pelo ONS.

IV. Capacidade média para diversificação energética (MW):

Conceito importante para a segurança energética, pois define a capacidade de um sistema diversificado (com várias fontes de geração energética) em responder aos problemas de entrega de capacidade advindos de uma fonte de energia primária. Sua métrica, segundo Hurtado e Campo (2021), pode ser definida assim:

$$H = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I -f_{i,t} \cdot \ln(f_{i,t}) \quad 24$$

$$f_{i,t} = \frac{F_{i,t}}{\sum_{i=1}^I F_{i,t}} \quad 25$$

Onde H representa o indicador médio de diversificação de um sistema elétrico durante um período analisado para simulação; I é o número total de tecnologias existentes no sistema; T é o número de anos que compõe o período

analisado de simulação; $f_{i,t}$ define a fração da tecnologia i em relação à total capacidade no ano t ; $F_{i,t}$ é a capacidade da tecnologia i no ano t .

A capacidade média para a diversificação energética poderia representar uma parcela de capacidade entregue advinda de sistemas híbridos em um cenário de mercado de capacidade. As usinas hidrelétricas reversíveis poderiam entregar tal parcela que não seria entregue por uma outra fonte de energia primária. O monitoramento deste indicador poderia ser realizado pela EPE e pelo ONS.

V. **Fator de Capacidade:** Segundo Mertens et al. (2021), uma das métricas para confiabilidade é pela chamada aproximação pelo fator de capacidade. O fator de capacidade é definido como sendo a razão entre a capacidade anual entregue por uma planta geradora e a capacidade disponibilizada sobre um determinado período horário de operação (NREL, 2017).

$$FC = \frac{\text{Capacidade anual entregue (MW)}}{\text{Capacidade no período de operação (MW)}} \quad 26$$

O fator de capacidade seria essencial para determinar se uma planta de UHR seria financeiramente viável ou não para a entrega do produto “capacidade”, pois num futuro mercado de capacidade, somente compensaria investir em plantas que consigam ter um alto fator de capacidade a fim de indicar a possibilidade desta planta gerar receita neste tipo de mercado. O monitoramento do indicador poderia ser realizado pela EPE e também pela ONS.

Econômicos:

I. **Liquidez de mercado:** A liquidez de mercado para energia elétrica pode ser entendida como a diferença entre os preços de oferta e demanda mais próximos ao preço de equilíbrio em um cenário de preços de energia elétrica (Bajaj et al., 2022).

Pode ser calculada em função da relação oferta-demanda, quando esta fica próxima do preço de equilíbrio, segundo a equação abaixo.

$$B_t = O_{s,n+1} - O_{D,n-1} \quad 27$$

Onde B_t é a oferta-demanda disseminada no mercado dada em R\$/MWh; O_s é o preço de venda e O_D é o preço de compra; ambos esses preços estão próximos a um preço de equilíbrio O_n . Todos os preços são dados em R\$/MWh.

A relação oferta-demanda expressa pela variável B_t determina a liquidez do mercado, quanto maior esta, maior é essa liquidez (Bajai et al., 2022).

A liquidez de mercado seria essencial para determinar a valoração adequada do preço do produto “capacidade” a ser provido por UHRs, tendo em vista que tal estimativa dependeria da qualidade do produto entregue por estas plantas, o que iria influenciar em investimentos ou não em usinas hidrelétricas reversíveis, caso o preço de venda do produto capacidade estivesse abaixo do esperado pelo mercado.

A CCEE poderia monitorar tal indicador a partir dos preços do futuro mercado de capacidade.

Ambiental:

I. **Fator médio de emissão de gases de efeito estufa:** Hurtado e Campo (2021) propuseram esse indicador, porque permite identificar de forma aproximada, a taxa de emissões de CO2 por unidade de eletricidade em um sistema de potência em um período específico.

Tal métrica é definida como:

$$FME = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{EF_i \cdot EG_{i,t}}{EG_t} \quad 28$$

Onde FME é o fator médio de emissões dado em kgCO2eq/MWh; EF_i é o fator de emissão de uma dada tecnologia i em kgCO2eq/MWh; EG_t é a quantidade de eletricidade produzida em MWh em um ano t .

Este indicador definiria o grau de emissão realizada por plantas de usinas reversíveis e poderia possibilitar um modelo de negócio para créditos de carbono em um eventual mercado de capacidade caso os níveis produzidos de capacidade estivessem de acordo com as metas de emissões estabelecidas no Acordo de Paris (2016). O Ministério de Minas e Energia em conjunto com o Ministério do Meio Ambiente poderiam ficar a cargo de monitorar este indicador.

Político:

I. *Nationally Determined Contributions* (NDCs) - Contribuições Nacionalmente Determinadas: NDCs são mecanismos primários de comunicação governamental a fim de informar os passos tomados para mudanças climáticas a nível nacional por meio da redução das emissões de gases poluentes, considerando as circunstâncias domésticas de cada país e suas capacidades de cumprimento das metas estabelecidas no acordo de Paris (<<https://www.wri.org/indc-definition>>). Hurtado e Campo. (2021) estabeleceram uma métrica para o cálculo do INDC, a qual, pode ser vista a seguir:

$$INDC (\%) = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^I EF_i \cdot EG_{i,2030}}{EGEE_{2030}} \right] \cdot 100 \quad 29$$

Onde INDC (%) é o indicador de *compliance* do INDC para o setor elétrico de um país; $EG_{i,2030}$ é a eletricidade produzida por uma tecnologia i no ano de 2030; EF_i é o fator de emissão de uma tecnologia i e $EGEE_{2030}$ é a meta de redução de emissões para 2030 (varia para cada país).

O indicador mencionado definiria se a entrega de capacidade advinda de UHRs atingiria baixos níveis de emissão e se os valores de capacidade estimados para serem produzidos em 2030 determinariam um cumprimento das metas de *compliance* para contribuições governamentais de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Definidos os indicadores e métricas para avaliação da política, completa-se o ciclo de análise de impacto regulatório do modelo proposto.

A seção seguinte (6.3) realizará a discussão dos resultados obtidos pelo modelo aplicado nesta dissertação de mestrado.

6.3. Discussão dos resultados

De acordo com o que foi apresentado nas seções anteriores, a modelagem proposta nesta dissertação foi aplicada para a seleção de políticas públicas com vistas a promover à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.

Na primeira fase do modelo proposto, foi possível definir as políticas propostas para seleção e avaliação, delimitando o objetivo de possibilitar a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Além disso, foram estabelecidas a natureza e alcance da política com um olhar direcionado para o setor elétrico brasileiro, por fim, foi identificada a base legal para atuação do órgão regulador que seria responsável pela implementação destas em um marco regulatório. As políticas definidas tiveram como parâmetro as discussões atuais no setor elétrico brasileiro sobre regulação de armazenamento de energia e as tendências regulatórias apontadas na literatura internacional para usinas hidrelétricas reversíveis.

Já na fase de definição do *framework* regulatório (segunda etapa do modelo), tendo posse das políticas definidas com os seus objetivos, foi possível desenhá-las de forma a estarem em conformidade com o objetivo de inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Tal desenho possibilitou que fosse criada uma estratégia proposta para a escolha da política preferida, a qual foi baseada na utilização de uma das metodologias utilizadas para análise de impacto regulatório. A metodologia escolhida foi a análise multicritério.

A terceira fase foi referente à identificação das políticas propostas e envolveu toda a metodologia desenvolvida para tal processo. Esta fase permitiu que fosse realizada uma extensa revisão da literatura a partir dos estágios de planejamento da pesquisa e de condução da pesquisa. Tais estágios permitiram um conhecimento sobre as políticas mais utilizadas no mundo para sistemas de armazenamento de energia, com foco em estudar as que fossem voltadas para usinas hidrelétricas reversíveis a fim de identificar possíveis políticas que pudessem ser adotadas no cenário regulatório do sistema elétrico brasileiro.

Na fase de atribuição dos pesos às dimensões e aos critérios selecionados para a avaliação, observou-se uma clara preferência pela dimensão Política, seguida pelas dimensões Robustez e Econômica. Quanto aos critérios mais importantes, considerando o peso das avaliações decorrentes do instrumento de coleta de dados,

estes foram Confiabilidade (T1) e Alinhamento às políticas nacionais (P1), o que reitera o potencial das usinas hidrelétricas reversíveis em melhorar aspectos de suprimento da energia elétrica, ademais, a inserção desta tecnologia de armazenamento de energia pode impactar positivamente o marco regulatório atual, sobretudo, considerando a abertura para o mercado livre de energia que possibilitará novas políticas alinhadas com as já existentes no setor elétrico.

No tocante à hierarquização das políticas públicas propostas, a política de implementação do mercado de capacidade se mostrou àquela preferida em comparação às outras avaliadas. Considerando que as usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs) conseguem fornecer garantia física ao sistema elétrico, na forma de capacidade (MW), este produto pode se tornar uma importante ferramenta para a evolução do mercado atual de energia elétrica com possibilidade de comercialização do mesmo sob vários mecanismos de remuneração, aumentando a concorrência no mercado e ampliando a gama de serviços no mesmo.

Os especialistas, ao julgarem essa política, atribuíram alta importância (valor mais frequente igual a 4 na escala de 1 a 5) a seis dos onze critérios. Mesmo os critérios considerados como custos, E1 - Custo para a sociedade; E3 - Aumento de subsídios e encargos; R1 - Dificuldade de implementação e R4 - Impactos previstos), contribuíram para o elevado Coeficiente de Proximidade (*CCi*) da política escolhida.

A segunda política mais bem avaliada foi o Mercado de Flexibilidade. As dimensões consideradas como mais relevantes na avaliação dessa política foram “Política” e “Robustez”. Ao critério P1 (Alinhamento às políticas nacionais) foram dadas as maiores notas e, como este tem elevado peso, contribuiu para levar essa política ao segundo lugar, mostrando coerência com os resultados do modelo. O resultado de *CCi* para a segunda política foi 8,58% abaixo daquele obtido para a primeira, o que indica uma proximidade entre estas em relação à preferência dos especialistas.

As políticas como leilão multiatributos e leilão de capacidade também foram bem avaliadas dentro do modelo proposto, porém, receberam maior peso em critérios como potencial de transformação de mercado e nos critérios que representam custo, o que justifica o fato dessas políticas não estarem no topo do ranking do processo de hierarquização.

Já a política de incentivos apresentou baixa pontuação em todos os critérios e foi considerada por vários especialistas como desnecessária para promover a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil haja vista que a modernização do setor elétrico estimula a livre concorrência entre os seus agentes e possibilita o aumento de participantes do mercado, o que torna o mercado mais liberalizado e dispensa a necessidade de subsídios ou incentivos governamentais.

Portanto, fica evidenciada a coerência dos resultados obtidos do modelo com os julgamentos dos especialistas, o que valida a aplicação do modelo desenvolvido para avaliação de políticas públicas.

Quanto ao monitoramento e avaliação da política preferida pelos especialistas, este visou identificar os indicadores mais importantes para estes fins e denotá-los conceitualmente e com suas métricas, o que possibilitou completar o ciclo de análise de impacto regulatório, indicando dimensões (técnica, econômica, ambiental e política), relevantes para que após a aplicação da política proposta, a mesma pudesse ser monitorada e avaliada de forma efetiva.

O objetivo da definição dos indicadores é propor que futuramente, em um estágio de regulação do mercado de capacidade no Brasil, o produto “capacidade” possa ser corretamente remunerado para fins de segurança no suprimento, resposta da demanda e confiabilidade. Além disso, os indicadores para monitoramento também podem contribuir para a correta valoração deste produto em um contexto de utilização de mecanismos de remuneração por capacidade, contribuindo para uma melhor liquidez do mercado. Ademais, o monitoramento do produto “capacidade” entregue pelas usinas hidrelétricas reversíveis permitiria que fossem atingidos adequados níveis de sustentabilidade por plantas dessa tecnologia, logo, as mesmas contribuiriam para as metas de *compliance* definidas no Acordo de Paris (2016).

De modo geral, esta dissertação buscou preencher lacunas identificadas na literatura. Em relação aos trabalhos que aplicaram análise multicritério para fins de seleção e avaliação de políticas energéticas, alguns dos dezesseis autores estudados tiveram os seguintes objetivos definidos: (i) determinação da melhor tecnologia de armazenamento de energia; (ii) auxílio no desenvolvimento sustentável em países da Europa Central e Oriental; (iii) gerenciamento e avaliação dos fatores de risco para investimento em projetos sustentáveis; (iv) criação de um índice para a transição energética sustentável em quatorze países selecionados; (v) análise do

desequilíbrio para o design do mercado de balanço de eletricidade na China; (vi) avaliação da aceitação social do uso da energia eólica. Foi possível notar que nenhum destes realizou um processo de análise de impacto regulatório para escolha da política preferida em um processo de hierarquização.

As etapas de definição do problema regulatório (definição das políticas propostas, definição da natureza destas e identificação de base legal para as mesmas); criação de um *framework* regulatório (objetivo da política, desenho da política e estratégia proposta para a escolha) e mapeamento das alternativas de ação (identificação das políticas propostas a partir de uma metodologia da pesquisa (planejamento, condução e documentação) não foram desenvolvidas nem sequer mencionadas por estes autores, sendo assim, essa dissertação de mestrado contribui para o preenchimento dessa lacuna no tocante ao desenvolvimento de um modelo para análise de impacto regulatório com o auxílio de métodos multicritério.

7. Conclusões e recomendações

Conforme descrito nesta dissertação, os sistemas de armazenamento de energia representam potenciais benefícios e custos para o setor elétrico. Dentre os benefícios estão a diversificação da matriz energética, o aumento de lastro do sistema (MW), a melhoria nos níveis de confiabilidade, dentre outros. Já sobre os custos, estes podem ser em relação à operação e manutenção dos sistemas de armazenamento e quanto ao investimento inicial em tecnologias deste tipo. Há ainda os custos com processos de outorga para a instalação de empreendimentos de armazenamento de energia, além do custo e da possível complexidade do processo de licenciamento ambiental, dependendo da classificação do sistema de armazenamento.

Porém, dado o cenário de crescimento de penetração de fontes renováveis (solar e eólica) e considerando, a intermitência destas, deve-se considerar explorar novas tecnologias de geração e de diversificação da matriz energética. Sendo assim, os sistemas de armazenamento de energia, com destaque para as usinas hidrelétricas reversíveis, considerando o imenso potencial hídrico e predominância da geração hidráulica na matriz renovável, aparecem como elementos a serem considerados em termos de arcabouço regulatório.

De forma a avaliar tais políticas públicas, foi desenvolvido um modelo conceitual de análise de impacto regulatório com apoio a decisão, baseado em métodos multicritério combinados com a teoria de conjuntos fuzzy, que considera a complexidade, subjetividade e incerteza inerentes à análise pretendida. Este modelo foi aplicado para selecionar as alternativas de políticas públicas mais favoráveis à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, considerando as especificidades do setor elétrico brasileiro, no tocante à sua regulação.

As abordagens conceituais e situacionais apresentadas nos capítulos 2 e 3, possibilitaram a caracterização dos sistemas de armazenamento de energia e a identificação das barreiras para inserção dos mesmos no Setor Interligado (SI) do sistema elétrico brasileiro. Com esta extensa revisão da literatura (nacional e

internacional), foi possível definir políticas públicas para a inserção das usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil (objetivo geral dessa dissertação de mestrado).

Os objetivos específicos, relacionados na seção 1.2, foram alcançados nos capítulos 4 e 5, nos quais foram discutidos os conceitos e metodologias que fundamentaram o desenvolvimento do referido modelo integrado AHP fuzzy-TOPSIS de avaliação de políticas públicas, cuja aplicação foi demonstrada no capítulo 6, no contexto de diversificação da matriz energética brasileira com a inserção de novas tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia.

Destaca-se que durante a pesquisa para desenvolvimento do modelo conceitual, foram identificados na literatura diversos trabalhos que utilizaram métodos multicritérios para a escolha de tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia para fins de estabelecimento de políticas energéticas. Entretanto em nenhum dos trabalhos estudados, houve de fato, a proposição de políticas voltadas à inserção de usinas hidrelétricas reversíveis o que evidencia a contribuição da presente pesquisa para tal aplicação.

Os resultados encontrados evidenciaram ainda alguns benefícios do modelo desenvolvido. Por fazer uso de ferramentas que consideram as incertezas envolvidas nas análises, foi possível avaliar as alternativas de políticas públicas à luz de quatro dimensões e onze critérios, com base nos julgamentos de sete especialistas quanto à importância de cada critério.

Com relação aos resultados alcançados, verificou-se que a política pública considerada mais relevante foi a implementação do mercado de capacidade, mostrando a importância do produto “capacidade” na forma de lastro, conforme é verificado no subtópico 3.2.1, o qual, demonstra as várias possibilidades de remuneração em um mercado de capacidade. Além disso, a entrega de capacidade pelas usinas hidrelétricas reversíveis promoveria resposta da demanda de energia elétrica e ajudaria a reduzir a instabilidade na geração advinda de fontes intermitentes. Há também a possibilidade de um mercado de capacidade abranger a entrega de outros serviços para trazer maior confiabilidade para o sistema.

No ranking final das alternativas de políticas públicas, a proposta de implementação do mercado de flexibilidade foi a segunda colocada e haja vista que as usinas hidrelétricas reversíveis podem prover vários serviços ancilares, poderão ser uma importante fonte de receita neste mercado, haja vista que os serviços ancilares são considerados como serviços de flexibilidade da rede elétrica em vários

países do mundo. Assim, abre-se uma janela para que tais serviços sejam devidamente remunerados e produzam uma importante fonte de receita para as tecnologias a eles associadas.

A terceira política pública melhor avaliada foi o leilão multiatributos, considerando que as usinas reversíveis podem entregar atributos como lastros de capacidade e produção; serviços ancilares e tempo de respostas, dentre outros, os quais podem ser usados para o cálculo de um índice benefício-custo a fim de estimar o preço da energia (R\$/MWh) a ser ofertado nestes leilões. A participação destas usinas nesse tipo de leilão permitiria a maior competição entre diferentes fontes, melhorando o preço final ofertado para a energia.

Quanto ao leilão de capacidade, esta política de implementação foi a quarta colocada na avaliação dos especialistas. Embora a realização do leilão deste produto não dependa da regulamentação do mercado de capacidade, seria mais fácil definir métricas e parâmetros para o preço ofertado no mesmo, sendo assim, há a tendência de preferir que um leilão de capacidade seja definido no arcabouço regulatório após a regulamentação do mercado de capacidade.

Embora as políticas de subsídios sejam importantes para fomentar novas tecnologias como o armazenamento de energia, na visão dos especialistas, uma política de incentivos não se torna viável o Brasil. Uma das possíveis razões para tal é o estado atual do mercado em transição para um regime de livre comercialização de produtos, o qual, permitiria maiores participantes e diferentes preços modulados de acordo com a oferta e a demanda, não necessitando de intervenção governamental para estimular o crescimento de novas tecnologias no sistema elétrico brasileiro.

Durante a avaliação pelos especialistas, alguns critérios foram apontados como mais relevantes, merecendo maior atenção quando da implementação das políticas públicas. Destacam-se a confiabilidade e o alinhamento às políticas nacionais, além do potencial de transformação de mercado de uma dada tecnologia, quando esta é inserida na matriz de um sistema elétrico.

Os resultados indicam que o uso de ferramentas multicritério de apoio à decisão, como o modelo *AHP fuzzy-TOPSIS* desenvolvido nesta dissertação, leva a resultados consistentes com a capacidade de processar informações de diferentes dimensões e sob vários critérios, a partir dos julgamentos de diversos especialistas, levando em consideração a complexidade, subjetividade e incerteza inerentes ao

processo decisório. Reduz-se assim o viés do resultado, evitando que este se restrinja à opinião do autor sobre o tema.

A partir das questões discutidas e dos resultados encontrados na fase aplicada da pesquisa, entende-se que o modelo de avaliação e seleção de políticas públicas poderá auxiliar a tomada de decisão quando da formulação de política no setor de energia elétrica, além de contribuir para a maior diversificação da matriz energética nacional, com a criação de novos modelos de negócio e possibilidade de criação de novos mercados.

Para estudos futuros recomenda-se:

- ✓ Realizar uma nova rodada de coleta de dados e análises, incluindo as propostas não contempladas na análise,
- ✓ Aplicar o modelo para avaliação de outras políticas públicas no setor de energia, analisando sua aplicabilidade e possíveis melhorias;
- ✓ Aplicar o “Instrumento de Avaliação de Políticas Públicas para inserção de “Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil” (Apêndice 1) para o julgamento por especialistas de outros setores, e não apenas da área de energia;
- ✓ Desenvolver modelos similares utilizando outros métodos multicritérios como *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *MACBETH*, *VIKOR* etc., verificando como cada ferramenta pode impactar os resultados encontrados;
- ✓ Avaliar números *fuzzy* com outras funções de pertinência como trapezoidal e gaussiana, ao invés de triangular (TFN), utilizado na fase V (*fuzzy TOPSIS*);
- ✓ Identificar as alterações legais e infralegais necessárias para implantação de cada política pública proposta, além daquela escolhida para análise de impacto regulatório (AIR), propondo nova redação para as leis, decretos, resoluções normativas, etc.
- ✓ Monitorar e avaliar as políticas públicas quando da sua implementação e, a depender dos resultados, reavaliar os critérios utilizados no modelo aqui apresentado.

8. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota técnica nº 094/2020 - SRG. **Abertura da Tomada de Subsídios para obter contribuições para as adequações regulatórias necessárias à inserção de sistemas de armazenamento, incluindo usinas reversíveis, no Sistema Interligado Nacional - SIN**, p.1-35, set. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota técnica nº 132/2019 - SRG. **Instauração de Tomada de Subsídios para fomentar abertura de discussão sobre o tema serviços ancilares aplicáveis ao no Sistema Interligado Nacional (SIN)**, p.1-20, dez. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota técnica nº 251/2020-SRG. **Atualização dos valores das Tarifas de Energia de Otimização - TEO e TEO Itaipu, da Tarifa de Serviços Ancilares - TSA e dos limites máximo e mínimo do Preço de Liquidação de Diferenças - PLD para o ano de 2021**, p.1-8, dez. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 002/2020-SRG/SRT/SCG. **Adequações regulatórias para implantação de usinas híbridas e aprimoramento da regulação relacionada à contratação de acesso de múltiplas centrais geradoras**, p.1-88, jul. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução normativa nº 697/2015. **Procedimentos para prestação de serviços ancilares e adequação de instalações de centrais geradoras motivada por alteração na configuração do sistema elétrico**, p.1-9, dez. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução normativa nº 1030/2022. **Consolida os atos regulatórios relativos ao programa da Resposta da Demanda**, p.1-15, jul. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota técnica nº 010/2022 - SRM. **Define as medidas regulatórias necessárias para permitir a abertura do mercado livre para consumidores com carga inferior a 500 kW**, p.1-203, jan. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução normativa nº 858/2019. **Estabelece os critérios e procedimentos para o cálculo dos limites máximo e mínimo do Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) e do valor da tarifa de energia de otimização referente à cessão de energia efetuada pelo comercializador de energia da Usina Hidroelétrica Itaipu**, p.1-4, out. 2019.

ALBUQUERQUE, L. R .S. C. DE Modelo para seleção de locais para a implantação de usinas hidrelétricas reversíveis: uma abordagem baseada em sistema de informação geográfica. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado. Metrologia. PUC-RIO, 2021, 139 p.

ALIZADEH, R.; SOLTANISEHAT, L.; LUND, P. D.; ZAMANISABZI, H. Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method. **Energy Policy**, v.137, p.1-17, 2020.

ALIPOUR, M. et al. Long-term policy evaluation: Application of a new robust decision framework for Iran's energy exports security. **Energy**, v. 157, p. 914-931, 2018.

ANUTA, OH.; TAYLOR, P.; JONES, D.; MC ENTEE, T.; WADE, N. An international review of the implications of regulatory and electricity market structures on the emergence of grid scale electricity storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.38, p.489-508, 2014.

ARYANFAR, A.; GHOLAMI, A.; POURGHOLI, M.; SHAHROOZI, S.; ZANDI, M.; KHOSRAVI, A. Multi-criteria photovoltaic potential assessment using fuzzy logic in decision-making: A case study of Iran. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v.42, p.1-20, 2020.

AUSTRALIAN RENEWABLE ENERGY AGENCY (ARENA). **About ARENA, 2011**. Disponível em: <<https://arena.gov.au/about/>>. Acesso em: 21 de mai. 2022.

BAJAI, M.; VIG, A.A.; HORTAY, O. Electricity Market Liquidity and Price Spikes: Evidence from Hungary. **Periodica Polytechnica Social and Management Sciences**, v.30, n.1, p.49-56, 2022.

BANA E COSTA, C.; VANSNICK, J.-C. MACBETH. An interactive path towards the construction of cardinal value functions. **International Transactions in Operational Research**, v. 1, n. 4, p. 489-500, 1994.

BARBOUR, E.; WILSON, I.A.G.; RADCLIFFE.; DING, Y. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.61, p. 421-432, 2016.

BARROS, J. J.C.; COIRA, M. L.; LÓPEZ, M.P.D.L.C.; GOCHI, A.D.C.; SOARES, I. Probabilistic multicriteria environmental assessment of power plants: A global approach. **Applied Energy**, v.260, p.1-13, 2020.

BLAKERS, A.; STOCKS, M.; LU, B.; CHENG, C. A review of pumped hydro energy storage. **Progress in Energy**, v.3, n.2, p.1-19, 2021.

BRODNY, J.; TUTAK, M. Assessing sustainable energy development in the central and eastern European countries and analyzing its diversity. **Science of the Total Environment**, v.801, p.1-18, 2021.

BUBLITZ, A.; KELES, D.; ZIMMERMANN, F.; FRAUNHOLZ, C.; FICHTNER, W. A survey on electricity market design: Insights from theory and real-world implementations of capacity remuneration mechanisms. **Energy Economics**, v.80, p.1059-1078, 2019.

CALIFORNIA INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR (CALIFORNIA ISO). **Energy Storage: Perspectives from California and Europe**, p.1-36, oct. 2019.

CALILI, R. F. **Métodos Multicritério de Apoio a Decisão**. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2018. (Material de aula).

CAPORALE, D.; SANGIORGIO, V.; AMODIO, A.; DE LUCIA, C. Multi-criteria and focus group analysis for social acceptance of wind energy. **Energy Policy**, v.140, p.1-15, 2020.

CELESTINO, N. Modelo AHP para avaliação e escolha de fontes de geração para a segurança da expansão de energia - análise do caso do Nordeste Brasileiro, **2017 (Mimeo)**.

CHEN, C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 114, n. 1, p. 1-9, 2000.

CHEN, H.; BRESLER, FS III.; BRYSON, ME.; SEILER, K.; MONKEN, J. Toward bulk power system resilience: approaches for regional transmission operators. **IEEE Power and Energy Magazine**, v.18, n.4, p.20-30, 2020.

CHINA ENERGY STORAGE ALLIANCE (CNESA). **Energy Storage Industry White Paper 2022**, p.1-28, 2022.

COLAK, M.; KAYA, I. Multi-criteria evaluation of energy storage technologies based on hesitant fuzzy information: A case study for Turkey. **Journal of Energy Storage**, v.28, p.1-14, 2020.

COWAN, K. R. et al. Forecasting the Adoption of Emerging Energy Technologies: Managing Climate Change and Evolving Social Values. **PICMET 2009 Proceedings**, Portland, 2-6 - aug. 2009, p.3048-3058.

CRAMTON, P.; OCKENFELS, A.; STOFT, S. Capacity market fundamentals. **Economics of Energy and Environmental Policy**, v.2, n.2, p.27-46, 2013.

CTG CHINA (COMPANHIA DE TRÊS GARGANTAS DA CHINA), **Overview Of China Pump Storage Hydroelectricity**, p.1-45, 2019.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Ancillary Services in the United States: Technical Requirements, Market Designs and Price Trends**, p.1-102, jun. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota técnica DEE-006/2019. **Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs)**, p.1-66, fev. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota técnica DEE-013/2021. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica**, p.1-37, fev. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota técnica DEE-037/2021. **Metodologia de Análise para o Atendimento à Demanda Máxima de Potência e Requisito de Capacidade**, p.1-38, abr. 2021.

EUROPEAN COMMISSION. “**Final Report on the Sector Inquiry on Capacity Mechanisms**”, p.1-18, nov. 2016.

EUROPEAN COMMISSION. “**Regulation 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the Internal Market for Electricity**”, p.1-71, jun. 2019.

EUROPEAN NETWORK OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATORS FOR ELECTRICITY (ENTSO-E). ENTSO-E Balancing Report, p.1-90, 2020.

FERDINANT, P.F.; NURDIANA, L.; IRMAN, A. Evaluation of power plant reliability using index loss of load in the Suralaya power plant. **Published in IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v.909, p.1-10, 2020.

GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO. Lei nº 9.427/1996. **Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19427cons.htm>. Acesso em: 31 de ago. 2022.

GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO. Lei nº 14.300/2022. **Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS)**. Disponível em:<<https://n9.cl/vrctp>>. Acesso em: 22 de jul. 2022.

GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO. Lei nº 14.120/ 2021. Transfere para a União, as ações de titularidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), representativas do capital social da Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) e da Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A. (Nuclep) e dá outras providências. Disponível em: <<https://n9.cl/t9j4b>>. Acesso em: 23 de jul. 2022.

GHOSE, D.; PRADHAN, S.; UDDIN, S. A Fuzzy-COPRAS Model for Analysis of Renewable Energy Sources in West Bengal, India. Published in **2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)**, p.1-6, 2019.

HAGHIGHI, A.; KERAMAT, A. A fuzzy approach for considering uncertainty in transient analysis of pipe networks. **Journal of Hydroinformatics**, v. 14, n. 4, p. 1024-1035, 2012

HAWKER, G.; BELL, K.; GILL, S. Electricity security in the European Union - The conflict between national Capacity Mechanisms and the Single Market. **Energy Research & Social Science**, v.54, p.51-58, 2017.

HE, W.; KING, M.; LUO, X.; DOONER, M.; LI, D.; WANG, J. Technologies and economics of electric energy storages in power systems: Review and perspective. **Advances in Applied Energy**, v.4, p.1-18, 2021.

HUOVILA, A.; BOSCH, P.; AIRAKSINEN, M. Comparative analysis of standardized indicators for Smart sustainable cities: What indicators and standards to use and when? **Cities**, v. 89, p. 141-153, 2019.

HURTADO, U.H.; CAMPO, C.M.DEL. A development of indicators for the sustainability assessment of the Mexican power system planning. **International**

Journal of Sustainable Energy Planning and Management, v.32, p.95-110, 2021.

HWANG, C.-L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications A State-of-the-Art Survey**. 1. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981.

ILAK, P.; RHERENCIC, L.; RAJSL, I.; RAOS, S.; TOMSIC, Z. Equilibrium Pricing with Duality-Based Method: Approach for Market-Oriented Capacity Remuneration Mechanism. **Energies**, v.14, n.567, p.1-19, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Subsidy for solar PV with storage installations (Programm zur Förderung von PV- Batteriespeichern)**, 2016. Disponível em: <<https://n9.cl/u4oqn>> . Acesso em: 20 de mai. 2022.

INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION (IHA). **The World's Water Battery: Pumped Hydropower Storage and the Clean Energy Transition**, p.1-15, dez. 2018.

JOSKOW, P.; TIROLE, J. Reliability and competitive electricity markets. **The RAND Journal of Economics**, v.38, n.1, p.60-84, 2007.

KAPOOR, V.; TAK, S.S. Fuzzy Application to the Analytic Hierarchy Process for Robot Selection. **Fuzzy Optimization and Decision Making**, v.4, n.3, p.209-234, 2005.

KASZYNSKI, P.; KOMOROWSKA, A.; ZAMASZ, K.; KINELSKI, G.; KAMINSKI, J. Capacity Market and (the Lack of) New Investments: Evidence from Poland. **Energies**, v.14, n.7843, p.1-17, 2021.

KUL, C.; ZHANG, L.; SOLANGI, Y.A. Assessing the renewable energy investment risk factors for sustainable development in Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p.1-14, 2020.

LEITE, D.A.; CALILI, R.F. Uma proposta de leilão de energia por atributos utilizando o Modelo AHP - Análise do caso Brasileiro, 2021 (Mimeo).

LIU, X.; ZHENGXUAN, Z.; QI, W.; WANG, D. Behavior Analysis With an Evolutionary Game Theory Approach for Procurement Bid Evaluation Involving Technical and Business Experts. **IEEE Systems Journal**, v.13, n.4, p.4374-4385, 2019.

LIU, C.-H.; TZENG, G.-H.; LEE, M.-H. Improving tourism policy implementation - The use of hybrid MCDM models. **Tourism Management**, v. 33, p. 413-426, 2012.

LIN, M.; HUANG, C.; XU, Z. MULTIMOORA based MCDM model for site selection of car sharing station under picture fuzzy environment. **Sustainable Cities and Society**, v.53, p.1-46, 2019.

LYULYOV, O.; PIMONENKO, T.; KWILINSKI, A.; YANA, U.S.; AREFIEVA, O.; AKIMOV, O.; PUDRYK, D. "Government Policy on Macroeconomic Stability: Case for Low- and Middle- Income Economies". **Proceedings of the 36th**

International Business Information Management Association (IBIMA), nov. 2020, Granada, Spain.

MARTINS, J.; MILES, J. A techno-economic assessment of battery business models in the UK electricity market. **Energy Policy**, v.148, p.1-16, 2021.

MARTINS, G. D. A. **Modelo Fuzzy AHP-TOPSIS para avaliação e seleção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado. Metrologia. PUC-RIO, 2017, 105 p.

MASTROCINQUE, E.; RAMÍREZ, F.J.; HONRUBIA-ESCRIBANO, A.; PHAM, D.T. An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector. **Expert Systems with Applications**, v. 150, p. 1-17, 2020.

MELLO, A. F. P. Monitoramento e avaliação da regulamentação sobre recolhimento de alimentos no Brasil: proposição de indicadores e métricas. **Dissertação Pós Graduação Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica**, Rio de Janeiro, 2015. 185p.

MERTENS, T.; BRUNINX, K.; DUERINCK, J.; DELARUE, E. Capacity credit of storage in long-term planning models and capacity markets. **Electric Power Systems Research**, v.194, p.1-15, 2021.

MINISTÉRIO DA CASA CIVIL, GOVERNO FEDERAL. **Diretrizes gerais e guia orientativo para a elaboração de análise de impacto regulatório**, p.1-110, jun. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO. Consulta Pública nº 127/ 2022. **Consulta Pública sobre proposta do GT Metodologia da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP), contemplando aprimoramentos no modelo SUISHI, conforme apresentado no Relatório Técnico denominado "Relatório de Validação da Versão 16 do Programa SUISHI – Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas em Sistemas Hidrotérmicos Interligados - Modo para Cálculo de “Energia Firme”, 10 de jun. 2022.**

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO. Portaria normativa nº 187/2019. **Define a instituição do grupo de trabalho (GT) voltado para a realização de estudos que permitam a modernização do Setor Elétrico, fundamentada na governança, estabilidade jurídica regulatória e na previsibilidade**, p.1-2, 4 de abr.2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO. Portaria normativa nº 46/2022. **Estabelece as diretrizes para o Leilão de Reserva de Capacidade na Forma de Energia de 2022**, p.1-19, 23 de jun. 2022.

MORAIZ, F.; SCOTT, D. The Impact of Capacity Market Auctions on Wholesale Electricity Prices. **The Energy Journal**, v.43, n.1, p.77-96, 2022.

MULLER, G. D. M. **Impacto de novas tecnologias e smart grids na demanda de longo prazo do sistema elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro: Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE-UFRJ. Tese de doutorado, 2016.

NEWBERY, D. Missing money and missing markets: reliability, capacity auctions and interconnectors. **Energy Policy**, v.94, p.401-410, 2016.

NEOFYTOU, H.; NIKAS, A.; DOUKAS, H. Sustainable energy transition readiness: A multicriteria assessment index. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.131, p.1-16, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Acordo de Paris. **Rege medidas de redução de emissão de dióxido de carbono a partir de 2020, e tem por objetivos fortalecer a resposta à ameaça da mudança do clima e reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos gerados por essa mudança**, p.1-42, dez. 2015.

ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). **Best Practice Principles for Regulatory Policy: Regulatory Impact Assessment**, p.1-36, fev. 2020.

ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). **Regulatory Policy Outlook 2021**, p.1-301, oct. 2021.

OTAY, Í.; OZTAYSI, B.; ONAR, S. C.; KAHRAMAN, C. Multi-expert performance evaluation of healthcare institutions using an integrated intuitionistic fuzzy AHP & DEA methodology. **Knowledge-Based Systems**, v.133, p. 90-106, 2017.

PÁCOLA, J. H. DO VALLE. Análise de volatilidade e risco do mercado transoceânico à vista de minério de ferro via modelos ARMA-GARCH e medidas de risco VaR e CvaR. **Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 114p.

PERERA, A. T. D. et al. A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems. **Applied Energy**, v. 107, p. 412-425, 2013.

PETITET, M.; FINON, D.; JANSSEN, T. Capacity adequacy in power markets facing energy transition: a comparison of scarcity pricing and capacity mechanism. **Energy Policy**, v.103, p. 30-46, 2017.

PUGL-PICHLER, C.; TYMA, F.; SU"SSENBACHER, W.; BLUME-WERRY, E.; TODEM, C. Capacity remuneration mechanisms on European electricity markets-legal basis and actual implementation status. **Journal of World Energy Law and Business**, v. 13, p. 498-517, 2020.

PRAMANIK, S.; MUKHOPADHYAYA, D. Grey relational analysis based intuitionistic fuzzy multi-criteria group decision-making approach for teacher selection in higher education. **International Journal of Computer Applications**, v. 34, n. 10, p. 21-29, 2011

PRICE WATER HOUSE COOPERS (PWC). **Differences in balancing markets between France and Germany**, p.1-20, jun. 2019.

PSR.; LACTEC. Projeto P&D-6491-0279/2012. **Aperfeiçoamento do processo de contratação da expansão do parque gerador**. Associação dos Produtores Independentes de Energia - APINE, Curitiba, 2014.

ROY, B. **Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)**. [S.l.]: Lausanne Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1968.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Mc-Graw-Hill, Makron, 1991.

SAHIN, T.; OCAK, S.; TOP, M. Analytic hierarchy process for hospital site selection. **Health Policy and Technology**, v.8, p.42-50, 2019.

SALEH, M.J.A.H.; ABDULLA, S.A.A.H.; ALTAWHEEL, A.M.A.A. LOLP and LOLE Calculation for Smart Cities Power Plants. **Presented in 2019 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)**. 22-23 September 2019 - Bahrain, University of Bahrain, p.1-6.

SANI, B.S.; CELVAKUMARAN, P.; VIGNA, K.R.; WALKER, S.; ALRAZI, B.; YING, Y.J.; DAHLAN, N.Y.; RAHMAN, M.H.A. Energy storage system policies: Way forward and opportunities for emerging economies. **Journal of Energy Storage**, v.32, p.1-14, 2020.

SARASWAT, S.K.; DIGALWAR, A.K. Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multicriteria decision approach. **Renewable Energie**, v.171, p.58-74, 2021.

SEMENOV, A.F.; KLUNDUK, G.A.; DEBRIN, A.S.; ZAPLETINA, A.V. Calculation of AIIS reliability indicators. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v.990, p.1-10, 2022.

SIKSNELYTE.; I.; ZAVADSKAS, E.K.; STREIMIKIENE, D.; SHARMA, D. An Overview of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Dealing with Sustainable Energy Development Issues. **Energies**, v.11, n. 2754, p.1-21, 2018.

SCHITTEKATTE, T.; MEEUS, L. Flexibility markets: Q&A with project pioneers. **Utilities Policy**, v.63, p.1-11, 2020.

SEDGHIYAN.; ASHOURI.; MAFTOUNI, N.; XIONG, Q.; REZAEI, E.; SADEGHI, S. Prioritization of renewable energy resources in five climate zones in Iran using AHP, hybrid AHP-TOPSIS and AHP-SAW methods. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v.44, p.1-14, 2021.

SHI, W; BAO, Z.; WANG, J.; LU, N.; ZHU, F.; SHEN, J. A privacy-preserving degree-matching multi-attribute auction scheme in the smart grid auction market. **Pers Ubiquit Computer**. v. 21, p. 779-789, 2017.

SOUZA, O. D. N. **Introdução à Teoria dos Conjuntos Fuzzy**. Universidade Estadual de Londrina. [S.l.]. 2010.

SPYRIDONIDOU, S.; VAGIONA, D.G. Systematic Review of Site-Selection Processes in Onshore and Onshore Wind Energy Research. **Energies**, v.13, n.5906, p.1-26, 2020.

SU, W.; ZHANG, D.; ZHANG, C.; STREIMIKIENE, D. Sustainability assessment of energy sector development in China and European Union. **Sustainable Development**, v. 28, p.1063-1076, 2020.

SYAFRIANTO, D.; BANJAR-NAHOR, K.M.; HARIYANTO, N. Optimized Design of Renewable Energy, Firm Capacity and Stable Operation Power Plant for Serving Off-grid Commercial Load in Indonesia. **Presented in 2020 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)**, p.1-6, 2020.

TIAN, C.; PENG, J.; ZHANG, W.; ZHANG, S.; WANG, J. Tourism environmental impact assessment based on improved AHP and picture fuzzy PROMETHEE II methods. **Technological and Economic Development of Economy**, v.26, n.2, p.355-378, 2020.

THE OFFICE OF GAS AND ELECTRICITY MARKETS (OFGEM). **Ofgem's Future Insights Series: Flexibility Platforms in electricity markets**, p.1-31, 2019.

TRINDADE, J. E. D. O. Mensuração e Avaliação da Capacidade Inovativa de Micro, Pequenas e Médias Empresas: aplicação de métodos multicritério fuzzy de apoio à decisão. **Dissertação Pós Graduação Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica**, Rio de Janeiro, 2016. 107p.

TUTAK.; M.; BRODNY.; BINDZÁR, P. Assessing the Level of Energy and Climate Sustainability in the European Union Countries in the Context of the European Green Deal Strategy and Agenda 2030. **Energies**, v.14, n.1767, p.1-32, 2021.

UNITED STATES.FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC). Order 841. **Electric Storage Participation in Markets Operated by Regional Transmission Organizations and Independent System Operators**, p.1-258, fev. 2018.

VALAREZO, O.; GÓMEZ, T.; CHAVES-AVILA, J.P.; LIND, L.; CORREA, M.; ZIEGLER, D.U.; ESCOBAR, R. Analysis of New Flexibility Market Models in Europe. **Energies**, v.14, n. 3521, p.1-24, 2021.

YANG, F; ZHAO, X. Policies and economic efficiency of China's distributed photovoltaic and energy storage industry. **Energy**, v.154, p.221-230, 2018.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, 1965, p.338-353.

ZHANG, Z.; DING, T.; ZHOU, Q.; SUN, Y.; QU, M.; ZENG, Z.; JU, Y.; LI, L.; WANG, K.; CHI, F. A review of technologies and applications on versatile energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.148, p.1-31, 2021.

ZHAO, J.; PATWARY, A.K.; QAYYUM, A.; ALHARTHI, M.; BASHIR, F.; MOHSIN, M.; HANIF, I.; ABBAS, Q. The determinants of renewable energy

sources for the fueling of green and sustainable economy. **Energy**, v.238, p.1-12, 2022.

ZHONG, J.; HU, X.; YUKSEL, S.; DINÇER, H.; UBAY, G.G. Analyzing the Investments Strategies for Renewable Energies Based on Multi-Criteria Decision Model. **IEEE Access**, v.8, p.1-23, 2020.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. What is an INDC? Disponível em: <<https://www.wri.org/indc-definition>>. Acesso em 20 de ago. 2022.

WU, Z.; ZHOU, M.; ZHANG, T.; LI, G.; ZHANG, Y.; LIU, X. Imbalance settlement evaluation for China's balancing market design via an agent-based model with a multiple criteria decision analysis method. **Energy Policy**, v.139, p.1-17, 2020.

Apêndice 1- Formulário enviado aos especialistas

Avaliação de Políticas Públicas para inserção de Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil

Prezado especialista,

Você está recebendo um questionário cujo objetivo é **a avaliação e a seleção de políticas públicas para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil**.

Ficariamos muito agradecidos com sua resposta, uma vez que os resultados empíricos farão parte da **dissertação de mestrado desenvolvida no âmbito do curso de Metrologia da PUC-Rio**, contribuindo para o avanço do conhecimento científico neste campo.

Atenciosamente,

Guilherme Cosentino / Prof. Rodrigo Calili.

Objetivo do Instrumento de Coleta de Dados

Este questionário faz parte da pesquisa de dissertação de mestrado que visa **identificar cenários regulatórios que viabilizem a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis na matriz elétrica brasileira**, em um contexto de inserção cada vez maior de fontes de geração de energia intermitente.

As políticas públicas aqui propostas estão em linha com a nota técnica nº 013/2021 da EPE, segundo a qual, existem desafios para a utilização das usinas hidrelétricas reversíveis em mercados de energia elétrica. Assim, estas políticas buscam superar tais desafios, dentro do contexto de modernização do setor elétrico brasileiro.

O objetivo deste Instrumento de Coleta de Dados é avaliar e selecionar potenciais políticas públicas que favoreçam a **utilização de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil dentro do sistema elétrico brasileiro**. A avaliação se dá à luz de quatro dimensões: Econômica, Técnica, Política e Robustez.

Políticas públicas a serem avaliadas e escolhidas

1. **Criação de um mercado de capacidade** - A definição do mercado de capacidade passa por um objetivo principal: fornecer a quantidade de capacidade que otimize e/ou minimize a duração dos apagões/rações. Esta definição seria adequada para o setor elétrico brasileiro, sobretudo, considerando a abertura para o mercado livre. Poderia ser permitida a contratação do produto capacidade a partir de

mecanismos baseados em mercado (obrigação de capacidade descentralizada e pagamentos de capacidade com base em preços de mercado).

2. **Criação de um mercado de flexibilidade** - Os mercados de flexibilidade podem melhorar a utilização das redes de distribuição locais, reduzindo as necessidades de investimento nas mesmas. Tais mercados podem ser usados por meio da plataforma "peer to peer" em mercados locais ou com mercados controlados por operadores de transmissão e/ou distribuição (TSO e DSO). Com a abertura do mercado livre de energia no Brasil, a adoção deste modelo de mercado permitiria que toda a rede pudesse ser vista como um único ativo a interagir com outras plataformas, entregando novos serviços à rede elétrica, inclusive, os serviços relacionados à confiabilidade e à flexibilidade.
3. **Implementação de um leilão multiatributo** - A principal aplicação decorrente da definição de atributos é a utilização destes em leilões de energia. Podem ser oferecidos múltiplos atributos, tais como impactos socioambientais, segurança operacional, energia, potência, dentre outros. A sugestão da aplicação desta política no setor elétrico brasileiro se baseia no fato de que, além das fontes renováveis convencionais, possa haver a participação dos sistemas de armazenamento de energia, em especial, das usinas hidrelétricas reversíveis, as quais, poderiam entregar um atributo valioso para o sistema brasileiro, a confiabilidade.
4. **Implementação de um leilão de capacidade** - Leilões de capacidade são mecanismos de mercado, nos quais, os volumes requeridos de capacidade podem ser adquiridos de forma centralizada ou descentralizada. O leilão de capacidade poderia ser executado por um agente responsável pelo planejamento do sistema ou ser totalmente desregulado, sendo promovido exclusivamente pela iniciativa privada no caso da liberalização do mercado (um novo produto). Em qualquer um dos cenários sugeridos, deveria haver espaço para participação de tecnologias inovadoras como armazenamento de energia, com destaque para as usinas hidrelétricas reversíveis.
5. **Implementação de uma política de incentivos** - A lei nº 9.427/1996 estabeleceu que os empreendimentos de alta potência e baseados em geração de fontes incentivadas receberiam uma redução mínima de 50% na Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD). Todavia, a Lei nº 14.120/2021 determina o término destes descontos dados pela lei de 1996. Uma sugestão de política, diferentemente do que foi definido pela lei de 2021 é que este desconto na TUSD seja estabelecido como 100% nos cinco primeiros anos de operação de uma tecnologia de armazenamento (usina reversível, inclusive), caindo para 80% e 50% a cada cinco anos, respectivamente, até que este subsídio seja extinto ao final dos quinze anos de operação do empreendimento.

Destaca-se que todas as propostas partem do pressuposto de que o fornecimento de energia elétrico deve ser confiável e seguro, não sendo admitidas falhas ou interrupções.

Instruções de preenchimento do Instrumento de Coleta de Dados

Para cada uma das cinco políticas públicas definidas, pedimos que marque **apenas uma alternativa** em relação ao grau do uso/aplicação da mesma (por ex.: “muito baixo”, “baixo”, “moderado”, “alto” e “muito alto”) no tocante a cada um dos critérios avaliados.

Ex.: No critério fictício “S”, a criação do mercado de capacidade tem importância “baixa”, a criação do mercado de flexibilidade, importância “moderada”, a implementação de um leilão multiatributo tem importância “baixa” e a implementação de um leilão de capacidade, importância “muito alta”. Já a adoção de uma política de incentivos não se aplica (NA) a esse critério ou mesmo não guarda relação com o mesmo.

Política Pública		Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	NA
1	Mercado de capacidade		x				
2	Mercado de flexibilidade			x			
3	Leilão multiatributo		x				
4	Leilão de capacidade					x	
5	Política de incentivos						x

Para cada dimensão são apresentados e descritos, critérios, para os quais, deve ser feita essa avaliação. Também há espaço para a sugestão de outras políticas públicas a serem avaliadas. Ao final há um espaço para descrição das sugestões apontadas.

Dimensão Econômica: critérios

E1. Custo para a sociedade. Este critério avalia o impacto de cada política sobre custo total para a sociedade, contemplando não só o custo de geração de energia elétrica, mas também os impactos financeiros indiretos. Trata-se de uma análise de impacto (ex-ante) que busca avaliar previamente as consequências econômicas de determinada política pública.

Custo para a sociedade							
Política Pública		Muito baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

E2. Potencial de transformação do mercado. Este critério avalia o potencial que uma determinada política tem de promover transformações no mercado de energia elétrica no país.

Potencial de transformação do mercado							
Política Pública		Muito baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

E3. Aumento de subsídios e encargos. Este critério avalia o impacto direto de cada política nos subsídios e encargos destinados ao custeio da geração de energia elétrica no sistema elétrico brasileiro.

Aumento de subsídios e encargos						
Política Pública	Muito baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	NA
1	Mercado de capacidade					
2	Mercado de flexibilidade					
3	Leilão multiatributo					
4	Leilão de capacidade					
5	Política de incentivos					
6	Outra (especifique)					
7	Outra (especifique)					

Dimensão Técnica: critérios

T1. Confiabilidade. Este critério avalia o impacto que certa política pública pode provocar na confiabilidade do suprimento ao consumidor final, ou seja, na capacidade de um sistema de geração em disponibilizar energia elétrica a qualquer momento, sempre que demandado, sem falhas ou interrupções.

Confiabilidade						
Política Pública	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	NA
1	Mercado de capacidade					
2	Mercado de flexibilidade					
3	Leilão multiatributo					
4	Leilão de capacidade					
5	Política de incentivos					
6	Outra (especifique)					
7	Outra (especifique)					

T2. Integração com outras fontes de geração energética. Este critério avalia o potencial da política em ampliar a integração de tecnologias de armazenamento (usinas reversíveis, inclusive) com outras fontes de geração energética, especialmente as de natureza intermitente (solar e eólica, por exemplo).

Integração com outras fontes de geração energética						
Política Pública	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	NA
1	Mercado de capacidade					
2	Mercado de flexibilidade					
3	Leilão multiatributo					
4	Leilão de capacidade					
5	Política de incentivos					
6	Outra (especifique)					
7	Outra (especifique)					

Dimensão Política: critérios

P1. Alinhamento às políticas nacionais. Este critério avalia o alinhamento do emprego de uma dada política pública às políticas públicas de incentivo às fontes de energias renováveis.

Alinhamento às políticas nacionais							
	Política Pública	Muito baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

P2. Governança pública e sustentabilidade do setor. Este critério afere o conjunto de mecanismos de liderança, estratégia e controle possíveis para avaliar, direcionar e monitorar a gestão da política pública, garantindo sua continuidade, sem depender de ações políticas ou subsídios. Também possui objetivo de definir órgãos competentes e responsáveis para implementar, avaliar, direcionar e mensurar a política pública adotada.

Governança pública e sustentabilidade do setor							
	Política Pública	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

Dimensão Robustez: critérios

R1. Dificuldade de implementação. Este critério avalia a dificuldade esperada para a implementação da política pública planejada. Contempla ajustes legais e regulatórios necessários e possíveis acordos políticos necessários para sua aprovação, além de considerar o quanto a proposta política pode ser flexibilizada durante sua discussão, sem comprometer sua eficácia e também, a sua aprovação.

Dificuldade de implementação							
Política Pública		Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

R2. Experiência prévia. Este critério avalia se há registro de ações ou políticas públicas já experimentadas, semelhantes à proposta, em nível nacional ou internacional. Quanto maior a quantidade de experiências prévias, maior a pontuação, e vice-versa.

Experiência prévia							
Política Pública		Muito pouca	Pouca	Moderada	Grande	Muito grande	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

R3. Possibilidade/ facilidade de monitorar e avaliar as políticas. Este critério mede a possibilidade ou facilidade para que a política pública possa ser monitorada e avaliada após sua implementação, ou seja, o acompanhamento da efetividade da política.

Possibilidade/ facilidade de monitorar e avaliar as políticas							
Política Pública		Muito difícil	Difícil	Moderada	Fácil	Muito fácil	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

R4. Impactos previstos. Consiste na avaliação prévia das consequências da política, verificando se os benefícios dos potenciais excedem os custos estimados e se, entre todas as alternativas consideradas para alcançar o objetivo proposto, a ação é a mais benéfica para a sociedade.

Impactos previstos							
Política Pública		Muito baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	NA
1	Mercado de capacidade						
2	Mercado de flexibilidade						
3	Leilão multiatributo						
4	Leilão de capacidade						
5	Política de incentivos						
6	Outra (especifique)						
7	Outra (especifique)						

Sugestões de políticas públicas

Caso você tenha sugerido e avaliado outras políticas públicas, além das propostas, pedimos que as descreva a seguir, a exemplo da explicação na seção “Objetivo do Questionário”.

Política pública sugerida:

Descrição:

Política pública sugerida:

Descrição:
