



Tarcísio Luiz Coelho de Castro

**Metodologia para comparação e seleção de
tecnologias de armazenamento de energia para sistemas
elétricos de potência: uma abordagem multicritério**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-
Rio

Orientador: Prof. Rodrigo Flora Calili

Rio de Janeiro,
outubro de 2022



TARCISIO LUIZ COELHO DE CASTRO

Metodologia para comparação e seleção de tecnologias de armazenamento de energia para sistemas elétricos de potência: uma abordagem multicritério

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Rodrigo Flora Calili

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia

Prof. Heloisa Teixeira Firmo

UFRJ

Prof. Eduardo Felga Gobbi

UFPR

Rio de Janeiro, 28 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.

Tarcísio Castro

Consultor Técnico em projetos de usinas hidrelétricas. Graduou-se em Engenharia Civil, com ênfase em Obras Hidráulicas e Saneamento, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

Ficha Catalográfica

Castro, Tarcísio Luiz Coelho de

Metodologia para comparação e seleção de sistemas de armazenamento de energia para um sistema elétrico de potência: uma abordagem multicritério/ Tarcísio Luiz Coelho de Castro; orientador: Rodrigo Flora Calili. – 2022.

226 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental - Teses. 3. Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica. 5. Geração de energia renovável. I. Calili, Rodrigo Flora. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Em memória de meus queridos pais aos quais devo tudo e a minha querida e
saudosa irmã Maria Cecília.

Agradecimentos

Posso citar, logo no início desse texto de gratidão, que a vida sempre me proporcionou, nas encruzilhadas, pistas e ventos que me conduziram para as boas escolhas. Assim como nas minhas crenças e experiências de vida. Encaro isso como sendo a presença silenciosa de Deus no meu caminho.

Numa dessas encruzilhadas tive a oportunidade de iniciar minha carreira como professor na UFRJ. E hoje, após mais de 40 anos, só tenho a agradecer aos meus mestres, colegas de universidade, e aos meus alunos, que tanto me ensinaram, os quais espero ter contribuído de alguma forma, para sua formação.

Já como Engenheiro, gostaria de agradecer o aprendizado e crescimento como profissional e como pessoa às várias Empresas de Consultoria como a Geotécnica, Engerio e Engevix. Sou grato aos engenheiros e amigos Ronei, Jonatas e José Renato.

Agradeço ao amigo Márcio Szechtman, ao qual nutro enorme respeito e amizade sincera e que me convidou a entrar para o quadro de profissionais da PSR, empresa onde encontrei um ambiente de pesquisa e prática que é simplesmente uma fábrica de ideias, comandada por um dos maiores engenheiros e cientistas na área de energia, Mário Veiga.

Na PSR fiz muitos amigos. Entre eles, meu ex-aluno e atual diretor executivo, Rafael Kelman, assim como o engenheiro Jorge Trinkenreich, torcedor do América F. C. como eu.

Foi aqui, na PSR, que encontrei espaço para me desenvolver e voltar às salas de aula como aluno.

Após muitos anos atuando na área de Recursos Hídricos, pude ainda ter a oportunidade de concluir o Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental e, consolidar o aprendizado nessa área tão importante atualmente. Esta dissertação é reflexo de um contínuo aprendizado que pretendo seguir na tentativa de estar sempre em evolução.

Meus agradecimentos são dirigidos especialmente àqueles que fizeram desta dissertação o produto de um trabalho em equipe.

Ao meu ex-aluno e hoje mestre Luiz Rodolpho Sauret, colega de trabalho, pelas sugestões, pela leitura paciente dos textos, e pelo companheirismo ao longo

do curso de mestrado e por sua sincera amizade, e com quem tenho grande prazer de pesquisar e trabalhar.

Ao professor Rodrigo Calili, pela orientação dedicada, pelo olhar minucioso, pela confiança depositada e pela enorme paciência com minhas falhas e dificuldades.

Aos meus colegas de vida, ex-alunos, e doutores nas suas universidades, que aceitaram participar da banca dessa dissertação, Heloisa Firmo e Eduardo Gobbi. E a minha amiga Flávia que me auxiliou na tarefa de edição e formatação final.

Aos meus pais, Francisco e Francisca que me deram uma educação completa em todos os sentidos para que eu me tornasse um ser humano melhor. Devo tudo a eles. À toda minha imensa e querida família, por me proporcionar um ambiente de amor e suporte nas horas difíceis (não posso citar todos não caberia aqui, irmãos e irmãs; cunhados e cunhadas; sobrinhos e sobrinhas). E em especial à minha saudosa irmã Cecília, que faz muita falta.

À minha querida esposa Moema, meu Norte. Que transformou minha vida, deu cor aos meus dias, e com quem aprendi o que é amar de forma completa. Um dos encontros mais felizes com que podia sonhar.

E aos meus filhos, Tiago, André e Luiza, razões da minha vida. Presentes que recebi ao longo do caminho, aos quais me fizeram nascer como pai e crescer como pessoa. E com eles vieram minhas queridas noras, Flávia e Juliana. E, por último porque são mais do que especiais, agradecer aos meus netos Joaquim e Miguel. Anjos que alegram e enchem de luz todos os meus dias (além do Edie e Bali, que aprendi a gostar).

E, por fim, àqueles com quem porventura tenha falhado como professor, amigo, colega de trabalho, e minha família pela compreensão nas minhas ausências. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de Financiamento 001.

Resumo

Castro, Tarcisio Luiz Coelho de; Calili, Rodrigo Flora (Orientador). **Metodologia para comparação e seleção de sistemas de armazenamento de energia para um sistema elétrico de potência: uma abordagem multicritério.** Rio de Janeiro, 2022. 226p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nos últimos anos tem havido uma grande modificação da matriz elétrica brasileira, como se pode comprovar ao avaliar os recentes Planos de Expansão de Energia – PDE elaborados pela EPE. Houve um grande investimento em usinas eólicas e fotovoltaicas e uma redução no número de hidroelétricas construídas e planejadas. Além disso, as recentes crises hidrológicas podem sinalizar que a alteração climática, associada a intensificação dos ciclos naturais de bloqueios atmosféricos (ENOS), pode reduzir a geração hidráulica. Com maiores investimentos em usinas eólicas e solares (fontes não controláveis) em larga escala, será necessário dispor de formas para garantir o atendimento à demanda. Essa garantia poderá se dar por meio de mais geração termoelétrica a combustível fóssil, que pode ser reduzida com a implantação de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs). Assim, a variabilidade de produção de energia das fontes intermitentes precisa ser coberta com recursos que aumentem a flexibilidade operativa. E dessa forma, o interesse maior da pesquisa visou utilizar métodos de análise multicritério de apoio à decisão com base na avaliação do desempenho dos SAEs considerando diversos atributos técnicos, econômicos e socioambientais para selecionar aqueles mais adequados para o suporte de grade na transmissão e distribuição e de gerenciamento de energia elétrica (num sistema hidrotérmico que vai ser cada vez mais complexo de operar com a entrada de grandes plantas de geração renovável intermitente). Foi selecionado o modelo AHP *Fuzzy* TOPSIS para essa avaliação por facilitar avaliações subjetivas, como aquelas associadas aos aspectos socioambientais e por sua maior transparência numa discussão multidisciplinar e com diversos interlocutores. O resultado mostrou a eficácia da metodologia adotada para a ordenação e seleção das melhores soluções para armazenamento de energia elétrica.

Palavras-chave - Sistemas de armazenamento de energia; geração de energia renovável; impactos socioambientais; análise multicritério.

Extended abstract

Castro, Tarcisio Luiz Coelho de; Calili, Rodrigo Flora (Advisor). **Methodology for comparing and selecting energy storage systems for an electric power system: a multicriteria approach.** Rio de Janeiro, 2022. 226 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

1 Introduction

In recent years there has been a major change in the Brazilian electrical matrix, as can be seen when evaluating the last Energy Expansion Plan (PDE 2002) prepared by EPE. There was a large investment in wind and photovoltaic plants, and a reduction in construction and even in the planning of new hydroelectric plants.

Associated with this change, it is important to highlight the observation of climate change effects in its hydrographic basins in the last ten years. A long period of drought was noticed, which started in 2012 and lasted until 2019, being an even more serious event than the worst drought ever recorded in Brazilian basins.

This fact resulted in the hiring of emergency thermal plants to meet demand in 2022. This hydrological crisis is already a sign that climate change, associated with the intensification of natural cycles of atmospheric blockages (ENSO), can reduce hydraulic generation. And with greater investments in large-scale in the wind and solar plants, it will be necessary to have more thermoelectric generation using fossil fuel to support the intermittence of these renewables, an operation that can be reduced with the implementation of Energy Storage Systems (ESSs).

Resources with operational flexibility that can mitigate the increasing variability of the production of renewable sources in electrical matrices will contribute to balancing the load and regulating the frequency. Thus, ESS can reduce the effects of the irregularity of renewable production and help transmission networks to meet demand at peak consumption hours (EPE, 2018), maintain electrical system frequency stability, and optimize the economic performance of generation systems, avoiding activation of less competitive resources such as fossil fuel thermoelectric plants (EPE, 2018). Several countries have already started to invest in pumped storage hydropower (PSH) to enable the intermittent renewable generation and reduce emissions (China and Europe, IDB, 2021).

The dissertation aims to propose a hierarchy model of electric energy storage technologies with the aid of multicriteria decision support methods. The Figure 1 show the research conceptual model as proposed.

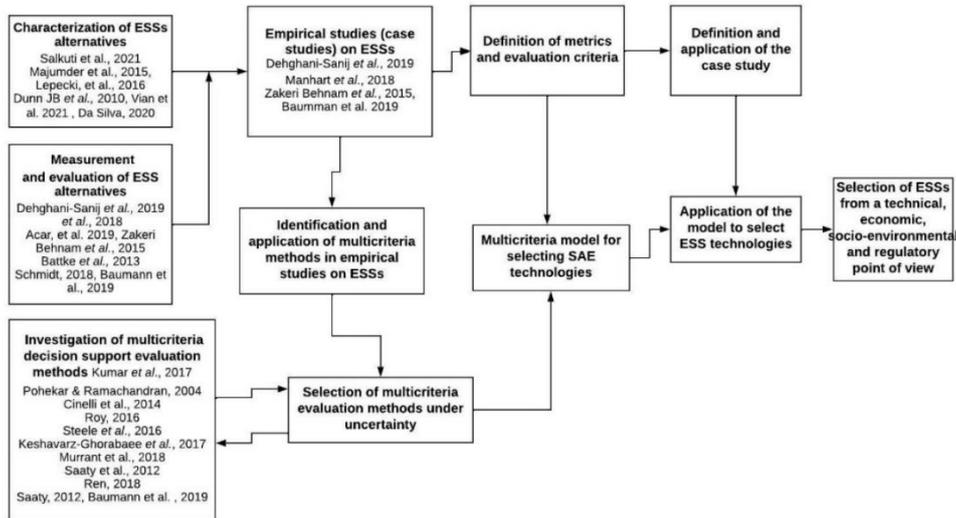


Figure 1: Conceptual model
Source own elaboration

2 Renewable energy generation and electricity storage

There are several ESS technologies that can adjust the temporal and geographic differences between the supply and demand of energy in electrical transmission and distribution systems, making the following aspects possible:

- adequate and efficient use of several intermittent renewable sources, integrating different sources of renewable and non-renewable energy generation in an electrical matrix.
- generation of electric energy close to the consumer, creating new business models for consumers and electric energy concessionaires.
- electricity supply in isolated regions of the transmission system, based on intermittent renewable sources; increase in the stability, flexibility, reliability and resilience of the electricity network, even with the insertion and increase in the use of renewable sources.

Some of these technologies are already mature and are commercially competitive in many applications. Among them are PSH plants, battery technologies, and thermal accumulation systems. Others are still in the early stages of development and therefore are not yet as competitive.

The existing energy storage technologies present different levels of flexibility, and performance, according to the technical requirements associated with each application. Among these requirements are energy and power densities, response time, cost and economy of scale, useful life, monitoring and control equipment, efficiency and operational restrictions, which define the most appropriate technology. for a given application (LEPECKI *et al.*, 2016). The available technologies must adapt to different applications, both in terms of storage capacity and loading and unloading times.

It is important to note that the comparisons are only generic and conceptual in nature, as the storage options and the existing power ranges are quite wide. Taking PSH plants as an example, there are those with a short discharge time (eg 4h) as well as those of a seasonal nature, with discharge times of up to thousands of hours.

The consulted literature shows a wide variety of options and services that the different ESSs can provide. Decourt et al. (2013) shows the applications as a function of power and discharge time, associated with the services provided to the grid for energy storage (Figure 2).

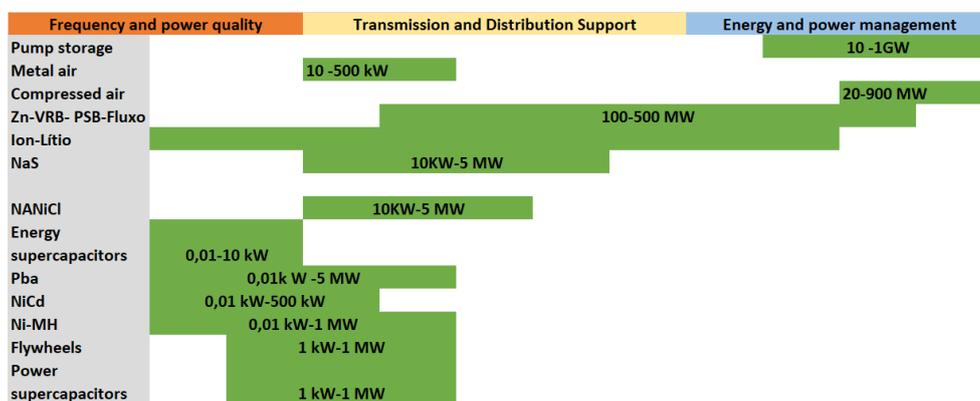


Figure2: Services and capacity range of ESSs
 Source own elaboration – Adapted from – DECOURT et al. 2013.

As the objective is to evaluate the technologies that best fit the network support and energy and power management, and with more maturity (Figure 2.5), the following systems were selected to be compared:

- Mechanical systems: PSH.

- Electrochemical batteries: Lead-acid (Pba); Nickel Cadmium (Ni-Cd); Nickel-metal hydride (NiMH); Ion-Lithium (Ion-Li); and Sodium-sulfur (Na-S).

3 Assessment and selection of ESS technologies

3.1 Multicriteria decision support methods under uncertainty

ESSs are seen as one of the main elements to develop a renewable and sustainable electrical matrix (OLIVEIRA et al., 2015). As presented, they can serve a wide range of services. Selecting a more suitable ESS, or a source of electricity generation is a problem that usually involves several stakeholders with generally divergent objectives. Several studies are available to address this problem by applying multicriteria decision analysis methods (Multicriteria Decision-making Methods - MCDM).

The decision-making problem is characterized by a need to evaluate a set of alternatives. This analysis aims to provide systematic thinking about complex problems, improving the quality of the results of these decisions. And it can occur even when the decision maker chooses to “not decide” (CALILI, 2018).

MCDM is considered a tool to support decision-makers in the organization and systematization of available information, rethinking the consequences of different solutions and verifying their opinions and needs (WILKENS, 2012). Decisions and preferences can be expressed mathematically and, in this way, can be associated with observations, being later reproduced for different scenarios listed with the participation of the stakeholders (ALCAMO, 2008).

Recent experience in hydroelectric inventory studies in Brazil shows the enormous difficulty of making a decision that involves subjectivity, risks, and difficulty in obtaining an objective quantification. For example, the best alternative for the use of hydroelectric plants in a basin involves many subjective impact assessments and socio-environmental indicators.

If indicators and comparison attributes are associated with qualitative factors, it is very hard to reach a consensus, as researchers from different disciplines are

involved, with different points of view, not to mention the difficulty in understanding some technical and economic aspects (KAYA et al., 2010).

Considering all these points, methods based on *fuzzy* set logic can be very useful, as they allow the elaboration of procedures to express the decision-making processes in linguistic terms, which is not an easy task, as the stakeholders would need to have a common objective to solve the problems of imprecision, ambiguity, and subjectivity of human judgment (KUMAR et al., 2017).

Thus, the research carried out shows that the AHP-Fuzzy TOPSIS multi-criteria approach can face these challenges when comprising the following steps:

- Defining a hierarchical decision-making structure and criteria (and sub-criteria) for validating indicators for measuring and evaluating technologies.
- Assigning weights to the criteria using the AHP method.
- Making a quantitative assessment of the compliance degree of the indicators with the criteria by the TOPSIS method; and
- Making qualitative assessments based on the results of the previous quantitative analysis.

According to this methodology, the best alternative would be the one closest to the positive ideal solution (positive ideal solution or PIS) and the one furthest from the negative ideal solution (negative ideal solution or NIS).

Therefore, this dissertation proposes to adopt the AHP-TOPSIS fuzzy model also proposed by Trindade (2016) and Martins (2017).

3.2 Criteria and sub-criteria for evaluating ESSs

Based on recent references and experiences, to propose a consistent and comprehensive model for the selection of ESSs, criteria, and sub-criteria were defined considering the four dimensions most cited in systematic evaluations (BAUMANN *et al.*, 2019): (i) technical; (ii) socio-environmental; (iii) economic; and (iv) institutional. It is worth noting that the institutional and regulatory dimension was not mentioned. Still, in the case of Brazil, it seems to be very relevant due to the lack of policies for ESS introduction into the electricity matrix.

Fourteen criteria were researched, analyzed, and considered, as shown in Table 2, below. Once the social dimension was mentioned only a few times, it was

decided to create a socio-environmental dimension in which both dimensions were aggregated.

Table 2: Dimensions and selected criteria

Dimension	Criteria
Technical	Construction time
	Electrical connection proximity
	Maturity
	Energy density
	Efficiency
	Capacity
	Lifetime
	Response time
Socioenvironmental	Greenhouse emission
	Land uses and conflicts
	Risks to human health and workers
	Contamination of water resources and soils
	Social and political acceptance
Economic	Investment risk
	Contribution to the economy
	Levelized cost/Capex
Institutional and regulatory	Simplicity in environmental licensing / risks of delays
	Existence of public policies /regulation

4 Demonstration of the applicability of models for selecting ESS technologies

The proposed model for the evaluation and selection of ESSs technologies was based on the integration of two multicriteria analysis methodologies – AHP and Fuzzy TOPSIS. This decision was based on the conceptual approach for an evaluation in many dimensions, considering the enormous difficulty of comparing technological alternatives that involve subjectivity. This aspect brings risks related to an objective understanding and quantification of the attributes selected for the assessment, especially while dealing with very different disciplines and variables, such as those involved in a socio-environmental analysis.

The method, as proposed in this work, is composed of two phases:

(i) use of the AHP method, which seeks to establish criteria first and then weights for evaluating of ESS technologies.

(ii) and use of Fuzzy-TOPSIS methods, in which it is intended to seek a hierarchy of these technologies considering their use in the Brazilian electrical matrix.

The *Fuzzy* sets used in the TOPSIS method were justified by the uncertainty of the answers given by the experts.

4.1

4.3 Applicability demonstration of models for selecting ESS technologies

Considering the collected data in the literature review about capacity and services to support the electricity transmission and distribution network, the following ESSs were selected, as already mentioned: (i) Lead acid; (ii) Nickel-cadmium; (iii) Nickel metal hydride; (iv) Lithium-ion and (v) Reversible hydroelectric plants.

However, information was not found for all the criteria presented before. Thus, a data collection instrument was created to be submitted to experts in the electricity sector and academia, in order to obtain opinion about the performance of ESSs for each of the selected criteria.

These questionnaires were sent with all the criteria, including the ones with values found in literature. This decision resulted in the use of two matrices, one with only the answers to the questionnaires and the other with both data (from the literature and the mentioned answers), being possible to verify eventual biases of opinion.

The research carried out in the literature made it possible to obtain values for some criteria such as: energy density; efficiency; capacity; lifespan; greenhouse gas emissions; leveled cost.

4.4.1 Phase I - AHP Application

The IPÊ model was used to define the comparison matrices in order to identify the weights of each criterion and dimension in the analysis. The IPÊ system, version 1.0, was developed by the Universidade Federal Fluminense (UFF), with the objective of implementing the AHP algorithm, proposed by Thomas L. Saaty (1990). The resultant weights vectors for each criterion are shown in Table 3.

Table 3: Weight final vectors - W

Cr�terios	W
T1 – construction time	0,02
T2 - electrical connection proximity	0,02
T3 - maturity	0,02
T4 – energy density	0,04
T5 - efficiency	0,03
T6 - capacity	0,06
T7 – life time	0,06
T8 – response time	0,04
SE1 - greenhouse gas emissions	0,06
SE2 – land use and conflicts	0,03
SE3 – risks to human health and workers	0,05
SE4 - social and political acceptance	0,03
SE5 - contamination of water resources and soils	0,12
E1 – investimento risks	0,09
E2 – contribution for the economy	0,06
E3 – levelized cost/capex	0,14
IR1 - licensing simplicity/delay risks	0,10
IR2 - public policy	0,05

After the calculation of consistency ratios (*CR*), the weights of dimensions and criteria were confirmed and used in the Fuzzy-TOPSIS phase.

4.4.2 Phase II - Fuzzy-TOPSIS application

This item presents the result of both modeling.

Table 4 presents *CCi* based only in the expert answers to the questionnaires in Table 5 based on both information (including the ones from literature)

Table 4: Proximity coefficient *CCi* – expert answers

ESS alternatives	D+	D-	CCi
Lead Acid - Pba	0,1603	0,64893	0,8019
Nickel-cadmium	0,1600	0,67288	0,8079
Nickel-metal hydrides	0,1590	0,66547	0,8071
Lithium ion	0,1279	0,71420	0,8481
Sodium Sulfur	0,1432	0,13035	0,4764
Pumped storage plants	0,8236	0,84689	0,5070

The preference ordering of ESS technologies were verified for both modeling alternatives, as shown in Table 10

- 1 – Lithium ion
- 2 – Nickel-cadmium
- 3 – Nickel-metal hydrides
- 4 – Lead Acid - Pba
- 5 – Pumped storage plants
- 6 – Sodium Sulfur

Thus,

Table 5: Proximity coefficient CCI – expert answers and literature

ESS Alternatives	D+	D-	CCI
Lead Acid - Pba	0,1774	0,52042	0,7458
Nickel-cadmium	0,2213	0,56689	0,7192
Nickel-metal hydrides	0,2394	0,58443	0,7094
Lithium ion	0,2320	0,67349	0,7438
Sodium Sulfur	0,1537	0,13963	0,4761
Pump storage	0,7111	0,76992	0,5199

It can be noted that the alternatives that had the worst performance were the sodium sulfur battery and the pumped storage plants, the best in both cases being the lithium-ion battery. The others showed some change in order, the most relevant being lead-acid, which appeared as a second option in the opinion of experts and which in the second round appears in fourth (Table 6).

Table 6: Preference order results

ESS	Preference order - expert answers	Preference order - expert answers and literature
Lead Acid - Pba	1	1
Nickel-cadmium	2	2
Nickel-metal hydrides	3	3
Lithium ion	4	4
Sodium Sulfur	5	6
Lead Acid - Pba	6	5

5 Conclusions and recommendations

The present research project aimed to contribute to the advancement of knowledge about evaluation, comparison and selection of technological alternatives

for electrical energy storage through multicriteria analysis techniques to support the decision associated with fuzzy set theory. In order to meet this objective, a model was used to carry out a diagnosis and evaluation of the performance for the hierarchy of the ESSs.

The results of the practical application covering the main attributes showed the relevance of this type of method to consider uncertainties, making them transparent to the stakeholders for decision making. The following aspects can be highlighted in this case study:

- It is possible to consider many dimensions and criteria in a systematic evaluation, reducing subjectivity.
- The application showed the validity of the experts' judgments in defining the preference between the attributes, when compared with the results of an analysis carried out with data from the criteria obtained from literature.
- The data collected made it possible to define that the most relevant systems for application in network support and energy management services are Lithium-Ion and Nickel-Cadmium batteries.
- The results showed that the AHP fuzzy-TOPSIS model is consistent, having the ability to process data from different dimensions in an integrated and relatively simple way for a comparative evaluation of the different ESSs.

Based on the results found, some recommendations can be suggested:

- Use AHP Fuzzy-TOPSIS multicriteria model considering the space-time evaluation of the ESSs life cycle.
- Include new technologies, at least the most promising ones, in this multicriterion analysis.
- Carry out a more comprehensive analysis of the socio-environmental impacts of the various ESSs and include recycling capacity in the analyses.
- Test new hybrid methods such as Fuzzy ELECTRE, PROMETHEE, among others for comparison.
- Invest in the acquisition of better quantification and qualification of the dimensions, mainly socio-environmental and economic ones, reducing subjectivity and uncertainty.

- Carry out a spatial-temporal comparison of the ESSs in different scenarios for the development of electrical matrices.

Keywords

Energy storage; renewable energy generation; environment impacts; climate change.

Sumário

1 . Introdução	26
1.1. Definição do problema de pesquisa	30
1.2. Objetivos: geral e específicos	31
1.3. Metodologia	32
1.3.1. Fase exploratória e descritiva	33
1.3.2. Fase de pesquisa aplicada	34
1.3.3. Fase conclusiva	34
1.4. Estrutura da dissertação	36
2 . Geração de energia renovável e o armazenamento de eletricidade	37
2.1. A energia renovável e a necessidade do armazenamento de energia	37
2.2. Regulação para os SAEs	43
2.3 Alternativas tecnológicas de SAE	45
2.3.1 Sistema de Armazenamento mecânico	50
2.3.2 Sistemas de armazenamento eletroquímico	56
2.3. Comparação entre os sistemas de armazenamento	66
2.4. Considerações sobre o capítulo	68
3 . Avaliação e seleção de tecnologias de SAEs	69
3.1 Os Métodos Multicritério de Apoio à Decisão	71
3.2 Métodos multicritério de apoio à decisão sob incerteza	76
3.3 Ferramentas para hierarquização e seleção de tecnologias de SAEs	80
3.4 Critérios e subcritérios para avaliação de SAEs	82
3.5 Considerações sobre o capítulo	90

4 . Modelo AHP <i>Fuzzy</i> TOPSIS para avaliação e seleção de tecnologias de SAEs	91
4.1. A lógica <i>Fuzzy</i>	91
4.2. Descrição da fase I – AHP	99
4.3. Descrição da fase II – <i>Fuzzy</i> TOPSIS	104
4.4. Considerações sobre o capítulo	107
5 . Demonstração de aplicabilidade dos modelos para seleção de tecnologias de SAE	108
5.1. Coleta, análise e formatação dos dados	108
5.2. Fase I – AHP	110
5.2.1. Construção da hierarquia: Definição de critérios e subcritérios	110
5.2.2. Matrizes de comparação pareadas	111
5.2.3. Análise da consistência das matrizes de comparação	112
5.3. Fase II – <i>Fuzzy</i> -TOPSIS modelagem utilizando somente os dados com a opinião dos especialistas	114
5.3.1. Criação das matrizes de avaliação usando o conjunto de termos linguísticos <i>fuzzy</i>	114
5.3.2. Determinação da solução ideal <i>fuzzy</i> positiva e negativa (FPIS e FNIS) e da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-)	116
5.3.3. Determinação da proximidade relativa do valor ideal	117
5.4. Fase II – <i>Fuzzy</i> -TOPSIS – modelagem alternativa utilizando os dados da literatura	118
5.5. Discussão dos resultados	122
6 . Conclusões e recomendações	125
6.1 Conclusões	125
6.2 Recomendações	130
Referências bibliográficas	132
Apêndices	141

Lista de figuras

Figura 1.1: PDE 2031 EPE	26
Figura 1.2 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos	33
Figura 1.3 - Mapa conceitual da pesquisa	35
Figura 2.1: Crescimento de renováveis	38
Figura 2.2: ENA x Energia eólica	40
Figura 2.3: Categorização dos Sistemas de Armazenamento de Energia	48
Figura 2.4: Classificação do sistema de armazenamento	49
Figura 2.5: Maturidade de SAEs	47
Figura 2.6: Serviços e faixa de capacidade dos SAEs	47
Figura 2.7: Usina hidrelétrica reversível - Sistema fechado	52
Figura 2.8: Usina hidrelétrica reversível - Sistema aberto	53
Figura 2.9: Usina hidrelétrica reversível - Sistema semiaberto	53
Figura 2.10: Corte esquemático de uma bateria de chumbo-ácido	58
Figura 2.11: Desenho esquemático de uma bateria de níquel-cádmio	59
Figura 2.12: Desenho esquemático da bateria de níquel metal hidreto	61
Figura 2.13: Desenho esquemático de baterias de íon-lítio	63
Figura 2.14: Bateria de Na-S	65
Figura 3.1: Adaptado de OLIVEIRA et al., 2015	71
Figura 4.1: Sistema fuzzy típico	94
Figura 4.2 – Função de pertinência Fuzzy Trapezoidal	95
Figura 4.3 – Função de pertinência <i>Fuzzy</i> Triangular	96
Figura 4.4: Modelo fuzzy AHP-TOPSIS	98
Figura 4.5: Matriz de avaliação	105
Figura 5.1: Estrutura hierárquica do modelo para avaliação e seleção de tecnologias de SAEs	111

Lista de quadros

Quadro 2.1: Aplicações de SAEs	46
Quadro 2.2: Vantagens x desvantagens	67
Quadro 3.1: Métodos multicritérios aplicados a tecnologias de SAEs	81
Quadro 3.2: Dimensões pesquisadas	83
Quadro 3.3: Critérios e referências	84
Quadro 3.4: Dimensões e critérios selecionados	85
Quadro 4.1: Escala de Saaty	101
Quadro 5.1: Dimensões e critérios.	109

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Principais aspectos dos sistemas	66
Tabela 2.2: Comparação custos x capital	67
Tabela 3.1: Base da pesquisa bibliográfica	80
Tabela 4.1: Índice de consistência aleatória (IR)	103
Tabela 4.2: Termos linguísticos para avaliação	104
Tabela 5.1: Resultados das matrizes de comparação das dimensões definidas para a análise	111
Tabela 5.2: Resultados da matriz de comparação para os critérios	111
Tabela 5.3: Vetores peso final – W	112
Tabela 5.4: Razão de consistência das dimensões consideradas	113
Tabela 5.5: Razão de consistência dos critérios	113
Tabela 5.6: Matriz de decisão fuzzy das fontes renováveis <i>versus</i> subcritérios	114
Tabela 5.7: Matriz de decisão normalizada	114
Tabela 5.8: Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método <i>fuzzy</i> AHP	115
Tabela 5.9: Matriz de distância total positiva - FPIS	116
Tabela 5.10: Matriz de distância total negativa - FNIS	116
Tabela 5.11: Coeficiente de proximidade CCI	117
Tabela 5.12: Matriz de decisão alternativa	118
Tabela 5.13: Matriz de decisão normalizada alternativa	119
Tabela 5.14: Matriz de decisão alternativa normalizada e ponderada pelo método <i>fuzzy</i> AHP	119
Tabela 5.15: Matrizes de distâncias positivas e negativas - FPIS	120
Tabela 5.16: Matrizes de distâncias positivas e negativas - FNIS	121
Tabela 5.17: Coeficiente de proximidade CCI	121

Lista de abreviaturas e siglas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CESP – Companhia Energética de São Paulo

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CPAMP - Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPRI – Electric Power Research Institute

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICB – Índice Custo-benefício

IEA – International Energy Agency

IET – Institute for Energy and Transport

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológico

IHA – International Hydropower Association

JRC – Joint Research Center

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDI – Modelo de Decisão de Investimentos

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

PDE – Plano Decenal de Expansão

PNE – Plano Nacional de Energia

PNSH – Plano Nacional de Segurança Hídrica
PMO – Programa Mensal de Operação
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
ONS – Operador Nacional do Sistema
SAE – Sistema de Armazenamento de Energia
SEP – Sistema Elétrico de Potência
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SIN – Sistema Interligado Nacional
UHE – Usina Hidrelétrica Convencional
UHR – Usina Hidrelétrica Reversível

1. Introdução

Nos últimos anos tem havido uma grande modificação da matriz elétrica brasileira, como se pode comprovar ao avaliar os recentes Planos de Expansão de Energia – PDE elaborados pela EPE. Houve um grande investimento em usinas eólicas e fotovoltaicas e uma redução no número de hidroelétricas construídas e planejadas. O principal motivo está relacionado às dificuldades de licenciamento dessas plantas, associado à redução dos custos de implantação das outras renováveis (solares e eólicas). A matriz brasileira que já teve 75% de sua capacidade instalada com base em usinas hidrelétricas (PDE 2020), hoje tem apenas 58% (Figura 1.1), e com previsão de que essa percentagem caia para 51% em 2031(PDE 2031). Além disso, existe um grande aumento na geração distribuída (PDE 2031) com novos desafios para os sistemas elétricos.

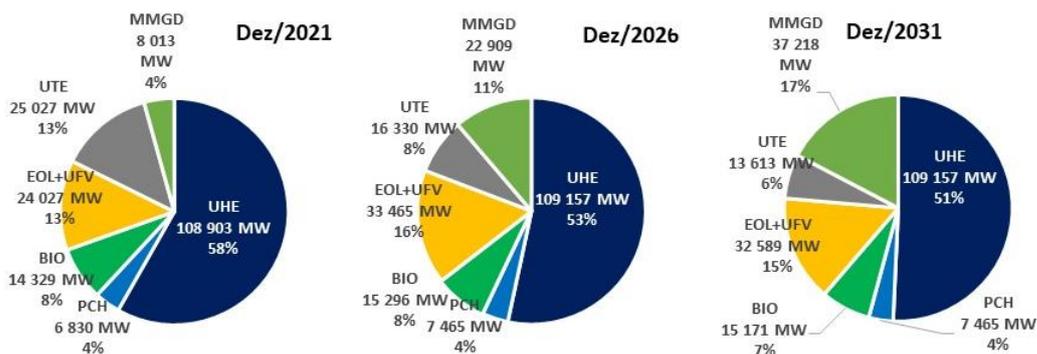


Figura 1.1: PDE 2031 EPE

Associado a essa alteração é importante ressaltar ainda a constatação de uma grande mudança climática nas bacias hidrográficas brasileiras nos últimos dez anos. Foi percebido um grande período de estiagem, iniciado em 2012 e que se prolongou até 2019, sendo evento ainda mais grave do que a maior seca já registrada nas vazões das bacias brasileiras. Esse resultado mostra uma sensível redução das vazões e conseqüentemente da energia natural afluente. Chegando a apresentar nas

bacias dos rios São Francisco, Paranaíba, Grande e Tocantins vazões médias nos anos de 2013 a 2018 50 a 55% da vazão média de longo termo (CPAMP, 2019).

Esse fato resultou na contratação de térmicas emergenciais para atender a demanda no ano de 2022. Denominado Procedimento Competitivo Simplificado (PSC) para Contratação de Reserva de Capacidade para os Subsistemas Elétricos Sudeste/Centro-Oeste e Sul, o leilão foi estruturado a partir de resolução da Câmara de Regras Excepcionais para Gestão Hidroenergética para suprimento de energia de 2022 a 2025. No processo, foram contratadas 17 usinas (1.220,8 MW), sendo a maior parte da potência proveniente de 14 plantas a gás natural (1.177,8 MW), com preços chegando a atingir patamar de R\$/kWh 1600,00(IDEDEC, 2021).

Essa crise hidrológica pode sinalizar que a alteração climática, associada a intensificação dos ciclos naturais de bloqueios atmosféricos (ENOS), pode reduzir a geração hidráulica. E que, com maiores investimentos em usinas eólicas e solares (fontes não controláveis) em larga escala, será necessário dispor de formas para garantir o atendimento à demanda. Essa garantia poderá se dar por meio de mais geração termoeletrica a combustível fóssil, que pode ser reduzida com a implantação de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs).

Os SAEs podem, então, minimizar os problemas de atendimento de potência e de serviços ancilares¹. Vários países já começaram a investir em usinas reversíveis para viabilizar a geração renovável intermitente e reduzir emissões. (China e Europa, IDB,2021).

Assim, o renovado interesse em sistemas de armazenamento de energia vem ocorrendo como decorrência de um movimento anterior, relativo ao crescimento do uso de fontes de geração de energia elétrica renováveis intermitentes ou variáveis a partir de meados e final dos anos 2000 (MME, 2016).

As fontes renováveis variáveis têm sido a principal opção para a expansão de sistemas elétricos de muitos países, não somente pelas preocupações em relação ao aquecimento global, mas por razões econômicas, haja vista que houve uma queda substancial do preço da energia gerada por estas fontes (INSTITUTO ESCOLHAS e PSR, 2018; IRENA, 2017). Este movimento se iniciou na Europa, através de

¹ Serviços ancilares: regulação de frequência e tensão geralmente fornecida pelas usinas hidrelétricas, o suporte de potência reativa proporcionado pela transmissão, as reservas de potência e de energia.

programas governamentais que criaram subsídios para este tipo de geração de energia, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa provocadas por queima de combustíveis fósseis em usinas térmicas, que contribuíam para aquecimento global ao longo de décadas (LEPECKI et al.,2018). Este incentivo inicial permitiu uma grande evolução tecnológica e consequente queda de custos.

No entanto, a variabilidade de produção de energia destas fontes precisa ser coberta com recursos que aumentem a flexibilidade operativa (DEHGHANI-SANIJ, et al., 2019). Mesmo em países com abundância de fontes flexíveis, como o Brasil, que dispõe de usinas hidrelétricas, e possui grande disponibilidade de recursos naturais, a ampliação do nível de intermitência na matriz elétrica traz consigo grandes desafios para a operação de uma matriz elétrica como a do Brasil. Os reservatórios de regularização foram por muito tempo a garantia de suprimento de energia elétrica em situações de hidrologia desfavorável, além de prestarem serviços ancilares importantes para dar suporte ao crescimento dessas fontes intermitentes. O grande crescimento da capacidade instalada eólica e solar no Brasil na última década só foi possível, sem maiores externalidades, devido à grande capacidade hidrelétrica. Entretanto, há mais de 20 anos, desde meados da década de 1990, a implantação de hidrelétricas com reservatórios de regularização tem encontrado grande resistência por seus impactos ambientais, dando lugar a usinas de menor porte e a fio d'água, com características mais restritivas de operação. Mesmo essas hidrelétricas sem capacidade de regular o fluxo d'água têm encontrado grandes dificuldades de serem desenvolvidas por questões, sobretudo, relativas ao licenciamento ambiental (VELLOSO, 2012; EPE, 2018).

É de se esperar que a transição da matriz elétrica nacional em curso (EPE, 2021) , com o aumento de fontes renováveis variáveis e a redução relativa da participação hidrelétrica - que até o momento ocorre relativamente sem transtornos - demande desafios crescentes no médio e longo prazo.

Recursos com flexibilidade operativa capazes de mitigar a crescente variabilidade da produção de fontes renováveis em matrizes elétricas contribuem para equilibrar a carga e regular a frequência². Assim, os sistemas de

² O melhor indicador deste delicado e permanente balanço de oferta e demanda por energia é a frequência do sistema elétrico, que no Brasil é de 60Hz: quando o consumo excede a oferta, a

armazenamento de energia (SAE) podem atenuar a irregularidade da produção renovável e ajudar às redes de transmissão a atender a demanda em horas de picos de consumo (EPE, 2018), manter a estabilidade da frequência do sistema elétrico e otimizar o desempenho econômico de sistemas de geração, evitando acionamento de recursos menos competitivos como as termoelétricas a combustível fóssil (EPE,2018).

E esse é um movimento irreversível, pois diversos países estabeleceram como meta para o Acordo de Paris, uma maior participação de fontes renováveis em suas matrizes elétricas (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2015). Nesse novo cenário, para atender aos padrões de demanda que não seguem as variações na produção de energia elétrica, haverá necessidade de geração com partida mais rápida de *backup*, melhores previsões de produção das fontes renováveis e aumento na capacidade de SAEs.

Existem várias alternativas de SAEs (sistemas mecânicos, químicos e eletroquímicos), com atributos e desempenhos muito diferentes. A seleção da melhor das alternativas para cada caso apresenta uma grande dificuldade em relação à avaliação dos impactos ambientais que, por sua vez, se dão de forma diferente ao longo das diversas etapas da vida útil dos projetos. Em sistemas mecânicos, por exemplo, os efeitos negativos são verificados principalmente nos locais do empreendimento e nas etapas de construção e operação. Já em sistemas eletroquímicos, os principais impactos ocorrem na extração dos minerais necessários no processo de fabricação e ao término da vida útil, quando ocorre o descarte ou a reciclagem. Outra diferença se refere a fonte de energia utilizada para a produção dos SAEs ou mesmo para a extração de matéria prima (mineração). Se, por exemplo, a produção de baterias for baseada principalmente na queima de combustíveis fósseis, poderá ter uma emissão maior de gases de efeito estufa do que no caso da construção das estruturas hidráulicas hidrelétricas reversíveis ou da fabricação de equipamentos.

Assim, o interesse maior da pesquisa visa utilizar métodos de análise multicritério de apoio à decisão com base na avaliação do desempenho dos SAEs

carga adicional desacelera os geradores e a frequência cai. Por outro lado, um consumo menor do que a oferta reduz a carga do gerador, aumentando a frequência.

considerando diversos atributos técnicos, econômicos e socioambientais para selecionar aqueles mais adequados para o suporte de grade na transmissão e distribuição e de gerenciamento de energia (que vai ser cada vez mais complexo de operar com a entrada de grandes plantas de geração renovável intermitente).

Esta dissertação insere-se na linha de pesquisa “Infraestrutura e Sustentabilidade” do Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

1.1. Definição do problema de pesquisa

O Brasil vem passando por um período de transição da matriz energética: de um sistema elétrico essencialmente hidrotérmico, baseado em usinas com geração hidráulica com grandes reservatórios de regularização de vazões e com complementação de geração termoelétrica para as crises hídricas, para um sistema com presença cada vez maior de fontes intermitentes, e com grande parte desses investimentos concentrados na região nordeste devido ao seu grande potencial para geração eólica e fotovoltaica. Os últimos leilões de energia realizados pela ANEEL têm demonstrado essa tendência.

Assim, as usinas hidrelétricas que possibilitaram a entrada dessas fontes intermitentes não conseguem mais fornecer todos os serviços ancilares que prestavam, nem retardar a necessidade de geração térmica nem manter a estabilidade dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Com a penetração de fontes intermitentes, principalmente a solar e eólica, a gradativa perda da flexibilidade operativa do sistema elétrico brasileiro, aliada à forte expansão da fonte eólica numa região concentrada, pode se tornar um desafio para a operação ótima do sistema.

Além disso, as novas usinas hidrelétricas projetadas estão localizadas na região Norte, sendo todas elas planejadas para operação a fio d’água para minimizar os impactos socioambientais, ou seja, não há previsão de acréscimo na capacidade de regularização por meio de reservatórios.

Considerando a crescente entrada de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, as metas estabelecidas no Acordo de Paris, a necessidade fornecer a

flexibilidade operativa ao sistema e o desafio de ofertar energia de modo mais sustentável, definiu-se a seguinte questão central a ser respondida ao longo desta pesquisa: “Em que medida a aplicação de métodos multicritério de apoio à decisão poderão contribuir para a escolha de tecnologias para armazenamento de energia elétrica no Brasil?”.

1.2. Objetivos: geral e específicos

Para responder à questão formulada como problema de pesquisa, esta dissertação tem como objetivo geral a proposição de um modelo de hierarquização de tecnologias de armazenamento de energia elétrica com o auxílio de métodos multicritério de apoio à decisão.

Em termos específicos, a dissertação precisará:

- Caracterizar as alternativas tecnológicas para armazenamento de energia elétrica a serem conectadas em um sistema de transmissão/distribuição de energia elétrica;
- Pesquisar quais os métodos são geralmente adotados para quantificar e avaliar a sustentabilidade econômica, social e ambiental de alternativas de sistemas de armazenamento em diferentes subsistemas elétricos;
- Investigar os diversos modelos que aplicam os métodos multicritério de apoio à decisão para selecionar as tecnologias de sistemas de armazenamento elétrico;
- Definir os critérios e os indicadores para quantificar os impactos positivos e negativos das tecnologias de armazenamento de energia elétrica;
- Desenvolver um modelo conceitual para hierarquização de tecnologias de armazenamento de energia elétrica com uso de métodos multicritério de apoio à decisão sob incerteza;
- Demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto;
- Analisar os resultados de modelo proposto e sugerir recomendações para a utilização do modelo proposto em diferentes contextos regionais ou locais.

1.3. Metodologia

Segundo Vergara (2002,2005) a pesquisa quanto a sua finalidade pode ser considerada aplicada, descritiva e metodológica.

Quanto aos meios de levantamento e investigação, a metodologia deve compreender alguns aspectos básicos:

- Pesquisa bibliográfica e documental sobre os temas centrais da pesquisa, como indicado na fase exploratória e descritiva da Figura 1.2;
- Desenvolvimento do modelo conceitual para seleção de tecnologias para armazenamento de energia;
- Aplicação de métodos multicritério de apoio à decisão para hierarquização de alternativas tecnológicas de armazenamento de energia elétrica.

A Figura 1.2 apresenta o desenho da pesquisa, destacando-se seus componentes e métodos, de acordo com três fases principais:

- (i) Fase de exploratória de descritiva que contempla a pesquisa bibliográfica e documental e a definição da abrangência da pesquisa;
- (ii) Fase de pesquisa aplicada que trata da definição e uso dos métodos multicritérios; e
- (iii) Fase de conclusão para elaboração das conclusões e recomendações

Nesse item são detalhados o desenvolvimento de cada fase e os resultados esperados em cada bloco da Figura 1.2.

Destaca-se que o desenho da pesquisa foi desenvolvido em total alinhamento com os objetivos gerais e específicos já enunciados na seção 1.2 deste capítulo. Como se poderá verificar as avaliações técnicas, econômicas, socioambientais dos SAEs foram muito difíceis de encontrar no sistema hidrotérmico brasileiro, notadamente porque apenas recentemente se apresentaram problemas de serviços de fornecimento de potência e de atendimento de energia elétrica pela crescente entrada de fontes intermitentes, e com isso a necessidade de buscar SAEs. Esses serviços anteriormente eram e ainda vem sendo prestados pelas usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização.

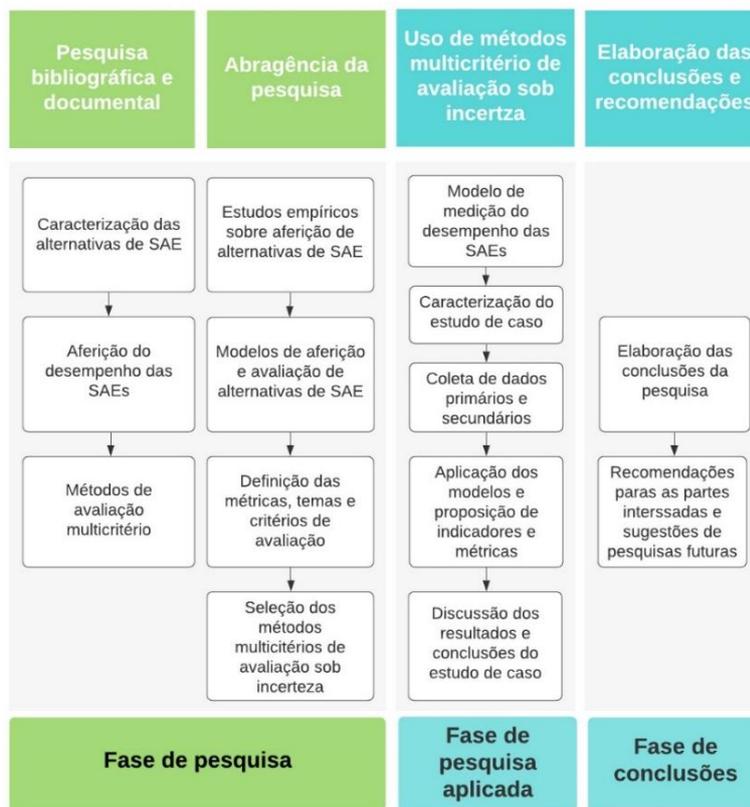


Figura 1.2 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos
 Fonte: Elaboração própria.

1.3.1. Fase exploratória e descritiva

Essa fase foi realizada a partir de pesquisas em referências bibliográficas, com o objetivo de investigar estudos e trabalhos sobre os conceitos dos SAE e de documentos de referência para definição do tema central desse projeto de pesquisa –seleção de tecnologias de armazenamento de energia elétrica. Essa pesquisa foi intensificada para investigar estudos nesse tema focando-se nos métodos de apoio à decisão que vem vêm sendo aplicados.

Primeiramente foram elencados os métodos multicritério de apoio à decisão comumente mais adotados (AHP; TOPSIS, ELECTRE, dentre outros). Em seguida, foram identificados os estudos voltados para as tecnologias para armazenamento de energia elétrica, ou mesmo de comparação de fontes de geração elétrica pela similaridade de avaliações de impactos ambientais, onde se adotavam métodos multicritério combinados. Existe muita subjetividade nessas avaliações e devem ser

buscadas métricas adequadas e compreensíveis para uma tomada de decisão, de modo a reduzir as incertezas no processo de decisão e aprovação.

Podem ser encontrados trabalhos de comparação de fontes de geração de energia elétrica no Brasil e no exterior, usando essas metodologias, mas ainda existem problemas e falhas na sua seleção. E no caso de sistemas de armazenamento de energia, particularmente no caso do Brasil, essa lacuna é ainda maior. Apresenta-se na Figura 1.3 no mapa conceitual uma visão geral e esquemática dos resultados desta primeira fase.

1.3.2.

Fase de pesquisa aplicada

Desenvolveu-se a fase da pesquisa aplicada propriamente dita a partir dos resultados da revisão bibliográfica e documental que norteou a definição dos objetivos da pesquisa e o desenvolvimento do modelo para seleção de tecnologias SAE, e demonstração de sua aplicabilidade.

1.3.3.

Fase conclusiva

Na terceira fase, elaboraram-se as conclusões gerais e as específicas em relação a cada um dos objetivos enunciados na seção 1.2, e formularam-se recomendações aos diversos atores interessados na aplicação do modelo de avaliação e seleção de tecnologias de SAE.

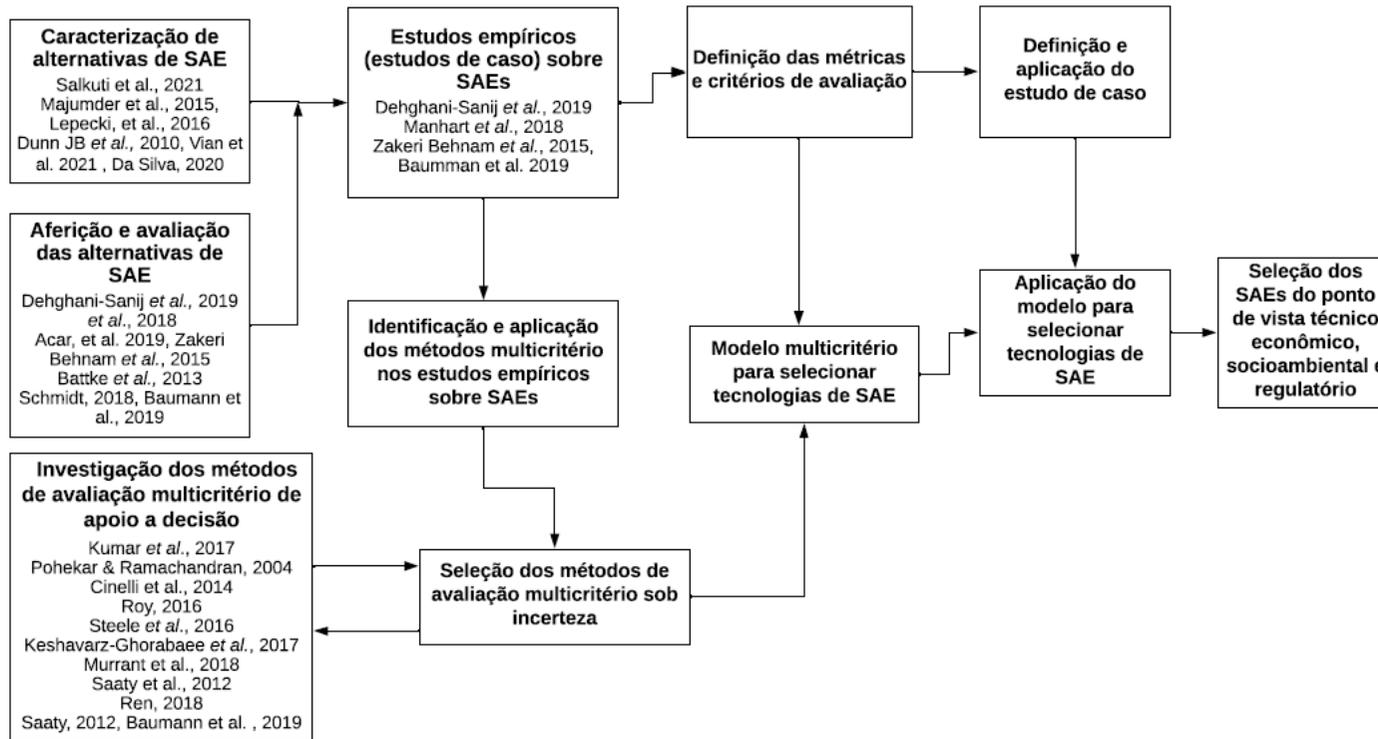


Figura 1.3 - Mapa conceitual da pesquisa
Fonte: elaboração própria

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, incluindo esta introdução.

O capítulo 2 apresenta a caracterização e tipologias dos diversos SAE, com uma descrição das suas características, aplicações nos sistemas elétricos, limitações e potencialidades das tecnologias. Encontra-se organizado em duas seções: na primeira, abordam-se o perfil da matriz elétrica brasileira, com destaque para a presença das diversas tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis. Na segunda seção, conceituam-se as principais tecnologias de SAE que poderiam fazer parte da operação de um sistema elétrico de potência.

No capítulo 3, apresenta o referencial teórico que fundamentou a proposição de um modelo de avaliação e seleção de tecnologias para os SAE. Apresenta-se a definição dos critérios e subcritérios que foram propostos para compor o método de avaliação multicritérios, baseando-se nos princípios sistêmico, de consistência, de mensuração, facilidade de compreensão e da comparabilidade.

O capítulo 4 apresenta o modelo de avaliação e seleção de tecnologias para os SAE, que foi baseado nos métodos multicritérios de apoio à decisão.

No capítulo 5, abordam-se as características dos SAE e dos sistemas elétricos onde serão inseridos, bem como os resultados das simulações com uso do modelo proposto. São discutidos também os pesos atribuídos aos critérios e subcritérios, a matriz de decisão e o resultado da hierarquização das alternativas tecnológicas dos SAE.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões do estudo em relação à aplicabilidade do modelo para avaliar e selecionar os SAEs além das suas potencialidades como ferramenta de apoio à decisão em processos complexos, com fatores conflitantes e de natureza diversa. Além disso, nesta seção, recomendações para estudos futuros são sugeridas para todos os atores interessados no modelo proposto.

2. Geração de energia renovável e o armazenamento de eletricidade

Apresentam-se neste capítulo as principais tecnologias de SAE disponíveis para atender o suporte de grade na transmissão e distribuição e de gerenciamento de energia, visando fundamentar o objetivo desta dissertação. É destacada inicialmente a importância desses sistemas no processo de descarbonização da matriz elétrica com investimentos em fontes renováveis intermitentes. São descritos os principais tipos de SAEs, suas características, as vantagens, desvantagens (técnicas, econômicas e socioambientais) e principais aplicações com base na literatura e na experiência recente na implantação desses SAEs.

2.1. A energia renovável e a necessidade do armazenamento de energia

Os aspectos de responsabilidade social e ambientais tanto em nível local quanto global, e os recentes avanços tecnológicos transformaram as fontes de geração de energias renováveis como a escolha prioritária para a expansão de capacidade de geração de energia elétrica (IPEA, 2018).

Segundo IRENA (2021), desde 2012, a instalação de nova capacidade de renováveis ultrapassou a das não renováveis (Figura 2.1). Já em 2015, a capacidade instalada de renováveis representava mais de 60% da capacidade total adicionada no mundo. Esse aumento se deve principalmente ao avanço das novas tecnologias, em especial as das fontes de geração elétrica eólica e solar. Nesse mesmo ano, o aumento da capacidade instalada dessas duas fontes superou a geração hidráulica pela primeira vez.

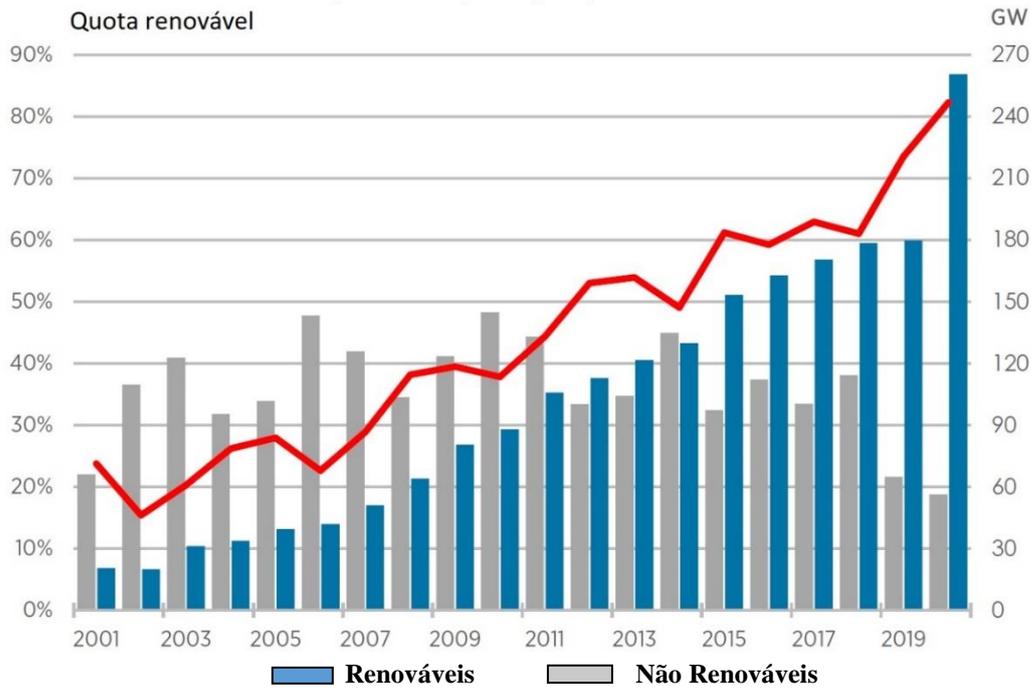


Figura 2.1: Crescimento de renováveis
 Fonte adaptado de IRENA 2021

Essa tendência também reverberou no Brasil, mesmo considerando seu cenário bastante peculiar, marcado pela presença histórica das fontes hidráulicas, propiciando que a participação das renováveis na sua matriz de geração chegasse a 85%, um caso de sucesso internacional (EPE, 2020). Por outro lado, a expansão das hidráulicas enfrenta progressivamente maiores dificuldades relacionadas a restrições ambientais (EPE, 2018). Assim, se o Brasil quiser ainda dispor de uma matriz elétrica limpa e sustentável terá que vencer os desafios relacionados à introdução dessas energias renováveis intermitentes, de forma a cumprir a meta global de redução da intensidade de emissões de CO₂ na geração de eletricidade, condizente com o cenário 450 da Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*) no horizonte 2040, o que limitaria o aumento da temperatura global em 2^oC.

Nesse campo, o Brasil já exerce uma liderança, ou seja, em matéria de matriz de geração limpa, está vinte anos à frente da média global (LOSEKHAN et al., 2016). Se esse esforço global mitigatório tiver êxito, a intensidade de emissão para a geração de energia global alcançará o índice brasileiro próximo do final desse período de previsão. O desafio que se coloca, no entanto, é manter a essa participação de renováveis na matriz de geração de eletricidade. A liderança atual

não exime o Brasil de seguir políticas de mitigação de emissões, entretanto, dá tempo ao país para planejar essa transição.

Para isso será preciso alterar o papel das térmicas no SIN, pois sua utilização tem sido inadequada em termos econômicos e ambientais nos últimos anos. Na expectativa de um uso pouco frequente, de forma a reduzir as tarifas, priorizou-se a flexibilidade com tecnologias de menor custo de investimento, apesar de resultarem em menor eficiência energética e maiores custos operacionais. Essas tecnologias, constituídas por sistemas térmicos em ciclo aberto, acarretam também maior emissão por KWh produzido. No entanto, desde 2013, as térmicas brasileiras têm sido utilizadas intensamente (em parte por conta de uma crise hídrica em algumas bacias) em longos períodos contínuos durante o ano. Essa inadequação da tecnologia para o tipo de uso impacta negativamente nos custos e nas emissões de CO₂ (IPEA, 2018).

Por outro lado, o sistema elétrico brasileiro tem a vantagem adicional de dispor de um elevado grau de flexibilidade na geração em decorrência: i) da preponderância hidrelétrica; ii) da estocagem através dos reservatórios hídricos com potencial de armazenagem; e iii) da possibilidade de intercâmbio elétrico-energético por meio de um sistema de transmissão de dimensão continental que atende a 98% da carga do país. Com essas características, a expansão renovável no Brasil pode ocorrer com custos de integração reduzidos. Os reservatórios ainda acomodam a intermitência provendo flexibilidade e ainda estocam a geração intermitente sob a forma de água, com o deslocamento da energia hidráulica evitada.

A introdução da energia eólica no Brasil foi inicialmente propiciada pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2002. O programa previa a contratação de 3,3 GW de capacidade de geração de três fontes de geração renováveis: pequenas centrais hidrelétricas, biomassa e eólica, através de tarifas incentivadas (FERREIRA, 2013).

A partir de 2004, a expansão da energia eólica se consolidou no Brasil com a implantação da sistemática de leilões. No final de 2021, a capacidade instalada de geração eólica alcançou 17,1 GW o que representava 8,8% do parque gerador brasileiro (EPE, 2021).

É importante mencionar que as características do potencial eólico brasileiro contribuíram para o sucesso na sua difusão, principalmente na região Nordeste, onde a velocidade dos ventos apresenta intensidade e constância favoráveis para a produção de eletricidade. Em primeiro lugar, o fator de utilização médio dos parques eólicos brasileiros, 38%, é bastante superior à média mundial, 24% (LOSEKHAN et al., 2016), e em segundo lugar a fonte energética dominante (hidrelétrica) apresenta complementariedade com a geração eólica. A Figura 2.2 a seguir mostra a correlação negativa entre as afluências às usinas hidrelétricas no, representadas pela ENA – Energia Natural Afluente, e a produção de energia eólica no Brasil, o que permite armazenar água nos reservatórios.

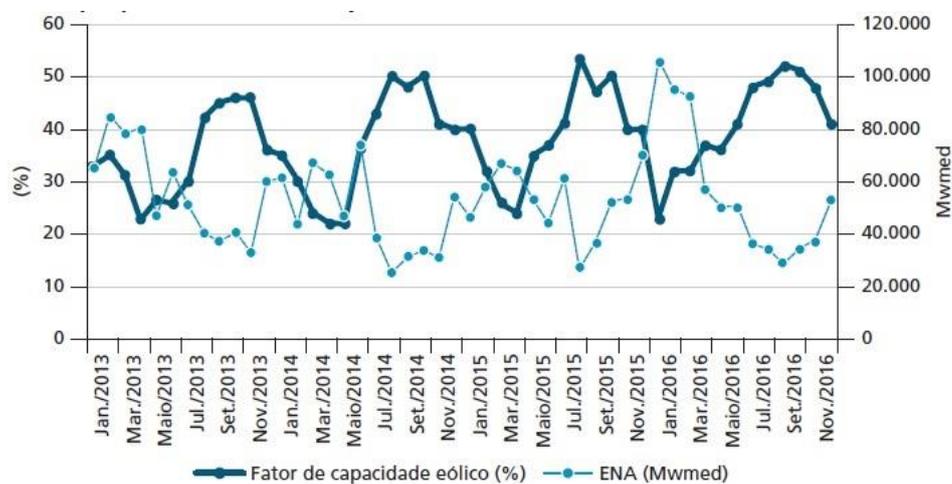


Figura 2.2: ENA x Energia eólica
Fonte: Adaptado de GOLDENZWEIG (2017).

No entanto, a dificuldade de implantação de novas hidrelétricas (como se pode verificar no PDE (EPE, 2020) trará novos desafios e, nesse contexto, o armazenamento de eletricidade pode proporcionar muitos benefícios para o SIN, incluindo a melhoria de confiabilidade, eficiência e flexibilidade, e facilitando a descarbonização por meio de energia renovável em expansão.

Cabe destacar também a energia solar que tem recebido incentivos no Brasil com 3.114 MW contratados de plantas fotovoltaicas (EPE, 2022) e ainda com a MMGD (Micro e Minigeração Distribuída) atualmente com cerca de 7.000 MW instalados podendo chegar a cerca de 15.000 MW em 2030 (EPE, 2022). E a redução dos custos dos equipamentos (PETRY et al., 2020) deram o impulso necessário para esse avanço da instalação dessa fonte de energia, notadamente num clima tropical, em particular na região semiárida e central do Brasil (IPEA, 2018).

Em abril de 2012 a Aneel estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia (Resolução Normativa nº 482/2012, e em 2015, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015, que acrescentou alguns benefícios aos micros geradores, entre eles, a possibilidade de geração distribuída conjunta, isto é, a energia gerada pode ser repartida entre várias residências de acordo com seus interesses, desde que elas façam parte da mesma área de concessão. Além disso, a potência máxima de geração por unidade aumentou de 1 MW para 5 MW e o processo de adesão para conectar a geração distribuída à rede de distribuição foi simplificado. Essas resoluções normativas parecem ter contribuído bastante para o crescimento no número de instalações de sistemas fotovoltaicos (IPEA, 2018). E a Lei 14.300/22 instituiu o marco legal da micro e da minigeração de energia. Essas modalidades permitem a consumidores produzirem a própria energia que utilizam a partir de fontes renováveis. A lei permite às unidades consumidoras já existentes — e às que protocolarem solicitação de acesso na distribuidora em 2022 — a continuação, por mais 25 anos, dos benefícios hoje concedidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) por meio do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Também define as regras que prevalecerão após 2045 e quais serão as normas aplicáveis durante o período de transição. A lei permite que sistemas de baterias sejam instaladas junto aos sistemas de geração distribuída, e que sejam viabilizadas micro redes para interligação de sistemas.

Assim, o emprego de SAE será uma necessidade para essa transição previsível. Por meio do armazenamento de energia, o excesso de geração das fontes variáveis produzido durante os períodos de baixa demanda pode ser armazenado para servir à rede quando houver alta demanda de eletricidade. Isso maximizaria a quantidade de energia que pode ser disponibilizada, minimizando assim a geração de combustível fóssil necessária para atender a demanda, e por conta da complementaridade, propiciar economia da utilização de água dos reservatórios das hidrelétricas. Além disso, as tecnologias de armazenamento de energia também ofereceriam uma série de outros serviços para tornar as redes elétricas mais seguras, resilientes, eficientes e econômicas.

Os sistemas de armazenamento de energia também oferecem vários serviços e benefícios para geração de energia convencional. Por exemplo, o armazenamento de energia oriundo de fontes movidas a combustão pode fornecer reserva girante³ e permitir que turbinas a gás natural disponibilizem energia imediatamente para o sistema, reduzindo os esforços de aceleração e permitindo que operem de forma constante e mais eficiente, aumentando a extensão da vida útil dos equipamentos (LEPECKI, 2018; EPE, 2019).

Na transmissão e distribuição de energia, os SAEs podem adiar os investimentos das concessionárias em atualizações de rede de transmissão, reduzindo a demanda de pico e a necessidade de investir em nova infraestrutura.

Em 2018, mais de 3 GW de armazenamento de energia foram adicionados globalmente, e a nova capacidade de armazenamento apesar de diminuir ligeiramente em 2019, está acima de 10 GW. Em 2030, serão necessários 200 GW de capacidade. De acordo com a IEA, um investimento médio anual de US \$ 37 bilhões é necessário em armazenamento de energia até 2050 (IDB, 2021).

Grandes melhorias tecnológicas e reduções de custos estão impulsionando os SAEs. Por exemplo, o LCOE (*Levelized Cost of Energy*) de armazenamento de baterias caiu pela metade nos últimos dois anos para US \$ 150 / MWh para sistemas com duração de quatro horas (BLOOMBERG NEF, 2020).

No entanto, em geral, o ambiente de preços atual que rege o armazenamento de energia é insuficiente para incentivar sua implantação em grande escala (SILVA, 2020). Embora o preço das baterias de íon-lítio, por exemplo, tenha caído rapidamente, sendo uma tecnologia bem estabelecida, outras alternativas ainda estão em desenvolvimento ou têm potencial significativo de redução de custos ainda inexplorado. Essas tecnologias emergentes exigem mercados confiáveis para que seu desenvolvimento seja viável. E a ausência de regulamentação constitui um grande obstáculo à formação de preços econômicos para o armazenamento.

Outro fator que contribui para o preço abaixo do ideal para o armazenamento de energia são as externalidades socioambientais não avaliadas de forma adequada na geração de combustível fóssil. Embora as tecnologias de fontes renováveis já sejam competitivas, os combustíveis fósseis ainda se beneficiam de preços que não

³ Reserva girante: é parte da reserva disponível sincronizada ao sistema elétrico e pronta para tomar carga; ou seja, é a diferença entre a potência sincronizada disponível e a potência gerada.

capturam o custo de suas emissões, e assim, diminuindo a demanda por armazenamento. Além disso, cabe ressaltar que, se carregado com energia produzida com base em combustíveis fósseis, o armazenamento de energia pode até aumentar os gases de efeito estufa.

2.2. Regulação para os SAEs

Como em grande parte do mundo, a regulamentação relativa ao armazenamento de energia é um obstáculo a ser ultrapassado pois está em um estágio inicial na América Latina e no Caribe. No entanto, alguns países começaram a criar mecanismos explícitos de compensação dos serviços prestados pelo armazenamento de energia. Metas ambiciosas de energia renovável criam a expectativa de aumento da demanda por armazenamento, e alguns países começaram a realizar licitações específicas para SAE. Nessa pesquisa o foco foi dado aos países da América Latina porque na sua maior parte são sistemas elétricos hidrotérmicos como o do Brasil e com grande disponibilidade de recursos naturais renováveis, e que têm iniciado investimentos em fontes eólicas e solares.

No Chile, a lei geral de serviços elétricos de 2016 abordou explicitamente o armazenamento de energia, facilitando a sua participação nos mercados de energia do país, procurando contornar as incertezas para os desenvolvedores de SAEs (GRAHAM et al., 2021). O governo da Colômbia fez o mesmo em 2019, assumindo um papel ativo na implantação do armazenamento de energia com a Resolução 098, que cria um processo competitivo e designa responsabilidades para a instalação e operação de sistemas de bateria (Ibid).

A insuficiente confiabilidade da rede elétrica, especialmente na costa caribenha do país (PLACE, 2020) foi uma força motriz, o que deve facilitar adiamentos de novas instalações de transmissão de energia (Ibid). El Salvador também iniciou o processo de regulamentação de armazenamento de energia à medida que a participação de fontes renováveis na rede nacional vem aumentando (Ibid).

O regulador da Colômbia preparou um modelo de regras permitindo que o armazenamento seja compensado como um ativo de transmissão nos casos em que pode ser usado no lugar de atualizações de transmissão (Ibid).

Em 2019, o regulador de energia do México definiu o pagamento e priorização de vários serviços prestados por armazenamento de energia para o sistema de transmissão e distribuição, com o objetivo de tornar o armazenamento lucrativo pelo reconhecimento e compensação de suas funções múltiplas (EPE, 2019). Mas estes regulamentos não entraram em vigor porque sua publicação formal ainda está pendente de aprovação do registro oficial do governo federal daquele país.

A introdução de SAEs no Brasil ainda está condicionada a alguns entraves políticos e regulatórios, tais como os mencionados na nota técnica da Aneel (NT-094/2020- ANEEL):

- Os SAEs devem participar de um cenário de mercado 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 uma posição dominante;
- Os recursos de armazenamento devem competir com os recursos tradicionais de oferta e demanda nos mercados de capacidade e de serviços ancilares, no segmento de transmissão ou distribuição. Ademais, os mesmos poderiam ser remunerados por serviços prestados a outros setores, como a redução de emissão de carbono;

Alternativas de cenários regulatórios vêm sendo pesquisados, 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 particular, usinas hidrelétricas reversíveis. Dentre estes, podem ser listados:

- Capacidade para dispor de modelos de negócio que possibilitam previsibilidade de receita e dos riscos;
- Necessidade de licença ambiental para operação do armazenamento de energia baseada em estudos de impacto ambiental para reduzir riscos aos empreendedores.

Como se pode depreender, a entrada de fontes renováveis intermitentes associadas à necessidade de descarbonização da matriz elétrica, está implicando na necessidade de implantar SAEs visando reduzir o despacho de usinas termoelétricas nas crises hídricas ou pela intermitência de fontes renováveis. No entanto, é preciso

estudar modos de remunerar os serviços ancilares e de potência. E como se verá a seguir existem várias alternativas tecnológicas para esses sistemas.

2.3 Alternativas tecnológicas de SAE

Existem várias tecnologias de SAEs que possibilitam ajustar as diferenças temporais e geográficas entre a oferta e a demanda de energia em sistemas elétricos de transmissão e distribuição, viabilizando os seguintes aspectos:

- Aproveitamento adequado e eficiente de diversas fontes renováveis intermitentes;
- Integração de diferentes fontes de geração de energia renováveis e não renováveis numa matriz elétrica;
- Geração de energia elétrica próxima ao consumidor dando oportunidade de criação de novas formas de negócio entre consumidores e concessionárias de energia elétrica;
- Suprimento de energia elétrica em regiões isoladas do sistema de transmissão, com base em fontes renováveis intermitentes;
- Aumento da estabilidade, flexibilidade, confiabilidade e resiliência da rede de energia elétrica, mesmo com a inserção e incremento do uso de fontes renováveis.

Algumas dessas tecnologias já estão maduras e sua operação mostra que são competitivas comercialmente em diversas aplicações. Dentre elas encontram-se as usinas hidrelétricas reversíveis, tecnologias de baterias e os sistemas de termoacumulação. Algumas ainda se encontram em estágios iniciais de desenvolvimento e, portanto, ainda não são tão competitivas.

As diferentes tecnologias de armazenamento de energia existentes apresentam diferentes níveis de flexibilidade e desempenho, de acordo com os requisitos técnicos associados à cada aplicação. Dentre estes requisitos encontram-se as densidades de energia e potência, o tempo de resposta, o custo e a economia de escala, a vida útil, os equipamentos de monitoramento e controle, a eficiência e as restrições operacionais, que definem a tecnologia mais adequada para uma determinada aplicação (LEPECKI et al., 2016).

As tecnologias disponíveis devem se adequar às diversas aplicações seja tanto em capacidade armazenamento, quanto ao tempo de carga e descarga. A Figura 2.5 mostra uma classificação de diferentes sistemas de armazenamento de energia elétrica de acordo com a natureza do processo utilizado.

A Figura 2.6 apresenta o campo de aplicação das diferentes tecnologias de armazenamento considerando-se a potência requerida e o tempo de descarga (a energia disponibilizada é o produto destes dois fatores). É importante destacar que essas comparações apresentadas têm apenas um caráter genérico e conceitual pois as opções de armazenamento e as faixas de potência existentes são bem mais amplas que as sugeridas. Tomando-se como exemplo as usinas reversíveis, existem aquelas com tempo curto de descarga (ex. 4h) como também as de caráter sazonal, com tempos de descarga de até milhares de horas.

A Figura 2.3 mostra os sistemas de armazenamento, a natureza do processo e seu grau de maturidade. A figura procura correlacionar os tipos de SAEs com riscos de investimentos de inicial para cada tecnologia e seu grau de maturidade. Quanto mais utilizada, ou seja, comercializada mais segura é a tecnologia para um investimento e menor o risco.

No caso dessa dissertação, essa referência e outras mais recentes mostram que essa avaliação é muito importante para seleção daquela mais adequada para cada aplicação como se verá adiante na escolha daquelas que vamos analisar.

A literatura consultada mostra uma grande variedade de opções e serviços que os diversos SAEs podem fornecer. O trabalho de Ferreira (2013) apresenta um resumo das SAEs e os serviços prestados por cada uma delas (Quadro 2.1).

Quadro 2.1: Aplicações de SAEs

Aplicações	Tecnologias	Potência MW	Tempo de resposta	Eficiência %	Vida Útil ciclos/anos
Serviço de resposta a reserva	Supercapacitores de alta energia	0,01-1	Milisegundos-minutos	80-98	10000 a 100000
Serviço de resposta a reserva	Super condutores	0,1-1	Milisegundos-minutos	80-95	100000
Serviço de resposta a reserva e suporte de redes	Volantes	0,001-1	Segundos-horas	70-95	20000 a 100000

Serviço de resposta a reserva	Hidrogênio	0,01-100	min-semanas	25-45	5-30 anos
Suporte de rede de transmissão e distribuição	Baterias	0,1-100	1- 8 horas	85-98	1000-10000
Gerenciamento de energia	Usinas reversíveis	100-1000	4-12 horas	70-85	30-60 anos
Suporte de rede de transmissão e distribuição	SAAC	10-1000	2-30 horas	40-75	20-40 anos

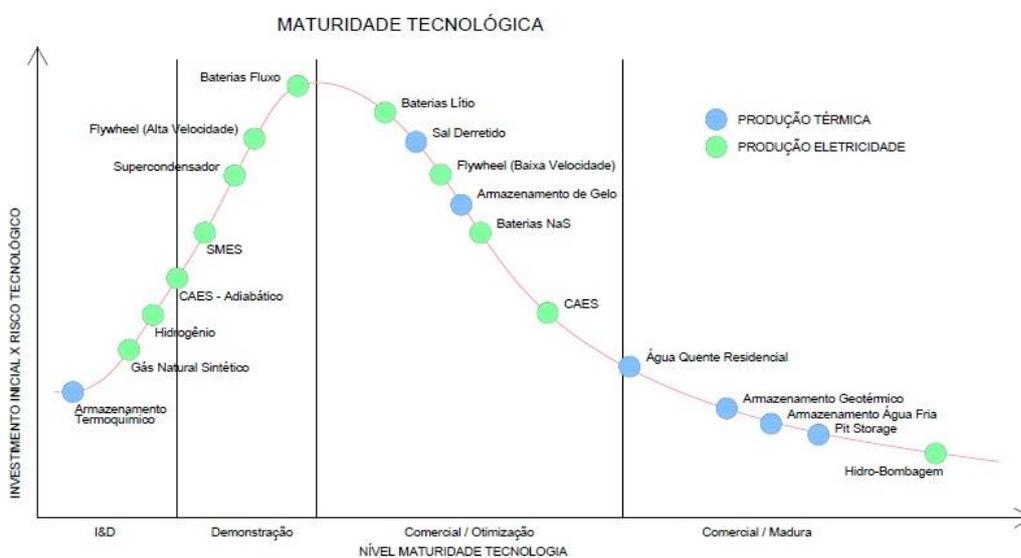


Figura 2.3: Maturidade de SAEs
 Fonte adaptado – Decourt et al. 2013.

Outra referência mostra as aplicações em função da potência e tempo de descarga, associada aos serviços prestados à rede para armazenamento de energia (Figura 2.4).

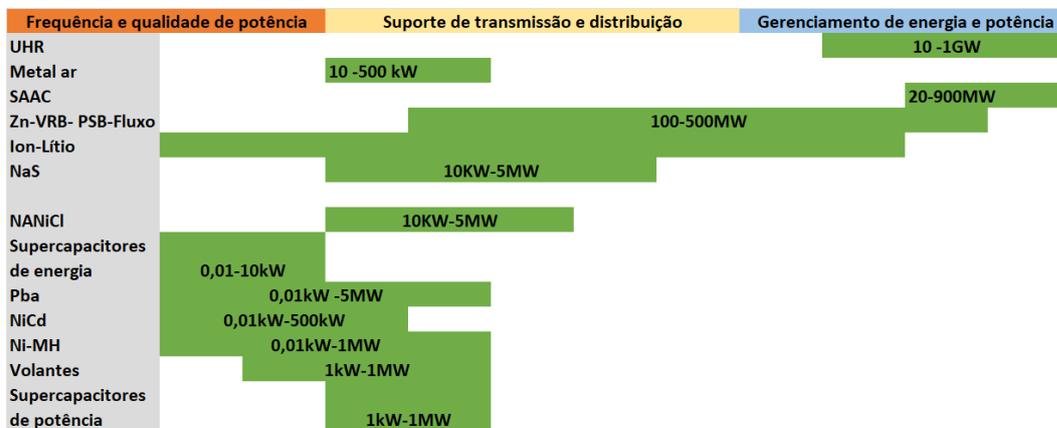


Figura 2.4: Serviços e faixa de capacidade dos SAEs
 Fonte elaboração própria – Adaptado de– DECOURT et al. 2013.

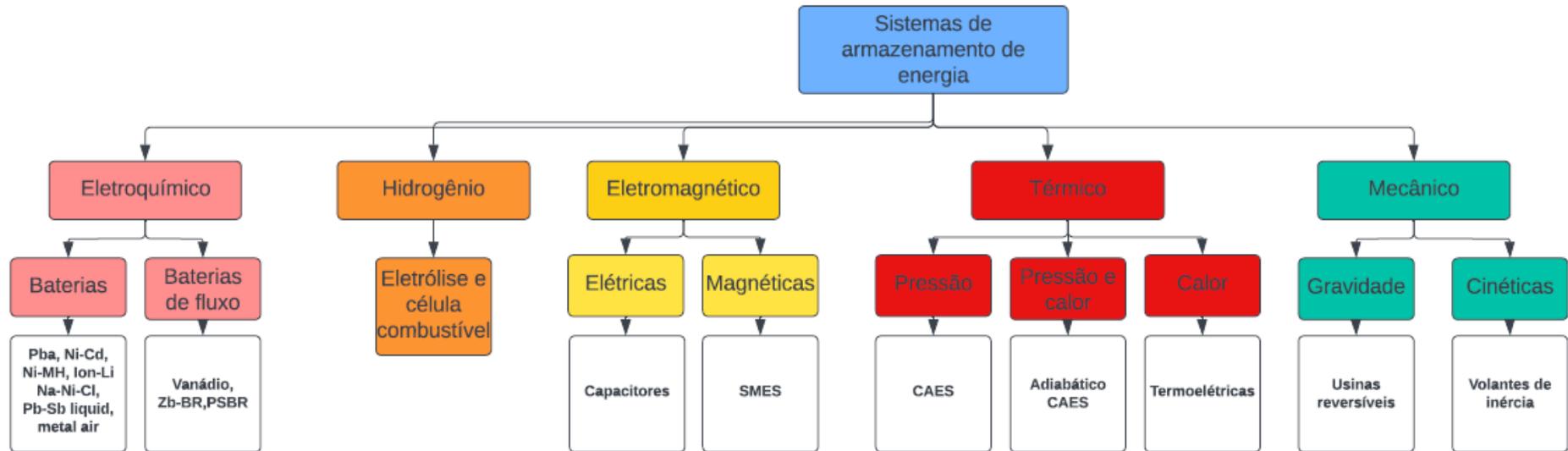


Figura 2.5: Categorização dos Sistemas de Armazenamento de Energia

Fonte: Elaboração própria

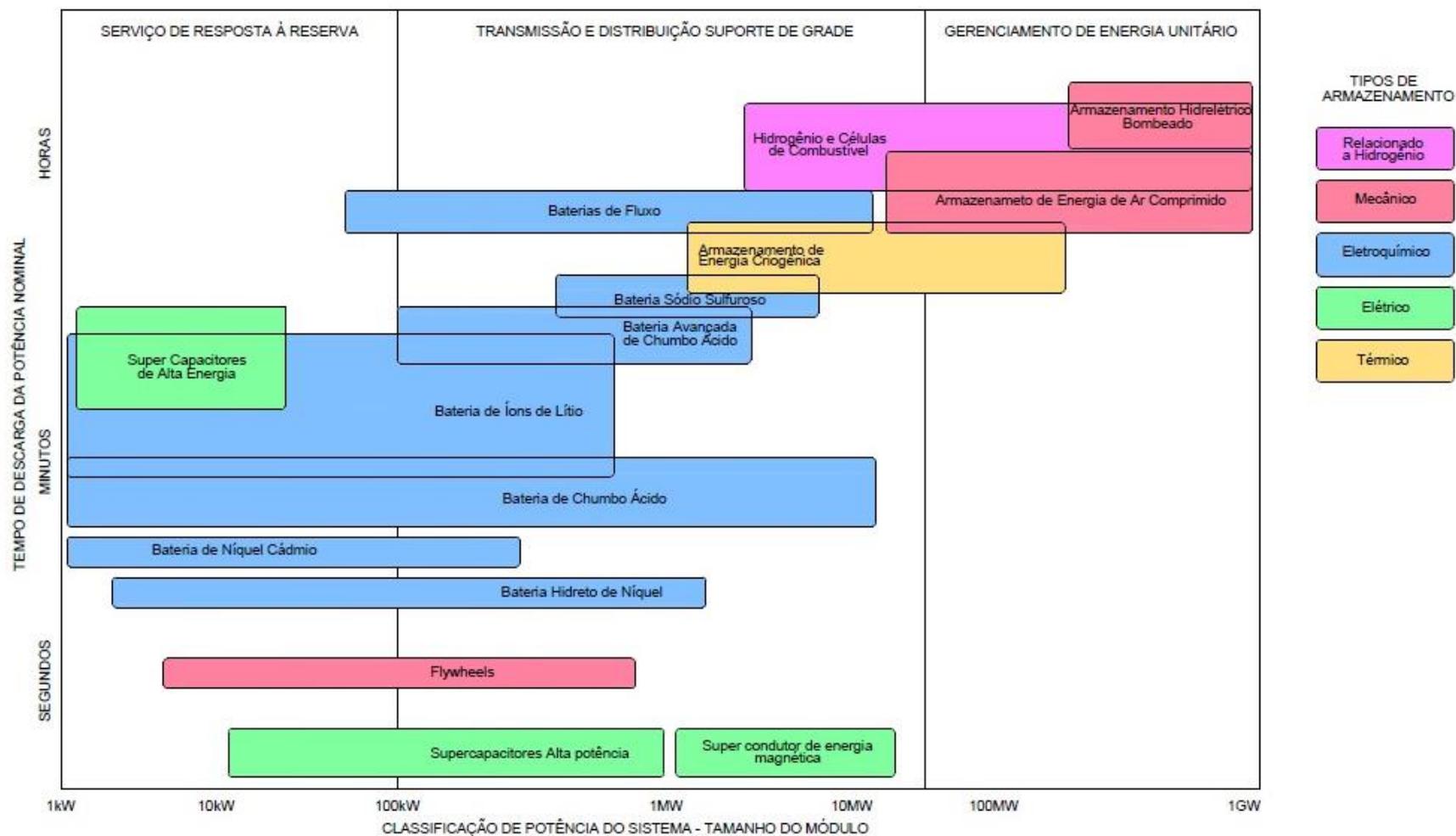


Figura 2.6: Classificação do sistema de armazenamento
 Fonte Elaboração própria Adaptado - GRON (2017)

Como o objetivo é avaliar as tecnologias que se ajustam melhor ao suporte de rede e gerenciamento de energia e potência, e com mais maturidade (Figura 2.3), selecionaram-se os seguintes sistemas:

- Sistemas mecânicos: Usinas reversíveis.
- Baterias eletroquímicas: Chumbo-ácido (Pb); Níquel cádmio (Ni-Cd); Níquel-metal hidreto (NiMH); Ion- Lítio (Ion-Li); e Sódio-enxofre (Na-S).

A partir da literatura consultada (BAUMANN et al., 2019; KOOHI-FAYEGH et al., 2019; VIAN et al., 2020) para esse projeto, selecionaram-se os seguintes sistemas de armazenamento com base nos seguintes critérios: capacidade de 0,1 MW a 100 MW de capacidade, por sua maturidade para aplicação para produção de eletricidade (pelo menos em estágio de comercialização – Figura 2.2), seja no suporte de rede na transmissão/distribuição, ou no gerenciamento de energia) e pela maior disponibilidade de informações para avaliação de seu desempenho técnico, econômico e principalmente socioambiental. Alguns sistemas como o de armazenamento geotérmico (ou para produção térmica), de ar comprimido, ou volantes de inércia, apesar de maduros se ajustam a casos particulares, tais como dispor de cavernas para armazenar o ar, ou de fontes térmicas de calor, e não foram considerados na análise multicritério como se verá mais à frente.

Nas próximas seções, serão discutidos, então, os sistemas mais promissores do ponto de vista de sua aplicação em gerenciamento de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica para o caso do Brasil e que são objeto desta dissertação. Na seção 3.4, será apresentada a usina hidrelétrica reversível, sistema de armazenamento mecânico. Já na seção 3.5, serão apresentados os sistemas de armazenamento químico, que são também objeto deste trabalho.

2.3.1 Sistema de Armazenamento mecânico

As tecnologias mecânicas de armazenamento estão baseadas na energia potencial gravitacional (com bombeamento de água entre reservatórios), compressão de ar e volantes de inércia.

O sistema mais maduro e mais utilizado é a usina hidrelétrica reversível – UHR. Sua tecnologia está baseada na implantação de reservatórios localizados em dois (ou mais) níveis. A água é bombeada de um reservatório superior nos períodos de menor demanda de eletricidade e, depois, descarregada para o reservatório inferior gerando energia nos períodos de maior demanda. A energia potencial gravitacional é armazenada pelo bombeamento no reservatório superior, mas sua eficiência encontra-se na faixa de 75 a 85% para geração elétrica, isto é, consome mais energia do que fornece (KOOHI-FAYEGH, 2019; LEPECKI et al., 2016; ACAR et al., 2019).

A tecnologia é aplicada numa ampla faixa de potência que vai de dezenas de megawatts a gigawatts, sendo competitiva para aplicações envolvendo grandes quantidades de energia e potência instalada. Os sistemas de bombeamento hidráulico apresentam vida útil e custo de capital semelhantes aos dos projetos de geração hidroelétrica e, da mesma forma, compartilham restrições similares, tais como relativas à localização para implantação dos reservatórios inferior e superior, impactos socioambientais, custos elevados de capital inicial e prazos elevados para a sua implantação. Essa tecnologia é apropriada para o gerenciamento da energia gerada, ideal para o atendimento da demanda de ponta e para fornecer equilíbrio para os sistemas sujeitos às intermitências das fontes eólica e solar. Também são úteis em situações que exigem alta descarga de energia e ciclos frequentes.

O país dispõe de condições topográficas, de disponibilidade de recursos hídricos, e mesmo de áreas ambientalmente degradadas para implantação das UHRs. Os demais sistemas atendem situações muito mais particulares, tal como existência de cavernas para o ar comprimido.

Caracterização do sistema

A UHR é uma tecnologia comprovada e confiável para armazenar energia em larga escala e com resposta rápida. É a forma mais comum de armazenamento de energia, com capacidade de 188 GW, representando 96% do total global (IHA,2019).

Foi um sistema muito empregado na Europa e nos EUA, mas a instalação de novas usinas diminuiu devido às preocupações ambientais introduzidas na década de 1990, e à aparente escassez de locais favoráveis. Porém, novos projetos estão sendo propostos novamente após a massiva entrada de renováveis intermitentes e

dos mercados desregulados. Por exemplo, na União Europeia, havia 7,4 GW de projetos propostos para o período de 2009 a 2018, aumentando a capacidade instalada total em 20%. Nos EUA, as novas propostas de projetos eram de 30 GW em 2009 (IHA, 2019).

As principais barreiras para a adoção de UHR são o investimento de capital necessário, sua localização, os impactos socioambientais, a demanda de terras e o tempo de construção. Avanços tecnológicos recentes e novas ferramentas podem facilitar a descoberta de sites em potencial no futuro.

As usinas reversíveis podem ser construídas basicamente de três formas (stoRE,2012):

- Circuito Fechado (*closed loop*) - Utiliza dois reservatórios, que podem ser lagos artificiais ou lagos naturais adaptados, sendo que nenhum deles é ligado a um rio (Figura 2.7).

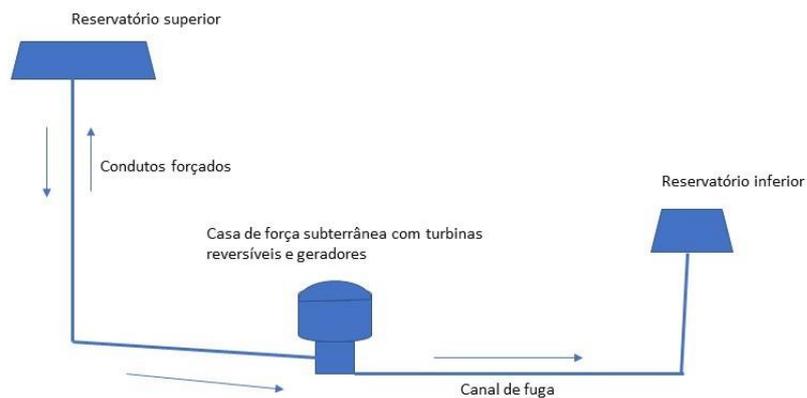


Figura 2.7: Usina hidrelétrica reversível - Sistema fechado
Fonte: Elaboração própria

- Circuito Aberto (*open loop*) - Utiliza dois reservatórios, sendo pelo menos um deles constituído a partir de uma fonte natural de água. Às vezes combina bombeamento para armazenamento de energia com uma hidrelétrica convencional (Figura 2.8).

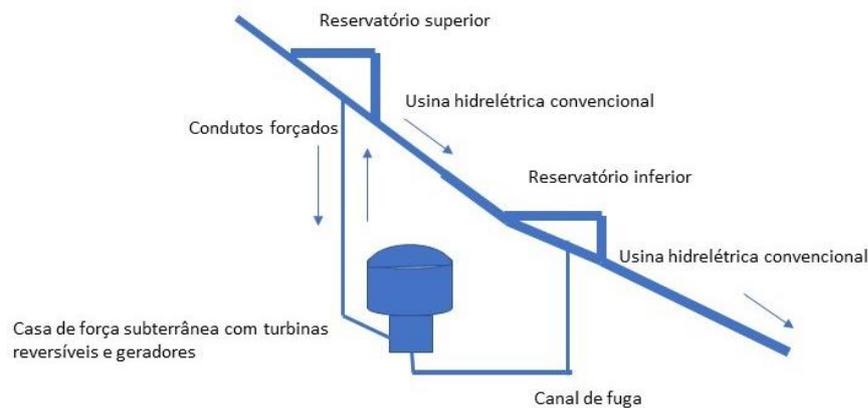


Figura 2.8: Usina hidrelétrica reversível - Sistema aberto
Fonte: Elaboração própria.

- Circuito Semiaberto - Utiliza dois reservatórios, sendo um deles artificial e o outro uma fonte natural de água, geralmente um rio, porém existem exemplos de utilização da água do mar (Figura 2.9).

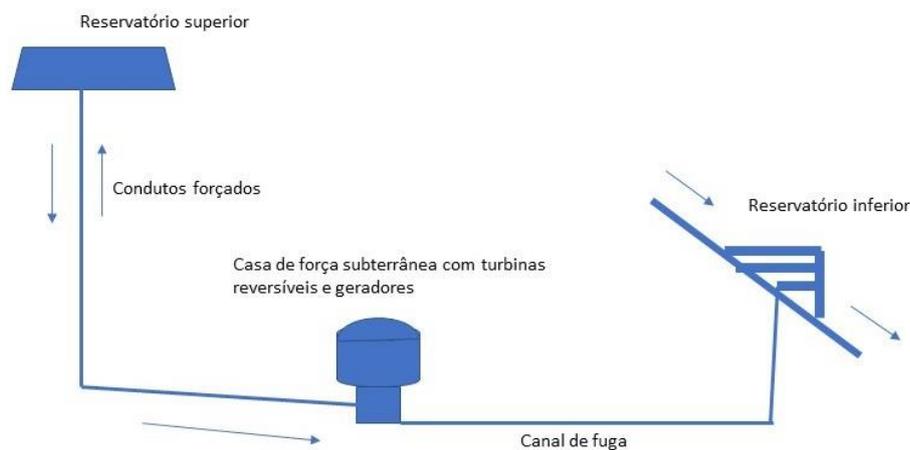


Figura 2.9: Usina hidrelétrica reversível - Sistema semiaberto
Fonte: Elaboração própria

A tecnologia é aplicada numa ampla faixa de potência que vai de dezenas de megawatts a gigawatts, sendo competitiva para aplicações envolvendo grandes quantidades de energia e potência instalada. Os sistemas de bombeamento hidráulico apresentam vida útil e custo de capital semelhantes aos dos projetos de geração hidroelétrica e, da mesma forma, compartilham restrições similares, tais como relativas à localização para implantação dos reservatórios inferior e superior, impactos socioambientais, custos elevados de capital inicial e prazos elevados para a sua implantação.

Aplicação – Vantagens e desvantagens

Essa tecnologia é apropriada para o gerenciamento da energia gerada, ideal para o atendimento da demanda de ponta e para fornecer equilíbrio para os sistemas sujeitos às intermitências das fontes eólica e solar. Também são úteis em situações que exigem alta descarga de energia e ciclos frequentes.

Devido à defasagem de tempo ocorrida desde a implantação das últimas usinas em operação é muito difícil avaliar seus custos. No entanto, estima-se que os custos de construção e instalação sejam o dobro das usinas hidrelétricas convencionais com capacidade semelhante, enquanto os custos operacionais são quase os mesmos. Os custos de implantação são altamente dependentes das características topográficas e geológicas do local examinado, tal como uma usina hidrelétrica convencional. E o longo prazo de construção, associado às obras e a obtenção das licenças ambientais acabam por resultar normalmente em sobrepreço. As contingências de projeto de uma UHR são estimadas na faixa de 10 a 15% e a precisão das estimativas de custo pode variar entre 20 e 25%, tal como nas hidrelétricas. (USDA, 2020).

Globalmente, as UHR fornecem, como as hidrelétricas convencionais, potência para o atendimento da demanda de ponta, mas consumindo energia em momentos de baixa carga. Desta forma, complementavam a geração, usualmente inflexível de térmicas a carvão ou nucleares, nos mercados onde era empregada. As UHR se desenvolveram acompanhando as instalações nucleares e perderam um pouco de fôlego com o avanço de modernas térmicas a gás natural, com grande flexibilidade operativa e por sua eficiência. Diante de um cenário de aumento da demanda por armazenamento de energia associado a maiores restrições à construção de hidrelétricas com reservatórios, as UHR – que possuem reservatórios menores e, por conseguinte, menores impactos ambientais – vêm despertando muito interesse.

Em comparação com as hidrelétricas convencionais, os reservatórios utilizados, além de menores, têm os períodos de geração muito mais curtos, sendo medidos em horas, e em dias, sendo muito raro haver volume para regularizar períodos maiores. O armazenamento assim propiciado pelo bombeamento nas horas mais favoráveis do dia, fora do período de pico, é a melhor forma de armazenamento de energia para um sistema elétrico (USDA, 2020).

A maior parte dos artigos publicados na Europa e na Ásia nos últimos anos sobre a identificação de locais de reversíveis, que envolvem ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tem como base as orientações do relatório *Institute for Energy and Transport - Joint Research Center*, que consolida as discussões levadas a cabo em workshop realizado na Holanda (ARÁNTEGUI et al., 2012).

As UHRs têm algumas desvantagens/limitações de aplicação. Conforme mencionado anteriormente, são altamente dependentes das características do local: dos recursos hídricos disponíveis, da topografia para formar os lagos e da geologia da área que deve ser favorável para as obras civis. Portanto, é provável que locais adequados estejam em regiões montanhosas, em áreas de grande beleza natural ou áreas ambientalmente sensíveis, o que implicaria em aspectos sociais e ecológicos adicionais. Assim, os locais escolhidos exigirão investigações muito específicas do local para determinar a qualidade das rochas para fundações das estruturas e se existem zonas permeáveis importantes, como falhas ou fraturas na rocha. E a evaporação pode ser um problema em climas semiáridos.

Por consumirem mais energia do que geram as UHR não podem ser catalogadas como centrais geradoras de energia elétrica. Esta indefinição dificulta sua aplicação nos marcos regulatórios dos mercados de energia elétrica em que esta tecnologia de armazenamento não esteja considerada.

Os registros históricos mostram que as UHRs se desenvolveram onde os mercados de eletricidade têm um bom grau de participação pública. A análise mostrou que uma redução no seu desenvolvimento global coincidiu com a desregulamentação em larga escala dos mercados de eletricidade durante os anos 90. A tecnologia requer investimento a longo prazo e alguma certeza no retorno, sendo necessário um ambiente regulatório e financeiro estável, portanto, sendo uma condição prévia para atrair financiamento privado. Os mercados de energia liberalizados modernos tendem a não fornecer essa certeza em lugares onde os contratos são de curto prazo, e onde as decisões políticas futuras podem ser imprevisíveis, levando a maiores riscos associados ao desenvolvimento desse tipo de esquema hidrelétrico (LEPECKI et al., 2016).

Por outro lado, os sistemas de UHR apresentam vários benefícios, como já mencionado de forma resumida:

- Tecnologia madura, onde as instalações têm uma vida útil longa, o que lhe permite desempenhar um papel importante no planejamento e gerenciamento de longo prazo dos sistemas de suprimento de energia.
- Grande escala de armazenamento que permite longos períodos de descarga, contribuindo para a segurança do suprimento.
- Prestação de serviços de resposta em frequência e na reserva operacional de curto prazo.
- Mudança de tempo de fornecimento e atendimento de energia elétrica consumindo o excedente de fontes renováveis em momentos de alta disponibilidade ou uso de custo mais baixo, com a utilização dessa energia elétrica para bombear para o reservatório superior, e resposta rápida de descarga ou geração hidrelétrica em períodos de maior valor de pico ou de demanda do sistema.
- Alta flexibilidade de resposta para absorver e gerar de energia suavizando o perfil de atendimento da demanda com o uso da geração de fonte renovável de eletricidade altamente variável e a resposta das usinas térmicas convencionais, permitindo que operem com maior eficiência e a menor custo.

Alguns critérios podem ser listados para a seleção dos locais promissores para as UHRs.

- Capacidade de rebaixamento do nível d'água dos reservatórios para uso dos volumes;
- Possibilidade de ampliação da potência instalada;
- Proximidade de centros de carga e da rede de transmissão;
- Proximidade de potenciais eólicos e solares;
- Distância de unidades de conservação, comunidades quilombolas e terras indígenas.

2.3.2 Sistemas de armazenamento eletroquímico

Os sistemas eletroquímicos de armazenamento de energia elétrica são caracterizados pelos diversos tipos de baterias que fazem uso de reações para

converter a energia química em eletricidade (LEPECKI et al., 2016). As baterias se tornaram a forma mais notória de armazenamento de energia, pois encontram-se presentes nas mais diversas aplicações e escalas. As diferentes tecnologias das baterias possibilitam seu uso efetivo tanto por concessionárias de energia elétrica como pelo consumidor final em aplicações industriais, comerciais ou residenciais. Além disso, possuem características como eficiência, modularidade, tempo de descarga, peso e mobilidade que as tornam adequadas para diversas aplicações em diversos segmentos.

A seguir apresentam-se as diferentes tecnologias de baterias e avaliações obtidas em referências (GAINES et al., 2010; DUNN et al., 2014; ACAR et al., 2019).

a) Baterias de Chumbo Ácido (Pb-A)

Caracterização do sistema

A bateria de chumbo-ácido (Pb-A) é a tecnologia mais madura. Seus principais componentes são: o cátodo composto de peróxido de chumbo colocado em uma rede para suporte; um ânodo feito de uma estrutura em rede esponjosa de chumbo para dar resistência mecânica; um eletrólito de água e ácido sulfúrico; fibra de vidro fosco como separadores (com alguns ligantes poliméricos) que mantêm o ânodo e cátodo separados; e um recipiente de contenção, normalmente feito de polipropileno. Durante a descarga, o chumbo no cátodo é reduzido ($\text{PbO}_2 \rightarrow \text{PbSO}_4$), enquanto no ânodo é oxidado ($\text{Pb} \rightarrow \text{PbSO}_4$). Durante a recarga, essas duas reações ocorrem na direção oposta (Figura 2.10).

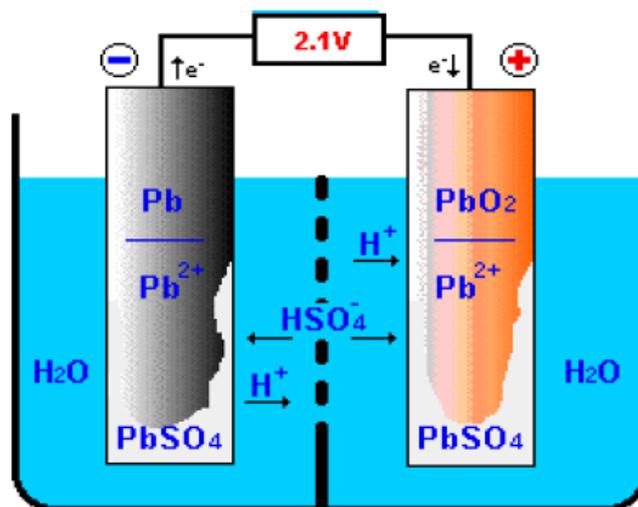


Figura 2.10: Corte esquemático de uma bateria de chumbo-ácido
Fonte: Adaptado de SALKUTI et al, 2021.

Uma bateria típica contém de 60% a 80% chumbo reciclado e plástico (BATTERY COUNCIL INTERNATIONAL, 2010). O antimônio (ou cálcio) foi introduzido para suprimir a eletrólise da água durante a recarga, o que eliminou a necessidade de adicionar periodicamente água às baterias.

Aplicação – vantagens e desvantagens

As baterias de chumbo ácido estão sendo aperfeiçoadas para melhoria de desempenho. Algumas com resposta rápida, semelhante aos volantes de inércia e super capacitores, começam a ser planejadas para aplicações de redução da demanda de ponta, regulação de frequência, integração de geração eólica e fotovoltaica. No entanto, seus ciclos de vida limitados (cerca de 2500), tempo de descarga curto e baixa densidade de energia (50 Wh/kg) são aspectos desfavoráveis para reduzir a demanda de ponta do sistema (GAINES et al, 2010, SALKUTI et al.2021).

Apresenta muitas vantagens: baixo custo, facilidade de fabricação, rápida reação eletroquímica e vida útil razoável quando operada corretamente, o que popularizou seu uso. Entretanto, para aplicações estáticas e de grande porte em sistemas elétricos apresenta desvantagens: o uso de materiais tóxicos na sua fabricação e potencialmente perigosos ao meio ambiente, a baixa densidade de energia e de potência, problemas de manutenção e vida útil limitada, variando com a aplicação, taxa e número de ciclos de descarga. Como já mencionado, estratificação ácida, vazamentos de ácido se violados. Apesar destas limitações são empregadas no fornecimento de potência para equipamentos de controle e chaveamento, em subestações e plantas de geração elétrica (GAINES et al., – 2010, LEPECKI et al.; 2016, ACAR et al.,2019; SALKUTI et al., 2021).

As baterias de chumbo-ácido têm a maior participação no mercado de baterias recarregáveis, tanto em termos de valor de venda quanto de MWh de produção, principalmente na indústria automotiva. Ainda há um mercado secundário para uso industrial, para telecomunicações e em redes de dados. Atendem a uma ampla faixa de armazenamento, tem bom desempenho em temperaturas variadas, e em alta tensão conseguem reter bem carga.

Sua produção, apesar das evidentes preocupações ambientais, pode ser quase completamente, reciclada, o que reduz seus impactos. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA afirma que 90% de reciclagem é obtida para as baterias automotivas (LEPECKI et al.,2016), o que é uma grande vantagem do ponto de vista ambiental. No Brasil, o MMA tem uma meta de reciclar 60% em 4 anos após acordo com setor automotivo (MMA,2019).

b) Baterias de Níquel-cádmio (Ni-Cd)

Caracterização do sistema

As baterias Ni-Cd fazem parte de uma família de baterias recarregáveis que empregam níquel (Ni) como eletrodo positivo e um eletrodo negativo constituído por cádmio (Cd), zinco (Zn), hidrogênio (H₂), ferro (Fe) ou haletos. O eletrólito empregado é uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH).

Durante o processo o Ni é reduzido ($\text{NiOOH} \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2$) no cátodo e o cádmio (Cd) é oxidado ($\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2$) no ânodo. Normalmente, o cátodo e o ânodo são enrolados e colocados em uma caixa de aço, embora uma configuração prismática da bateria também esteja disponível. O cátodo e o ânodo são separados por um polímero poroso, (uma tira separadora - três camadas finas que consistem em nylon / polipropileno / nylon), com o eletrólito livre para se difundir através dele (Figura 2.11).

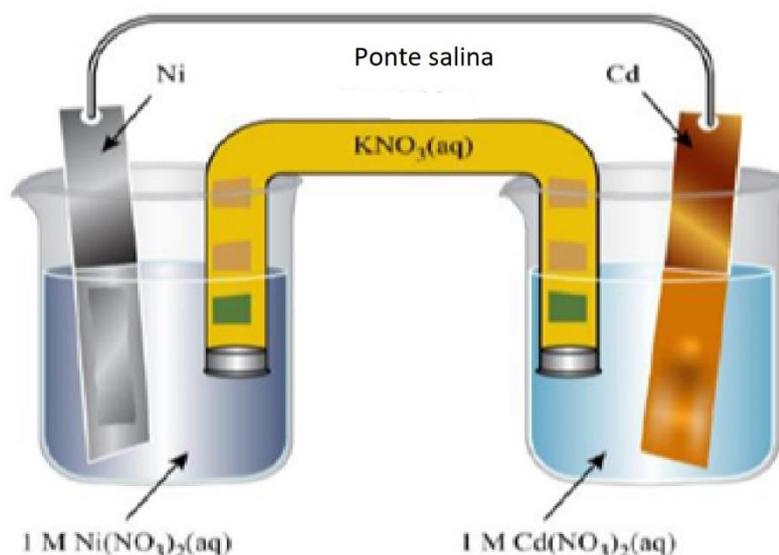


Figura 2.11: Desenho esquemático de uma bateria de níquel-cádmio
Fonte Adaptado de SALKUTI et al., 2021

Aplicação – desvantagens e vantagens

Dentre as baterias de níquel, a de Ni-Cd é a mais empregada para armazenamento de energia em concessionárias de eletricidade. Da mesma forma que as baterias de chumbo ácido, também são consideradas uma tecnologia madura, porém a um custo de aquisição superior.

Suas principais vantagens são: alta densidade de energia, elevada capacidade de descarga, robustez, confiabilidade e vida útil. Uma das vantagens dessas baterias é que elas podem suportar altas taxas de descarga sem afetar adversamente a sua capacidade. Outras vantagens consistem na sua vida útil, boa durabilidade, boa retenção de carga, excelente armazenamento a longo prazo, menor manutenção e descarga plana.

A principal desvantagem é a toxidez decorrente da presença de cádmio (Cd) na sua constituição, porém existem outras limitações como a eficiência na faixa de 60 a 70% e tendência a apresentar perdas de carga elevadas. Sofrem com um efeito de memória, pois perdem capacidade se a recarga for feita antes da descarga completa (GAINES et al., 2010; FREITAS ,2010). Além disso, podem causar impactos ambientais relevantes. Deve ser descartada adequadamente, pois os níveis de Cd nos resíduos sólidos urbanos atualmente vêm em grande parte de baterias de Ni-Cd descartadas (GAINES et al. 2010; LEPECKI et al. 2016; SALKUTI et al. 2021). Mas existe possibilidade de sua reciclagem, reduzindo esse impacto ao meio ambiente.

No setor elétrico são usadas em iluminação de emergência, sistemas de back-up, fornecimento ininterrupto de energia.

c) Baterias de níquel-metal hidretos (Ni-MH)

Caracterização

Os componentes dessas baterias são um cátodo composto de óxido de hidroxila de níquel, um ânodo de *mischmetal* (Me) hidretos, um eletrólito de KOH e um separador de uma membrana porosa de polipropileno. No decorrer da descarga, a reação no cátodo é a mesma que para as baterias de NiCd; ou seja, o Ni é reduzido ($\text{NiOOH} \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2$) e o *mischmetal* é oxidado ($\text{MH} \rightarrow \text{M}$) no ânodo.

O eletrodo negativo usado é hidreto metálico, o eletrodo positivo usado é o oxihidróxido de níquel $[\text{NiO}(\text{OH})_2]$ e o eletrólito usado é o hidróxido de potássio $[\text{KOH}]$. O ânodo é feito de metal hidreto, uma liga de zinco, vanádio, cromo e titânio (GAINES, et al.,2010; SALKUTI, et al.,2021) (Figura 2.12).

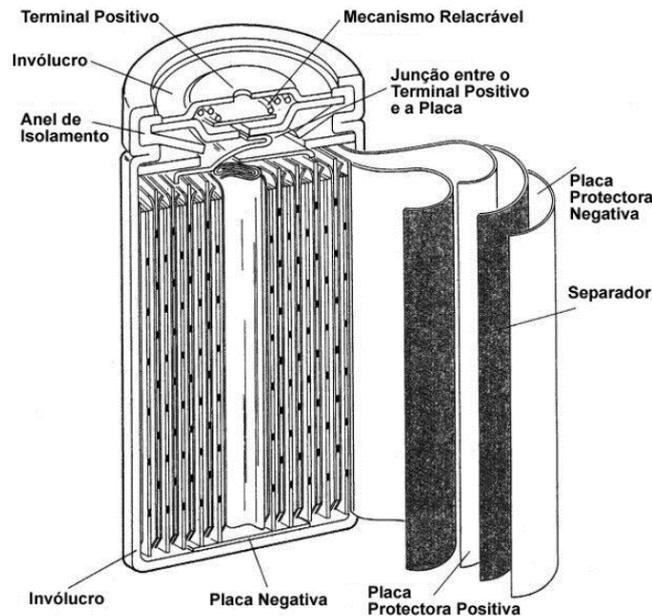


Figura 2.12: Desenho esquemático da bateria de níquel metal hidreto
Fonte: Adaptado de MOURA, 2010

Aplicação – vantagens e desvantagens

Essas baterias estão entre as mais antigas tecnologias, e foram as mais desenvolvidas desde a década de 1990. Elas oferecem densidade de energia relativamente alta (55–75 Wh/kg), baixa necessidade de manutenção e de 2000 a 2500 ciclos de vida. Têm servido em diferentes aplicações, oferecendo energia de qualidade. As composições podem variar amplamente, dependendo da aplicação. Consistentes com seus respectivos objetivos, as baterias de alta potência tendem a ter menos material eletricamente ativo do que as baterias de alta energia, como as usadas para tração em veículos elétricos (GAINES et al., 2010; LEPECKI et al., 2016).

Possuem uma energia específica melhor que as baterias de Ni-Cd e não sofrem do efeito de memória (GAINES et al., 2010; LEPECKI et al., 2016).

As principais desvantagens são os custos de capital relativamente altos, e os problemas no manuseio do seu descarte que estão associados à toxicidade de metais pesados. E conseqüentemente os impactos ao meio ambiente por conta desses

metais, tem baixa aplicação para sistemas elétricos de potência por seu preço e por conseguinte sua capacidade.

d) **Baterias de Íon-Lítio (Ion-Li)**

Caracterização do sistema

As baterias de Íon-lítio representam uma tecnologia comparativamente nova. Têm energia específica e vida útil maiores, e não têm efeito de memória. Até recentemente, a aplicação mais comum para essa bateria era em produtos eletrônicos, como telefones celulares, aparelhos auditivos, computadores e similares. (GAINES et al. 2010; LEPECKI et al, 2016).

Em geral, as baterias comerciais de íons de lítio usam um composto de lítio-grafite, $\text{Li}_x\text{-C}_6$, como ânodo, óxido de lítio cobalto, LiCoO_2 , como cátodo e um íon-lítio como eletrólito condutor. Quando a célula é carregada, o lítio é extraído do cátodo e inserido no ânodo. Na descarga os íons de lítio são liberados pelo ânodo e absorvidos novamente pelo cátodo (Figura 2.13).

As primeiras baterias comerciais de íon-lítio foram produzidas no início dos anos 1990. Elas foram as primeiras direcionadas para aplicativos portáteis, mas também foram empregadas em aplicativos estacionários em escala de grade. A composição das baterias de Íon-Li pode ser bastante variável, dependendo principalmente da composição do seu cátodo. (GIZ, 2018; GAINES et al., 2010; SALKUTI et al., 2021).

As baterias de íon-lítio podem ser classificadas pelos diversos tipos de metais utilizados na sua fabricação (GIZ, 2018):

- LNMC (óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto)
- LCO (óxido de cobalto e lítio)
- LNCA (óxido de lítio-cobalto-alumínio)
- LMO (óxido de lítio-manganês)
- LFP (fosfato de ferro e lítio)
- LTO (titanato de lítio)

As baterias que contêm cobalto têm densidades de energia mais elevadas em comparação com outras baterias de Li, mas também são mais caras. Portanto, são predominantemente usadas em dispositivos móveis, como smartphones e veículos

elétricos em que o peso e a densidade de energia são de alta relevância (GIZ, 2018; GAINES et al., 2010; SALKUTI et al., 2021).

Para uso estacionário são utilizadas principalmente baterias LMO ou LFP mais baratas. Embora as baterias LTO tenham vantagens em termos de segurança contra incêndio, elas não são muito empregadas devido às baixas densidades de energia, pois são muito caras também.

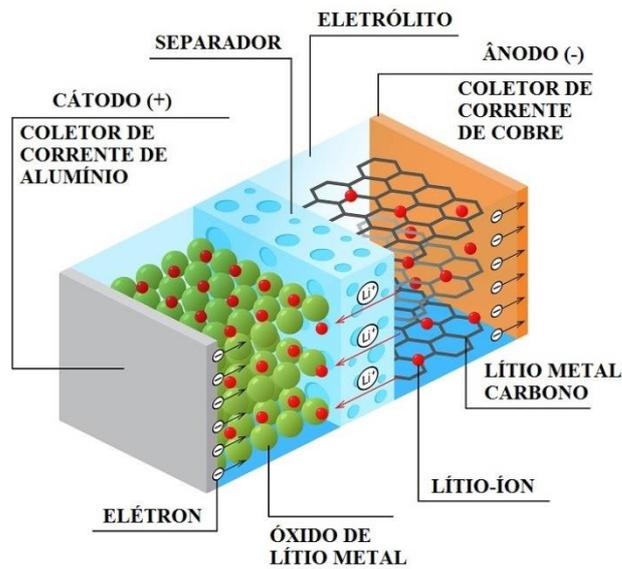


Figura 2.13: Desenho esquemático de baterias de íon-lítio
Fonte: Adaptado de FREITAS, 2017

Aplicação – vantagens e desvantagens

Foram largamente utilizadas em equipamentos eletrônicos e têm sido a opção preferencial para as aplicações veiculares, seja nos híbridos quanto nos veículos elétricos puros. Nos últimos anos as baterias de Íon-Li têm despontado são como a tecnologia que mais têm sido desenvolvidas nas aplicações estacionárias para armazenamento de energia, com destaque em sistemas fotovoltaicos isolados da rede (*off-grid*).

Quando comparadas com a maturidade das baterias chumbo-ácido ainda se encontram em estágio tecnológico menos avançado. Portanto, possuem grande potencial para desenvolvimentos e reduções de custo. Existem vários projetos piloto de sistemas estacionários de armazenamento com baterias de Íon-Li integrados às redes de concessionárias de energia elétrica. Estas aplicações envolvem tanto conjuntos de baixa capacidade (5 a 10 kW/20 kWh) para sistemas distribuídos quanto de capacidade elevada (>1 MW), e na resposta rápida para regulação de

frequência. Algumas concessionárias de distribuição planejam a implementação de Sistemas Distribuídos de Armazenamento de Energia (*Distributed Energy Storage Systems – DESS*), que seriam instalados antes do medidor de energia, com potência na faixa de 25 a 50 kW e capacidade de atendimento da carga durante 1 a 3 horas (GAINES et al., 2010; LEPECKI et al., 2016; MOURA, 2010; SALKUTI et al., 2021).

As vantagens desses SAEs incluem células seladas que não requerem manutenção, ciclo de vida longo, ampla faixa de temperatura de operação, carregamento rápido, alta eficiência de carga / descarga e de densidade de energia, além de ampla flexibilidade de projeto.

Essa flexibilidade envolve a seleção dos sais usados como eletrólito. Convencionalmente, as baterias de íon de lítio usam hexa-flúor-fosfato de lítio (LiPF_6). As baterias que usam LiPF_6 são limitadas pela estabilidade térmica, sensibilidade à umidade e se decompõem em produtos químicos tóxicos, mas sais alternativos estão sendo investigados para reduzir essas desvantagens. Eletrólitos de estado sólido também podem ser implementados para tornar as baterias de íon-lítio mais eficazes devido à sua estabilidade térmica e química; os eletrólitos de estado sólido são considerados caros. No entanto, estão sendo feitos avanços para torná-los mais viáveis comercialmente.

As baterias de íon-lítio podem fornecer uma alta eficiência de armazenamento (>80%), e, portanto, são as fontes de energia preferidas para o transporte sustentável. Essas baterias são amplamente aplicadas em sistemas de energia renovável e micro redes.

As baterias Íon-Li apresentam algumas desvantagens, dentre as quais a relação existente entre a vida útil (ciclos) e a profundidade dos ciclos de descarga, a recomendação de não ser utilizada em descarga completa, a possibilidade de ocorrer instabilidade térmica quando há carregamento excessivo ou alta descarga, além de custo superior aos das demais baterias convencionais (chumbo ácido e, Ni-Cd).

e) **Baterias de sódio enxofre (Na-S)**

Caracterização do sistema

As baterias de Na-S são uma tecnologia com maior aplicação nas empresas de distribuição de energia elétrica fornecendo bons serviços de energia,

nivelamento de carga, em sistemas de emergência, integração com fontes renováveis e ações que requerem tempo longo de descarga (GAINES et al., 2010; LEPECKI et al., 2016).

Nessas baterias o eletrodo negativo (ânodo) é constituído pelo sódio (Na) fundido e o eletrodo positivo (cátodo) por enxofre fundido, separados por um eletrólito cerâmico sólido (β -alumina). Os íons de sódio carregados positivamente fluem através do eletrólito cerâmico para o enxofre fundido onde uma reação eletroquímica produz um fluxo de corrente elétrica (Figura 2.14). Para facilitar a condutividade iônica através do eletrólito cerâmico, o sódio e o enxofre são mantidos no estado fundido a uma temperatura na faixa de 300 a 360°C (LEPECKI, et al., 2016).

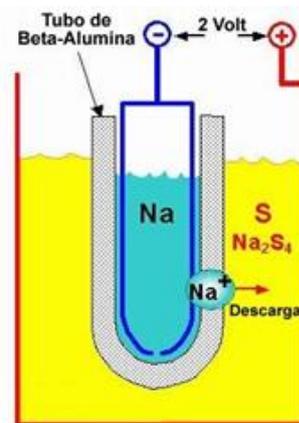


Figura 2.14: Bateria de Na-S
Fonte: Adaptado de LEPECKI et al., 2016

Essas baterias são caracterizadas por utilizarem o sal fundido como eletrólito, sendo o sódio usado na sua forma líquida. Devido a isso, tais baterias são operadas em temperaturas elevadas.

Aplicação – vantagens e desvantagens

As baterias de Na-S foram desenvolvidas pela NGK *Insulators e Tokyo Electric Power* desde 1987. Têm capacidade em aplicações para o atendimento de ponta de energia, com eficiência geral relativamente alta (75-85%), ciclos de vida de 2500 a 4500, vida útil esperada de 15 anos e tempo de descarga de até 7 h, e sua classificação de potência é escalável. As baterias de sal fundido possuem características interessantes para aplicação em larga escala, com vida útil superior às de ion-lítio, e por serem compostas por materiais abundantes e não tóxicos (LEPECKI et al., 2016; GAINES et al., 2010; SANIJ et al., 2019).

Um ponto positivo é a sua longa vida útil quando comparadas ao tempo de operação de uma bateria Íon-Li.

No aspecto ambiental as baterias de sódio-enxofre não produzem emissões durante seu funcionamento e cerca de 99% de seus materiais (em peso) podem ser reciclados, como o ferro, o cobre e o alumínio, porém não o sódio e enxofre (GAINES et al., 2010). Elas já foram consideradas a alternativa preferida para aplicações em veículos elétricos.

Porém, vários pontos negativos podem ser apontados: requerem energia para manter a temperatura operacional (cerca de 300 °C) e existem preocupações de segurança sobre sódio fundido e polissulfeto de sódio altamente corrosivo.

2.3. Comparação entre os sistemas de armazenamento

Cada sistema de armazenamento de energia tem vantagens e desvantagens, e distintos custos de implantação e operação. A Tabela 2.1 mostra as principais características técnicas dos sistemas.

Tabela 2.1: Principais aspectos dos sistemas

Sistemas de armazenamento	Vida útil (anos)	Número de ciclos	Eficiência (%)	Densidade de energia por volume (Wh/L)	Densidade de potência (W/L) por volume
UHR	40 a 60	10000 a 30000	70 a 85	1 a 2	0,5 a 1,5
Pba	5 a 15	500 a 1000	70 a 80	50 a 80	10 a 400
Li-ion	5 a 15	1000 a 10000	90 a 97	200 a 500	1500 a 10000
Na-S	10 a 15	2500 a 4500	75 a 90	150 a 250	140 a 180
Ni-Cd	10 a 20	2000 a 2500	60 a 70	60 a 150	80 a 600
NI-MH	3 a 15	250-2000	65 a 70%	60-120	250-1000

Fonte: BAUMANN et al., 2019 e FERREIRA et al., 2013

A Tabela 2.2 compara os custos de investimento e de operação. Nota-se que os sistemas mecânicos têm maior vida útil e número de ciclos de operação, mas menor eficiência que baterias de íon-lítio, por exemplo. Apresentam ainda um custo maior de investimento inicial dependendo do tipo de instalação (SANIJ, et al., 2019). O quadro é apenas uma referência comparativa que no futuro teria que ser atualizada para o caso brasileiro.

Tabela 2.2: Comparação custos x capital

Sistemas de armazenamento	Investimento(U\$/kW)	Custo da energia(U\$/kW)	Custo de operação e manutenção(U\$/kW/ano)
UHR	2500 a 4300	5 a 100	3
Pba	300 a 600	200 a 400	50
Li-ion	1200 a 4000	600 a 2500	ND
Na-S	1000 a 3000	300 a 500	80
Ni-Cd	500 a 1500	800 a 1500	20
NI-MH	1000	ND	ND

Fonte: Elaboração própria – (MONGIRD et al., 2019; IRENA, 2017; FERREIRA et al.,2013; SANIJ et al.,2019)

Os sistemas mecânicos têm alta capacidade, são confiáveis, têm longa vida útil, impactos socioambientais relevantes durante a implantação e não são adequados ao armazenamento distribuído. Precisam de condições ambientais e geológicas particulares. Por outro lado, as baterias se ajustam bem ao armazenamento distribuído, mas causam impactos maiores na extração de matéria prima, e no descarte/reciclagem. Outra desvantagem é a menor vida útil. O Quadro 2.2 mostra uma matriz SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) (SANIJ et al., 2019) das três grandes categorias de sistemas de armazenamento aqui mencionadas.

Quadro 2.2: Vantagens x desvantagens

Sistemas de armazenamento	Pontos fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
UHR	Alta capacidade; baixo custo por kWh; menor necessidade de conversores eletrônicos; longa vida útil e confiável	Armazenamento centralizado; restrições geográficas e ambientais; alto investimento inicial	Pode ser usado em instalações off-Shore de usinas eólicas	Pode ser considerado obsoleto para o armazenamento distribuído; resistência pelos impactos socioambientais
Baterias	Armazenamento distribuído; fácil de configurar; tempo de resposta rápida; e alta eficiência de energia e densidade	Alto investimento inicial; curta vida útil; e limitações de temperatura em climas frios	Novas tecnologias e aplicação em sistemas distribuídos	Constantes desenvolvimento de tecnologias dificulta a seleção da melhor solução; resistência de ambientalistas aos impactos da extração e no descarte e problemas de reciclagem

Fonte: SANIJ et al.,2019.

Como o estudo de caso será feito para sistemas elétricos de potência para o Brasil, essa dissertação focará nos principais sistemas de armazenamento - SAEs mecânicos (nesse caso as usinas reversíveis), e nas baterias mais utilizadas dos sistemas eletroquímicos e com maior número de informações dos diversos atributos que permitirão a avaliação multicritério (IDB, 2021), e focando no intervalo de potência de 0,1 a 100 MW.

2.4. Considerações sobre o capítulo

Nesse capítulo foi apresentado um panorama geral sobre SAEs, tanto para serviços de resposta a reserva, quanto a suporte de rede de transmissão e distribuição de energia elétrica e gerenciamento de energia. O foco da pesquisa foram os serviços de suporte a rede e gerenciamento de energia, tão necessários a entrada de fontes renováveis no Brasil (inclusive de geração distribuída), sendo discutidas as alternativas tecnológicas de SAEs que estão disponíveis para esses serviços.

Ao longo da pesquisa sobre esses sistemas pode-se notar um grande e recente interesse em baterias para equipamentos eletrônicos e veículos, o que tem resultados em muitas novas alternativas de tecnologias, seu aperfeiçoamento e redução de custos, além da preocupação com o descarte ou reciclagem após o término de sua vida útil, o que envolve a busca por novos materiais e minérios. Como mencionando ao longo desse capítulo procurou-se abranger aquelas tecnologias mais testadas e maduras, e que se adequassem aos serviços necessários citados.

3. **Avaliação e seleção de tecnologias de SAEs**

Apresentam-se neste capítulo as principais metodologias que utilizam avaliação multicritério para análise e seleção das mais relevantes tecnologias de SAE disponíveis para atender as demandas de uma rede para prestar Serviços Elétricos de Potência (SEP).

Como visto no capítulo 2, existem muitos sistemas e tecnologias com aplicações e serviços muito distintos. Alguns dos fatores que os diferenciam – tais como, vida útil, número de ciclos, eficiência, densidade de energia e de potência, investimentos, custo da energia, de operação e manutenção – são essenciais de serem estudados para uma tomada de decisão de investimento, por exemplo. Mas além desses critérios técnicos e econômicos, os atributos socioambientais também são muito relevantes no processo de tomada de decisão.

Recentemente um trabalho sobre a avaliação e seleção da melhor alternativa de geração de fontes renováveis (MARTINS, 2017), utilizando métodos multicritério, mostrou que as fontes de geração solar e eólica têm o melhor desempenho considerando critérios técnicos, econômicos e socioambientais, seguido pelas fontes hidrelétricas e biomassa.

As usinas hidrelétricas e mesmo algumas plantas eólicas têm sido muito questionadas pelos impactos que causam ao meio ambiente (MURY et al, 2022), e não têm sido implantadas de forma a poder acompanhar o crescimento da demanda, o que mostra que esse tipo de avaliação é fundamental para que a sociedade possa ser mais bem informada para tomar a melhor decisão sobre a forma de expandir a oferta de energia elétrica. Inclusive as hidrelétricas realizam os serviços ancilares ao sistema de transmissão brasileiro, e foram responsáveis para viabilizar a entrada em grande escala das fontes renováveis intermitentes no Brasil (EPE,2016). O que mostra a importância de ter uma matriz elétrica diversificada como a operada pelo SIN.

A recente crise hidrológica (2014-2021) vem mostrando a importância das usinas com reservatório de regularização (VELOSO, 2014), e o fato de que não são

mais aprovadas vem causando muitas dificuldades para operação do sistema elétrico brasileiro.

Assim, como já mencionado, a variabilidade de produção destas fontes intermitentes precisa ser coberta com recursos que aumentem a flexibilidade operativa para mitigar a variabilidade da produção solar ou eólica de curto prazo, além da sazonalidade da produção anual. É de se esperar que a transição da matriz elétrica nacional em curso, com o aumento relativo da participação de fontes renováveis variáveis e a redução relativa das hidrelétricas – que até o momento vinha ocorrendo quase sem transtornos – demande desafios crescentes no médio e longo prazo. Dentro desse contexto, vai ganhar relevância o investimento em SAEs, sejam eles mecânicos ou eletroquímicos.

Alguns critérios pesquisados na literatura para comparar esses sistemas se mostram difíceis de avaliar. Por exemplo, a análise de custos não pode ser generalizada com facilidade porque os orçamentos de projetos de UHR e SAAC (sistema de armazenamento de ar comprimido) são específicos, estando diretamente relacionados às condições topográficas, geológicas e socioambientais dos locais onde serão instalados. Neste sentido, as baterias tendem a ser mais facilmente comparáveis entre si já que sua implantação não depende dessas condições.

Existem outros desafios para realizar as análises comparativas se levarmos em conta que os impactos ambientais se dão de forma diferente ao longo das diversas etapas da vida útil dos SAEs. Em sistemas mecânicos, os efeitos negativos são verificados principalmente nos locais do empreendimento e nas etapas de construção e operação. Em sistemas eletroquímicos, os principais impactos devem ocorrer nas fases de extração dos minerais necessários no processo de fabricação e ao término da vida útil, quando ocorre o descarte ou reciclagem. Outra diferença relevante para a comparação refere-se a fonte de energia utilizada para a produção da matéria prima ou sua extração. Se for baseada principalmente na queima de combustíveis fósseis, terá uma maior emissão de gases de efeito estufa na sua fabricação.

Por conta dessas especificidades, nesta dissertação, é proposto o uso das informações disponíveis de impactos socioambientais considerando o ciclo de vida dos equipamentos (OLIVEIRA et al. 2015) para comparar de forma mais adequada os diversos efeitos negativos gerados pelas tecnologias de armazenamento. A

Análise de Ciclo de Vida (ACV) fornece uma perspectiva abrangente de todo o processo de fabricação de um dispositivo ou sistema (OLIVEIRA et al., 2015). Essa análise considera os impactos e custos associados em todos os estágios de sua produção, incluindo a extração de matéria prima, fabricação e montagem, operação, manutenção e sua desativação.

O método é baseado em uma sequência de avaliações dos estágios da produção, conforme resumidamente apresentado no fluxograma a seguir. Na fase de extração, como mostrado na Figura 3.1 a obtenção da matéria prima pode se iniciar com uma recuperação, por exemplo, como se faz hoje com as baterias de chumbo ácido, reduzindo os impactos sobre os recursos naturais para extração dos minerais necessários.



Figura 3.1: Adaptado de OLIVEIRA et al., 2015

Neste ponto é importante deixar claro que não se fará uma análise de ciclo de vida de cada um dos SAEs, mas apenas que serão utilizadas avaliações disponíveis na literatura sobre esses sistemas durante sua vida útil (OLIVEIRA et al, 2015; BAUMANN et al.,2019), do berço ao túmulo. Isto é, em cada uma das etapas, começando na extração dos materiais, fabricação, operação e descarte.

3.1 Os Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Os SAEs são vistos como um dos principais elementos para desenvolver uma matriz elétrica de base renovável e ambientalmente sustentável (OLIVEIRA et al., 2015). Selecionar um SAE, ou uma fonte de geração de energia elétrica, mais adequado é um problema que envolve geralmente vários interlocutores com

objetivos geralmente divergentes e que podem ser atendidos por várias tecnologias, principalmente no que tange às questões socioambientais. Vários estudos estão disponíveis para abordar este problema aplicando métodos de análise de decisão multicritério (Métodos Multicritério de Apoio à Decisão - MMAD).

A situação ou problema de decisão caracteriza-se por uma necessidade de avaliação de um conjunto de alternativas. O objetivo da análise é fazer com que o tomador de decisão pense sistematicamente sobre problemas complexos, melhorando a qualidade das decisões resultantes. Uma decisão pode ocorrer mesmo quando o decisor escolhe por “não decidir” (CALILI, 2018).

A Análise de Decisão Multicritério (ADM), é considerada uma ferramenta para apoiar os tomadores de decisão na organização e na sistematização das informações disponíveis, repensando as consequências das diversas soluções, e verificando suas opiniões e necessidades (WILKENS, 2012). As decisões e preferências podem ser expressas matematicamente e, dessa forma, podem ser associadas a observações, sendo posteriormente reproduzidas para diferentes cenários elencados com a participação dos interlocutores (ALCAMO, 2008).

Por isso, os métodos ADM têm sido amplamente aplicados para resolver esses problemas de decisão em grande escala relacionados ao planejamento de política energética (HÄMÄLÄINEN et al., 1986), para a escolha da melhor tecnologia de energia renovável, ou em projetos de energia sustentável.

Existem diferentes abordagens, critérios e objetivos na tomada de decisão com base em avaliações de múltiplos atributos, e que são particularmente adequados quando aplicadas em situações em que os resultados são complexos para comparar ou mesmo de reproduzir, por exemplo, quando envolve impactos socioambientais difíceis de quantificar ou mesmo qualificar.

Os critérios considerados nessas metodologias podem ser estruturados em torno de algumas dimensões: tecnológica, econômica, socioambiental e institucional, e ainda compreendendo um elevado número de subcritérios individuais. A agregação desses critérios costuma ser realizada principalmente por meio da Análise de Processo Hierárquico (AHP) em combinação com um amplo conjunto de outros métodos.

De acordo com a literatura (BAUMANN et al., 2019), os métodos de Análise de Decisão Multicritério ou Modelos de Decisão Multicritério (ADM ou

MDM) são separados em modelos de decisão multiobjectivo (MDMO) e modelos de decisão multicritério (MDMC). Ambas as abordagens compartilham características semelhantes. O primeiro conjunto de métodos lida com problemas de decisão onde o espaço é contínuo, com o objetivo de encontrar uma solução ideal dentro de limites predefinidos (por exemplo, numa função objetivo como num problema de otimização).

Em contraste, os métodos MDMC concentram-se em problemas onde os espaços de decisão são discretos e onde um conjunto de alternativas de decisão já foi predeterminado (por exemplo, selecionar uma alternativa pelos impactos que causam), pois dificilmente se consegue gerar uma função contínua para essa quantificação, e muitas vezes o máximo que se obtém é uma qualificação (OBERSCHMIDT, 2010; TRIANTAPHYLLOU et al., 1998).

Esses dois métodos podem ser esquematizados em duas fases que, por sua vez, podem ser subdivididas da seguinte forma:

i) Fase de construção:

- Definição de objetivos, escopos e alternativas.
- Identificação e seleção de critérios.
- Criação de uma interface com os interlocutores.

ii) Fase de exploração:

- Estabelecimento de critérios de medição de desempenho.
- Agregação dos critérios.
- Comparação dos resultados.

A fase de construção geralmente começa com a definição do objetivo e o problema de decisão que se pretende resolver. Isso também inclui a seleção do método mais adequado, as alternativas relevantes, definição dos critérios de avaliação correspondentes e a provisão de uma interface (por exemplo, uma escala para comparações de pares) que permita a compreensão e decisão dos interlocutores para expressar suas preferências em relação aos critérios selecionados.

Essas etapas devem ser conduzidas em cooperação com as partes interessadas (tomadores de decisão) por meio de pesquisas ou entrevistas. Portanto, é crucial identificar e integrar os atores relevantes neste processo, pois eles fornecem as entradas fundamentais para a configuração de um MDM.

A ponderação necessária deve ser preferencialmente definida pelos tomadores de decisão durante a fase de exploração. Ao lado dessa atribuição de pesos, também o desempenho de diferentes alternativas em relação aos critérios definidos deve ser medido para comparação. Esta etapa é frequentemente chamada de agregação. E existem vários métodos disponíveis para este fim, e o mais adequado deve ser escolhido de acordo com os objetivos do problema que se quer resolver.

A maioria dos métodos MDMC mostra alta flexibilidade quanto à entrada de dados, permitindo integrar uma grande variedade de tipologias com vários graus de liberdade. Pelas características das comparações que se precisará fazer, envolvendo diversas dimensões para as quais não se disporá de funções contínuas, como os aspectos socioambientais, o trabalho aqui desenvolvido focará nos métodos MDMC.

Essas entradas de dados podem ser custos de modelos técnico-econômicos, impactos ambientais resultantes de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), mas também outros dados de revisões de literatura ou pesquisas (custos nivelados, percepções sobre os impactos nos ecossistemas etc.).

Ao final se procura obter uma classificação das alternativas inicialmente elencadas, sendo fundamental que todas as informações relevantes sejam fornecidas de forma simples e compreensíveis para que se possa dar um feedback para os tomadores de decisão identificados (exibindo todas as preferências dos participantes, e facilitando a comunicação para encontrar uma solução de consenso).

O MDMC pode ser separado em métodos elementares, métodos compensatórios clássicos (CCM – também chamado de método da teoria da utilidade multiatributo – escola americana) e métodos de superação (OM – escola europeia) (GUITOUNI et al. 1998; MAJUMDER et al., 2015).

i) Métodos elementares

Incluem os métodos de informação não preferenciais sem tomador de decisão, com a entrada feita pelo método da soma ponderada (WSM) ou método de produto ponderado fornecido pelo tomador de decisão (WANG et al. 2009). WSM é um dos métodos MDMC mais usados. Geralmente, nenhuma compensação é feita entre os critérios considerados. Uma grande vantagem desse método é a sua

simplicidade associada aos mínimos esforços de cálculo. Por outro lado, eles não consideram compensações (*trade-offs*), ou potenciais inconsistências de pesos atribuídos a diferentes critérios (KRUGER et al., 2013).

ii) Métodos compensatórios clássicos (CCM)

Esses métodos têm o objetivo de atribuir um valor para cada alternativa. O valor total é a soma dos valores marginais que cada critério atribui a uma ação considerada (FIGUEIRA, 2005). Esses métodos se iniciam a partir de uma ordenação prévia de determinadas alternativas. Os métodos típicos são TOPSIS (Técnica da Ordem de Preferência por Similaridade com a Solução Ideal) (DAIM, et al., 2012), MAUT (Teoria da Utilidade Multi-Atributo), MAVT (Teoria do Valor Multi-atributo) (MURRANT et al., 2018), SMART (Técnica Simples de Classificação Multi-Atributo) e AHP (Processo Analítico Hierárquico) (SAATY, 2012). O AHP como método compensatório é usado com mais frequência (especialmente para agregação de preferências).

O grau da agregação pode ser uma desvantagem devido à possibilidade de perda de informações, e por não admitir que duas alternativas não sejam comparáveis a princípio (GUITOUNI et al., 1998). O tomador de decisão assume que pode haver compensação absoluta entre as avaliações diferentes, o que pode não ser correto. Assim, um bom desempenho para um critério pode facilmente ser contrabalançado por outro mais pobre e levar à escolha de uma alternativa não ideal, que pode ter um bom desempenho em um critério específico, mas um mal resultado nos demais.

iii) Métodos de superação (OM)

Esses métodos buscam eliminar alternativas que são particularmente dominantes. Em outras palavras, o problema de agregação não é mais abordado antecipadamente, mas sim resolvido por um sistema de síntese das relações de preferência (ROY, 2016). As referências são usadas para atribuir maior influência a critérios específicos do que outros (MAJUMDER et al., 2015), e alguns conceitos devem ser empregados para estabelecer relações: limites, concordância e discordância. Métodos típicos são ELECTRE (Algoritmo de tradução de escolhas e eliminação) I, II e III e PROMETHEE (Método de Classificação de Preferência para Avaliação de Enriquecimento) I e II (OBERSCHMIDT et al., 2016). Os problemas desses métodos estão associados a dependência nas definições bastante

arbitrárias do que se constitui a superação, e como os parâmetros de limite são estabelecidos e posteriormente manipulados.

iv) Métodos híbridos

Como resumidamente apresentado, cada método tem seus prós e contras, e é sempre um desafio selecionar um método apropriado. Além disso, alguns deles podem levar a uma classificação diferente das alternativas. Alguns autores, portanto, recomendam o uso de uma combinação de métodos diferentes (ZAVADSKAS et al., 2016; SADOK et al., 2008). Exemplos de tais combinações são o uso de AHP como um método para definição de preferência juntamente com o método TOPSIS ou PROMETHEE, por exemplo, empregados para agregação de desempenho. Essa aplicação de tais abordagens complexas e mistas estão tendo um interesse crescente.

3.2

Métodos multicritério de apoio à decisão sob incerteza

Como mencionado na introdução, esse trabalho visa hierarquizar diferentes tipos de SAE e selecionar aquele mais adequado para os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

No caso de SAEs, o melhor exemplo para a relevância que essa avaliação pode ser necessária é o caso de uma usina hidrelétrica reversível, pois seus impactos na implantação são muito semelhantes aos de uma usina convencional. E o que tem sido visto é a dificuldade de comparar fontes de geração de energia renovável e aprovar mesmo bons projetos de usinas hidrelétricas. São projetos complexos, com impactos locais muito relevantes, mas muitos benefícios regionais. E com muitas incertezas na avaliação dos impactos negativos ao meio ambiente. O que torna o processo de aprovação de uma usina hidrelétrica, inclusive das reversíveis, muito complexo.

Pode ser visto na experiência recente em estudos de inventário hidrelétrico no Brasil a enorme dificuldade de se tomar uma decisão que envolva subjetividade, riscos a partir de uma quantificação objetiva. Por exemplo, a melhor alternativa de aproveitamento de usinas hidrelétricas em uma bacia envolve muitas avaliações subjetivas dos impactos e indicadores socioambientais. O Manual de Estudos de Inventário de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS/CEPEL, 2007) adotou uma dessas técnicas de análise multicritério (SAATY, 1990) para decidir a melhor

alternativa de exploração de uma bacia hidrográfica. A ELETROBRÁS e o CEPEL introduziram uma metodologia para tentar avaliar os impactos ambientais cumulativos e sinérgicos, e melhorar a discussão com os diversos agentes: a Avaliação Ambiental Integrada (AAI). Mesmo adotando, nesse caso, uma nova metodologia baseada em indicadores de impactos sociais e ambientais, não se tem alcançado sucesso nas discussões com diversos interlocutores (RAUPP, 2019). Como foi o caso da revisão dos Estudos de Inventário Hidrelétrico do rio Araguaia (EPE, 2009), os estudos foram aprovados pela EPE, mas não lograram a continuidade dos projetos das usinas hidrelétricas identificadas.

Ainda não se consegue identificar exemplos de situações similares com outros tipos de SAEs (apenas as UHRs por similaridade com as UHEs), pois seus impactos não são muito visíveis na implantação, mas podem ser muito relevantes apenas no descarte, como no caso das baterias. Geralmente sua fabricação é feita distante da implantação. Não existe experiência de aprovação de UHRs ou de grandes bancos de baterias no que tange ao licenciamento ambiental. Mas, certamente, os questionamentos a respeito da melhor solução do ponto de vista técnico, econômico e socioambiental surgirão.

Assim, o processo de avaliação que envolve indicadores de natureza diversa vai, com grande probabilidade, enfrentar duas dificuldades. A primeira é a simples seleção desses indicadores ou critérios. Como avaliar os impactos de uma fonte de tecnologias de geração ou armazenamento de energia? Qual impacto é mais relevante? Por exemplo: uma planta solar impacta o clima de uma área? Uma fazenda eólica vai causar extinção de espécies de morcego? A segunda dificuldade é como delimitar esses indicadores. Qual a sua área de abrangência? Qual o grau dos efeitos negativos, principalmente numa área já afetada por atividades humanas? Uma planta eólica de grande porte, por exemplo, geralmente afeta a paisagem de uma praia ou de uma colina, e esse aspecto terá certamente avaliações distintas por parte de quem mora na área ou vive de turismo, ou de outro interlocutor que não vive ou trabalha nessa área. Nesse contexto, é muito difícil alcançar um objetivo específico e comum devido aos diferentes conflitos e pontos de interesse, que são traduzidos em indicadores ou critérios.

Se os indicadores e atributos para comparação estão associados a fatores qualitativos, torna-se muito difícil chegar a um consenso, pois há o envolvimento

de pesquisadores de muitas disciplinas, com pontos de vista diferentes, e isso sem mencionar os aspectos técnicos, econômicos, nem sempre muito fáceis de compreender (KAYA et al., 2010). Num artigo recente, Flecker e colaboradores, (2022) exemplificam essa questão na decisão do melhor aproveitamento hidráulico da bacia amazônica, em que são selecionados os critérios ou indicadores de impacto mais relevantes.

Considerando todas estas dificuldades, os métodos baseados na lógica de conjuntos *fuzzy* podem ser muito úteis, pois permitem a elaboração de procedimentos para expressar em termos linguísticos os processos de tomada de decisão, o que mesmo assim não é tarefa fácil, pois os interlocutores precisam entender e ter como objetivo comum resolver os problemas de imprecisão, da ambiguidade e da subjetividade do julgamento humano (KUMAR et al., 2017).

Pode-se encontrar a aplicação da lógica *fuzzy* em vários processos decisórios:

- CHANG (1996), introduziu uma nova abordagem combinando o método *fuzzy* com o AHP, propondo um modelo para a seleção de profissionais de ensino universitário com base em alguns critérios pré-selecionados: criatividade matemática, implementações criativas, capacidade administrativa, maturidade pessoal.
- LIMA JÚNIOR (2013) comparou o desempenho dos métodos *fuzzy*-AHP e *fuzzy*-TOPSIS sob o contexto de seleção de fornecedores em geral.
- LIU (2014) utilizou o método *fuzzy*-AHP para propor a criação de um índice geral de sustentabilidade para avaliar fontes renováveis.
- TRINDADE (2016) propôs um modelo que integra os métodos *fuzzy*-AHP e *fuzzy*-TOPSIS para monitorar e avaliar a capacidade inovativa de empresas.
- ŞENGÜL (2014) combinou a lógica *fuzzy* com o método multicritério de apoio à decisão TOPSIS (*fuzzy*-TOPSIS) para a classificação de opções tecnológicas de geração de energia elétrica, tal como apresentado no trabalho de MARTINS (2017).

A aplicação da lógica *fuzzy* como ferramental de apoio em processos decisórios está presente em diversas áreas do conhecimento. De maneira geral, o

que se busca é considerar as incertezas que são inerentes ao julgamento humano nas análises, a fim de auxiliar os tomadores de decisão.

Um problema identificado neste estudo é o de estruturação do modelo para escolha da melhor alternativa de SAE levando em consideração os aspectos socioambientais, tentando superar a simplicidade de avaliações elementares, como a ponderação de indicadores tal como utilizada em estudos de avaliação ambiental integrada ou estratégica (EPE, 2007, 2008). Outro problema a ser contornado é obter a ponderação dos interlocutores, uma vez que a escolha é normalmente muito subjetiva, além da participação de todos na verificação da influência dos pesos e indicadores nos resultados, e sua posterior validação.

A abordagem multicritério AHP-TOPSIS compreende as seguintes etapas:

- Definição da estrutura hierárquica de decisão e os critérios (e subcritérios) para validação dos indicadores para mensuração e avaliação das tecnologias;
- Atribuição de pesos aos critérios pelo método AHP;
- Avaliação quantitativa do grau de atendimento dos indicadores aos critérios pelo método TOPSIS; e
- Avaliação qualitativa a partir dos resultados da análise quantitativa do grau de atendimento dos indicadores propostos aos critérios previamente estabelecidos.

De acordo com essa metodologia, a melhor alternativa seria aquela mais próxima da solução ideal positiva (*positive ideal solution* ou PIS) e a mais distante da solução ideal negativa (*negative ideal solution* ou NIS).

Portanto, esta dissertação propõe adotar o modelo *fuzzy* AHP-TOPSIS também proposto por TRINDADE (2016) e MARTINS (2017). Neste caso, as principais motivações são:

- A combinação dos benefícios da lógica dos conjuntos *fuzzy* em considerar as incertezas associadas aos processos decisórios;
- O potencial do método AHP em reduzir decisões complexas em um conjunto de comparações pareadas e sua capacidade de síntese, tal como utilizado no Manual de Estudos de Inventário Hidrelétrico (ELETROBRÁS/CEPEL, 2007), capturando os aspectos subjetivos e objetivos de uma decisão, por meio de *trade-offs*.

- A aplicação do TOPSIS para hierarquizar as alternativas de SAE, identificando e adotando aquela mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da ideal negativa.
- A inclusão de um número ilimitado de propriedades e atributos (critérios);
- A ordenação das alternativas se dá através de escores, facilitando o entendimento das diferenças e similaridades entre elas;
- A facilidade de implementação do modelo em planilha eletrônica, favorecendo a sua utilização.

3.3 Ferramentas para hierarquização e seleção de tecnologias de SAEs

A pesquisa de referências bibliográficas foi essencial para o objetivo de construir um modelo que fosse capaz de avaliar as alternativas tecnológicas de SAE.

Foram aplicadas buscas nas principais bases de dados e referências (*Scopus Elsevier e Google*) utilizando-se as seguintes palavras-chave, tanto em inglês quanto em português: análise multicritério; sistemas de armazenamento de energia; renováveis; meio ambiente.

Em seguida foram selecionadas as mais recentes, pelo fato de conterem, por hipótese, as pesquisas mais desenvolvidas, aliadas ao interesse por SAEs, e que tem aumentado nos últimos anos. Foram analisados os resumos dos 192 artigos publicados a partir de 2009, visto que houve um aumento expressivo de artigos publicados nesse período (Tabela 3.1) com base nessas palavras-chave.

Tabela 3.1: Base da pesquisa bibliográfica

Anos	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Quantidade	10	7	5	13	13	14	15	23	24	18	21	25

Ao todo selecionaram-se 16 artigos e referências com aderência ao tema proposto nesta dissertação: análise multicritério e sistemas de armazenamento de energia. Os objetivos e métodos utilizados por estes trabalhos estão apresentados no Quadro 3.1 a seguir.

Quadro 3.1: Métodos multicritérios aplicados a tecnologias de SAEs

Autores	Métodos e aspectos correlatos a pesquisa
Çolaka (2020)	Faz avaliação multicritério para seleção de SAEs no método VIKOR(Fuzzy), com foco num caso da Turquia.
Albawab (2020)	Utiliza métodos multicritério híbridos com emprego de indicadores de sustentabilidade para ranquear SAEs.
Fayegh,(2020)	Uma revisão dos tipos de armazenamento de energia, aplicações e desenvolvimentos recentes. Com critérios para comparação dos sistemas.
Zhao (2019)	Avaliação abrangente para sistemas de armazenamento de energia de bateria baseados em um modelo fuzzy-MCDM considerando as preferências de risco.
Baumann (2019)	Faz uma revisão sistemática de métodos de avaliação multicritério para SAES para aplicação em redes de sistemas de transmissão.
Acar (2019)	Cria uma nova abordagem multicritério para avaliação da sustentabilidade de SAEs.
Barin (2011)	Seleção de tecnologias de armazenamento de energia para fornecimento de energia de qualidade
Ren J (2018)	Classificação de sustentabilidade de tecnologias de armazenamento de energia sob incertezas. Ordenação de SAEs com base na sustentabilidade das tecnologias para promover o desenvolvimento de energia renovável: numa nova combinação fuzzy intuitiva.
Dehghani-Saniij (2019)	Faz o estudo de sistemas de armazenamento de energia e apresenta os desafios ambientais das tecnologias de baterias.
Oliveira (2015)	Analisa o desempenho ambiental de sistemas de armazenamento de eletricidade para aplicações de rede, uma abordagem de ciclo de vida. Desempenho ambiental de sistemas de armazenamento para aplicações em redes elétricas Aplicações com a entrada de renováveis intermitentes, uma abordagem de ciclo de vida
Petrillo, 2016	Proposição de critérios socioambientais para análise multicritério.
Zakeri (2014)	Avaliação de sistemas de armazenamento de energia elétrica: com referências de custo nivelado
Mongird (2019)	Define e avalia os parâmetros de custo e desempenho de baterias de armazenamento de energia tecnologias
Cowan (2010)	Avaliação do impacto de energia hidrelétrica sustentável e tecnologias de armazenamento no Pacífico Noroeste dos Estados Unidos
Daim (2012)	Avaliação de tecnologias de armazenamento de energia para integração com as fontes de eletricidade renovável.
Walker (2015)	Avaliação comparativa de energia para gás utilizando hidrogênio eletrolítico como alternativa de armazenamento de energia

Conforme o Quadro 3.1, foram identificados diversos métodos multicritério para seleção e comparação de SAEs. Alguns deles com foco na sustentabilidade e na avaliação de impactos socioambientais, considerando o ciclo de vida dos SAEs. Como se pode verificar na avaliação do desempenho, percebe-se atributos e critérios mensuráveis ou não, o que requer o uso de métodos multicritérios de apoio a decisão, notadamente no que concerne aos aspectos socioambientais. Os métodos AHP se mostram bastante utilizados e aliados ao emprego de conjuntos *fuzzy* para considerar as incertezas.

3.4 Critérios e subcritérios para avaliação de SAEs

É fundamental que a utilização de métodos multicritério para seleção de SAEs contemple todas as dimensões: técnica, econômica e institucional. Além dessas 3 dimensões, outra deve ser introduzida para atender agendas internacionais e nacionais de desenvolvimento sustentável e o Acordo de Paris: a dimensão socioambiental.

No Brasil e em outros países, não se pode planejar a expansão da geração elétrica ou dos sistemas de transmissão sem considerar esses critérios ou dimensões.

Acordada pelos 193 Estados-membros da ONU, uma agenda foi proposta: “Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” consiste em uma declaração, com 17 objetivos de desenvolvimento sustentável e 169 metas, uma seção sobre meios de implementação e uma renovada parceria mundial, além de um mecanismo para avaliação e acompanhamento. Ela reconhece que acabar com a pobreza deve caminhar lado a lado com um plano que promova o crescimento econômico e responda a uma gama de necessidades sociais, incluindo educação, saúde, proteção social e oportunidades de trabalho, ao mesmo tempo em que aborda as mudanças climáticas e proteção ambiental. Ela também cobre questões como desigualdade, infraestrutura, energia, consumo, biodiversidade, oceanos e industrialização.

A nova agenda de desenvolvimento sustentável se enquadra no êxito do resultado da Conferência sobre o Financiamento para o Desenvolvimento, concluída em Adis Abeba (Etiópia) em 2015, que foi a uma das bases para o Acordo de Paris.

Nesse contexto de discussão de alternativas de fontes de geração ou SAEs, os processos de tomada de decisão devem considerar os critérios e dimensões impactadas por essas tecnologias, bem como os diversos atores envolvidos.

O Quadro 3.2 resume a identificação das dimensões elencadas nos artigos selecionados. Observa-se que as dimensões mais frequentes nos estudos são a ambiental, econômica, social e técnica. A definição de critérios e subcritérios deve ser cuidadosa para assegurar que todas as dimensões e fatores estejam presentes de forma adequada na avaliação. Wang (2009) afirma que aumentar a quantidade de critérios não torna a tomada de decisão necessariamente mais útil no campo de energia sustentável, pelo contrário, menos critérios podem ser benéficos para a avaliação de sistemas de armazenamento de energia. Assim, os critérios devem apresentar relevância, mas sem repetitividade.

Quadro 3.2: Dimensões pesquisadas

Autores	Dimensões
Barin et al. (2009)	Técnica, econômica
Oberschmidt et al. (2010)	Técnica, econômica, social e ambiental
Cowan et al. (2010)	Técnica, econômica, social e ambiental
Daim et al. (2012)	Técnica, econômica, social e ambiental
Albawab et al. (2012)	Técnica, econômica, social e ambiental
Baumann et al. (2019)	Técnica, econômica e ambiental
Walker et al. (2016)	Técnica, econômica, social e ambiental
Ren et al. (2018)	Técnica, econômica, social e ambiental
Dehghani-Sanij (2019)	Técnica, econômica, social e ambiental
Çolaka et al. (2020)	Técnica, econômica, social e ambiental
Oliveira (2015)	Ambiental
Petrillo (2016)	Econômica, social e ambiental
Zakeri (2014)	Econômica
Mongird (2019)	Técnica, econômica, social e ambiental
Fayegh (2020)	Técnica e econômica
Acar (2019)	Técnica, econômica, social e ambiental
Zhao (2019)	Institucional/regulatória
Çolaka (2019)	Institucional/regulatória

Algumas características devem ser determinantes para seleção dos critérios que possibilitem análises mais eficazes, quais sejam:

- sistêmicas com as principais características definidoras dos SAEs;
- consistentes com as metas da decisão a ser tomada;

- independentes do desempenho das alternativas;
- quantitativas ou qualitativas;
- comparáveis.

Assim, a revisão propiciada pelas referências encontradas, mostrou que os principais aspectos considerados na avaliação das SAEs e sua sustentabilidade baseiam-se principalmente em critérios técnicos, econômicos e ambientais. Pouca avaliação existe dos aspectos sociais por ser difícil sua mensuração, conforme apresentado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3: Critérios e referências

Critério	Subcritério	Referências
Técnico	Densidade de potência	Barin et al. (2011) e Walker et al. (2015).
	Densidade energética	Raza et al. (2014); Ren et al. (2018) e Ren (2018).
	Maturidade	Barin et al. (2011); Wei et al. (2018); Daim et al. (2012); Walker et al. (2015); Ren et al. (2018); Ren (2018); Çolaka et al. (2020)
	Eficiência	Barin et al. (2011); Ren et al. (2018); Cowan et al. (2010); Walker et al., (2016); Çolaka et al. (2020), Acar et al. (2019),
	Capacidade	Nadeem et al. (2018); Lepecki et al. (2016); Ren et al. (2018); Ren (2018); Acar et al. (2019)
	Vida útil	Raza et al. (2014); Daim et al. (2012); Ren et al. (2018); Ren (2018); Acar (2019); Çolaka et al. (2020)
	Facilidade de conexão/acessibilidade	Acar et al. (2019); Çolaka et al. (2020)
	Tempo de resposta	Vo et al. (2017); Wei et al. (2018).
	Tempo de implementação	Kruger et al. (2012); Lepecki et al. (2016)
Econômicos	Custo nivelado/Capex, Opex	Schmidt et al. (2019); Baumann et al. (2016); Acar et al. (2019); Çolaka et al. (2020)
Ambiental	Emissões de CO ₂	Oberschmidt et al. (2010); Vo et al. (2017); Barin et al. (2011); Ren et al. (2018); Ren (2018); Kruger et al., (2012).
	Contaminação da água e do solo	Cowan et al. (2010); Daim et al. (2012).
	Impactos aos ecossistemas/na vida selvagem/áreas sensíveis	Cowan et al. (2010); Daim et al. (2012); Kruger et al. (2012); Vo et al. (2017); Barin et al. (2011); Ren et al. (2018); Ren (2018); Raza et al. (2014).
	Riscos de mal funcionamento	Kruger et al. (2012); Kruger et al. (2013).
	Uso da terra e conflitos	Cowan et al. (2010); Çolaka et al. (2020); Acar et al. (2019)

Critério	Subcritério	Referências
Social	Aceitação social e política	Cowan et al. (2010); Oberschmidt et al. (2010); Kruger et al. (2012); Kruger et al. (2013); Walker et al., (2016); Vo et al. 2017; Acar et al. (2019); Çolaka et al. (2020)
	Saúde e segurança	Daim et al. (2012); Çolaka et al. (2020)
Institucional/regulatória	Atrasos na aprovação	Zhao et al. (2019)
	Subsídios e incentivos	Çolaka et al. (2020)

Com base nas referências e experiências recentes, com foco em propor um modelo para seleção de SAEs que seja consistente e abrangente, foram definidos critérios e subcritérios, para fins da presente pesquisa, considerando as quatro dimensões mais citadas em uma avaliação sistemática (BAUMANN et al., 2019). (i) técnica; (ii) socioambiental; (iii) econômica; e (iv) institucional. Cabe notar que nessa avaliação sistemática não foi citada a dimensão institucional/regulatória, que, no caso do Brasil, entendeu-se ser muito relevante, embora mencionada em duas referências apenas.

Foram considerados 14 critérios, conforme Quadro 3.4, a seguir. Uma vez que a dimensão social tenha sido citada poucas vezes, decidiu-se criar por uma dimensão socioambiental, em que as dimensões social e ambiental fossem agregadas.

Quadro 3.4: Dimensões e critérios selecionados

Dimensões	Crítérios
Técnica	Tempo de implementação
	Facilidade de descentralização
	Maturidade
	Densidade energética
	Eficiência
	Capacidade
	Vida útil
	Tempo de resposta
Socioambiental	Emissões de GEE
	Usos da terra e conflitos
	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores
	Contaminação dos recursos hídricos e dos solos
	Aceitação social e política
Econômico	Risco de investimento
	Contribuição para a economia
	Custo nivelado

Dimensões	Critérios
Institucional/regulatória	Simplicidade no licenciamento ambiental/riscos de atrasos
	Existência de políticas públicas de incentivos/regulação

Serão feitas, na sequência, as considerações sobre os critérios escolhidos para serem considerados no modelo proposto que será apresentado no capítulo a seguir.

a) Dimensão técnica - Foram selecionados critérios mais citados da literatura e aqueles que melhor caracterizam os SAEs para atender os serviços de rede de transmissão e distribuição:

- Tempo de implementação: Os serviços dos SAEs podem ser necessários em tempos de crises hidrológicas, como as que o Brasil vem passando, e algumas tecnologias podem ter um tempo de licenciamento ou de obras maior por dificuldades de construção ou fabricação do que outros em função de suas dimensões.
- Facilidade de descentralização e de conexão à rede: Procura refletir a facilidade de se investir numa tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia, o que facilita sua integração com o sistema elétrico, reduzindo o investimento em sistemas de transmissão.
- Maturidade: Nesse caso, compara-se o grau de evolução tecnológica de uma dada tecnologia de SAE, considerando: o estado da arte em nível mundial; sua aplicação histórica; e disponibilidade comercial. Assim, quanto mais tempo a tecnologia está no mercado (comercialmente), menor deve ser o investimento (por conta da concorrência) e menor o risco associado.
- Densidade energética: Esse critério visa comparar a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, sejam sistemas eletroquímicos ou mecânicos. Assim, quanto menor as dimensões do sistema e maior a quantidade de energia disponibilizada, melhor.

- Eficiência: É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria; e bombeamento, no caso da reversível).
- Capacidade: Este atributo procura comparar a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade, melhor o sistema de SAE. No caso do Brasil, será muito importante para evitar despacho de termoelétricas ou para reduzir falhas do sistema, por exemplo, em áreas supridas por energia solar.
- Vida útil: Esse critério procura comparar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim, uma vida útil alta representa uma tecnologia que vai operar por muitos anos. Com isso advém tanto vantagens pela diminuição dos problemas de descarte ou reciclagem e seus custos, quanto dos impactos ambientais, inclusive na necessidade de obter mais matéria prima.
- Tempo de resposta: É um atributo utilizado para comparar o tempo necessário para que a tecnologia de SAE comece a fornecer energia quando demandada [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

b) Dimensão socioambiental – Foram selecionados a partir da análise das referências consultadas. Nesse caso, muitas delas citam impactos ambientais de forma genérica, sem discriminar o tipo ou efeito negativo. Na medida do possível, selecionou-se aqueles que podem efetivamente facilitar a comparação dos diversos tipos de SAEs relativamente aos impactos socioambientais que causam.

- Emissão de gases de efeito estufa: Visa comparar a emissão de gases emitida nos processos nas diversas fases de sua implantação e operação (nem sempre disponível na literatura), ou a emissão não realizada se a tecnologia evitar o despacho de usinas termoelétricas.

- Uso da terra e conflitos: Esse critério foi usado em algumas referências, e procura refletir a área necessária, ou impactada, para cada uma das fases de implantação dos SAEs, e sua localização. Afinal, podem ser gerados conflitos com as populações frágeis ou tradicionais, em função da presença de uma nova atividade econômica ou do uso de recursos naturais como água e solos.
- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores: Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas ao SAE nas fases implantação, operação ou descarte. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura, risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, além de outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.
- Aceitação social e política: A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.
- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem: A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de uso dos recursos naturais. Quanto maior a área ou habitats afetados, relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

c) Dimensão econômica – A literatura não cita muitos critérios, mas estão sempre presentes os investimentos iniciais, custos de operação e manutenção, e riscos de investimentos.

- Risco de investimento: Esse critério procura refletir os riscos associados à implantação dos SAEs no que tange a sua aprovação técnica e

socioambiental (atrasos nas obras), aos sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, ao risco de flutuação cambial, entre outros.

- **Contribuição para a economia:** Esse critério procura comparar as contribuições para o atendimento da demanda de potência ou energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoeletricas na matriz elétrica.
- **Custo nivelado de energia:** Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh. Substitui os critérios de CAPEX e OPEX, muito citados nas referências.

d) **Dimensão institucional/regulatória** – Poucas referências citam essa dimensão. Contudo, ainda existem dificuldades regulatórias, como se viu nesse capítulo, que precisam ser vencidas; além disso, alguns incentivos podem ser necessários, bem como tornar mais ágil o licenciamento ambiental.

- **Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos:** Esse critério visa comparar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangência dos estudos necessários para obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. Isto certamente refletirá na maior ou menor facilidade de se obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira e, no limite, levar a inviabilização do empreendimento.
- **Existência de políticas públicas de incentivo/regulação:** Este atributo procura avaliar e comparar as diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas ou, minimamente, uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Isto é, se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de aplicação em função da regulamentação existente.

3.5 Considerações sobre o capítulo

Como se pode verificar nesse capítulo foram definidos:

- A metodologia para fazer a comparação e ordenação dos sistemas de armazenamento de energia em função do seu desempenho para atender o suporte na transmissão e na distribuição, além do gerenciamento de energia elétrica.
- As dimensões e os critérios para avaliação comparativa do desempenho dos SAEs.

Algumas referências foram encontradas sobre métodos multicritério para seleção de SAEs. A escolha dos métodos mais apropriados levou em consideração a facilidade de sua implementação e a possibilidade de modelar as incertezas no processo de julgamento. Assim, definiu-se que um modelo *AHP-Fuzzy TOPSIS* seria apropriado para a resolução do problema em tela. Para se definir os pesos a serem considerados no método TOPSIS, utilizou-se o método AHP, pois possibilita o julgamento em escala verbal dos critérios, que depois é convertida em escala numérica.

Os critérios para a avaliação das alternativas tecnológicas de SAEs seguiram, na medida do possível, a experiência nesse tipo de abordagem multicritério encontrada nas referências. Foram definidos 14 critérios subdivididos em 4 dimensões, quais sejam: (i) técnica; (ii) socioambiental; (iii) econômica; e (iv) institucional/regulatória.

O modelo proposto nesta dissertação para hierarquização de tecnologias de armazenamento de energia elétrica com o auxílio de métodos multicritério de apoio à decisão será apresentado no capítulo a seguir.

4. Modelo AHP *Fuzzy* TOPSIS para avaliação e seleção de tecnologias de SAEs

Apresenta-se neste capítulo o modelo proposto para avaliação e seleção de tecnologias SAEs, baseado na integração de duas metodologias de análise multicritério de apoio à decisão – AHP *Fuzzy* TOPSIS. Essa decisão se baseou no enfoque conceitual e algumas premissas, tais como as propostas por Trindade, (2016) para uma avaliação em muitas dimensões diante da enorme dificuldade de se realizar uma comparação entre alternativas tecnológicas que envolva subjetividade. O caráter subjetivo traz riscos para se obter uma compreensão e a quantificação objetiva dos atributos selecionados para a avaliação, principalmente em se tratando de disciplinas e variáveis muito distintas como aquelas envolvidas numa análise socioambiental.

Como se poderá verificar neste capítulo, essas dificuldades podem ser contornadas com a aplicação do método AHP, e *fuzzy*-TOPSIS para resolver problemas de mensuração multidimensional. Esse método como proposto neste trabalho é composto por duas fases:

- (i) uso do método AHP, na qual se busca estabelecer critérios em primeiro lugar e, depois, pesos para a avaliação das tecnologias SAEs;
- (ii) utilização dos métodos *Fuzzy*-TOPSIS, na qual se pretende buscar uma hierarquização dessas tecnologias considerando seu aproveitamento na matriz elétrica brasileira.

Os conjuntos *Fuzzy* utilizados no método TOPSIS se justificaram pela necessidade de se modelar a incerteza das respostas dadas pelos especialistas. A descrição desta modelagem se encontra na seção a seguir.

4.1. A lógica *Fuzzy*

O conceito de lógica *fuzzy* foi introduzido na década de 1960 por Lotfi Zadeh, professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Ciências da Computação da

Universidade da Califórnia, em Berkeley, que estava trabalhando com problemas de classificação de conjuntos que não tinham fronteiras bem definidas, típicos àqueles relacionados à incerteza que é inerente às ações e acontecimentos da vida humana e, portanto, onde os modelos matemáticos exatos não se ajustariam.

Segundo Braga et al. (1995) citados por Cury (1999), a lógica *fuzzy* é uma tentativa de se aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real. Ainda para Cury (1999), a lógica *fuzzy* é uma solução que considera a teoria dos conjuntos na lógica convencional (binária ou Booleana), e que foi adaptada para tratar as avaliações que envolvem valores compreendidos numa graduação entre uma verdade absoluta, ou certeza, e o falso, ou incerto.

Em outras palavras, o método *fuzzy* consiste no tratamento matemático de sistemas que envolvem muita subjetividade, tal como as avaliações de impactos socioambientais associadas à implantação de empreendimentos, onde é muito difícil aplicar a lógica convencional. A lógica *fuzzy* permite tratar e traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas (CONNOLLY et al., 2011), com o intuito de ser utilizada para a construção de um processo que busque, da melhor forma possível, um consenso, incorporando a experiência de especialistas (FILIPPO et al., 2005).

Enquanto a lógica clássica trabalha os extremos com valores “zero” ou “um”, a lógica *fuzzy* é capaz de capturar um grupo infinito de valores compreendidos entre estes extremos, por meio de uma manipulação numa escala de valores capazes de oferecer aos seus usuários grande precisão em operação de sistemas complexos e com grandes níveis de incerteza.

Dentro desse contexto uma variável não tem apenas um único estado atual, mas n estados, cada um com diferentes graus de associação ou de pertinência, sendo muito aplicado em avaliações ambientais de alternativas de projetos de transporte urbano e rodoviário, análises de mercado, entre muitas outras que envolvem comparações e decisões humanas (VON ALTROCK, 1995; JAMSHIDI, 1997; CURY, 1999; KOMAROVA, 2000; GOU, 2001).

A importância dessa abordagem pode ser ilustrada a partir de um caso acontecido em passado recente. Na ocasião, a economia dos EUA custou a perceber a relevância da análise multicritério e da aplicação da lógica *fuzzy*, o que resultou na tardia criação de tecnologias inteligentes e máquinas sofisticadas e

automatizadas. Este fato, como retratado em McNeill (1994) rendeu aos japoneses, que investiram nessa abordagem, cerca de 2000 processos de patente, projetando a imagem da indústria japonesa para todo mundo como um dos principais detentores de tecnologia na produção de equipamentos eletrônicos sofisticados, tais como câmeras, sensores, máquinas inteligentes e robôs.

O grande diferencial da lógica *fuzzy* se dá no tratamento da teoria dos conjuntos com a relativização entre valores através do grau de pertinência de um elemento em relação a um universo. Assim, essa característica é retratada por uma função que assume valores que indicam o grau de pertinência de um elemento em relação a um dado conjunto.

Assim, um elemento pode ser comparado com n conjuntos e resultar em n valores em seus níveis de pertinência, cada qual adequado à similaridade ou ao pertencimento do elemento ao conjunto ao qual é comparado. Ou seja, um elemento pode pertencer a vários conjuntos de modos diferentes.

Um sistema *fuzzy* típico consiste em uma base de regras, de funções de pertinência e de procedimentos de inferência, conforme mostrado na Figura 4.1.

Os dados de entrada para o sistema podem ser valores precisos, derivados de aferições ou mesmo de um conjunto *fuzzy* oriundo do parecer ou opinião de um grupo de especialistas, e que pode ser obtido por meio da aplicação de um questionário.

Para utilizar esse sistema é preciso realizar o procedimento de *fuzzificação*, que permite a transformação das variáveis de entrada em graus de pertinência ou de certeza, produzindo uma interpretação ou qualificação das mesmas, ou seja, associando um vetor linguístico aos possíveis valores dos parâmetros de entrada, de tal forma que esse conjunto retrate a imprecisão do problema sob análise. É nesse estágio que se estabelecem as regras de inferência, isto é, a sua combinação.

Quando um valor numérico como variável de saída é solicitado, por exemplo, para se decidir sobre a aceitação ou rejeição de um projeto, ou mesmo para o caso de comparações ou estabelecimento de um ranking, é necessário o processo de *defuzzificação* que vai ocorrer após a inferência *fuzzy*. As variáveis de saída, tanto as intermediárias quanto a final, são geradas pelos blocos de inferência na forma de variáveis linguísticas. No passo final, obtém-se um vetor linguístico associado ao vetor de graus de pertinência.

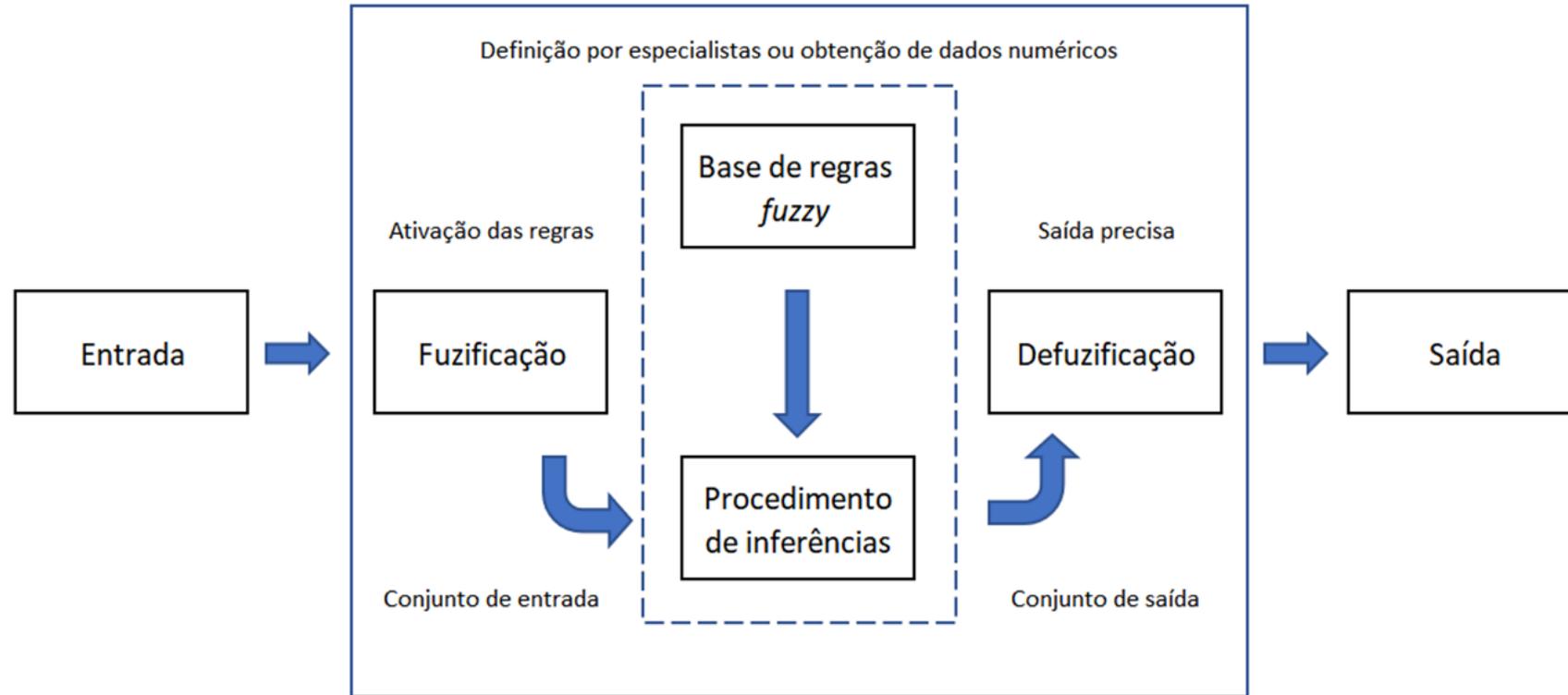


Figura 4.1: Sistema fuzzy típico
Adaptado de Alves, *et al.* (2016).

Um conjunto *fuzzy* F permite atribuir a cada elemento do universo um valor entre 0 e 1, que representa o grau de pertinência de um conceito impreciso ao conjunto *fuzzy*. Este valor de pertinência é definido pela equação 1.

$$F = \{(x, \mu(x)) / x \in U\} \quad (1)$$

As funções que definem pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas, e que é fundamental nessa construção. Um exemplo poderia ser elaborado a partir de uma variável linguística, como o impacto na paisagem de uma planta eólica, com os seguintes termos: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, aos quais corresponde um conjunto definido pelas funções de pertinência. Uma escolha possível de funções de pertinência seria a da Figura 4.2.



Figura 4.2 – Função de pertinência Fuzzy Trapezoidal
Adaptado de LIMA JUNIOR (2013)

No entanto, algumas premissas são necessárias para que um conjunto seja considerado um número *fuzzy*:

- Devem estar contidos no conjunto dos números reais;
- A função de pertinência não pode ser descontínua;
- Devem fazer parte de um conjunto normalizado e convexo.

Um número *fuzzy* é dito triangular, por sua vez, quando a sua função de pertinência é triangular e definida pela expressão seguinte (Figura 4.3):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x \geq a_3 \end{cases} \quad (2)$$



Figura 4.3 – Função de pertinência *Fuzzy Triangular*
Adaptado de LIMA JUNIOR (2013)

O conjunto *fuzzy* triangular foi escolhido por sua maior adequabilidade a análise multicritério que envolve disciplinas e profissionais muito diversos, principalmente aquelas relativas aos aspectos socioambientais. Além disso, optou-se por esse conjunto por sua similaridade com os trabalhos de Trindade (2016) e Martins (2019), que mostram muitos outros exemplos com essa mesma proposta (ŞENGÜL et al. (2015); ARCER et al. (2015); e KAYA (2010)). Existem outros tipos de números *fuzzy* como o gaussiano e o trapezoidal, mas que se mostram mais complexos para compreensão e utilização, motivo pelo qual são aqui evitados.

De maneira geral, os números *fuzzy* representam um sistema elaborado para realizar inferências, que se compõe de três etapas:

- (i) A fase de *fuzzyficação*: onde se entra com valores no sistema, que podem ser resultados de aferições ou observações, e onde essas informações são convertidas em números *fuzzy*;

- (ii) A fase de processamento: onde ocorrem as inferências, obedecendo as regras *fuzzy*, e que consiste na participação dos especialistas no formato de sentenças linguísticas;
- (iii) A fase de *defuzzificação*: onde é gerada a saída do sistema de inferência *fuzzy*, com a interpretação da informação contida no conjunto *fuzzy*.

Assim, o método multicritério selecionado nesse trabalho, AHP- *Fuzzy* TOPSIS, propõe aplicar a *fuzzificação* na adequação dos dados fornecidos tanto pela literatura quanto pela avaliação dos especialistas no processo de análise das tecnologias de armazenamento de energia elétrica.

O fluxograma do processo de avaliação e seleção das SAEs é mostrado na Figura 4.4, que compreende duas fases. A primeira delas, é a AHP, como já mostrado no capítulo anterior, por suas vantagens na definição de critérios e na avaliação da graduação por parte dos especialistas.

Após a avaliação dos pesos de cada critério e subcritério gerados na etapa anterior, e sua consistência de comparação, pode-se prosseguir com a segunda fase – *fuzzy* TOPSIS, que consiste das seguintes etapas:

- Elaboração das matrizes de avaliação das alternativas, onde são agregados os valores linguísticos fornecidos pelos diversos interlocutores que deverão participar do processo de decisão;
- Definição da solução ideal (PIS - *Positive Ideal Solution* e NIS - *Negative Ideal Solution*) e distâncias (D) positiva e negativa para PIS (D+) e para NIS (D-);
- Determinação do grau de aproximação relativa do valor ideal e definição do ordenamento numa escala decrescente dos valores obtidos para cada alternativa.

Cada uma dessas etapas do modelo é apresentada nas seções seguintes.

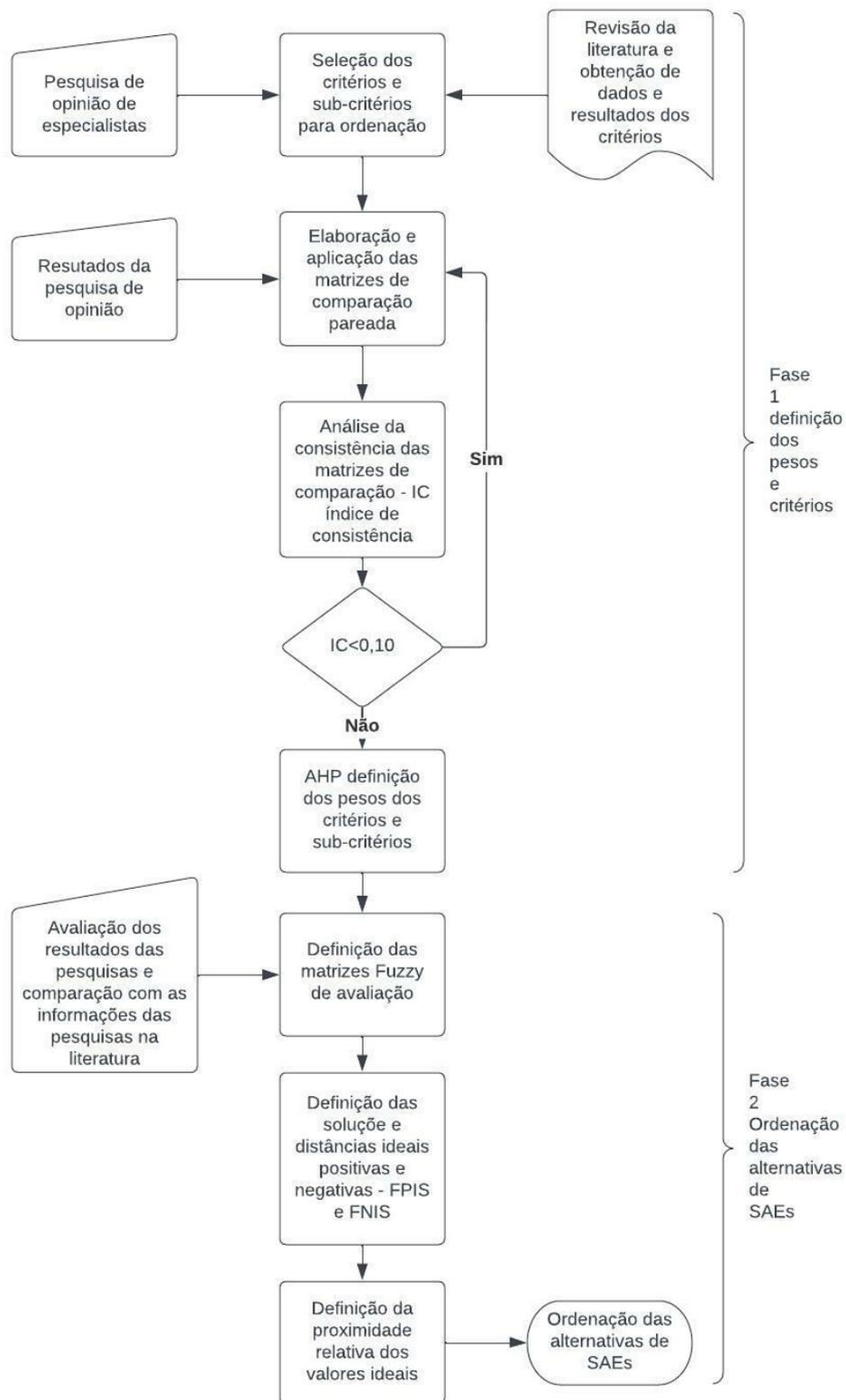


Figura 4.4: Modelo fuzzy AHP-TOPSIS

4.2. Descrição da fase I – AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) como mencionado no capítulo 3 foi elaborado por Thomas L. Saaty em 1970, e passou a ser um dos métodos de apoio à decisão mais aplicados para fazer comparações e facilitar a seleção de alternativas com base em avaliações que envolvam muita subjetividade.

Ele se fundamenta na definição de critérios e sua avaliação comparativa tentando chegar a uma ordenação de preferências, isto é, comparando cada um dos critérios em relação a outro numa escala de graduação de forma organizada. Assim um problema maior e mais complexo, que envolva muitos critérios de avaliação, pode ser decomposto para possibilitar uma avaliação por partes para que se possa, ao final, ter uma análise do conjunto. O problema é dividido em outros menores e, quando eles forem solucionados um a um e posteriormente somados, devem resultar na decisão a ser seguida para se obter o melhor resultado.

A ideia básica de Saaty é tentar simular como funciona a mente humana, que faz comparações para tomar uma decisão, no entanto, nesse caso, envolvendo mais de uma medida. Assim vai se construindo o resultado passo a passo, agrupando os critérios de avaliação definidos para resolver o problema com um grande número de elementos (atributos). Esse processo é feito para todos os níveis estabelecidos para comparação que, depois de somados, vão fornecer uma ordenação, ou seja, um resultado que mostre uma preferência (MELLO,2015)

A comparação pareada é a forma como os seres humanos fazem seus julgamentos. Por exemplo, um jogador de futebol é muito habilidoso e, por esse critério único, poderia ser considerado o melhor de todos. Porém, existem outros atributos que vão definir o melhor jogador para um time, tal como preparo físico, visão de jogo, espírito de equipe entre outros. A metodologia possibilita representar tanto as medidas objetivas quanto as subjetivas, no caso do jogador de futebol, quantos gols ele fez na temporada, que é o seu principal objetivo.

O método pode ser resumido em três princípios básicos e suas etapas, conforme proposto por Saaty (1991):

- Construção de uma ordenação em níveis específicos;

- Definição de prioridades conforme o critério estabelecido para comparar desempenho em julgamentos pareados;
- Verificar a consistência lógica, tentando evitar os vieses e de forma a estabelecer a ordenação.

As etapas do AHP podem ser resumidas da seguinte maneira:

- Identificação das alternativas e atributos mais relevantes para a avaliação que se pretende fazer.
- Indicação da significância relativa entre os critérios, isto é, seus pesos.
- Especificação das preferências para cada atributo e par de alternativas.
- Registro das comparações entre os atributos e as alternativas em matrizes na forma de frações. Nesta etapa, cada matriz é avaliada pelo seu autovalor para verificar a coerência dos julgamentos. Este procedimento gera uma “razão de coerência” que será igual a 1 se todos os julgamentos forem coerentes entre si.
- Cálculo dos valores globais de preferência para cada alternativa.

Os elementos para a ordenação do problema e sua resolução envolvem:

- Objetivo global: o que se pretende comparar; no caso exemplo, qual o melhor jogador para o sucesso de um time;
- Definição de um conjunto de critérios: características ou propriedades nas quais as alternativas devem ser avaliadas, como no caso do jogador, sua habilidade, seu preparo físico, etc.; e
- Definição de um conjunto de alternativas viáveis: possibilidades de escolha dentro do problema para que a decisão seja tomada, isto é, que jogadores queremos comparar.

O resultado é, então, a 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).

Desse modo, nessa primeira fase (AHP) é preciso selecionar e estimar os pesos dos critérios e subcritérios, que são selecionados por sua influência sobre o objetivo da pesquisa. Assim, são definidos os critérios e subcritérios que têm

correlação com esse objetivo, que é avaliar e comparar os diversos SAEs numa estrutura de ordenação em que serão avaliados.

Dessa forma, para avaliar as opções tecnológicas, é preciso obter os julgamentos dos especialistas convidados para definir a importância de cada critério e subcritério por meio da comparação par a par, de acordo com a preferência estabelecida entre eles. Nesse processo são calculadas as matrizes de comparação, sendo a primeira matriz aquela que contém os quatro critérios ou dimensões, e as demais são compostas pelos subcritérios de cada dimensão avaliada. Assim, é necessário que os especialistas participem na definição e relevância de cada critério e subcritério, além de sua correlação com as opções de SAEs. Durante esse procedimento, são definidas as matrizes de comparação pareada. A primeira, a dos critérios, e as demais dos subcritérios de cada dimensão avaliada. No caso em questão se definiram 4 dimensões (técnica, econômica, socioambiental e institucional), e mais 18 subcritérios associados a essas dimensões selecionadas.

Esse processo se inicia com uma seleção desses critérios na literatura seguida pela elaboração de um questionário que, para esta pesquisa, foi submetido aos especialistas para o julgamento feito por meio de termos linguísticos baseados na escala de Saaty (2012), proposta em 9 níveis, conforme quadro apresentado a seguir. A comparação de relevância de cada critério ou atributo de comparação sobre os demais será representada por números de um conjunto *fuzzy* triangular. Deste modo, uma escala para avaliar o nível de importância de cada critério e subcritério nas comparações pareadas é definida para permitir o julgamento dos especialistas. A importância de um atributo sobre o outro é representada por números *fuzzy* de um conjunto triangular. Estes números são calculados em função do julgamento dos especialistas, conforme o Quadro 4.1 (TRIANANTAPHYLLOU, 1998). Por consequência, é empregada uma escala que permitirá avaliar o nível de importância que cada especialista entende ser o mais adequado na comparação.

Quadro 4.1: Escala de Saaty

Nível de importância	Definição	Explicação
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.

Nível de importância	Definição	Explicação
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

Após avaliar as preferências ou prioridades relativas tanto dos critérios quanto das alternativas, é importante fazer um teste de consistência. Se um critério A tem igual importância em relação à B; e se C tem importância absoluta em relação à A, então B não pode ter igual importância em relação à C. No caso do método AHP, deve-se calcular a Razão de Consistência (RC) para se medir o quanto os julgamentos foram consistentes em relação a grandes amostras de juízos completamente aleatórios e sujeitos a subjetividade.

Assim, as avaliações do método AHP são baseadas na suposição de que o decisor é racional, e assim, se A é preferido a B, e B é preferível a C, então A é preferido a C (COSTA, 2006). Se a Razão de Consistência (RC) é superior a 0,1 (10%) os julgamentos não são confiáveis, e os resultados obtidos não apresentam valores consistentes. Para calcular a RC é necessário, primeiramente, obter o maior autovalor da matriz A, definido a partir da seguinte equação, onde “A” é a matriz de prioridades e “w” é o vetor de prioridade.

$$Aw = \lambda_{\max} \cdot W \quad (3)$$

Depois de λ_{\max} estabelecido (maior autovalor da matriz), deve-se calcular o Índice de Consistência (IC) e, em seguida, a Razão de Consistência - RC. O IC é determinado de acordo com a equação 5 abaixo, em que “n” é o número de critérios ou alternativas, sendo IR, da equação 4, o índice de consistência referente ao número de comparações efetuadas par a par. Este é um índice aleatório calculado para matrizes quadradas de ordem “n” pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge, nos EUA (GOMES, 2004). A análise de consistência das matrizes de comparação pareadas *fuzzy* pelo índice de consistência (IC) pode ser realizada com o método

clássico AHP, pois quando a comparação da matriz *crisp* (valores reais fixos) A é consistente, significa que a matriz de comparação *fuzzy* \tilde{A} também é consistente.

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

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Como já mencionado, quando a razão de consistência RC é inferior a 0,10, a consistência é aceita; porém, em caso contrário, faz-se necessário revisar a matriz de comparação com a participação dos tomadores de decisão. O índice randômico (IR), como mencionado é um valor tabelado de consistência aleatória, como mostrado na Tabela 4.1 (MELLO,2015).

Tabela 4.1: Índice de consistência aleatória (IR)

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

Como pontuado por Saaty (1991), a inconsistência é um fato inerente ao julgamento humano e, portanto, deve existir uma tolerância para a sua aceitação. Por isso, foi proposta a aceitação de julgamentos que gerem uma inconsistência com $RC < 0,1$. Mello (2015) propôs que um julgamento pode ser considerado coerente quando $RC \leq 0,1$. Se $0,1 < RC < 0,2$, o que resultaria num julgamento questionável, devendo ser revisto, buscando melhorar alguma(s) comparação(ões) que tenha(m) sido inconsistente(s).

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 (6).

$$F(a) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(a) \quad (6)$$

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

4.3. Descrição da fase II – Fuzzy TOPSIS

Na fase II foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

- Elaboração das matrizes de avaliação a partir do conjunto *fuzzy*;
- Definição da solução ideal *fuzzy* positiva e negativa (FPIS e FNIS) e da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-) e;
- Obtenção da ordenação final das alternativas de SAEs por meio do cálculo da proximidade relativa do valor ideal.

Com os pesos calculados na última etapa da Fase I, pode-se iniciar a fase *fuzzy* TOPSIS. Nesta fase, os valores de cada critério e subcritério são aqueles fornecidos pelos tomadores de decisão no processo de avaliação de cada tecnologia. Como essa avaliação é normalmente subjetiva para uma classificação, é comumente usada a escala *Likert* de cinco pontos, na qual cada ponto representa um nível de amadurecimento, e conseqüentemente, cada nível recebe um valor numérico triangular *fuzzy*. Essa escala foi aqui adotada por se entender ser mais compreensível e mais simples de aplicar.

A Tabela 4.2 apresenta a descrição dos termos linguísticos e seus respectivos valores numéricos para os critérios qualitativos.

Tabela 4.2: Termos linguísticos para avaliação

Descrição	Graus de importância
Muito baixo (MB)	1
Baixo (B)	2
Médio (M)	3
Alto (A)	4
Muito alto (MA)	5

Fonte: Elaboração própria.

Depois de obtido cada grau atribuído pelos especialistas na avaliação das tecnologias, os valores são convertidos para números triangulares *fuzzy*. Neste modelo, além das notas atribuídas pelos especialistas, algumas informações podem ser oriundas de fontes de dados sobre o desempenho mensurado das tecnologias, tais como vida útil ou emissões de CO₂, dispensando uma avaliação subjetiva. Nestes casos, o valor de desempenho da dimensão ou critério mensurado de cada tecnologia também é convertido para o formato de termos triangulares *fuzzy*. Isto é,

se estabelece uma escala de comparação a partir dos números ou resultados medidos. No presente trabalho foi feita uma comparação utilizando apenas os resultados dos especialistas e também uma outra que considera os resultados medidos obtidos na literatura sobre SAEs.

A partir dos termos linguísticos e respectivos valores *fuzzy*, a matriz de decisão \tilde{D} é construída, de acordo com o exemplo a seguir.

$$\tilde{D} = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ A_S \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{s1} & \tilde{x}_{s2} & \cdots & \tilde{x}_{sn} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, s; j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Onde A_m são as alternativas e x_{mn} são os valores apontados pelos tomadores de decisão.

Para o entendimento do método *fuzzy* TOPSIS é preciso apresentar as operações algébricas a serem realizadas. Seja \tilde{A} e \tilde{B} dois números triangulares *fuzzy*:

$$\begin{aligned} \tilde{A} + \tilde{B} &= [a_{1A}, a_{2A}, a_{3A}] + [a_{1B}, a_{2B}, a_{3B}] \\ &= [a_{1A} + a_{1B}, a_{2A} + a_{2B}, a_{3A} + a_{3B}] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{A} - \tilde{B} &= [a_{1A}, a_{2A}, a_{3A}] - [a_{1B}, a_{2B}, a_{3B}] \\ &= [a_{1A} - a_{1B}, a_{2A} - a_{2B}, a_{3A} - a_{3B}] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tilde{A} * \tilde{B} &= [a_{1A}, a_{2A}, a_{3A}] * [a_{1B}, a_{2B}, a_{3B}] \\ &= [a_{1A} * a_{1B}, a_{2A} * a_{2B}, a_{3A} * a_{3B}] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\tilde{A}}{\tilde{B}} = \frac{[a_{1A}, a_{2A}, a_{3A}]}{[a_{1B}, a_{2B}, a_{3B}]} = \left[\frac{a_{1A}}{a_{3B}}, \frac{a_{2A}}{a_{2B}}, \frac{a_{3A}}{a_{1B}} \right] \quad (11)$$

Dispondo da matriz de avaliação \tilde{D} , Figura 4.5: , inicia-se o algoritmo do método *fuzzy* TOPSIS.

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

Figura 4.5: Matriz de avaliação

O segundo passo é normalizar a matriz \tilde{D} usando uma escala de transformação linear. A matriz \tilde{D} normalizada como \tilde{R} , é obtida pela equação 12.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (12)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{1ij}}{a_{3j}^+}, \frac{a_{2ij}}{a_{3j}^+}, \frac{a_{3ij}}{a_{3j}^+} \right) \quad (13)$$

Sendo $u_j^+ = \max_i u_{ij}$

O terceiro passo é obter a matriz ponderada normalizada \tilde{V} por meio da multiplicação dos pesos pelos elementos da matriz normalizada, equação 15.

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

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

No quarto passo, define-se a solução ideal *fuzzy* positiva (FPIS, A+) e negativa (FNIS, A-), conforme as equações 16 e 17.

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \quad (16)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad (17)$$

Onde $\tilde{v}_1^+ = (1,1,1)$ e $\tilde{v}_1^- = (0,0,0)$.

O quinto passo consiste na definição da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-) com emprego das equações 18 e 19.

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

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

$$d(\tilde{X}, \tilde{Z}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(a_{1X} - a_{1Z})^2 + (a_{2X} - a_{2Z})^2 + (a_{3X} - a_{3Z})^2]} \quad (20)$$

No último passo, calculam-se os coeficientes de aproximação CC_i para cada uma das alternativas avaliadas, conforme a equação 21.

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

Com isto, define-se a ordenação final das alternativas avaliadas com os valores de CC_i , obtendo-se o resultado final de ordenação das alternativas de tecnologias de SAEs.

4.4. Considerações sobre o capítulo

Como se pode verificar ao longo desse capítulo, o modelo proposto permite realizar comparações entre as alternativas de SAEs para suporte a rede de transmissão e distribuição e suporte de energia para um sistema elétrico de potência envolvendo vários atributos. O modelo também permite efetuar uma ordenação da melhor solução considerando o julgamento desses critérios escolhidos para avaliar o desempenho geral de cada uma das alternativas tecnológicas. Pode também envolver questões subjetivas como, por exemplo, em grande parte dos aspectos socioambientais ou mesmo econômicos.

É comum ver nesses aspectos julgamentos irracionais, tal como quando se discute qual a melhor fonte para geração de energia elétrica. Em face das alterações climáticas, a maioria das pessoas, muitas delas leigas no assunto, quando perguntadas sobre essa comparação, dirá que a energia solar e a eólica são as melhores por serem renováveis e limpas. Contudo, as recentes crises hidrológicas vistas no Brasil têm mostrado que essas fontes renováveis sozinhas não conseguem garantir segurança à operação de uma matriz elétrica, e que temos instalado mais termoelétricas para diminuir riscos de falhas de suprimento. Se forem questionados sobre usinas nucleares, muitos vão ser contra por razões dos riscos associados, mas a recente crise da Ucrânia está fazendo alguns países como a França e a China voltarem a planejar sua instalação.

No próximo capítulo se verá a aplicação dessa metodologia de análise multicritério para os SAEs selecionados.

5. Demonstração de aplicabilidade dos modelos para seleção de tecnologias de SAE

Este capítulo 5 tem por objetivo demonstrar aplicabilidade do modelo proposto no capítulo 4 para seleção de tecnologias de SAEs que visem dar suporte à rede de transmissão e distribuição de energia elétrica. Para tal, este capítulo está dividido em 5 subseções:

Na primeira é feita uma análise do levantamento e formatação dos dados das pesquisas dos atributos e dos critérios para avaliação e seleção de tecnologias de SAEs, tanto das informações das referências como das respostas dos especialistas;

Na segunda está apresentada a aplicação da Fase I (AHP) da análise multicritério com a construção da ordenação das alternativas e das matrizes de comparação;

Na terceira é mostrada a aplicação da Fase II (*Fuzzy* TOPSIS) com base nas respostas dos especialistas, incluindo: criação das matrizes *fuzzy* de avaliação; determinação da solução ideal *fuzzy* positiva e negativa, bem como da proximidade relativa do valor ideal; e ordenação final das tecnologias;

Na quarta é mostrada a aplicação da Fase II (*Fuzzy* TOPSIS) com base nas respostas dos especialistas com dados disponíveis, obtidos em referências, para alguns dos critérios;

Na quinta é feita uma discussão dos resultados.

5.1. Coleta, análise e formatação dos dados

Considerando-se os dados levantados na revisão da literatura de capacidade e serviços para dar suporte a rede de transmissão e distribuição de energia elétrica, e a disponibilidade de dados para a fase aplicada desta pesquisa, selecionaram-se os seguintes SAEs, como já mencionado: (i) Chumbo-ácido; (ii) Níquel-cádmio; (iii) Níquel metal-hidreto; (iv) Íon-lítio e (v) Usinas hidrelétricas reversíveis.

Esta seção descreve os processos e os métodos adotados no levantamento e análise das informações necessárias para demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto. Primeiramente, buscaram-se dados na literatura referentes aos desempenhos dos SAEs para cada um dos critérios selecionados. Todavia, os dados não foram encontrados para todos os critérios apresentados anteriormente. Assim, foi confeccionado um instrumento de coleta de informação a ser submetido à opinião de especialistas do setor elétrico e academia, a fim de medir o desempenho dos SAEs para cada um dos critérios selecionados.

Os critérios considerados foram agrupados em quatro dimensões: técnica, socioambiental, econômica e institucional/regulatória e são reapresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1: Dimensões e critérios.

Dimensões	Crítérios
Técnicos	T1 - tempo de implementação
	T2 - facilidade de conexão
	T3 - maturidade
	T4 - densidade energética
	T5 - eficiência
	T6 - capacidade
	T7 - vida útil
	T8 - tempo de resposta
Socioambiental	SE1 - emissão de gases
	SE2 - uso da terra e conflitos
	SE3 - risco à saúde humana e segurança
	SE4 - aceitação social e política
	SE5 - impactos aos ecossistemas e vida selvagem
Econômico	E1 - risco de investimento
	E2 - contribuição para a economia
	E3 - custo nivelado
Institucional/regulatório	IR1 - risco de atrasos/licenciamento
	IR2 - existência de políticas públicas de incentivo

Antes de enviar os questionários, modificou-se a sistemática inicialmente proposta. Ao invés de enviar apenas os critérios para os quais se dispunham de dados na literatura optou-se por encaminhar um questionário com todos os critérios. Com isso pode-se utilizar duas matrizes, uma com apenas respostas dos questionários e outra com dados da literatura e as respostas dos especialistas. Com

esses resultados se pode comparar as respostas dos especialistas e os eventuais vieses de opinião.

Os dados e respostas dos especialistas estão apresentados no Apêndice.

Os resultados obtidos da literatura e dos questionários enviados a 8 especialistas na área de energia e meio ambiente resultaram num banco de informações para se pudesse aplicar o modelo de decisão multicritério (já apresentado no capítulo 4).

Para a definição dos atributos dos critérios, - cujos dados não estavam disponíveis na literatura, adotou-se uma escala Likert de cinco pontos, visando obter a opinião dos especialistas quanto ao nível de maturidade em relação a cada um dos subcritérios restantes. Os níveis de graduação considerados foram: 1 - muito baixa; 2 - baixa; 3 - moderada; 4 - alta; 5 - muito alta.

Com base nesses dados, procedeu-se a uma análise dos julgamentos dos especialistas, considerando-se as medianas e a dispersão das notas atribuídas aos critérios e subcritérios. Dessa forma, foi possível compor uma matriz com as dimensões e critérios de avaliação com seus pesos. Na sequência, foram formatados para aplicação propriamente dita do modelo em duas fases considerando: (i) = AHP; e (ii) *fuzzy*-TOPSIS.

Nas seções subsequentes, cada uma das fases do modelo proposto é apresentada, considerando os dados levantados na literatura ou obtidos por meio da opinião dos especialistas consultados.

5.2.

Fase I – AHP

5.2.1.

Construção da hierarquia: Definição de critérios e subcritérios

Os critérios referem-se às quatro dimensões adotadas (técnica, socioambiental, econômica e institucional), conforme a estrutura hierárquica apresentada na Figura 5.1.

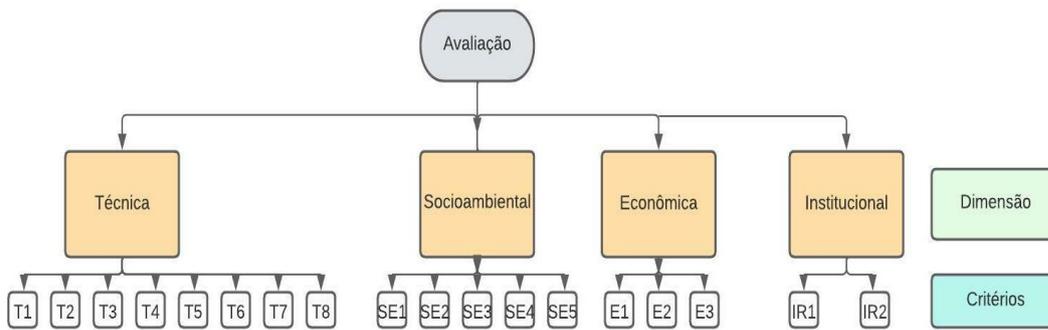


Figura 5.1: Estrutura hierárquica do modelo para avaliação e seleção de tecnologias de SAEs
Fonte: Elaboração própria.

5.2.2. Matrizes de comparação pareadas

Na definição das matrizes de comparação, foi utilizado o modelo IPÊ para que pudesse chegar à identificação dos pesos de cada critério e de cada dimensão na análise. O sistema IPÊ, versão 1.0, foi desenvolvido pela Universidade Federal Fluminense (UFF), com o objetivo de implementar o algoritmo do AHP, proposto por Thomas L. Saaty (1990).

Os resultados dos pesos das dimensões estão apresentados na Tabela 5.1 a seguir:

Tabela 5.1: Resultados das matrizes de comparação das dimensões definidas para a análise

Dimensões	Técnica	Socioambiental	Econômica	Institucional/regulatória
Pesos	0,286	0,286	0,286	0,143

Os pesos dos critérios das dimensões definidas estão apresentados na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3.

Tabela 5.2: Resultados da matriz de comparação para os critérios

Critérios	Pesos
Técnicos	
T1 - tempo de implementação	0,064
T2 - facilidade de conexão	0,071
T3 - maturidade	0,057
T4 - densidade energética	0,151
T5 - eficiência	0,102
T6 - capacidade	0,213
T7 - vida útil	0,213
T8 - tempo de resposta	0,129

Crêterios	Pesos
Socioambientais	
SE1 - emissão de gases de efeito estufa	0,226
SE2 - uso da terra	0,092
SE3 - saúde	0,158
SE4 - aceita�o social	0,116
SE5 - impactos aos ecossistemas	0,408
Econ�micos	
E1 - risco de investimento	0,312
E2 - contribui�o para a economia	0,198
E3 - custo nivelado	0,409
Institucionais/regulatórios	
IR1 - simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos	0,667
IR2 - políticas públicas	0,333

Tabela 5.3: Vetores peso final – W

Crêterios	W
T1 - tempo de implementa�o	0,02
T2 - facilidade de conexão	0,02
T3 - maturidade	0,02
T4 - densidade energética	0,04
T5 - eficiência	0,03
T6 - capacidade	0,06
T7 - vida útil	0,06
T8 - tempo de resposta	0,04
SE1 - emissão de gases de efeito estufa	0,06
SE2 - uso da terra	0,03
SE3 - saúde da popula�o	0,05
SE4 - aceita�o social	0,03
SE5 - impactos aos ecossistemas	0,12
E1 - risco de investimento	0,09
E2 - contribui�o para a economia	0,06
E3 - custo nivelado	0,14
IR1- simplicidade de licenciamento/risco de atrasos	0,10
IR2 - políticas públicas	0,05

5.2.3. Análise da consistência das matrizes de compara o

Como já mencionado no capítulo 4, quando a razão de consistência RC   inferior a 0,10, a consistência   aceita; caso contrário, faz-se necessário revisar a matriz de compara o com a participa o dos tomadores de decisão. (MELLO,2015). Como se pode verificar na Tabela 5.4 todas as matrizes das quatro dimensões foram consistentes.

Tabela 5.4: Razão de consistência das dimensões consideradas

Dimensão	RC
Técnica	0,060
Socioambiental	0,075
Econômica	0,000
Institucional/regulatória	0,000

A mesma verificação foi feita para os critérios selecionados e a razão de consistência deles está apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Razão de consistência dos critérios

Crítérios	RC
T1 - tempo de implementação	0,044
T2 - facilidade de conexão	0,031
T3 - maturidade	0,089
T4 - densidade energética	0,056
T5 - eficiência	0,082
T6 - capacidade	0,044
T7 - vida útil	0,063
T8 - tempo de resposta	0,065
SE1 - emissão de gases de efeito estufa	0,059
SE2 - uso da terra	0,044
SE3 - saúde da população	0,086
SE4 - aceitação social	0,063
SE5 - impactos aos ecossistemas	0,056
E1 - risco de investimento	0,031
E2 - contribuição para a economia	0,054
E3 - custo nivelado	0,062
IR1- simplicidade de licenciamento/risco de atrasos	0,022
IR2 - políticas públicas	0,063

Na sequência da modelagem após o cálculo das razões de consistência, são obtidos os pesos das dimensões e critérios pelo método AHP. Os pesos finais, resultantes da multiplicação dos pesos dos critérios pelos pesos das respectivas dimensões, serão utilizados na fase *Fuzzy-TOPSIS* para hierarquizar os SAEs.

5.3.

Fase II – Fuzzy-TOPSIS modelagem utilizando somente os dados com a opinião dos especialistas

Nesse item apresenta-se o resultado da modelagem realizada apenas com base nas respostas dos especialistas, já que não se dispunha de dados ou resultados de desempenho para todos os critérios.

5.3.1.

Criação das matrizes de avaliação usando o conjunto de termos linguísticos fuzzy

Para definir os parâmetros a_1 , a_2 e a_3 do número *fuzzy* triangular, adotou-se, respectivamente, o valor mínimo (l), o valor da mediana (m) e o valor máximo (u).

A partir do resultado dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão D, apresentada na Tabela 5.6, com base na posição dos especialistas consultados. E na Tabela 5.7, tem-se a matriz de decisão normalizada.

Tabela 5.6: Matriz de decisão fuzzy das fontes renováveis *versus* subcritérios

D	Chumbo-ácido - Pba			Níquel-cádmio			Níquel-metal hidretos			Íon-lítio			Sódio-enxofre			Usinas reversíveis		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T1	1	1	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	3	4	4	5	5
T2	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	3	5	1	2	3
T3	2	5	5	2	4	5	3	4	5	3	3	4	1	3	4	2	4	5
T4	1	3	5	2	3	4	2	3	4	4	4	5	3	4	5	1	3	5
T5	2	3	4	2	4	4	2	4	4	4	4	5	3	4	5	2	3	5
T6	2	3	4	2	3	4	2	3	4	3	4	4	2	4	4	1	4	5
T7	1	3	3	2	3	4	2	3	3	2	4	5	2	3	5	5	5	5
T8	1	2	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	4	3	4	5
SE1	2	3	4	2	3	5	2	3	4	2	3	4	2	2	4	1	2	4
SE2	1	2	4	1	2	4	1	2	4	2	2	4	2	2	4	2	4	5
SE3	3	4	5	2	3	5	2	3	5	2	4	5	2	3	4	1	2	3
SE4	2	4	5	3	4	5	3	4	4	3	4	4	2	3	4	2	3	4
SE5	2	3	4	2	3	5	2	3	5	2	3	5	2	3	4	2	4	4
E1	1	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	4	5
E2	1	3	4	1	3	4	1	3	4	3	3	4	2	3	5	4	4	5
E3	1	3	5	1	4	5	1	4	5	2	3	5	3	4	5	1	3	5
IR1	2	3	5	2	3	5	2	3	5	2	3	5	2	3	4	1	4	5
IR2	1	2	3	1	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	3	1	2	3

Tabela 5.7: Matriz de decisão normalizada

D	Pba			Ni-Cd			Ni-MH			Íon-Li			NaS			UHR		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T1	0,200	0,200	0,800	0,200	0,300	0,800	0,200	0,400	0,800	0,200	0,300	0,800	0,200	0,600	0,800	0,800	1,000	1,000
T2	0,400	0,800	1,000	0,400	0,800	1,000	0,400	0,800	1,000	0,400	0,800	1,000	0,400	0,600	1,000	0,200	0,400	0,600

D	Pba			Ni-Cd			Ni-MH			Íon-Li			NaS			UHR		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T3	1,000	1,000	1,000	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	1,000	1,000	1,000
T4	0,086	0,114	0,143	0,043	0,450	0,857	0,011	0,229	0,571	0,011	0,429	1,000	0,011	0,429	0,714	0,001	0,004	0,014
T5	0,737	0,842	0,947	0,632	0,700	0,768	0,684	0,737	0,789	0,895	0,947	1,000	0,789	0,868	0,947	0,737	0,800	0,863
T6	0,000	0,002	0,004	0,000	0,004	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,020	0,002	0,004	0,007	0,002	0,501	1,000
T7	0,200	0,600	0,600	0,400	0,600	0,800	0,400	0,600	0,600	0,400	0,800	1,000	0,400	0,600	1,000	1,000	1,000	1,000
T8	0,083	0,167	0,250	0,167	0,250	0,333	0,083	0,125	0,167	0,333	0,375	0,417	0,167	0,208	0,250	0,667	0,833	1,000
SE1	0,111	0,194	0,278	0,417	0,431	0,444	0,500	0,750	1,000	0,417	0,708	1,000	0,556	0,778	1,000	0,056	0,056	0,056
SE2	0,200	0,400	0,800	0,200	0,400	0,800	0,200	0,400	0,800	0,400	0,400	0,800	0,400	0,400	0,800	0,400	0,800	1,000
SE3	0,600	0,800	1,000	0,400	0,600	1,000	0,400	0,600	1,000	0,400	0,800	1,000	0,400	0,600	0,800	0,200	0,400	0,600
SE4	0,400	0,700	1,000	0,600	0,800	1,000	0,600	0,700	0,800	0,600	0,800	0,800	0,400	0,600	0,800	0,400	0,600	0,800
SE5	0,400	0,600	0,800	0,400	0,600	1,000	0,400	0,600	1,000	0,400	0,600	1,000	0,400	0,600	0,800	0,400	0,800	0,800
E1	0,200	0,600	0,800	0,400	0,600	0,800	0,400	0,600	0,800	0,400	0,600	0,800	0,400	0,600	0,800	0,400	0,800	1,000
E2	0,200	0,600	0,800	0,200	0,600	0,800	0,200	0,600	0,800	0,600	0,600	0,800	0,400	0,600	1,000	0,800	0,800	1,000
E3	0,225	0,275	0,325	0,125	0,250	0,375	0,125	0,250	0,375	0,300	0,650	1,000	0,088	0,419	0,750	0,150	0,575	1,000
IR1	0,400	0,600	1,000	0,400	0,500	1,000	0,400	0,600	1,000	0,400	0,600	1,000	0,400	0,600	0,800	0,200	0,800	1,000
IR2	0,333	0,667	1,000	0,333	0,667	1,000	0,667	0,667	1,000	0,667	0,667	1,000	0,667	0,667	1,000	0,333	0,667	1,000

A matriz normalizada foi então ponderada pelos pesos dos critérios para que se pudesse fazer a comparação entre as SAEs de maneira adequada. Dessa forma, a matriz de decisão está pronta para o cálculo das distâncias positiva e negativa (Tabela 5.8).

Tabela 5.8: Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP

DxW	Pba			N-Cd			Ni-MH			Íon-Li			NaS			UHR		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T1	0,004	0,004	0,015	0,004	0,005	0,015	0,004	0,007	0,015	0,004	0,005	0,015	0,004	0,011	0,015	0,015	0,018	0,018
T2	0,008	0,016	0,020	0,008	0,016	0,020	0,008	0,016	0,020	0,008	0,016	0,020	0,008	0,012	0,020	0,004	0,008	0,012
T3	0,016	0,016	0,016	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,016	0,016	0,016
T4	0,004	0,005	0,006	0,002	0,019	0,037	0,000	0,010	0,025	0,000	0,019	0,043	0,000	0,019	0,031	0,000	0,000	0,001
T5	0,021	0,025	0,028	0,018	0,020	0,022	0,020	0,021	0,023	0,026	0,028	0,029	0,023	0,025	0,028	0,021	0,023	0,025
T6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,061
T7	0,012	0,037	0,037	0,024	0,037	0,049	0,024	0,037	0,037	0,024	0,049	0,061	0,024	0,037	0,061	0,061	0,061	0,061
T8	0,003	0,006	0,009	0,006	0,009	0,012	0,003	0,005	0,006	0,012	0,014	0,015	0,006	0,008	0,009	0,025	0,031	0,037
SE1	0,007	0,013	0,018	0,027	0,028	0,029	0,032	0,048	0,065	0,027	0,046	0,065	0,036	0,050	0,065	0,004	0,004	0,004
SE2	0,005	0,011	0,021	0,005	0,011	0,021	0,005	0,011	0,021	0,011	0,011	0,021	0,011	0,011	0,021	0,011	0,021	0,026
SE3	0,027	0,036	0,045	0,018	0,027	0,045	0,018	0,027	0,045	0,018	0,036	0,045	0,018	0,027	0,036	0,009	0,018	0,027
SE4	0,013	0,023	0,033	0,020	0,027	0,033	0,020	0,023	0,027	0,020	0,027	0,027	0,013	0,020	0,027	0,013	0,020	0,027
SE5	0,047	0,070	0,093	0,047	0,070	0,117	0,047	0,070	0,117	0,047	0,070	0,117	0,047	0,070	0,093	0,047	0,093	0,093
E1	0,018	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,071	0,089
E2	0,011	0,034	0,045	0,011	0,034	0,045	0,011	0,034	0,045	0,034	0,034	0,045	0,023	0,034	0,057	0,045	0,045	0,057
E3	0,032	0,039	0,046	0,018	0,035	0,053	0,018	0,035	0,053	0,042	0,091	0,140	0,012	0,059	0,105	0,021	0,081	0,140

DxW	Pba			N-Cd			Ni-MH			Íon-Li			NaS			UHR		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
IR1	0,038	0,057	0,095	0,038	0,048	0,095	0,038	0,057	0,095	0,038	0,057	0,095	0,038	0,057	0,076	0,019	0,076	0,095
IR2	0,016	0,032	0,048	0,016	0,032	0,048	0,032	0,032	0,048	0,032	0,032	0,048	0,032	0,032	0,048	0,016	0,032	0,048

5.3.2.

Determinação da solução ideal *fuzzy* positiva e negativa (FPIS e FNIS) e da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-)

Com os valores já padronizados e ajustados *fuzzy*, foram calculadas as distâncias entre esses dados e as soluções ideais *fuzzy* positiva e negativa. Esses representam os valores máximos e mínimos de cada subcritério respectivamente. Conforme descrito no capítulo 4, são mostradas, respectivamente na Tabela 5.9 e na Tabela 5.10, as matrizes de distâncias positivas e negativas da solução ideal.

Tabela 5.9: Matriz de distância total positiva - FPIS

FPIS	Pba	Ni-Cd	Ni-MH	Íon-Li	NaS	UHR
A+	d(A1, O+)	d(A2, O+)	d(A3, O+)	d(A4, O+)	d(A5, O+)	d(A6, O+)
T1	-0,99269	-0,99208	-0,99147	-0,99208	-0,99025	-0,98292
T2	0,985122	0,985318	0,985318	0,985122	0,986089	0,991788
T3	0,986969	0,988054	0,986962	0,989133	0,991314	0,988054
T4	0,974191	0,974114	0,974114	0,962581	0,965477	0,974191
T5	0,982508	0,980567	0,980567	0,974721	0,976674	0,980579
T6	0,963501	0,963501	0,963501	0,955344	0,959457	0,959611
T7	0,97164	0,963501	0,967527	0,955448	0,959508	0,939082
T8	-0,9804	-0,97794	-0,97794	-0,97794	-0,98037	-0,9705
SE1	-0,96128	-0,95705	-0,96128	-0,96128	-0,9656	-0,96997
SE2	-0,98774	-0,98774	-0,98774	-0,98598	-0,98598	-0,98073
SE3	-0,96388	-0,96994	-0,96994	-0,96693	-0,97292	-0,98195
SE4	0,976811	0,973474	0,976781	0,975676	0,980109	0,980109
SE5	-0,93018	-0,92267	-0,92267	-0,92267	-0,93018	-0,92247
E1	-0,95267	-0,94657	-0,94657	-0,94657	-0,94657	-0,93483
E2	0,969901	0,969901	0,969901	0,962263	0,962352	0,950937
E3	-0,91706	-0,91242	-0,91242	-0,90725	-0,88818	-0,92175
IR1	-0,93671	-0,93993	-0,93671	-0,93671	-0,9429	-0,93697
IR2	0,968341	0,968341	0,962992	0,962992	0,962992	0,968341

Tabela 5.10: Matriz de distância total negativa - FNIS

FNIS	Pba	Ni-Cd	Ni-MH	Íon-Li	NaS	UHR
A-	d(A1, O-)	d(A2, O-)	d(A3, O-)	d(A4, O-)	d(A5, O-)	d(A6, O-)
T1	0,008967	0,009273	0,009686	0,009273	0,010777	0,017171
T2	0,015729	0,015529	0,015529	0,015729	0,014791	0,008862
T3	0,013833	0,012627	0,013311	0,010976	0,009521	0,012467
T4	0,029502	0,026854	0,026854	0,037649	0,035261	0,029875
T5	0,01814	0,020211	0,020211	0,025432	0,023819	0,021127
T6	0,03788	0,03788	0,03788	0,045041	0,040583	0,044964

T7	0,030661	0,03788	0,032993	0,047187	0,043362	0,060918
T8	0,023334	0,025203	0,025203	0,025203	0,020698	0,029944
SE1	0,040192	0,046008	0,040192	0,040192	0,037482	0,034202
SE2	0,013923	0,013923	0,013923	0,014884	0,014884	0,020381
SE3	0,036896	0,032165	0,032165	0,035002	0,028099	0,019523
SE4	0,024604	0,027088	0,023381	0,024529	0,02063	0,02063
SE5	0,07256	0,083059	0,083059	0,083059	0,07256	0,080844
E1	0,052538	0,055487	0,055487	0,055487	0,055487	0,069119
E2	0,033342	0,033342	0,033342	0,038128	0,040308	0,049367
E3	0,095734	0,10008	0,10008	0,099752	0,114424	0,09314
IR1	0,067893	0,06539	0,067893	0,067893	0,059837	0,069711
IR2	0,03429	0,03429	0,037785	0,037785	0,037785	0,03429

5.3.3. Determinação da proximidade relativa do valor ideal

A proximidade relativa com a solução ideal *fuzzy* é calculada por meio das distâncias totais positiva e negativa, também como descrito no capítulo 4, e é denominada de coeficiente de proximidade (*CCi*). Na Tabela 5.11, os resultados obtidos para esse coeficiente, que procura comparar o desempenho de cada tecnologia de SAE com base das dimensões e critérios selecionados, são apresentados.

Tabela 5.11: Coeficiente de proximidade *CCi*

Alternativa	D+	D-	CCi
Chumbo-ácido - Pba	0,1603	0,64893	0,8019
Níquel-cádmio	0,1600	0,67288	0,8079
Níquel-metal hidretos	0,1590	0,66547	0,8071
Íon-lítio	0,1279	0,71420	0,8481
Sódio-enxofre	0,1432	0,13035	0,4764
Usinas reversíveis	0,8236	0,84689	0,5070

As alternativas das tecnologias de SAE foram ordenadas a partir dos valores do coeficiente de proximidade (*CCi*), considerando as quatro dimensões consideradas: técnica, socioambiental, econômica e institucional/regulatória. A melhor é aquela que apresentou o maior valor, como listado a seguir:

- 1 – Íon-Lítio
- 2 – Níquel-cádmio
- 3 – Níquel metal hidretos
- 4 – Chumbo-ácido

5 – Usinas hidrelétricas reversíveis

6 – Sódio-enxofre

5.4.

Fase II – *Fuzzy-TOPSIS* – modelagem alternativa utilizando os dados da literatura

Nessa modelagem alternativa foram utilizados dados obtidos na literatura e que foram complementados pelas contribuições dos julgamentos dos especialistas, por exemplo, em critérios como uso do solo, ou aceitação social. Entendeu-se que seria relevante comparar os julgamentos com os dados das referências bibliográficas.

Os valores obtidos na revisão bibliográfica estavam relacionados aos seguintes critérios:

- Densidade energética
- Eficiência
- Capacidade
- Vida útil
- Emissões de gases de efeito estufa
- Custo nivelado

Esses dados foram utilizados para construir uma matriz alternativa mista considerando os dados das duas origens diferentes. A seguir apresenta-se a matriz de decisão (Tabela 5.12), e a matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método fuzzy AHP (Tabela 5.13), e a matriz de distância total positiva e negativa (Tabela 5.14).

Tabela 5.12: Matriz de decisão alternativa

D	Chumbo-ácido - Pba			Níquel-cádmio			Níquel-metal hidretos			Íon-lítio			Sódio-enxofre			Usinas reversíveis		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T1	1	1	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	3	4	4	5	5
T2	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2	3	5	1	2	3
T3	2	5	5	2	4	5	3	4	5	3	3	4	1	3	4	2	4	5
T4	30	40	50	15	35	55	60	70	80	120	175	230	150	195	240	1	1	1
T5	70	81	92	60	65	70	60	63	66	85	88	90	75	83	90	70	79	87
T6	0	10	20	0	20	40	0	0	0	0	50	100	10	22	34	10	2505	5000
T7	5	10	15	10	15	20	5	8	10	20	23	25	10	13	15	40	50	60

D	Chumbo-ácido - Pba			Níquel-cádmio			Níquel-metal hidretos			Íon-lítio			Sódio-enxofre			Usinas reversíveis		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T8	1	2	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	4	3	4	5
SE1	2	4	5	8	8	8	9	14	18	8	13	18	10	14	18	12	16	20
SE2	1	2	4	1	2	4	1	2	4	2	2	4	2	2	4	2	4	5
SE3	3	4	5	2	3	5	2	3	5	2	4	5	2	3	4	1	2	3
SE4	2	4	5	3	4	5	3	4	4	3	4	4	2	3	4	2	3	4
SE5	2	3	4	2	3	5	2	3	5	2	3	5	2	3	4	2	4	4
E1	1	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	4	5
E2	1	3	4	1	3	4	1	3	4	3	3	4	2	3	5	4	4	5
E3	250	313	375	350	425	500	350	425	500	550	615	680	180	240	300	60	130	200
IR1	2	3	5	2	3	5	2	3	5	2	3	5	2	3	4	1	4	5
IR2	1	2	3	1	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	3	1	2	3

Tabela 5.13: Matriz de decisão normalizada alternativa

D	Chumbo-ácido - Pba			Níquel-cádmio			Níquel-metal hidretos			Íon-lítio			Sódio-enxofre			Usinas reversíveis		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T1	0,20	0,20	0,80	0,20	0,30	0,80	0,20	0,40	0,80	0,20	0,30	0,80	0,20	0,60	0,80	0,80	1,00	1,00
T2	0,40	0,80	1,00	0,40	0,77	1,00	0,40	0,77	1,00	0,40	0,80	1,00	0,40	0,66	1,00	0,20	0,41	0,60
T3	0,40	0,93	1,00	0,40	0,80	1,00	0,60	0,77	1,00	0,60	0,64	0,80	0,20	0,59	0,80	0,40	0,77	1,00
T4	0,13	0,17	0,21	0,06	0,15	0,23	0,25	0,29	0,33	0,50	0,73	0,96	0,63	0,81	1,00	0,00	0,00	0,00
T5	0,76	0,88	1,00	0,65	0,71	0,76	0,65	0,68	0,72	0,92	0,95	0,98	0,82	0,90	0,98	0,76	0,85	0,95
T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,50	1,00
T7	0,08	0,17	0,25	0,17	0,25	0,33	0,08	0,13	0,17	0,33	0,38	0,42	0,17	0,21	0,25	0,67	0,83	1,00
T8	0,20	0,44	1,00	0,20	0,57	1,00	0,20	0,56	1,00	0,20	0,57	1,00	0,20	0,51	0,80	0,60	0,79	1,00
SE1	0,10	0,18	0,25	0,38	0,39	0,40	0,45	0,68	0,90	0,38	0,64	0,90	0,50	0,70	0,90	0,60	0,80	1,00
SE2	0,20	0,40	0,80	0,20	0,40	0,80	0,20	0,40	0,80	0,40	0,40	0,80	0,40	0,40	0,80	0,40	0,80	1,00
SE3	0,60	0,80	1,00	0,40	0,60	1,00	0,40	0,60	1,00	0,40	0,80	1,00	0,40	0,60	0,80	0,20	0,40	0,60
SE4	0,40	0,70	1,00	0,60	0,80	1,00	0,60	0,70	0,80	0,60	0,80	0,80	0,40	0,60	0,80	0,40	0,60	0,80
SE5	0,40	0,63	0,80	0,40	0,63	1,00	0,40	0,60	1,00	0,40	0,63	1,00	0,40	0,60	0,80	0,40	0,80	0,80
E1	0,20	0,60	0,80	0,40	0,60	0,80	0,40	0,60	0,80	0,40	0,60	0,80	0,40	0,60	0,80	0,40	0,80	1,00
E2	0,20	0,60	0,80	0,20	0,60	0,80	0,20	0,60	0,80	0,60	0,60	0,80	0,40	0,60	1,00	0,80	0,80	1,00
E3	0,37	0,46	0,55	0,51	0,63	0,74	0,51	0,63	0,74	0,81	0,90	1,00	0,26	0,35	0,44	0,09	0,19	0,29
IR1	0,40	0,60	1,00	0,40	0,57	1,00	0,40	0,60	1,00	0,40	0,60	1,00	0,40	0,62	0,80	0,20	0,75	1,00
IR2	0,33	0,67	1,00	0,33	0,67	1,00	0,67	0,67	1,00	0,67	0,67	1,00	0,67	0,67	1,00	0,33	0,67	1,00

Tabela 5.14: Matriz de decisão alternativa normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP

DxW	Chumbo-ácido - Pba			Níquel-cádmio			Níquel-metal hidretos			Íon-lítio			Sódio-enxofre			Usinas reversíveis		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T1	0,004	0,004	0,015	0,004	0,005	0,015	0,004	0,007	0,015	0,004	0,005	0,015	0,004	0,011	0,015	0,015	0,018	0,018
T2	0,008	0,016	0,020	0,008	0,016	0,020	0,008	0,016	0,020	0,008	0,016	0,020	0,008	0,013	0,020	0,004	0,008	0,012

D _{xW}	Chumbo-ácido - Pba			Níquel-cádmio			Níquel-metal hidretos			Íon-lítio			Sódio-enxofre			Usinas reversíveis		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
T3	0,007	0,015	0,016	0,007	0,013	0,016	0,010	0,013	0,016	0,010	0,010	0,013	0,003	0,010	0,013	0,007	0,013	0,016
T4	0,005	0,007	0,009	0,003	0,006	0,010	0,011	0,013	0,014	0,022	0,031	0,041	0,027	0,035	0,043	0,000	0,000	0,000
T5	0,022	0,026	0,029	0,019	0,021	0,022	0,019	0,020	0,021	0,027	0,028	0,029	0,024	0,026	0,029	0,022	0,025	0,028
T6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,061
T7	0,005	0,010	0,015	0,010	0,015	0,020	0,005	0,008	0,010	0,020	0,023	0,025	0,010	0,013	0,015	0,041	0,051	0,061
T8	0,007	0,016	0,037	0,007	0,021	0,037	0,007	0,021	0,037	0,007	0,021	0,037	0,007	0,019	0,030	0,022	0,029	0,037
SE1	0,006	0,011	0,016	0,024	0,025	0,026	0,029	0,044	0,058	0,024	0,041	0,058	0,032	0,045	0,058	0,039	0,052	0,065
SE2	0,005	0,011	0,021	0,005	0,011	0,021	0,005	0,011	0,021	0,011	0,011	0,021	0,011	0,011	0,021	0,011	0,021	0,026
SE3	0,027	0,036	0,045	0,018	0,027	0,045	0,018	0,027	0,045	0,018	0,036	0,045	0,018	0,027	0,036	0,009	0,018	0,027
SE4	0,013	0,023	0,033	0,020	0,027	0,033	0,020	0,023	0,027	0,020	0,027	0,027	0,013	0,020	0,027	0,013	0,020	0,027
SE5	0,047	0,073	0,093	0,047	0,073	0,117	0,047	0,070	0,117	0,047	0,073	0,117	0,047	0,070	0,093	0,047	0,093	0,093
E1	0,018	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,054	0,071	0,036	0,071	0,089
E2	0,011	0,034	0,045	0,011	0,034	0,045	0,011	0,034	0,045	0,034	0,034	0,045	0,023	0,034	0,057	0,045	0,045	0,057
E3	0,052	0,064	0,077	0,072	0,088	0,103	0,072	0,088	0,103	0,113	0,127	0,140	0,037	0,049	0,062	0,012	0,027	0,041
IR1	0,038	0,057	0,095	0,038	0,054	0,095	0,038	0,057	0,095	0,038	0,057	0,095	0,038	0,059	0,076	0,019	0,072	0,095
IR2	0,016	0,032	0,048	0,016	0,032	0,048	0,032	0,032	0,048	0,032	0,032	0,048	0,032	0,032	0,048	0,016	0,032	0,048

Assim, também com os valores já padronizados e ajustados *fuzzy*, foram calculadas as distâncias entre esses dados e as soluções ideal *fuzzy* positiva e negativa que são mostradas, respectivamente, na Tabela 5.15 e na Tabela 5.16.

Tabela 5.15: Matrizes de distâncias positivas e negativas - FPIS

FPIS	Pba	Ni-Cd	Ni-MH	Íon-Li	NaS	UHR
A+	d(A1, O+)	d(A2, O+)	d(A3, O+)	d(A4, O+)	d(A5, O+)	d(A6, O+)
T1	-0,99269	-0,99208	-0,99147	-0,99208	-0,99025	-0,98292
T2	0,985122	0,985318	0,985318	0,985122	0,986089	0,991788
T3	0,987359	0,988054	0,98712	0,988905	0,99139	0,988211
T4	0,992803	0,993706	0,987405	0,968544	0,964934	0,99982
T5	0,97432	0,97939	0,980024	0,972255	0,973842	0,975111
T6	0,999878	0,999756	1	0,999391	0,999732	0,969798
T7	0,989856	0,984779	0,992387	0,977158	0,987311	0,949271
T8	-0,97988	-0,97829	-0,97847	-0,97829	-0,98142	-0,97069
SE1	-0,9887	-0,97495	-0,95644	-0,95889	-0,95481	-0,94835
SE2	-0,98774	-0,98774	-0,98774	-0,98598	-0,98598	-0,98073
SE3	-0,96388	-0,96994	-0,96994	-0,96693	-0,97292	-0,98195
SE4	0,976811	0,973474	0,976781	0,975676	0,980109	0,980109
SE5	-0,92909	-0,92153	-0,92267	-0,92153	-0,93018	-0,92247
E1	-0,95267	-0,94657	-0,94657	-0,94657	-0,94657	-0,93483
E2	0,969901	0,969901	0,969901	0,962263	0,962352	0,950937
E3	-0,93566	-0,9125	-0,9125	-0,87332	-0,95059	-0,97328
IR1	-0,93671	-0,9378	-0,93671	-0,93671	-0,94236	-0,93854
IR2	0,968341	0,968341	0,962992	0,962992	0,962992	0,968341

Tabela 5.16: Matrizes de distâncias positivas e negativas - FNIS

FNIS	Pba	Ni-Cd	Ni-MH	Íon-Li	NaS	UHR
A-	d(A1, O-)	d(A2, O-)	d(A3, O-)	d(A4, O-)	d(A5, O-)	d(A6, O-)
T1	0,008967	0,009273	0,009686	0,009273	0,010777	0,017171
T2	0,015729	0,015529	0,015529	0,015729	0,014791	0,008862
T3	0,013381	0,012627	0,013158	0,011185	0,009521	0,012467
T4	0,007346	0,00695	0,012681	0,03251	0,035706	0,00018
T5	0,025841	0,020651	0,019992	0,027753	0,026232	0,024988
T6	0,000157	0,000315	1,41E-07	0,000787	0,000293	0,039338
T7	0,010966	0,015783	0,007892	0,022938	0,012859	0,051437
T8	0,023675	0,024896	0,024752	0,024896	0,020698	0,029944
SE1	0,011984	0,025055	0,045216	0,043472	0,04646	0,052775
SE2	0,013923	0,013923	0,013923	0,014884	0,014884	0,020381
SE3	0,036896	0,032165	0,032165	0,035002	0,028099	0,019523
SE4	0,024604	0,027088	0,023381	0,024529	0,02063	0,02063
SE5	0,073627	0,084027	0,083059	0,084027	0,07256	0,080844
E1	0,052538	0,055487	0,055487	0,055487	0,055487	0,069119
E2	0,033342	0,033342	0,033342	0,038128	0,040308	0,049367
E3	0,065256	0,088492	0,088492	0,127215	0,050481	0,029266
IR1	0,067893	0,067001	0,067893	0,067893	0,059837	0,069711
IR2	0,03429	0,03429	0,037785	0,037785	0,037785	0,03429

Na Tabela 5.17 é apresentado o coeficiente de proximidade (CC_i) que procura comparar o desempenho de cada tecnologia de SAE com base das dimensões e critérios selecionados.

Tabela 5.17: Coeficiente de proximidade CC_i

Alternativa	D+	D-	CC_i
Chumbo-ácido - Pba	0,1774	0,52042	0,7458
Níquel-cádmio	0,2213	0,56689	0,7192
Níquel-metal hidretos	0,2394	0,58443	0,7094
Íon-lítio	0,2320	0,67349	0,7438
Sódio-enxofre	0,1537	0,13963	0,4761
Usinas reversíveis	0,7111	0,76992	0,5199

A ordenação de preferência das tecnologias de SAE foi, então, verificada por meio dos valores do coeficiente de proximidade (CC_i), considerando as dimensões técnica, socioambiental, econômica e institucional/regulatória. A melhor é aquela que apresentou o maior valor de CC_i .

- 1 – Chumbo-ácido
- 2 – Íon-Lítio
- 3 – Níquel-cádmio
- 4 – Níquel metal hidreto
- 5 – Usinas hidrelétricas reversíveis
- 6 – Sódio-enxofre

Pode-se notar que as alternativas que tiveram pior desempenho foram a bateria de sódio enxofre e as usinas reversíveis, sendo as melhores nos dois casos as de Ion-Lítio. As demais apresentaram alguma alteração de ordenação, sendo a mais relevante a de chumbo-ácido que aparecia como segunda opção na opinião dos especialistas e que na segunda rodada aparece em quarto.

5.5. Discussão dos resultados

Os resultados do modelo de hierarquização das tecnologias de SAEs atendem ao objetivo de comparar as fontes para suporte à rede de transmissão e distribuição e gerenciamento de energia elétrica. As dimensões selecionadas, por sua vez, procuraram expressar de forma conjunta, numa análise multicritério, os aspectos técnicos, socioambientais, econômicos e institucionais.

Tanto a literatura (BAUMANN *et al.* 2019) quanto a consulta aos especialistas mostraram uma ponderação equilibrada entre as dimensões técnica, socioambiental e econômica, tal como a que foi adotada nesse projeto de pesquisa.

Pode-se notar que as alternativas que tiveram pior desempenho foram a bateria de sódio enxofre e as usinas reversíveis, sendo as melhores nos dois casos as de Ion-Lítio. As demais apresentaram alguma alteração de ordenação, sendo a mais relevante a de chumbo-ácido que aparecia como segunda opção na opinião dos especialistas e que na segunda rodada aparece em quarto.

As SAEs de Íon-lítio e Níquel-Cádmio mostraram bom desempenho técnico no que tange a vários critérios: facilidade de acesso à rede, tempo de resposta, densidade de potência, eficiência, capacidade e tempo de resposta (SANIJ *et al.*, 2019), além de bom desempenho socioambiental; neste caso, sobretudo quando associado a fatores como uso da terra, e impactos aos ecossistemas, provavelmente

por ocuparem áreas relativamente reduzidas. As baterias de Sódio-enxofre, apesar de serem consideradas mais “verdes” por conta dos minerais utilizados na sua fabricação e por emitirem menos gases de efeito estufa, apresentam atributos técnicos menos atrativos, tais como densidade de energia, capacidade (SANIJ, *et al.* 2019).

As baterias eletroquímicas avaliadas levam algumas vantagens na comparação com os sistemas de armazenamento mecânico. As UHRs têm dificuldades comparativas devido ao tempo de implantação, ao maior uso da terra, aos impactos nos ecossistemas associados aos reservatórios, e aos riscos de investimentos pelas obras necessárias e incertezas associadas, apesar de terem uma vida útil bem maior, e de serem uma tecnologia de grande capacidade para suporte de rede e gerenciamento de energia.

Assim os fatores que mais influenciaram essa avaliação foram os seguintes:

- Tempo de implementação
- Densidade energética
- Capacidade
- Riscos de investimento
- Tempo de resposta
- Custos nivelados
- Uso da terra

Entretanto, dependendo do tipo de SAE necessária, pode haver uma escolha diferente. Por exemplo, ao se desejar um armazenamento de grande porte, maior do que 100 MW, é possível que uma UHR seja mais adequada, mesmo com as desvantagens já mencionadas. Ademais, os sistemas podem não ser excludentes numa matriz elétrica e, sim, complementares.

As principais dificuldades de confirmação de dados e resultados foram as seguintes;

- Não foram encontrados resultados para emissões em UHR, e fica muito difícil compará-los com as demais SAEs nesse quesito.
- Geralmente, os impactos socioambientais de baterias são muito reduzidos na sua implantação e operação. Não se considerou nessas avaliações os efeitos negativos da mineração dos materiais necessários à fabricação desses sistemas, muitos deles metais pesados;

- Os impactos socioambientais de uma UHR podem ser muito reduzidos dependendo de onde os reservatórios se localizarem (por exemplo, em áreas desmatadas e improdutivas), mas essas questões não são consideradas na literatura (OLIVEIRA *et al.*, 2015; SANIJ *et al.* 2019).

Cabem algumas ressalvas neste julgamento final. Afinal, não foram obtidos desempenhos dos critérios considerando todo o ciclo de vida dos SAEs. Isto certamente é uma lacuna das pesquisas que pode alterar a ordenação obtida. Por exemplo Sanij *et al.* (2019) compara os efeitos ambientais das baterias e mostra que as baterias de Íon-lítio e Níquel-cádmio apresentam maiores impactos pela necessidade de matérias primas que têm causado muitos efeitos ambientais e sociais em regiões ambientalmente sensíveis, como lítio, cobalto e níquel. Ao se considerar o ciclo de vida, esses efeitos negativos seriam computados, bem como seus custos ambientais e sociais. Os impactos associados a uma demanda cada vez maior de baterias para veículos e equipamentos eletrônicos têm gerado também muitos problemas no descarte. No caso das baterias de Íon-lítio ainda não é viável sua reciclagem; diferentemente, por exemplo, das baterias de chumbo-ácido, que são quase completamente recicláveis.

Além disso, ao se levar em conta o ciclo de vida, devem passar a ser computados os efeitos da fabricação, que pode ser feita na China a partir de geração elétrica movida a carvão, o que não aconteceria no Brasil, onde os minerais poderiam ser processados em uma matriz elétrica limpa.

6. Conclusões e recomendações

Neste capítulo apresentam-se as conclusões da dissertação e as principais recomendações para futuras pesquisas e preenchimento de lacunas.

6.1 Conclusões

O presente projeto de pesquisa visou contribuir para o avanço do conhecimento sobre avaliação comparação e seleção das alternativas tecnológicas para armazenamento de energia elétrica por meio de técnicas de análise multicritério de apoio à decisão associados a teoria de conjuntos *fuzzy*. Para atender esse objetivo principal foi estabelecido um modelo de análise multicritério para realizar um diagnóstico e avaliação do desempenho para hierarquização se alternativas de SAEs.

. Os aspectos conceituais e metodológicos apresentados nos capítulos 3 e 4 fundamentaram a definição de critérios e as etapas de aplicação do modelo, atingindo-se os objetivos específicos da dissertação:

- Caracterizar as alternativas tecnológicas dos SAEs a serem conectadas a uma rede elétrica a partir de um levantamento sobre quais sistemas têm sido propostos para atender os requisitos de suporte à rede de transmissão e distribuição de energia elétrica e gerenciamento de energia, identificando suas aplicações, vantagens e desvantagens;
- Pesquisar como são feitas as avaliações da sustentabilidade econômica, social e ambiental dos SAEs, tendo se verificado que existem muitas referências sobre a análise comparativa dos sistemas do ponto de vista técnico, em função da maturidade dessas tecnologias. Um levantamento sistemático mostrou que também existem muitos trabalhos que consideram o conjunto de atributos relevantes para comparação de desempenho numa avaliação multicritério, dentre os quais: atributos técnicos mais adequados para os serviços de rede, impactos socioambientais, relação benefício custo

para a matriz elétrica e critérios para avaliações de políticas para viabilizar os investimentos necessários. Verificou-se também que a avaliação socioambiental é bem mais complexa, sendo difícil quantificar os impactos nos recursos naturais e na socio economia da região onde o sistema será inserido.

- Investigar os métodos multicritério de apoio à decisão, avaliando as metodologias e selecionando aquelas que mais se ajustam a um processo complexo, que envolve muitos atributos e muita subjetividade, sobretudo no caso dos critérios socioambientais, e que demandam discussão dos *trade-offs* com vários interlocutores em uma avaliação multidisciplinar;
- Definir os critérios e os indicadores para quantificar os impactos positivos e negativos, avaliando-se com base na literatura aqueles atributos que podem ser quantificados e qualificados, e que pudessem permitir a comparação mais objetiva possível dos SAEs.
- Desenvolver um modelo conceitual para hierarquização das tecnologias de SAEs com uso de métodos multicritério de apoio à decisão sob incerteza e demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto, tendo sido feita uma análise dos métodos para comparação e ordenação das tecnologias com base nos atributos selecionados para a definição do modelo mais adequado para as avaliações dos *trade-offs*.
- E, por fim, analisar os resultados de modelo proposto e sugerir recomendações para a comparação dos SAEs, como detalhado adiante, além de definir a ordenação das melhores opções tecnológicas.

Os resultados da aplicação prática mostraram a relevância desse tipo de método para considerar as incertezas, fazendo com que eles sejam transparentes para os interlocutores para uma tomada de decisão. Da análise da aplicação, os seguintes aspectos podem ser destacados:

- É possível considerar muitas dimensões e critérios numa avaliação sistemática, verificando-se a consistência, o grau de dependência, e as métricas adequadas para comparação, o que pode diminuir a sua subjetividade.

- Demonstrou-se a validade dos julgamentos dos especialistas na definição da preferência entre os atributos, quando comparados com os resultados de uma análise feita com dados dos critérios obtidos das referências.
- A partir dos dados levantados, definiu-se que os sistemas mais relevantes para atender os serviços de suporte a rede e gerenciamento de energia são as baterias de Ion-Lítio e Níquel-Cádmio, considerando as quatro dimensões selecionadas: técnica, socioambiental, econômica e institucional.
- Os resultados mostraram que o modelo AHP *fuzzy*-TOPSIS é consistente, com capacidade de processar os dados de diversas dimensões de forma integrada, além de ser relativamente simples para uma avaliação comparativa dos diversos SAEs. O modelo facilitou a definição da hierarquia considerando critérios mensuráveis ou não, mesmo aqueles mais complexos, tornando-os mais compreensíveis aos decisores, e reduzindo as incertezas e a subjetividade.

Entretanto, deve-se fazer algumas ressalvas, antes de se passar as propostas para trabalhos futuros:

- Encontraram-se muitas referências (como relatado por Baumann, et al., 2019) aos impactos que podem ser causados na produção/fabricação de baterias compostas por minerais como Cádmio, Cobalto, Níquel e Lítio. Foram relatados impactos a ecossistemas frágeis, e na população nas regiões onde se buscam esses minérios. Outro aspecto refere-se a vida útil e o posterior descarte. Muitos desses equipamentos ainda não são recicláveis, o que será um problema muito sério para o futuro, pois a demanda dessas baterias para veículos e equipamentos eletrônicos tem tido um grande crescimento.
- Num artigo relativamente recente (SANIJ et al., 2019) é feita uma avaliação do desempenho ambiental das tecnologias de armazenamento de eletricidade para aplicações de rede, como proposto nesta pesquisa. Utilizando uma metodologia de avaliação do ciclo de vida, foram analisados os impactos da construção, descarte/fim de vida e uso de cada um dos sistemas. Nesse caso, a avaliação dos impactos ambientais se limitou às emissões de gases (associado a mudanças climáticas), à toxicidade humana, à formação de material particulado e esgotamento de recursos fósseis (com

aplicação do modelo ReCiPe – 2009). Foram utilizados diferentes cenários de geração de energia, e usado o mix de eletricidade da Bélgica de 2011 (com 59% de geração nuclear, 28% de gás natural, 4,6 % de carvão, sendo as demais fontes: eólicas, hidrelétricas, biomassa, resíduos urbanos, e gás de altos fornos) como referência. Os resultados indicam que o desempenho ambiental dos sistemas de armazenamento está vinculado às matérias-primas para produzir eletricidade durante a fase de uso. A bateria de sódio-enxofre mostrou-se como a de melhor desempenho para todos os impactos analisados. As usinas reversíveis seguem em segundo lugar. Em relação à infraestrutura (extração de materiais, fabricação e implantação) e ciclo operação, os resultados indicam que os sistemas de baterias eletroquímicas têm maiores impactos do que os mecânicos devido ao menor número de ciclos e de energia fornecida na sua vida útil. Um outro artigo publicado (CASTRO et al. 2022) utilizando apenas critérios socioambientais e aplicando o modelo AHP *Fuzzy* TOPSIS apresentou resultados que corroboram a necessidade de maior investigação: os SAEs com usinas reversíveis e baterias de Na-S foram as que tiveram o melhor desempenho.

- O aumento de fabricação de baterias tem causado muitos impactos, inclusive geopolíticos, por causa da localização de fontes de metal (muitas vezes em locais politicamente instáveis ou em economias controladas pelo estado (Figura 6.1). Além disso, alguns desses materiais são preciosos (Ag) e usados como moeda, e outros são caros (In e Hg) ou raros (La e Ce). Para garantir os insumos necessários no fornecimento de metais como chumbo, zinco, lítio, alumínio, cobre etc., quantidades adicionais de minerais em novas descobertas devem ser geradas.

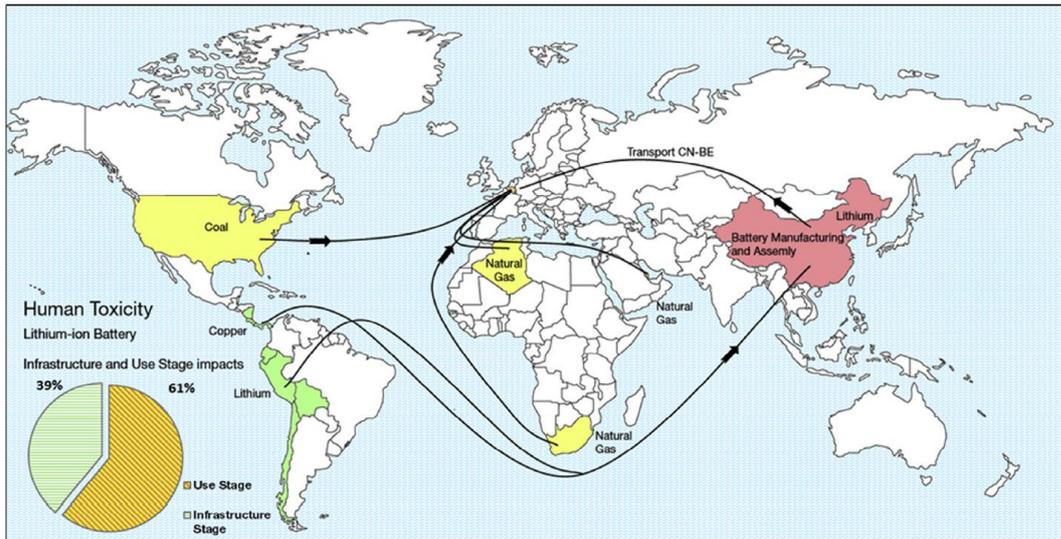


Figura 6.1 Distribuição espaço temporal da origem dos impactos

Fonte: Adaptado de Oliveira – 2015

- Associada a esses aspectos, a verificação dos índices de *commodities* públicas a partir de meados de 2018 mostra que o Co aumentou o preço três vezes nos últimos dois anos, Li em quatro vezes desde 2015, e os índices do mercado de ações de terras raras aumentaram dramaticamente (a China dominou a produção de terras raras em 80% do total global em 2016). Cerca de 85% do consumo mundial de chumbo é usado para a produção de baterias Pb-A. O consumo global de lítio na fabricação de baterias foi aproximadamente 35% do total minerado em 2015, chegando a 46% em 2017. A demanda mundial de cobalto para fabricação de baterias é cerca de 50% do total gerado, sendo o de grafite cerca de 10% da produção global em 2010 (OLIVEIRA et al., 2015; SANIJ et al., 2019).
- Os investimentos em energia renovável (inclusive os SAEs) são absolutamente necessários para reduzir emissões de GEE e as alterações climáticas, e dentro do possível reverter as perdas de biodiversidade. No entanto, a geração das tecnologias e infraestrutura necessárias tem criado ameaças para a biodiversidade. A mineração influencia potencialmente 50 milhões de km² da superfície da Terra, sendo que 8% impactam Áreas Protegidas, 7% de áreas prioritárias para a biodiversidade. A maioria das áreas de mineração (82%) tem como alvo os materiais necessários para produção de energia e se sobrepõem a áreas protegidas e áreas selvagens remanescentes (SANIJ et al., 2019) E, sem estratégias de planejamento,

essas novas ameaças à biodiversidade podem superar aquelas evitadas pelas mudanças climáticas.

6.2 Recomendações

Com base nos resultados encontrados pode-se citar alguns desdobramentos da pesquisa para aprofundamento dos resultados:

- Aplicação do modelo multicritério AHP *Fuzzy*-TPOISSIS considerando a avaliação espaço temporal do ciclo de vida SAEs;
- Incluir novas tecnologias, pelo menos as mais promissoras, nessa análise multicritério;
- Realizar uma análise mais exaustiva dos impactos socioambientais dos diversos SAEs e incluir a facilidade de reciclagem nas análises;
- Testar novos métodos híbridos como *Fuzzy* ELECTRE, PROMETHEE, dentre outros para uma comparação;
- Investir na aquisição de uma melhor quantificação e qualificação dos critérios, principalmente os socioambientais e econômicos, diminuindo a subjetividade e incerteza.
- A fabricação de baterias requer grandes quantidades de metais e não-metais diferentes. Os metais utilizados incluem chumbo (Pb), lítio (Li), níquel (Ni), cobalto (Co), zinco (Zn), manganês (Mn), magnésio (Mg), mercúrio (Hg), prata (Ag), cádmio (Cd), vanádio (V), potássio (K), titânio (Ti), cromo (Cr), sódio (Na), estanho (Sn), alumínio (Al), ferro (Fe), cobre (Cu), índio (In), silício (Si), antimônio (Sb), lantânio (La) e cério (Ce). Os não-metais usados incluem carbono ou grafite (C), flúor (F), cloro (Cl), bromo (Br), enxofre (S) e germânio (Ge). As baterias geram poluentes ambientais, incluindo resíduos, emissões de GEE e gases tóxicos, durante a fabricação, uso, transporte, coleta, armazenamento, tratamento, descarte e reciclagem, devido ao alto consumo de energia, em comparação com outros processos de armazenamento de energia. Os metais pesados usados na fabricação de baterias (por exemplo, Pb, Cd, Hg, As, Cr) são prejudiciais à saúde humana se a exposição exceder certos limites. É razoável supor que o uso de grandes baterias aumentará rapidamente na próxima geração, e o armazenamento de

energia de baterias em escala de rede (> 50 MW) vem sendo planejado. Seria altamente recomendável que sistemas de armazenamento sejam analisados com muito mais rigor em termos de seu impacto do ciclo de vida (SANIJ et al., 2019), o que mostra uma grande lacuna na pesquisa.

- Realizar um comparação espaço-temporal dos SAEs em diversos cenários de desenvolvimento das matrizes elétricas.

Referências bibliográficas

AGÊNCIA BRASIL, 2021 <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2021-06/governo-edita-mp-que-permite-aco-es-emergenciais-contr-a-apagao-eletrico>> acessado em maio de 2022.

ALBAWAB, M et al. - Sustainability Performance Index for Ranking Energy Storage Technologies using Multi-Criteria Decision-Making Model and Hybrid Computational Method <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101820> (2020)

ALCAMO, J, “Chapter Six the SAS Approach: Combining Qualitative and Quantitative Knowledge in Environmental Scenarios,” in Developments in Integrated Environmental Assessment, vol. 2, Elsevier, 2008, pp. 123–150.2008

ALVES, G. K. A. Sustentabilidade ambiental dos sistemas de transportes públicos em centros urbanos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia - IME. (2016).

ANEEL/MME/GIZ Sistemas de Energia do Futuro: Soluções regulatórias para redução ou limitação da geração na operação de tempo real - Aneel (NT- 094/2020-ANEEL)

BARIN, et al. Multicriteria Decision Making for Management of Storage Energy Technologies on Renewable Hybrid Systems - The Analytic Hierarchy Process and The Fuzzy Logic 2006

BARIN A, et al. – Multiple criteria analysis for energy storage selection. Energy Power Eng 2011.

BAUMANN et al. A review of multi-criteria decision-making approaches for evaluating energy storage systems for grid applications – 2019 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.016>

BRAGA, M. J. F.; BARRETO, J. M.; MACHADO, M. A. S. (1995). “Conceitos da Matemática Nebulosa na Análise de Risco”. Rio de Janeiro: Artes & Rabiscus. Cury, M. V. Q. Modelo Heurístico Neuro-fuzzy para avaliação humanística de projetos de transporte urbano. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro 1999;

BATTKE B, et al. A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications. Renew Sustain Energy Rev 2013.

CAF Corporación Andina de Fomento - Integração das Fontes Renováveis Intermitentes na América Latina: Brasil, Chile e Uruguai Editor: CAF: Mauricio T. Tolmasquim <http://scioteca.caf.com> - 2017

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

CANALLES et al. – Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicações e perspectivas, Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, DOI: 105902/2236117016002, 04/03/2015.

CASTRO, T et al. A perspectiva socioambiental na seleção de Sistemas de armazenamento de energia para o sistema elétrico de potência: Uma abordagem multicritério XXVI SNPTEE, 2022, Rio de Janeiro.

CHANG, D. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. European Journal of Operational Research, v.95, p. 649-655, 1996

CINELLI M et al. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. Ecol Indic 2014.

COSTA, H. G. IPÊ 1.0: guia do usuário. Niterói: UFF, 2004.

ÇOLAKA, M et al. Multi-criteria evaluation of energy storage technologies based on hesitant fuzzy information: A case study for Turkey Murat Çolaka , 2020 <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101211>

COWAN, K. R. et al. Forecasting the adoption of emerging energy technologies: managing climate change and evolving social values. In: PICMET 2009. Proceedings... Portland: PICMET, 2009. p. 3048-3058.

CPAMP - Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico Relatório Técnico do GT Metodologia da CPAMP – nº05-2019

DAIM TU, et al. Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity: quantifying expert opinions. Environ Innov Soc Transit 2012.

DANTAS et al. IPEA, VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL E POSSÍVEIS EFEITOS NO SETOR ELÉTRICO, 2018

DA SILVA, J SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SMART GRIDS - Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, 2020.

DECOURT et al. Electricity Storage Schlumberger Business Consulting Energy Institute - 2013

DEGHANI-SANIJ, et al. - Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>, 2019

DUNN et al., Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle Argonne National Laboratory 2014

ELETROBRÁS/CEPEL – Manual de Estudos de Inventário Hidrelétrico, 2007.

EPE, 2018 - Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo – Documento de apoio PNE 2050.

EPE, M. Flexibilidade e Capacidade: Conceitos para a incorporação de atributos ao planejamento. In: Report EPE-DEE-NT067/2018-r0, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, Brasil, 2018.

EPE, PDE Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, Relatório Final, 2022

EPE, PDE Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, Relatório Final, 2020

EPE, PDE Plano Decenal de Expansão de Energia 2028, Relatório Final, 2019

EPE, Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica, 2021.

EPE, Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). – EPE: Rio de Janeiro, 2016

EPE - Estudos de Avaliação Ambiental Integrada do rio Araguaia (EPE, 2009)

EPE, Estudos de Avaliação Ambiental Integrada do rio Paranaíba 2007

EPE, Estudos de Avaliação Ambiental Integrada do rio Doce 2008

FAYEGH, S., et al. - A review of energy storage types, applications and recent developments <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047> - Journey of energy storage – 2019

FERREIRA, W - Tese de mestrado UNISC, 2013 - PROINFA: uma contribuição para a diversificação da matriz energética no Rio Grande do Sul, 2013

FIGUEIRA, J. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. New York, NY: Springer; 2005

FILIPPO et al. Lógica *Fuzzy* para obtenção do índice de prioridade para intervenção no passivo ambiental de segmentos de rodovias pavimentadas. In Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET – XIX) Anais eletrônicos, CD. Recife., 2005

FLECKER, et al. Reducing adverse impacts of Amazon hydropower expansion, *Science* 375, 753–760 (2022).

FREITAS et al, Predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis: modelagem matemática e validação de modelos baseados em cinética e difusão unidimensional, *Revista Brasileira de Computação Aplicada* (ISSN 2176-6649), Passo Fundo, v. 9, n. 4, p. 76-89, dez. 2017

GAINES et al., A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs J.L. Sullivan and L. Gaines Center for Transportation Research Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 2010.

GOLDENZWEIG, N. Desafios e oportunidades da energia eólica na matriz energética brasileira: um estudo comparativo. Monografia (Bacharelado) – Faculdade de Economia, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2017.

GOMES, Da informação a tomada de decisão; Agregando valor através de métodos multicritério 2004

GOUDARD, B., 2001. Avaliação Ambiental de Alternativas de Projetos de Transporte Rodoviário com o uso da Lógica Fuzzy. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia - IME. GOUDARD (2001).

GRAHAM et al. - State of charge: energy storage in Latin America and the Caribbean – IDB 2021

GIZ - Tecnologias de armazenamento de energia - a chave para a transformação do sistema energético no Brasil, 2021.

GUITOUNI et al. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. Eur J Oper Res 1998.

HÄMÄLÄINEN, RP, et al. The analytic network process in energy policy planning. Socioecon Plan Sci 1986;20(6):399–405.1986

IDEC, 2021 <<https://idec.org.br/release/contratacao-de-termicas-emergenciais-deve-ser-suspensa-defende-idec>> acessado em maio de 2022

IHA – INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. The World’s Water Battery: Pumped Hydropower Storage and the Clean Energy Transition. IHA working paper, p.1-15, December 2018. Disponível em: <<https://n9.cl/bw9ol>>. Acesso em: 30 janeiro de 2022.

IHA, Advancing sustainable hydropower Annual Report 2019-2020

INSTITUTO ESCOLHAS – PSR - Quais os reais custos e benefícios das fontes de geração elétrica no Brasil? 2016

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Rethinking Energy 2017. Abu Dhabi: 2017

IRENA, Renewable capacity highlights – 2021 Disponível em: <www.irena.org>. Acesso em: 23 may. 2022.

IRENA, Costs and Markets to 2030. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, <https://www.irena.org/Publications/2017/Oct/ElectricityStorage-and-Renewables-Costs-and-Markets>, October. www.irena.org 2017

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. REthinking Energy 2017. Abu Dhabi: Irena, 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/EkjNAq>>.

JAMSHIDI, M., 1997. Applications of fuzzy logic: towards high machine intelligence quotient systems. Prentice Hall. (1997),

KAYA, T.; KAHRAMAN, C. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. Energy, v.35, p. 2517-2527, 2010

KOMAROVA, A. D. H. Transporte multimodal de cargas: análise de alternativas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia -2000

KRUGER et al., Sustainable use of excess wind power shares. Presented at the 7th international renewable energy storage conference and exhibition (IRES). Berlin, 2012.

KUMAR et al., Application of Hybrid AHP-TOPSIS Technique in Analyzing Material Performance of Silicon Carbide Ceramic Particulate Reinforced - <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00211-8> Silicon (2020)

LEPECKI et al - Inserção da Geração a Partir das Fontes Primárias Intermitentes (FPI) no Sistema Interligado Nacional (SIN) ,2018

LEPECKI, J et al - Armazenamento de Energia: Situação Atual, Perspectivas e Recomendações - COMITÊ DE ENERGIA DA ACADEMIA NACIONAL DE

LIMA JÚNIOR, F. R. et al. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. Gest. Prod., São Carlos, v. 22, n. 1, p. 17-34, Mar. 2015. (

LIU, G. Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.31, p. 611-621, 2014. ENGENHARIA, 2016.

LOSEKHAN et al., 2016 - NOVAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: DESAFIOS E OPORTUNIDADES – IPEA

MAJUMDER M. Multi criteria decision making. Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations. Singapore: Springer; p. 35–47 - 2015.

MARTINS, G - Modelo Fuzzy AHP-TOPSIS para avaliação e seleção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. 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.

MCNEILL, D et al. Fuzzy Logic: The Revolutionary Computer Technology that Is Changing Our World. 1a Edição. New York: Touchstone Rockefeller Center, 1994 (1994)

MELLO, A. F. P. Monitoramento e avaliação da regulamentação sobre recolhimento de alimentos no Brasil: proposição de indicadores e métricas. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Metrologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MMA, Implementação do sistema de logística reversa das baterias para aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída por Lei em 2010, 2019

MMA. ENREDD+: Estratégia Nacional para Redução das Emissões Provenientes do Desmatamento e da Degradação Florestal, Conservação dos Estoques de Carbono Florestal, Manejo Sustentável de Florestas e Aumento de Estoques de Carbono Florestal. 2015
<http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/redd/enredd.pdf>

MME, 2016 Lepecki 2018 Inserção da Geração a Partir das Fontes Primárias Intermitentes (FPI) no Sistema Interligado Nacional (SIN)

MONGIRD et al., Energy Storage Technology and Cost Characterization Report | Department of Energy. July.
<https://www.energy.gov/eere/water/downloads/energy-storage-technology-andcost-characterization-report2019>

MONGIRD, K - Energy Storage Technology and Cost Characterization Report – July 2019 - Pacific Northwest National Laboratory, operated by Battelle for the U.S. Department of Energy (DOE); Argonne National Laboratory; and Oak Ridge National Laboratory. (2019)

MOORE, J et al. The New Energy Outlook (NEO) is Bloomberg NEF's annual long-term scenario analysis on the future of the energy economy, 2020.

MURRANT, D et al. Assessing energy storage technology options using a multi-criteria decision analysis-based framework <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018>

MURY et al., O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DAS USINAS SOLAR FOTOVOLTAICAS NO BRASIL: UMA ANÁLISE DA LEGISLAÇÃO ESTADUAL VIGENTE, XXVI SNPTEE, 2022

NADEEM, F et al. Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems – IEEE Access 2019.

OBERSCHMIDT J. Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Göttingen: Universität Göttingen; 2010.

OLIVEIRA L et al- Environmental performance of electricity storage systems for grid applications, a life cycle approach - Energy Conversion and Management – 101, 2015.

PETRILLO, A et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system, 2016.

PLACE, Colombia to launch energy storage tender in 2021. BNamericas, October 6, 2020. <https://app.bnamericas.com/article/section/all/content/xrzlkem4w-colombia-postpones energy-st 2020>

POHEKAR SD et al. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2004.

RAUPP - Seleção multicritério de alternativa de localização de reservatórios e usinas hidroelétricas em bacias hidrográficas considerando parâmetros de indiferença e preferência - - Cadernos do IME – Série Estatística - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ ISSN impresso 1413-9022 / ISSN on-line 2317-4536 - v.43, p.1 - 17, 2017 DOI: 10.12957/cadest.2017.31283

RAZA SS et al, Sustainability index approach as a selection criterion for energy storage system of an intermittent renewable energy source. *Applied Energy* 2014.

ReCiPe Methodology, RIVM, CML, PRé Consultants, Radboud Universiteit Nijmegen; 2009

REN J. Sustainability prioritization of energy storage technologies for promoting the development of renewable energy: a novel intuitionistic fuzzy combinative distance-based assessment approach. *Renew Energy* 2018.

REN J, et al. Sustainability ranking of energy storage technologies under uncertainties. *J Clean Prod* 2018.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2015 - PRETENDIDA CONTRIBUIÇÃO NACIONALMENTE DETERMINADA PARA CONSECUÇÃO DO OBJETIVO DA CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA.

ROY B. Paradigms and challenge. Multiple criteria decision analysis, 233. New York, NY: Springer New York; 2016.

SAATY TL et al., The possibility of group choice: pairwise comparisons and merging functions. *Soc Choice Welfare* 2012.

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

SAATY, T.L., "An exposition of the AHP in reply to the paper 'Remarks on the Analytic Hierarchy Process'," *Management Science*, 36(3), 259-268, 1990.

SADOK, W, et al. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agron Sustain Dev* 2008.

SALKUTI, S Electrochemical batteries for smart grid applications *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol. 11, No. 3, June 2021

SCHMIDT O. et al. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies - Oliver Schmidt,^{1,2,5}, * Sylvain Melchior,³ Adam Hawkes,⁴ and Iain Staffell² - Joule 3, 81–100, January 16, 2019.

ŞENGÜL, Ü. et al. Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, v.75, p. 617-625, 2014.

SILVA, J SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SMART GRIDS - Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, 2020.

TRIANANTAPHYLLOU, et al. Multi-criteria decision making: an operations research approach. *Encycl Electr Electron Eng* 15:175–86.1998).

TRIANANTAPHYLLOU et al., "An evaluation of the AHP and the revised AHP when the eigen value method is used under a continuity assumption," *Computers and Industrial Engineering*, 2(1), 35-44, 1995.

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. Rio de Janeiro, 2016. 107p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Metrologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (2016)

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - Energy Storage Grand Challenge: Energy Storage Market Report - 2020.

VELLOSO, João Paulo, et al. - Opção pela energia hidrelétrica (e outras fontes renováveis), 2012.

VERGARA, S. C Metodologia do trabalho científico. 2002 São Paulo: Cortez

VERGARA, S. C Métodos de pesquisa em administração. 2005 São Paulo: Atlas

VIAN, A et al. Armazenamento de Energia - fundamentos, tecnologia e aplicações - Projeto de P&D Gerenciador para Sistemas de Geração Intermitente, Fontes Complementares e Armazenagem de Energia, 2021.

VO TTQ et al. Sustainability assessment of largescale storage technologies for surplus electricity using group multi-criteria decision analysis. *Clean Technol Environ Policy* 2017.

VON ALTROCK, C., 1995. Fuzzy logic and neurofuzzy applications explained. Prentice Hall (1995),

WALKER SB et al. Benchmarking and selection of power-to-gas utilizing electrolytic hydrogen as an energy storage alternative. *Int J Hydrog Energy* 2016;41(19):7717–31. (2015)

WANG et al. 2009 Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure Xue Wang, Gabrielle Gaustad*, Callie W. Babbitt, Kirti Richa <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.009>

WEI, L et al - Evaluation of grid energy storage system based on AHP-PROMETHEE-GAIA. 2016.

WILKENS I. Multikriterielle Analyse zur Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen - Von der Theorie zur praktischen Anwendung [Doktor der Ingenieurwissenschaften]. Berlin, Berlin: Technische Universität; 2012.

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

ZAVADSKAS EK et al. Hybrid multiple criteria decision-making methods: a review of applications for sustainability issues. Econ Res-Ekon Istraživanja 2016;29(1):857–87.

ZHAO, H et al. - Comprehensive assessment for battery energy storage systems based on fuzzy-MCDM considering risk preferences <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.129> (2019)

ZAKERI, B et al. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014>.

ZADEH, L.A., Fuzzy Logic, reprinted from IEEE Computer Mag., Apr.1988, pp.88- 93, University of California, Berkeley, California, USA: 2002

Apêndices

Apêndice 01 – Questionários dos especialistas

Especialista 1

Prezado especialista, CPF: 786711407 68

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo objetivo é avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas em um sistema elétrico de potência (SEP).

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

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/
REGULATÓRIA

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio
- Sódio-enxofre
- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação 1

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio	x				
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis					x

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede 2

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis	x				

- Maturidade 3

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

- Densidade energética 4

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis					x

- Eficiência 5

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis			x		

- Capacidade 6

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis					x

- Vida útil 7

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes

de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis					x

- Tempo de resposta 8

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos	x				
Íon-lítio	x				
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis			x		

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis		x			

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos	x				
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura, risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis	x				

- Aceitação social e política

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política				
Graus	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis			x		

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Usinas reversíveis				x	

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis		x			

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoeletricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis				x	

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis		x			

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis					x

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba	x				

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis			x		

Especialista 2

Prezado especialista,

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo o objetivo de avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas no sistema elétrico de potência (SEP).

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/
REGULATÓRIA

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio
- Sódio-enxofre
- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em

relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis		x			

- Maturidade

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

- Densidade energética

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre				x	

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Usinas reversíveis			x		

- Eficiência

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis			x		

- Capacidade

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Vida útil

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes

de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Tempo de resposta

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis				x	

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura, risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				x	

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis			x		

- Aceitação social e política/facilidade de licenciamento

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política/facilidade de licenciamento				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis			x		

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis				x	

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoelétricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis	x				

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis				x	

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério

procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis		x			

Especialista 3

Prezado especialista,

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo objetivo é avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas em um sistema elétrico de potência (SEP).

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

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/
REGULATÓRIA

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio
- Sódio-enxofre

- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos	x				
Íon-lítio	x				
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis			x		

- Maturidade

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis				x	

- Densidade energética

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim

quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
Graus	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

- Eficiência

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
Graus	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

- Capacidade

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
Graus	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

- Vida útil

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis					x

- Tempo de resposta

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos	x				
Íon-lítio	x				
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis			x		

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos

gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis		x			

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura,

risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis	x				

- Aceitação social e política

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política				
Graus	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis		x			

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis		x			

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoeletricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis					x

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério

procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis		x			

Especialista 4

Prezado especialista,

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo objetivo é avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas em um sistema elétrico de potência (SEP).

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

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/
REGULATÓRIA

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio

- Sódio-enxofre
- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	X				
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis					x

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis			X		

- Maturidade

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis					x

- Densidade energética

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim

quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis					x

- Eficiência

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis					x

- Capacidade

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis					x

- Vida útil

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis					x

- Tempo de resposta

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis		X			

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura, risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis	x				

- Aceitação social e política

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis		x			

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio					X

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Níquel-metal hidretos					X
Íon-lítio					X
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis				X	

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis					x

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoeletricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	X				
Níquel-metal hidretos	X				
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis					x

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos	x				
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			X		
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis	x				

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o

pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis	X				

Especialista 5

Prezado especialista,

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo objetivo é avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas em um sistema elétrico de potência (SEP).

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

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/REGULATÓRIA

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio

- Sódio-enxofre
- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

Comentário: Para o caso das Usinas Reversíveis o tempo de implementação pode variar com a concepção construtiva (utilização de reservatórios ou estruturas existentes, complexidade do circuito hidráulico, entre outros) bem como com o processo de outorga e licenciamento.

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

Comentário: Apesar da maior dependência com as condições locais (topográficas, geológicas, etc) quando comparado a outras tecnologias, é possível que existam regiões com condições favoráveis para a implantação de UHR e próximas a centros de consumo.

- Maturidade

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis				x	

Comentário: Entendo que a maturidade tecnológica pode representar:

1. Baixo potencial de evolução (desempenho e/ou custos).
2. Capacidade/habilidade de gestão de riscos, diagnóstico e solução de problemas.

Apesar de mais de um século de experiência, as usinas reversíveis ainda são objeto de aperfeiçoamento contínuo e desenvolvimento, cabendo destacar que estes empreendimentos são normalmente projetados e otimizados considerando as condições e necessidades específicas de cada caso.

Também é válido destacar que existem diferentes projetos, inovações e pesquisas de UHR não convencionais, como indicado em <https://publications.anl.gov/anlpubs/2022/05/175341.pdf>

- Densidade energética

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pb	x				
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis		x			

Comentário: Entendo que a depender a localização (e da disponibilidade de espaço), a densidade energética pode não ser a característica mais relevante para comparação ou seleção de tecnologias de armazenamento.

- Eficiência

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e

bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis				x	

Comentário: Avaliação considerando sistema novo. No entanto, entendo ser importante considerar a degradação do rendimento ao longo da vida útil de cada tecnologia.

- Capacidade

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Vida útil

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba	x				

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

Comentário: A vida útil pode depender da aplicação e uso do sistema de armazenamento no sistema (quantidade de ciclos de carga e descarga, etc)

- Tempo de resposta

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos	x				
Íon-lítio	x				
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis			x		

Comentário: Para o caso das UHR, o tempo de resposta pode depender da tecnologia e concepção construtiva (Exemplo: Grupos ternários operando em curto-circuito hidráulico de KOPS II na Áustria). Além disso, as UHR fornecem inércia (massa girante ou inercia sintética), característica também importante para a manutenção da frequência de rede.

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis		x			

Comentário: Os impactos das UHR são dependentes do porte e concepção construtiva. Vale destacar que alguns empreendimentos trazem benefícios associados aos usos múltiplos dos reservatórios (navegação, turismo, irrigação, controle de cheias).

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis			x		

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos

trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura, risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis			x		

- Aceitação social e política

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			X		
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis		x			

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus			X		
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis			X		

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis				x	

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoelétricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba	X				
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis		x			

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			X		
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis				x	

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério

procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	X				
Níquel-cádmio	X				
Níquel-metal hidretos	X				
Íon-lítio	X				
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis	X				

Especialista 6

Prezado especialista,

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo objetivo é avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas em um sistema elétrico de potência (SEP).

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

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/
REGULATÓRIA

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio
- Sódio-enxofre

- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Maturidade

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Densidade energética

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim

quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Eficiência

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Capacidade

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Vida útil

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Tempo de resposta

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos

gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura,

risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Aceitação social e política

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					X
Níquel-cádmio					X
Níquel-metal hidretos					X
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis		X			

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					X

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoelétricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
Graus	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					X

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento.

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério

procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis	X				

Especialista 7

Prezado especialista,

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo objetivo é avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas em um sistema elétrico de potência (SEP).

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

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

**TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/
REGULATÓRIA**

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio
- Sódio-enxofre

- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis					X

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus			X		
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis	X				

- Maturidade

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					X
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis			X		

- Densidade energética

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim

quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis	X				

- Eficiência

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			X		
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis		X			

- Capacidade

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis	X				

- Vida útil

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis					X

- Tempo de resposta

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis				X	

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis	X				

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis				X	

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura, risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis		X			

- Aceitação social e política

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			X		
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis		X			

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba			X		

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus			X		
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis				X	

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus			X		
Chumbo-ácido - Pba			X		
Níquel-cádmio			X		
Níquel-metal hidretos			X		
Íon-lítio			X		
Sódio-enxofre			X		
Usinas reversíveis				X	

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoelétricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus				X	
Chumbo-ácido - Pba				X	
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis				X	

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba			X		
Níquel-cádmio				X	
Níquel-metal hidretos				X	
Íon-lítio				X	
Sódio-enxofre				X	
Usinas reversíveis			X		

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis				X	

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério

procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		X			
Níquel-cádmio		X			
Níquel-metal hidretos		X			
Íon-lítio		X			
Sódio-enxofre		X			
Usinas reversíveis		X			

Especialista 8

Prezado especialista,

Você está recebendo um instrumento de coleta de dados cujo objetivo é avaliar e selecionar as alternativas de sistemas armazenamento de energia elétrica (SAE) que poderão ser empregadas em um sistema elétrico de potência (SEP).

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

Atenciosamente,

Tarcisio L C Castro / Prof. Rodrigo Calili

Objetivo do trabalho:

O objetivo deste instrumento de coleta de dados é avaliar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica em quatro dimensões:

TÉCNICA, ECONÔMICA, SOCIOAMBIENTAL e INSTITUCIONAL/
REGULATÓRIA

As tecnologias a serem avaliadas são:

- Chumbo-ácido - Pba
- Níquel-cádmio
- Níquel-metal hidretos
- Íon-lítio
- Sódio-enxofre
- Usinas reversíveis

Instruções de preenchimento do questionário

Para cada uma das seis tecnologias objeto da avaliação, solicitamos que seja assinalada apenas uma alternativa em relação a graduação do uso da tecnologia em relação a cada subcritério que se avaliará, e que seriam: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Como exemplo poderíamos considerar o subcritério maturidade tecnológica de cada sistema de armazenamento, onde a usina reversível teria importância muito alta, a de chumbo-ácido teria grau alto, a de íon-lítio médio, a de níquel cádmio médio, níquel metal hidretos grau baixo, e sódio enxofre muito baixo, por hipótese.

Tecnologias de SAEs	Maturidade tecnológica				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio			x		
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis					x

Dimensão Técnica:

- Tempo de implementação

O subcritério procura comparar qualitativamente o período gasto durante a implantação dos SAEs. Isto é, dependendo do caso a agilidade de implantação pode fazer a diferença. Por exemplo um SAE pode ter um tempo de licenciamento ou de obras maior do que outros em função de suas dimensões.

Tecnologias de SAEs	Tempo de implementação				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Facilidade de descentralização e de conexão à rede

Esse critério visa avaliar a facilidade de se adotar uma tecnologia de SAE mais próxima aos centros de consumo de energia e de fácil integração com o sistema elétrico.

Tecnologias de SAEs	Facilidade de descentralização e de conexão à rede				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio					x
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis			x		

- Maturidade

Avalia o grau de evolução de uma dada tecnologia de SAE, considerando o estado-da-arte em nível mundial, sua aplicação histórica e disponibilidade comercial. Também deve ser avaliado se existem possibilidades de melhorias tecnológicas que aumentem a sua eficiência ou custo. Assim quanto mais tempo a tecnologia está no mercado comercialmente maior valor, e também se tem possibilidade de melhorar aspectos relativos à produção, com menor consumo de energia, ou com possibilidade de reciclagem.

Tecnologias de SAEs	Maturidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba					x
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Densidade energética

Esse critério avalia a quantidade de energia que um SAE é capaz de fornecer por unidade de massa, para uma dada taxa de descarga (ou Wh/kg). Além de conseguir guardar energia, as soluções precisam ter dimensões compatíveis com sua aplicação, tanto os sistemas eletroquímicos como os sistemas mecânicos. Assim quanto menor as dimensões e maior a quantidade de energia melhor, mais alto o grau.

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	

Tecnologias de SAEs	Densidade energética				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis				x	

- Eficiência

É medida pela relação entre a energia líquida que é injetada no sistema (descarga, no caso da bateria, e turbinamento, no caso da usina reversível) e a energia líquida usada para carregar os SAEs (carregamento, no caso da bateria, e bombeamento no caso da reversível). Quanto melhor esta relação, mais alto o grau de eficiência do sistema.

Tecnologias de SAEs	Eficiência				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis				x	

- Capacidade

Este subcritério avalia a capacidade do SAE em relação a quantidade de energia que ele consegue armazenar em cada ciclo de carga e descarga. Quanto maior a capacidade melhor o sistema.

Tecnologias de SAEs	Capacidade				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Graus					
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis				x	

- Vida útil

Esse critério procura avaliar a extensão de ciclo de vida de cada tecnologia, desde a sua implantação até o estágio de descomissionamento do SAE. Assim uma vida útil alta representa uma tecnologia que possui vai operar por muitos anos, antes de seu descomissionamento. Grau médio ou moderado operar alguns anos antes de parar de fornecer serviços elétricos, e grau baixo significa que seu ciclo de vida é de poucos anos. Os demais graus são valores intermediários.

Tecnologias de SAEs	Vida útil				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis					x

- Tempo de resposta

É o tempo necessário para que o SAE comece a fornecer energia quando demandado [s, min]. Muitos dos serviços que se esperam que os sistemas de armazenamento possam oferecer dependem do tempo de resposta (*backup*, controle de frequência, suporte à rede etc.).

Tecnologias de SAEs	Tempo de resposta				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre			x		
Usinas reversíveis					x

Dimensão Socioambiental

- Emissão de gases de efeito estufa

Emissão de gases emitida nos processos para das diversas fases do seu ciclo de vida das SAEs. O CO₂eq é a unidade que expressa o impacto de cada um dos gases de efeito estufa em termos de quantidade de CO₂ associada a cada um dos SAEs analisados.

Tecnologias de SAEs	Emissão de gases				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio					x
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis		x			

- Uso da terra e conflitos

Esses impactos podem ser identificados tanto na fase de obtenção dos recursos naturais, como na fase de fabricação/implantação, e até mesmo na fase de operação. Deve refletir a área necessária para a cada uma das fases de implantação dos SAEs, além do tipo de área afetada e sua localização, pois podem ser gerados conflitos nas atividades econômicas, populações frágeis ou tradicionais, e no uso dos recursos naturais como água e solos. Pode ser expresso em m² de área afetada, mas deve refletir também o grau de conflito que pode gerar, por exemplo quanto maior o valor da terra ou a atividade econômica, ou mesmo se existem populações frágeis ou tradicionais afetadas.

Tecnologias de SAEs	Uso da terra e conflitos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba	x				
Níquel-cádmio	x				
Níquel-metal hidretos	x				
Íon-lítio	x				
Sódio-enxofre	x				
Usinas reversíveis				x	

- Riscos à saúde humana e aos trabalhadores

Relacionado aos impactos na saúde humana dos trabalhadores e das pessoas que estejam próximas aos canteiros de trabalho nas fases de extração, fabricação, operação ou descarte do SAE. Inclui, por exemplo, o potencial de intoxicação dos trabalhadores, perigos químicos, perigos de fogo e explosão, trabalho em altura, risco de acidentes ocupacionais fatais, emissão de poeiras, e outros perigos e riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, bem como das pessoas no entorno.

Tecnologias de SAEs	Riscos à saúde humana e aos trabalhadores				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis		x			

- Aceitação social e política

A legislação ambiental tem sido cada vez mais restritiva no que concerne ao licenciamento de projetos. Esse critério visa estabelecer uma comparação no que tange a aceitação da sociedade relativamente às opções de SAE. A aceitação pública ao investimento em novas tecnologias é um fator de risco que pode interferir na adoção das tecnologias de SAEs.

Tecnologias de SAEs	Aceitação social e política				
	muito baixa	baixa	média	alta	muito alta
Chumbo-ácido - Pba			x		
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio			x		
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis			x		

- Impactos aos ecossistemas e na vida selvagem

Impactos aos ecossistemas/ na vida selvagem - A obtenção dos materiais para a fabricação dos equipamentos e instalação dos SAEs podem gerar impactos relevantes do ponto de vista socioambiental em áreas sensíveis, bem como conflitos de usos dos recursos naturais. É importante lembrar que essa avaliação deve considerar toda a vida útil do SAE, desde a extração de minerais/recursos naturais até o descarte de resíduos na etapa de descomissionamento. Quanto maior a área afetada, habitats relevância do bioma (por exemplo na Mata Atlântica) e os recursos naturais necessários, maior o impacto provocado.

Tecnologias de SAEs	Impactos nos ecossistemas e na vida selvagem				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis				x	

Dimensão econômica

- Risco de investimento

Esse critério procura refletir os riscos associados a implantação dos SAEs no que tange: a sua aprovação técnica e socioambiental, de sobrecustos advindos de alteração da regulamentação, risco de câmbio, entre outros.

Tecnologias de SAEs	Risco para o investimento				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos				x	
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre				x	
Usinas reversíveis				x	

- Contribuição para a economia

Esse critério procura avaliar as contribuições para o atendimento da demanda de potência/energia elétrica determinada pela carga, onde os SAEs estarão operando, e em alguns casos até mesmo reduzindo despacho de usinas termoelétricas da matriz elétrica.

Tecnologias de SAEs	Contribuição para a economia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos			x		
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis				x	

- Custo nivelado de energia

Representa o custo por energia gerada, definido em unidades monetárias descontadas, da implantação e operação de um sistema de armazenamento durante todo seu ciclo de vida, e normalmente expressa em unidade monetária por Wh.

Tecnologias de SAEs	Custo nivelado de energia				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba					
Níquel-cádmio					
Níquel-metal hidretos					
Íon-lítio					
Sódio-enxofre					
Usinas reversíveis					

Dimensão institucional/regulatória

- Simplicidade do licenciamento ambiental/ Riscos de atrasos

Esse critério visa avaliar a regulamentação de licenciamento no que tange aos procedimentos e abrangências dos estudos necessários a obtenção das autorizações nas diversas etapas desde a implantação até o descarte, com o descomissionamento dos SAEs. O que certamente se refletirá na maior ou menor facilidade de obter as licenças ambientais exigidas pela regulamentação brasileira, e no limite levar a inviabilização do empreendimento

Tecnologias de SAEs	Simplicidade de licenciamento/riscos de atrasos				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba				x	
Níquel-cádmio				x	
Níquel-metal hidretos					x
Íon-lítio				x	
Sódio-enxofre					x
Usinas reversíveis		x			

- Existência de políticas públicas de incentivo/regulação.

Este subcritério avalia se existem diferenças relativas entre as tecnologias quanto às políticas públicas federais e estaduais de fomento econômico como subsídios, incentivos fiscais, redução de tarifas de conexão e distribuição, condições de financiamento diferenciadas e ou minimamente uma regulamentação para o pagamento dos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento. Esse critério

procura avaliar se alguns dos SAEs têm maior ou menor facilidade de sua aplicação em função da regulamentação existente.

Tecnologias de SAEs	Existência de políticas públicas				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Graus					
Chumbo-ácido - Pba		x			
Níquel-cádmio		x			
Níquel-metal hidretos		x			
Íon-lítio		x			
Sódio-enxofre		x			
Usinas reversíveis	x				

Apêndice 02 Dados das referências sobre desempenho de SAEs

1) BAUMMAN et al. 2019

SAEs	Critérios			
	Eficiência (%)	Densidade energética (Wh/l)	Vida útil (anos)	Capex (Euros/Kwh)
A1	76	33	18	230
A2	81	57	12	1200
A3	81	57	12	1200
A4	91	115	15	484
A5	86	148	14	295
A6	75	----	40-60	1200

2) SANIJ et al. 2019

SAEs	Critérios		
	Eficiência (%)	Capex (US\$/KW)	GEE (kg/kg)
A1	76	450	2-5
A2	81	1000	7,5-8
8A3	81	1000	9-18
A4	91	2600	7,5-18
A5	86	2000	10-18
A6	75	3000	-----

3) NADEEM et al. 2019

SAEs	Critérios			
	Capacidade (MW)	Densidade energética (Wh/kg)	Vida útil (anos)	Maturidade
A1	<20	30-50	5-15	Madura
A2	<40	15-55	10-20	Madura
A3	<0,03	60-80	5-10	Madura
A4	0,05-100	120-230	20-25	Comercial
A5	10-34	150-240	10-15	Comercial
A6	10-5000	1,0	45	Madura

4) FERREIRA et al. 2013

SAEs	Critérios				
	Capacidade (MW)	Eficiência (%)	Vida útil (anos)	CAPEX(US\$/KW)	Maturidade (grau de 1 a 5)
A1	0,01-50	70-92	10	300-600	5
A2	0-46	60-70	5-20	500-1500	4
A3	0,01	60-66	3-15	-----	4
A4	0,1-50	85-90	5-20	1200-4000	4
A5	0,05-34	75-90	15	1000-3000	4
A6	100-5000	70-87	40-100	600-2000	5

5) ZAKERY et al. 2015

SAEs	Critérios					
	Capacidade (MW)	Eficiência (%)	Vida útil (anos)	Densidade energética (Wh/kg)	LCOE (Euros/MW/h) Bulk energy	LCOE (Euros/MW/h) T&D support
A1	<20	70-90	10	30-50	323	290
A2	<40	60-70	60-73	15-300	421	337
A3	-----	60-66	65-75	80-200	-----	----
A4	<0,01	85-90	85-95	150-350	251	617
A5	0,05-8	75-90	75-90	150-250	244	249
A6	10- 5000	70-87	70-82	-----	120	-----

5) FAYEGH et al. 2020

SAEs	Critérios		
	Densidade energética (Wh/m ³)	CAPEX (US\$/MW)	Eficiência (%)
A1	50-80	300-600	65-80
A2	15-150	500-1500	60-90
A3	80-200	-----	65-75
A4	90-750	1200-4000	85-98
A5	150-300	1000-3000	70-85
A6	0,2- 2,0	500-4600	65-85

Apêndice 3 – Dados das referências e julgamento dos especialistas

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
T1	X1	1	1	3	1	4	5
	X2	1	1	1	1	1	4
	X3	1	1	1	1	2	4
	X4	1	2	2	3	4	5
	X5	2	2	2	2	2	4
	X6	4	3	2	3	4	5
	X7	4	4	4	4	4	5
	X8	1	1	1	1	1	5
	Mínimo	1	1	1	1	1	4
	Mediana	1	1,5	2	1,5	3	5
	Máximo	4	4	4	4	4	5
T2	X1	5	5	5	5	5	1
	X2	4	3	3	4	3	2
	X3	2	2	2	2	2	3
	X4	4	3	3	4	3	3
	X5	4	4	4	4	4	3
	X6	3,71	3,71	3,71	4	3,57	2,14
	X7	3	4	4	4	3	1
	X8	5	5	5	5	5	2
	Mínimo	2	2	2	2	2	1
	Mediana	4	3,855	3,855	4	3,285	2,07
	Máximo	5	5	5	5	5	3
T3	X1	2	2	3	3	1	5
	X2	5	4	4	3	2	4
	X3	4	4	4	4	4	3
	X4	5	5	5	4	3	5
	X5	4	3	3	3	4	4
	X6	4,28	3,86	3,71	3,42	2,86	3,71
	X7	5	4	4	4	4	3
	X8	5	5	3	3	2	2
	Mínimo	2	2	3	3	1	2
	Mediana	4,64	4	3,855	3,21	2,93	3,855
	Máximo	5	5	5	4	4	5
T4	X1	30	15	60	120	150	1
	X2						
	X3						
	X4						
	X5						
	X6						
	X7						
	X8	50	55	80	230	240	1
	Mínimo	30	15	60	120	150	1
	Mediana	40	35	70	175	195	1

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
	Máximo	50	55	80	230	240	1
T5	X1	70	60	60	85	75	70
	X2						
	X3						
	X4						
	X5						
	X6						
	X7						
	X8	92	70	66	90	90	87
	Mínimo	70	60	60	85	75	70
	Mediana	81	65	63	87,5	82,5	78,5
	Máximo	92	70	66	90	90	87
T6	X1	0,01	0,01	0,01	0,05	10	10
	X2						
	X3						
	X4						
	X5						
	X6						
	X7						
	X8	20	40	0,013	100	34	5000
	Mínimo	0,01	0,01	0,01	0,05	10	10
	Mediana	10,005	20,005	0,0115	50,025	22	2505
	Máximo	20	40	0,013	100	34	5000
T7	X1	5	10	5	20	10	40
	X2						
	X3						
	X4						
	X5						
	X6						
	X7						
	X8	15	20	10	25	15	60
	Mínimo	5	10	5	20	10	40
	Mediana	10	15	7,5	22,5	12,5	50
	Máximo	15	20	10	25	15	60
T8	X1	1	1	1	1	2	3
	X2	3	3	3	4	3	4
	X3	1	1	1	1	1	5
	X4	5	5	5	5	4	3
	X5	1	1	1	1	1	3
	X6	2,42	2,71	2,57	2,71	2,14	3,85
	X7	4	4	4	4	4	4
	X8	2	4	3	3	3	5
	Mínimo	1	1	1	1	1	3
	Mediana	2,21	2,855	2,785	2,855	2,57	3,925
	Máximo	5	5	5	5	4	5

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
SE1	X1	2	7,5	9	7,5	10	12
	X2						
	X3						
	X4						
	X5						
	X6						
	X7						
	X8	5	8	18	18	18	20
	Mínimo	2	7,5	9	7,5	10	12
	Mediana	3,5	7,75	13,5	12,75	14	16
	Máximo	5	8	18	18	18	20
SE2	X1	1	1	1	2	2	5
	X2	2	2	2	2	2	4
	X3	4	4	4	4	4	2
	X4	2	2	2	2	2	5
	X5	2	2	2	2	2	3
	X6	2	2	2	2	2	4
	X7	2	2	2	2	2	4
	X8	2	2	2	2	2	4
	Mínimo	1	1	1	2	2	2
	Mediana	2	2	2	2	2	4
	Máximo	4	4	4	4	4	5
SE3	X1	3	3	3	3	4	1
	X2	4	4	4	4	3	3
	X3	5	5	5	5	3	1
	X4	4	3	3	3	4	1
	X5	3	2	2	2	3	3
	X6	4	3	3	4	3	2
	X7	4	3	3	4	3	2
	X8	4	4	3	4	2	2
	Mínimo	3	2	2	2	2	1
	Mediana	4	3	3	4	3	2
	Máximo	5	5	5	5	4	3
SE4	X1	4	4	4	4	3	3
	X2	3	3	3	4	3	3
	X3	4	4	4	4	4	3
	X4	4	4	4	4	4	2
	X5	3	3	3	3	3	2
	X6	5	5	4	4	2	4
	X7	3	3	3	3	3	2
	X8	2	4	3	3	4	3
	Mínimo	2	3	3	3	2	2
	Mediana	3,5	4	3,5	4	3	3
	Máximo	5	5	4	4	4	4
SE5	X1	3	3	3	3	3	4

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
	X2	2	2	2	2	2	4
	X3	4	4	4	4	4	2
	X4	4	5	5	5	3	4
	X5	3	2	2	2	3	3
	X6	3,28	3,29	3	3,29	2,86	3,57
	X7	3	3	3	3	3	4
	X8	4	4	3	4	2	4
	Mínimo	2	2	2	2	2	2
	Mediana	3,14	3,145	3	3,145	3	4
	Máximo	4	5	5	5	4	4
E1	X1	2	2	2	3	4	2
	X2	3	3	3	3	4	4
	X3	3	3	3	3	3	2
	X4	1	2	2	3	3	5
	X5	2	2	2	2	2	4
	X6	4	4	4	4		5
	X7	3	3	3	3	3	2
	Mínimo	1	2	2	2	2	2
	Mediana	3	3	3	3	3	4
	Máximo	4	4	4	4	4	5
E2	X1	3	3	3	3	3	4
	X2	3	3	3	3	2	4
	X3	3	3	3	3	3	5
	X4	1	1	1	4	4	5
	X5	1	2	2	3	2	4
	X6	4	4	4	4		5
	X7	4	4	4	4	4	4
	Mínimo	1	1	1	3	2	4
	Mediana	3	3	3	3	3	4
	Máximo	4	4	4	4	5	5
E3	X1	250	350	350	550	180	60
	X2						
	X3						
	X4						
	X5						
	X6						
	X7						
	Mínimo	250	350	350	550	180	60
	Mediana	312,5	425	425	615	240	130
	Máximo	375	500	500	680	300	200
IR1	X1	2	2	3	3	4	5
	X2	3	3	3	3	3	4

Subcritério	Especialista	Chumbo- ácido - Pba	Níquel- cádmio	Níquel- metal hidretos	Íon- lítio	Sódio- enxofre	Usinas reversíveis
	X3	5	5	5	5	4	3
	X4	3	3	3	3	3	1
	X5	3	2	2	2	3	4
	X6	3	2,83	3	3	3,17	3,5
	X7	2	2	2	2	2	4
	X8	3	2,83	3	3	3,17	3,5
	Mínimo	2	2	2	2	2	1
	Mediana	3	2,83	3	3	3,085	3,75
	Máximo	5	5	5	5	4	5
IR2	X1	1	1	2	3	3	3
	X2	2	2	2	2	2	2
	X3	3	3	3	3	3	2
	X4	2	2	2	2	2	1
	X5	2	2	2	2	2	2
	X6	2	2	2	2	2	1
	X7	2	2	2	2	2	2
	X8	2	2	2,14	2,29	2,67	1,89
	Mínimo	1	1	2	2	2	1
	Mediana	2	2	2	2	2	2
	Máximo	3	3	3	3	3	3

Apêndice 4 Julgamento dos especialistas

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
T1	X1	1	1	3	1	4	5
	X2	1	1	1	1	1	4
	X3	1	1	1	1	2	4
	X4	1	2	2	3	4	5
	X5	2	2	2	2	2	4
	X6	4	3	2	3	4	5
	X7	4	4	4	4	4	5
	X8	1	1	1	1	1	5
	Mínimo	1	1	1	1	1	4
	Mediana	1	1,5	2	1,5	3	5
	Máximo	4	4	4	4	4	5
T2	X1	5	5	5	5	5	1
	X2	4	3	3	4	3	2
	X3	2	2	2	2	2	3
	X4	4	3	3	4	3	3
	X5	4	4	4	4	4	3
	X6	3,71	3,71	3,71	4	3,57	2,14
	X7	3	4	4	4	3	1
	X8	5	5	5	5	5	2
	Mínimo	2	2	2	2	2	1
	Mediana	4	3,855	3,855	4	3,285	2,07
	Máximo	5	5	5	5	5	3
T3	X1	2	2	3	3	1	5
	X2	5	4	4	3	2	4
	X3	4	4	4	4	4	3
	X4	5	5	5	4	3	5
	X5	4	3	3	3	4	4
	X6	4,28	3,86	3,71	3,42	2,86	3,71
	X7	5	4	4	4	4	3
	X8	5	5	3	3	2	2
	Mínimo	2	2	3	3	1	2
	Mediana	4,64	4	3,855	3,21	2,93	3,855
	Máximo	5	5	5	4	4	5
T4	X1	3	3	2	4	5	5
	X2	2	2	4	5	4	3
	X3	4	4	4	4	4	3
	X4	4	3	3	5	5	5
	X5	1	3	3	4	4	2
	X6	2,42	2,86	3,14	4,29	4,14	3,29
	X7	2	3	3	4	3	1
	X8	5	2	3	4	4	4

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
	Mínimo	1	2	2	4	3	1
	Mediana	2,71	3	3	4	4	3,145
	Máximo	5	4	4	5	5	5
T5	X1	4	4	4	5	5	3
	X2	2	3	3	4	3	3
	X3	4	4	4	4	4	3
	X4	3	2	2	5	5	5
	X5	3	4	4	4	3	4
	X6	3,29	3,29	3,29	4,29	4	3,43
	X7	3	4	4	4	4	2
	X8	4	2	3	4	4	4
	Mínimo	2	2	2	4	3	2
	Mediana	3,145	3,645	3,645	4	4	3,215
	Máximo	4	4	4	5	5	5
T6	X1	3	3	4	4	4	5
	X2	3	3	3	4	2	2
	X3	4	4	4	4	4	3
	X4	2	2	2	4	4	5
	X5	2	2	2	3	2	5
	X6	2,86	2,71	3	3,86	3,29	3,71
	X7	2	3	3	4	3	1
	X8	4	2	3	4	4	4
	Mínimo	2	2	2	3	2	1
	Mediana	2,93	2,855	3	4	3,645	3,855
	Máximo	4	4	4	4	4	5
T7	X1	3	3	3	4	5	5
	X2	3	3	3	4	2	5
	X3	3	3	3	3	3	5
	X4	3	2	2	5	4	5
	X5	1	2	2	2	2	5
	X6	2,43	2,86	2,71	3,71	3,5	5
	X7	2	3	3	4	3	5
	X8	2	4	3	2	2	5
	Mínimo	1	2	2	2	2	5
	Mediana	2,715	3	3	3,855	3	5
	Máximo	3	4	3	5	5	5
T8	X1	1	1	1	1	2	3
	X2	3	3	3	4	3	4
	X3	1	1	1	1	1	5
	X4	5	5	5	5	4	3
	X5	1	1	1	1	1	3
	X6	2,42	2,71	2,57	2,71	2,14	3,85
	X7	4	4	4	4	4	4

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
	X8	2	4	3	3	3	5
	Mínimo	1	1	1	1	1	3
	Mediana	2,21	2,855	2,785	2,855	2,57	3,925
	Máximo	5	5	5	5	4	5
SE1	X1	3	3	3	3	3	2
	X2	3	3	3	3	2	4
	X3	4	4	4	4	4	2
	X4	2	2	2	2	2	2
	X5	3	2	2	2	2	2
	X6	3	3	2,71	2,71	2,57	2,14
	X7	2	2	2	2	2	1
	X8	4	5	3	3	3	2
	Mínimo	2	2	2	2	2	1
	Mediana	3	3	2,855	2,855	2,285	2
	Máximo	4	5	4	4	4	4
SE2	X1	1	1	1	2	2	5
	X2	2	2	2	2	2	4
	X3	4	4	4	4	4	2
	X4	2	2	2	2	2	5
	X5	2	2	2	2	2	3
	X6	2	2	2	2	2	4
	X7	2	2	2	2	2	4
	X8	2	2	2	2	2	4
	Mínimo	1	1	1	2	2	2
	Mediana	2	2	2	2	2	4
	Máximo	4	4	4	4	4	5
SE3	X1	3	3	3	3	4	1
	X2	4	4	4	4	3	3
	X3	5	5	5	5	3	1
	X4	4	3	3	3	4	1
	X5	3	2	2	2	3	3
	X6	4	3	3	4	3	2
	X7	4	3	3	4	3	2
	X8	4	4	3	4	2	2
	Mínimo	3	2	2	2	2	1
	Mediana	4	3	3	4	3	2
	Máximo	5	5	5	5	4	3
SE4	X1	4	4	4	4	3	3
	X2	3	3	3	4	3	3
	X3	4	4	4	4	4	3
	X4	4	4	4	4	4	2
	X5	3	3	3	3	3	2
	X6	5	5	4	4	2	4

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
	X7	3	3	3	3	3	2
	X8	2	4	3	3	4	3
	Mínimo	2	3	3	3	2	2
	Mediana	3,5	4	3,5	4	3	3
	Máximo	5	5	4	4	4	4
SE5	X1	3	3	3	3	3	4
	X2	2	2	2	2	2	4
	X3	4	4	4	4	4	2
	X4	4	5	5	5	3	4
	X5	3	2	2	2	3	3
	X6	3,28	3,29	3	3,29	2,86	3,57
	X7	3	3	3	3	3	4
	X8	4	4	3	4	2	4
	Mínimo	2	2	2	2	2	2
	Mediana	3,14	3,145	3	3,145	3	4
	Máximo	4	5	5	5	4	4
E1	X1	2	2	2	3	4	2
	X2	3	3	3	3	4	4
	X3	3	3	3	3	3	2
	X4	1	2	2	3	3	5
	X5	2	2	2	2	2	4
	X6	4	4	4	4		5
	X7	3	3	3	3	3	2
	X8	4	4	4	4	4	4
	Mínimo	1	2	2	2	2	2
	Mediana	3	3	3	3	3	4
	Máximo	4	4	4	4	4	5
E2	X1	3	3	3	3	3	4
	X2	3	3	3	3	2	4
	X3	3	3	3	3	3	5
	X4	1	1	1	4	4	5
	X5	1	2	2	3	2	4
	X6	4	4	4	4		5
	X7	4	4	4	4	4	4
	X8	2	2	3	3	5	4
	Mínimo	1	1	1	3	2	4
	Mediana	3	3	3	3	3	4
	Máximo	4	4	4	4	5	5
E3	X1	2	2	3	3	3	2
	X2	4	4	4	2	5	1
	X3	5	5	5	5	4	3
	X4	1	1	1	3	4	5
	X5	3	3	3	3	4	2
	X6	3	3	3,33	3,33	4	2,67

Subcritério	Especialista	Chumbo-ácido - Pba	Níquel-cádmio	Níquel-metal hidretos	Íon-lítio	Sódio-enxofre	Usinas reversíveis
	X7	3	4	4	4	4	3
	X8	3	3	3,33	3,33	4	2,67
	Mínimo	1	1	1	2	3	1
	Mediana	3	3	3,33	3,165	4	2,67
	Máximo	5	5	5	5	5	5
IR1	X1	2	2	3	3	4	5
	X2	3	3	3	3	3	4
	X3	5	5	5	5	4	3
	X4	3	3	3	3	3	1
	X5	3	2	2	2	3	4
	X6	3	2,83	3	3	3,17	3,5
	X7	2	2	2	2	2	4
	X8	3	2,83	3	3	3,17	3,5
	Mínimo	2	2	2	2	2	1
	Mediana	3	2,83	3	3	3,085	3,75
	Máximo	5	5	5	5	4	5
IR2	X1	1	1	2	3	3	3
	X2	2	2	2	2	2	2
	X3	3	3	3	3	3	2
	X4	2	2	2	2	2	1
	X5	2	2	2	2	2	2
	X6	2	2	2	2	2	1
	X7	2	2	2	2	2	2
	X8	2	2	2,14	2,29	2,67	1,89
	Mínimo	1	1	2	2	2	1
	Mediana	2	2	2	2	2	2
	Máximo	3	3	3	3	3	3