

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

ANTONIO PEREIRA DOS SANTOS FILHO

**METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA
DE BATERIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Curitiba

2020

ANTONIO PEREIRA DOS SANTOS FILHO

**METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA
DE BATERIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos - SECA, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Débora Cintia Marcilio
Coorientadora: Profa. Dra. Ana Paula Oening

Curitiba

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S237m

Santos Filho, Antonio Pereira dos

Metodologia multicritério para definição da tecnologia de baterias para armazenamento de energia [recurso eletrônico] / Antonio Pereira dos Santos Filho. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2020.

Orientadora: Débora Cintia Marcilio.

Coorientadora: Ana Paula Oening.

1. Energia - Armazenamento. 2. Geração distribuída de energia elétrica. I. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. II. Instituto de Engenharia do Paraná. III. Marcilio, Débora Cintia. IV. Oening, Ana Paula. V. Título.

CDD: 621.31

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

ANTONIO PEREIRA DOS SANTOS FILHO

METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA DE BATERIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:

Débora C. Marcilio

ORIENTADOR(A): Prof. Dr.ª Débora Cintia Marcilio
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

Prof. Dr. Patricio Rodolfo Impinnisi

Prof. Dr. Patricio Rodolfo Impinnisi
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

Prof. Dr. EdUARdo Kazumi Yamakawa

Prof. Dr. EdUARdo Kazumi Yamakawa
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

Prof. Dr. CleverSON Luiz da Silva Pinto

Prof. Dr. CleverSON Luiz da Silva Pinto
Copel Distribuição S.A.

Curitiba, 05 de maio de 2020.

A minha amada esposa Geovana e filhas Amanda e Nathália, pelo amor, generosidade, paciência nos momentos mais difíceis e por me fazer querer ser uma pessoa melhor. Sem vocês essa conquista não seria possível.

Aos meus pais Antonio e Esther, meus irmãos Solange (*in memoriam*), Simone e Roni por toda orientação e amor disponibilizados ao longo da minha vida.

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças.”

Leon C. Megginson

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me guiar e mostrar o caminho para me tornar instrumento de sua obra.

As professoras Dra. Débora e Dra. Ana pela oportunidade, paciência, coerência e espírito crítico que tanto contribuíram para melhoria deste trabalho.

Ao LACTEC, técnicos e pesquisadores, por acreditarem no projeto e incentivarem a realização.

Ao Dr. Eduardo F. Sciarra, por todo apoio demonstrado durante minha vida acadêmica, profissional e pessoal.

A todos meu respeito, admiração e sincero muito obrigado.

RESUMO

Informações com múltiplos critérios influenciam as escolhas para tomada de decisão e a dificuldade aumenta em função da complexidade dos problemas num campo onde a análise das escolhas e alternativas também geram incertezas. Tendência mundial e brasileira, o uso crescente do armazenamento de energia em baterias vem contribuindo com o avanço tecnológico no setor elétrico. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia multicritério para definição da melhor alternativa tecnológica de armazenamento de energia, utilizando o processo de análise de decisão hierárquica - *Analytic Hierarchy Process* (AHP), e que permita, a partir do estudo da bibliografia, reuniões com especialistas e informações fornecidas pelos fabricantes, escolher o melhor equipamento. Utilizando-se da ferramenta AHP, busca-se um modelo para auxiliar os decisores no processo de tomada de decisão. De forma a avaliar o modelo e indicar aos tomadores de decisão a alternativa ideal, foram utilizados quatro tipos de tecnologias de baterias, sendo três de chumbo-ácido e uma de Íons de Lítio. Dos resultados mostrou-se que a bateria de Íons de Lítio é a melhor alternativa sob a ótica dos critérios ambientais, tecnológicos, regulatórios e financeiros. Este trabalho, depois de realizadas adequações, pode ser adaptado a outros tipos de tecnologias de armazenamento de energia e contribuir com os tomadores de decisão na seleção da melhor alternativa tecnológica.

Palavras-chave: Processo de Análise Hierárquica (AHP); Multicritério; Tomada de Decisão; Armazenamento de Energia.

ABSTRACT

Information with multiple criteria influences the choices for decision making and the difficulty increases due to the complexity of the problems in a field where analysis of choices and alternatives also generates uncertainties. Global and Brazilian trend, the growing use of energy storage in batteries has contributed to technological advances in the electricity sector. This work aims to develop a multicriteria methodology to define the best technological alternative for energy storage, using the hierarchical decision analysis process - Analytic Hierarchy Process (AHP), and which allows, from the bibliography study, meetings with experts and information provided by the manufacturers, choose the best equipment. Using the AHP tool, a model is sought to assist the decision-makers in the decision-making process. In order to evaluate the model and indicate to decision makers the ideal alternative, four types of battery technologies were used, three of which are lead-acid and one of lithium-ion. From the results it was evidenced that the Lithium Ion Battery is the best alternative from the perspective of environmental, technological, regulatory and financial criteria. This work, after making adjustments, can be adapted to other types of energy storage technologies and contribute to decision makers in the selection of the best technological alternative.

Keywords: Analytic Hierarchy Process (AHP); Multicriteria; Decision Making; Energy Storage.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ASPECTOS DE EVOLUÇÃO DA REDE DE ENERGIA, EM DIFERENTES DOMÍNIOS, PROPORCIONADOS PELA APLICAÇÃO DO CONCEITO SMART GRID.	16
FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS QUÍMICOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	24
FIGURA 3 - APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	27
FIGURA 4 - PRINCIPAIS MÉTODOS MCDA.....	34
FIGURA 5 - MATRIZ DE DECISÃO	35
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA GERAL DO AHP	37
FIGURA 7 – ESQUEMA DE DECISÃO HIERÁRQUICO GENÉRICO.....	38
FIGURA 8 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO.....	40
FIGURA 9 - PUBLICAÇÕES SOBRE MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO ENTRE 1995 E 2015	50
FIGURA 10 – DIMENSÕES DO CONTAINER.....	57
FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DOS PROJETOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO MUNDO	59
FIGURA 12 - QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO COMPARATIVA	65
FIGURA 13 - ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO TRABALHO	79
FIGURA 14 - QUESTIONÁRIO COMPLETO DE AVALIAÇÃO COMPARATIVA.....	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DESCRIÇÃO E ESCALA DE SAATY	39
TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE PARES DE CRITÉRIOS - APLICAÇÃO DA ESCALA SAATY	39
TABELA 3 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE PARES DE CRITÉRIOS - COMPLETA.....	40
TABELA 4 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO	42
TABELA 5 – ELECTRE E PROBLEMAS DE DECISÃO	45
TABELA 6 - ALTERNATIVAS PARA FORNECIMENTO ELÉTRICO	49
TABELA 7 - FASES PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	53
TABELA 8 – CRITÉRIOS, SUBCRITÉRIOS E NÍVEIS	54
TABELA 9 - ESPECIALISTAS QUE PARTICIPARAM DA PESQUISA	55
TABELA 10 – SUBCRITÉRIOS AMBIENTAIS (NÍVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO	58
TABELA 11 – SUBCRITÉRIOS TECNOLÓGICOS (NÍVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO	59
TABELA 12 – SUBCRITÉRIOS TECNOLÓGICOS (NÍVEL 4) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO	62
TABELA 13 – SUBCRITÉRIOS REGULATÓRIOS (NÍVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO	63
TABELA 14 – SUBCRITÉRIOS FINANCEIROS (NÍVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO	64
TABELA 15 – DISTRIBUIÇÃO DOS CRITÉRIOS – MATRIZ DE PONDERAÇÕES	66
TABELA 16 – AUTOMATIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS CRITÉRIOS – MATRIZ DE PONDERAÇÕES	67
TABELA 17 – MATRIZ NORMALIZADA	68
TABELA 18 – AUTOMATIZAÇÃO DA MATRIZ NORMALIZADA.....	68
TABELA 19 – CÁLCULO DA CONSISTÊNCIA – AUTOVALOR, IC, ICA E TC	69
TABELA 20 – AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE CONSISTÊNCIA – AUTOVALOR, IC, ICA E TC.....	69

TABELA 21 – NORMALIZAÇÃO DO GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO (PADRONIZAÇÃO)	70
TABELA 22 – INTERDEPENDÊNCIA DE PESOS E ALTERNATIVAS.....	71
TABELA 23 - INTERDEPENDÊNCIA DE PESOS E ALTERNATIVAS (RESULTADOS)	72
TABELA 24 – ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE BATERIAS.....	73
TABELA 25 – PANORAMA GERAL DO BANCO DE BATERIAS	74
TABELA 26 – DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS	74
TABELA 27 – RESULTADOS BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO TUBULAR ESTACIONÁRIA VENTILADA (OPZS).....	75
TABELA 28 – RESULTADOS BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO CARBONO.....	76
TABELA 29 – RESULTADOS BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO ESTACIONÁRIA VENTILADA	77
TABELA 30 – RESULTADOS BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO LFP	78
TABELA 31 – DISTRIBUIÇÃO DOS CRITÉRIOS, NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA (CRITÉRIOS X CRITÉRIOS)	80
TABELA 32 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO AMBIENTAL (NÍVEL 3), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA	81
TABELA 33 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO (NÍVEL 3), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA	81
TABELA 34 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO – MATURIDADE TECNOLÓGICA (NÍVEL 4), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA	82
TABELA 35 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO - DENSIDADE (NÍVEL 4).....	82
TABELA 36 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO REGULATÓRIO (NÍVEL 3), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA	83
TABELA 37 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO FINANCEIRO (NÍVEL 3).....	83
TABELA 38 – NORMALIZAÇÃO DO GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO	84
TABELA 39 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS – AMBIENTAIS.....	85

TABELA 40 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS TECNOLÓGICOS (continua).....	86
TABELA 41 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS – TECNOLÓGICOS (conclusão).....	87
TABELA 42 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS - REGULATÓRIOS.....	88
TABELA 43 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS – FINANCEIROS.....	89
TABELA 44 – RESULTADOS FINAIS.....	91

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AHP	Analytic Hierarchy Process
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos da América
DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
DIT	Demais Instalações de Transmissão
FER	Frequência Equivalente de Reclamação
GD	Geração Distribuída
MADM	<i>Multiple Attribute Decision Making</i>
MCDA	<i>Multicriteria Decision Aid</i>
MCDM	<i>Multicriteria Decision Making</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MODM	<i>Multiple Objective Decision Making</i>
NTC	Norma Técnica Copel
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída
PRORET	Procedimentos de Regulação Tarifária
Pst	Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração.
REN	Resolução Normativa
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SED	Subestação de Distribuição
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTO	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	21
2.1.1	Armazenamento de Energia em Baterias	23
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	28
2.3	PRODIST - MÓDULO 8	30
2.4	TOMADA DE DECISÃO	32
2.4.1	Métodos da Escola Americana	36
2.4.2	Métodos da Escola Europeia	44
2.4.3	Outros métodos	46
3	ESTADO DA ARTE	48
4	MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1	MATERIAIS	53
4.2	MÉTODOS	53
4.2.1	Fase 1 - Alternativas, Critérios e Subcritérios	54
4.2.2	Fase 2 – Estruturação Hierárquica AHP	65
4.2.3	Fase 3 – Normalização e Consistência	67
4.2.4	Fase 4 – Interdependência dos Pesos e Alternativas	69
4.2.5	Fase 5 – Análise dos Resultados	71
5	ESTUDO DE CASO	73
5.1.1	Fase 1 – Alternativas, Critérios e Subcritérios	73

5.1.2	Fase 2 – Estruturação Hierárquica AHP	79
5.1.3	Fase 3 – Normalização e Consistência	80
5.1.4	Fase 4 – Interdependência dos Pesos e Alternativas	84
5.1.5	Fase 5 – Análise dos Resultados	90
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE.....	100

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro e o mercado de armazenamento de energia mundial apresentam potenciais e registram crescimentos sucessivos (SERRA et al., 2016). Uma das formas de minimizar os problemas de ordem energética é adotando novos meios de geração de energia e armazenamento. Considerando que no futuro poderá haver escassez de combustíveis fósseis, e também danos ambientais por eles causados, é importante selecionar novas tecnologias e métodos multicritérios de apoio à decisão (BARIN et al., 2011).

Combustível fóssil é a principal fonte de energia para suprir 81% do consumo total de energia no mundo. Redução da carga de pico, perdas nas redes de distribuição, aumento da confiabilidade, redução de emissões podem ser revolidas com a implantação de fontes de energias renováveis (ÇELIKBILEK; TÜYSÜZ, 2016). No mundo, estima-se que aproximadamente 1,5 bilhão de pessoas não tem acesso à eletricidade. O consumo tende a aumentar, não somente devido à economia dos países, mas também pelo fato da população mundial continuar aumentando. Para alcançar a inclusão generalizada dos sistemas armazenamento de energia, deve-se considerar o planejamento (KUMAR et al., 2016).

Em 2017, estudos apontavam que a matriz energética brasileira fecharia o ano com 43,8% de participação em energias renováveis. O boletim mensal de energia MME (2017, p.1), apresentou o desempenho e as transformações do setor energético brasileiro, crescimento e diversificação. A energia hidráulica, mesmo sendo a mais importante, apresentou pequena queda se comparada ao ano anterior, mas foi compensada pela geração de fontes renováveis. Examinando as experiências do Brasil e do Chile, verifica-se que a energia hidrelétrica continuará tendo um papel significativo prestando serviços tradicionais, mas também uma variedade de serviços auxiliares que a flexibilidade do novo contexto renovável exige (HENDERSON, 2017, p.70).

Em março/2018, houve um grande apagão que deixou 12 estados da região norte e nordeste do Brasil sem energia elétrica (UOL, 2018). Esse foi um exemplo de intermitência em grande escala, mas o sistema ainda está sujeito a pequenas falhas que passam despercebidas pela maior parte da população. Falhas de menor monta continuam prejudicando casas, indústrias, bairros e seus efeitos podem ser reduzidos

com a introdução gradual da geração distribuída. Para compensar essa intermitência nos sistemas, fontes de armazenamento de energia podem auxiliar a atender a demanda, principalmente nos horários de maior consumo.

A energia elétrica impacta diretamente no estilo de vida das pessoas e, para manter a disponibilidade frente ao consumo, é importante incentivar o armazenamento. A produção de energia em grande escala se deve ao processo evolutivo do setor de energia elétrica que a mais de 100 anos investe em mudanças estruturais. Para garantir o suprimento contínuo em períodos de intermitência ou baixa produção, os sistemas de armazenamento de energia podem assegurar o fornecimento de energia (BUENO; BRANDÃO, 2016).

O Brasil ainda não possui regulamentação específica que permita a conexão de sistemas com armazenamento à rede elétrica. O questionamento sobre o modo de cobrança, e a possibilidade de comprar energia no momento em que ela está com menor preço e vender quando ela estiver com maior valor, pode ser importante fator para estimular o uso racional da eletricidade. A evolução dos aspectos regulatórios poderá garantir um relacionamento justo entre consumidor/ produtor e concessionárias. Alcantara et al. (2013) apresentam possibilidades de um Smart Grid, resultados de eficiência energética, mostram sistemas de gerenciamento e controle de consumo e chamam a atenção para necessidade de mudanças legislativas e regulatórias.

Paralelo à ampliação do uso, que é uma tendência brasileira e mundial, surgiu nos últimos anos a necessidade de desenvolver conceitos que proporcionam a evolução das tecnologias de distribuição e armazenamento. O Smart Grid é um desses conceitos, conforme FIGURA 1.

FIGURA 1 – ASPECTOS DE EVOLUÇÃO DA REDE DE ENERGIA, EM DIFERENTES DOMÍNIOS, PROPORCIONADOS PELA APLICAÇÃO DO CONCEITO SMART GRID.



FONTE: ANEEL; p.107 (2016)

Para tomar uma decisão sobre armazenamento de energia, devem-se assumir alguns pressupostos como o cenário no qual a decisão é ou será tomada. Para desenvolvimento dos cenários de decisão não há um único método, porém sua aplicabilidade inclui etapas específicas (RODRIGUEZ; COSTA; CARMO, 2013).

Dentro dos aspectos estratégicos fundamentais, o planejamento energético e processo decisório desempenham papel importante no desenvolvimento das regiões de um país. Conceitos que são aplicados de forma global podem ser utilizados em escalas menores como: estado, município, distrito, bairro, fazenda, indústria (DOS REIS, 2015).

1.1 CONTEXTO

Pensar estrategicamente é tentar antecipar movimentos de um mercado cada vez mais competitivo. No setor elétrico brasileiro constantemente surgem novas oportunidades, mas para que não ocorram erros e obsolescência dos equipamentos, é necessário ampliar os estudos com a inserção de novas tecnologias. Para avaliação e

decisão de solução única envolvendo múltiplos critérios, os métodos de avaliação multicritérios se apresentam como ferramentas de suporte na análise de problemas que envolvam aspectos quantitativos e qualitativos. Mesmo que se disponha dos mais variados recursos: humanos, técnicos e estratégicos, se não houver atenção com os processos de decisão, o negócio pode sofrer bem mais com as variações do mercado.

O Brasil se coloca em posição privilegiada em relação ao mundo no quesito armazenamento, e os investimentos na área de infraestrutura aumentaram o interesse da iniciativa privada (ANEEL, 2008). Para que as estratégias sejam colocadas mais rapidamente em prática, autorizadas, concessionárias, autoprodutores e demais instituições do setor elétrico precisam de planejamento, inovação e gestão. Essas ações integradas e alinhadas com bons projetos podem gerar consistentes ferramentas de apoio à decisão. De acordo com ANEEL (2008), os agentes do sistema elétrico são definidos como:

- Autorizada: agente titular de autorização federal para prestar serviço público de geração ou comercialização de energia elétrica;
- Concessionária: agente titular de concessão federal para prestar serviço público de distribuição ou transmissão ou geração de energia elétrica;
- Autoprodutor: pessoa física ou jurídica ou empresas agrupadas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produção de energia para o uso exclusivo.
- Comercialização: titular de autorização, concessão ou permissão para operações de compra e venda;
- Distribuição: titular de concessão ou permissão para distribuição de energia elétrica a consumidor final;
- Geração: titular de concessão, permissão ou autorização para fins de geração de energia elétrica. Divide-se em: prestadores de serviços, produtores independentes e autoprodutores de energia.

Embora a reforma política e regulatória possa criar ambiente mais atraente para investimentos em armazenamento de energia, é também necessário incentivar estudos que abranjam diferentes horizontes, tendo como objetivo definir, em função de um ou mais cenários de assertividade e confiabilidade. Tanto armazenamento de grande quanto de pequena escala podem se beneficiar com a maior transparência dos meios

de obtenção de financiamento. Na demanda do sistema energético, a adoção de tarifas estruturadas ou programas capazes de revelar o valor de determinados serviços pode ajudar a suportar sistemas distribuídos de armazenamento de energia (por exemplo, em residências e edifícios). Componente essencial na movimentação desta tecnologia de forma mais rápida para implantação comercial, encontra-se no apoio financeiro dos projetos, bem como em sistemas de garantia de risco (ECONOMY; VEHICLES, 2014, p.51).

Os sistemas de armazenamento figuram entre as inovações mais esperadas para as próximas décadas e, sem dúvida, caminham com passos firmes na direção dos benefícios ambientais, crescimento econômico e menor dependência de fontes poluentes de energia. Os sistemas com baterias de armazenamento existem há várias décadas, no entanto foi necessário tempo de amadurecimento para aumentar sua confiabilidade e durabilidade. Com isso espera-se a redução gradual nos custos e ampliação do uso em grande escala com qualidade e responsabilidade socioambiental (SERRA et al., 2016).

As alternativas de armazenamento de energia podem ajudar a estocagem do excesso de energia e a alternativa mais adequada pode ser analisada por técnicas de determinação multicritérios (ÖZKAN et al., 2015).

No mundo percebe-se que os países estão investindo expressivas somas de recursos na geração e armazenamento de energia que ofereça inovação integrada a aspectos econômicos e ambientais. Discussões sobre as oportunidades e barreiras de mercado para implantação de armazenamento de energia estão sendo debatidas também em países como China e nos Estados Unidos. Os debates descrevem experiências e apresentam valiosas lições institucionais para o desenvolvimento do armazenamento de energia em todo o mundo (HENDERSON, 2017, p.16).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia de análise multicritério que permita auxiliar na escolha da tecnologia de bateria para armazenamento de energia em sistemas estacionários.

Este trabalho traz os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os principais tipos de bateria que podem ser utilizados no estudo;
- Categorizar aspectos ambientais, tecnológicos, regulatórios e financeiros;
- Modelar o problema de otimização multicritério, definindo critérios e subcritérios por meio da avaliação dos dados sobre os principais tipos de baterias utilizados;
- Utilizar metodologia multicritério de apoio à decisão para definição da tecnologia de armazenamento de energia em função dos critérios definidos;
- Aplicar e testar metodologia em um estudo de caso.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em função do preço, vida útil, autonomia entre outros, é necessário aprimorar constantemente os sistemas de armazenamento de energia em baterias, para que o uso desta tecnologia se torne rapidamente viável. Também é imprescindível estudar e selecionar técnicas de apoio à decisão que apontem as melhores soluções econômicas. Alinhado com essa concepção, deve-se fomentar a colaboração mútua entre institutos de tecnologia (nacionais e internacionais), universidades, concessionárias, empresas privadas, para que juntos possam desenvolver e aprimorar técnicas de decisão que possibilitem melhor escolha das baterias de armazenamento de energia.

O armazenamento de energia representa uma opção flexível que pode trazer benefícios econômicos fundamentais para diversas áreas do setor de energia elétrica, incluindo requisitos de investimento em infraestrutura. Estudos sugerem que as tecnologias de armazenamento de energia podem ter um papel significativo a desempenhar na facilitação do custo-eficiente para um sistema de energia. Também poderá gerar economias de custo em todo o sistema elétrico, compensando a necessidade de investimentos em geração, rede e ao mesmo tempo contribuindo para a economia de custos operacionais (HENDERSON, 2017, p.32). Armazenar energia em baterias é uma forma de solucionar o gerenciamento de demanda que apresenta inclusive melhoramento da qualidade da energia (LI, et al., 2013).

De forma geral as empresas não possuem mecanismos de decisão para escolha das melhores alternativas de tecnologias de armazenamento. Também existe uma lacuna no desenvolvimento associado à utilização das baterias no setor elétrico, o que desperta a necessidade de constantes pesquisas nessa área. Dessa maneira, como forma de suprir a falta de procedimentos de decisão multicritério, que por vezes são incompletos e inespecíficos a situações particulares, neste trabalho propõe-se uma ferramenta adequada com o desenvolvimento de uma metodologia de apoio à tomada de decisão para, a partir de determinados parâmetros de entrada, auxiliar os gestores na decisão sobre qual a melhor tecnologia de armazenamento de energia para determinada aplicação.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema, contexto, objetivos, justificativa e organização do trabalho. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica de armazenamento de energia em baterias, geração distribuída, PRODIST e tomada de decisão. O terceiro capítulo apresenta o estado da arte sobre os métodos de decisão multicritério aplicados na seleção de sistema de armazenamento de energia. O quarto capítulo apresenta os materiais, métodos e também a descrição das fases da metodologia. O quinto capítulo apresenta o método multicritério aplicado a um estudo de caso bem como a análise dos resultados. Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as fundamentações teóricas de armazenamento de energia, geração distribuída, Prodist – Módulo 8, tomada de decisão multicritérios e método AHP.

2.1 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

De forma genérica, define-se armazenamento de energia como retenção de energia por determinado tempo para uso futuro. No mundo, via de regra, existe uma variedade de sistemas de armazenamento de energia sendo utilizados para transformar energia elétrica em energia armazenável, que pode ser química, mecânica, térmica, etc. (SPATARU et al., 2015).

Armazenamento de energia não é algo novo, baterias e acumuladores que utilizam reações químicas como meio de armazenar energia já eram conhecidos antes dos dínamos e alternadores. O armazenamento de energia possibilita o aproveitamento de fontes renováveis com eficiência, com geração próxima aos consumidores e consequente aumento da confiabilidade (SERRA et al., 2016). Com a crescente contribuição do fornecimento de energia originado em fontes renováveis, o armazenamento de energia será parte importante dos sistemas de energia do futuro. A flexibilidade oferecida pelo SAE reduz a necessidade e facilita a produção de energia com baixa emissão de carbono.

Bueno e Brandão (2016), definem os conceitos mais importantes para entender a aplicação dos SAE:

- Energia: unidade fundamental dos sistemas elétricos de potência, capacidade de realizar determinado trabalho, importante conceito para definir o tamanho da SAE. A unidade do sistema internacional é o Joule (J), mas em sistemas elétricos é mais utilizado o Watt-hora ($1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ J}$).
- Potência: definida pela quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Na especificação e aplicação do armazenamento define a tecnologia mais alinhada ao suprimento da demanda. A unidade é o Joule por segundo ($\text{J/s} =$

Watt).

- Eficiência: relação entre a energia fornecida na fase de descarga em comparação a energia recebida na carga. Define a quantidade de energia perdida no processo pelo SAE, indicador importante para avaliação da viabilidade econômica.
- Densidade de energia: quantidade de energia por unidade de volume ou massa. Importante na determinação do volume e peso do SAE. A unidade é expressa em Wh/litro ou Wh/kg.
- Densidade de potência: potência disponível por unidade de volume ou massa. A unidade é expressa W/litro ou W/kg.
- Ciclo de vida: número de operações de carga e descarga ou ciclos realizados até que a perda de capacidade de armazenar energia não permita mais realizar as funções para as quais foi projetada.
- Auto Descarga: perdas de energia que acontecem durante os períodos de *stand by* devido às reações químicas internas. É a descarga que acontece sem que o SAE esteja ligado, fornecendo energia para consumidor, entre outros.
- Tempo de Descarga na Potência Especificada: é o tempo máximo em que uma determinada tecnologia pode manter o fornecimento de energia na taxa especificada. Existem tecnologias mais ajustadas a respostas rápidas e de elevada potência, mas com baixa capacidade de armazenamento como flywheels; e outras de respostas lentas com elevada capacidade de armazenamento como o bombeamento reverso.

De acordo com Luo et al., (2015) existem vários métodos de categorização das tecnologias de armazenamento de energia, como, em termos de suas funções, tempos de resposta, e durações de armazenamento conforme exemplos abaixo:

- Sistemas mecânicos: armazenamento de energia sob a forma cinética, exemplo ar comprimido e volante de inércia;
- Sistemas hidráulicos: armazenamento de energia sob a forma potencial, exemplo usina hidrelétrica bombeada;
- Sistemas térmicos: armazenamento de energia na forma de calor, exemplos sal

fundido, água e gelo;

- Sistemas magnéticos: armazenamento de energia em campos magnéticos, exemplo supercondutores magnéticos;
- Sistemas eletroquímicos: armazenamento de energia por processos químicos, exemplos baterias de íons de lítio, sódio enxofre (NaS), fluxo e chumbo-ácido (Pb).

2.1.1 Armazenamento de Energia em Baterias

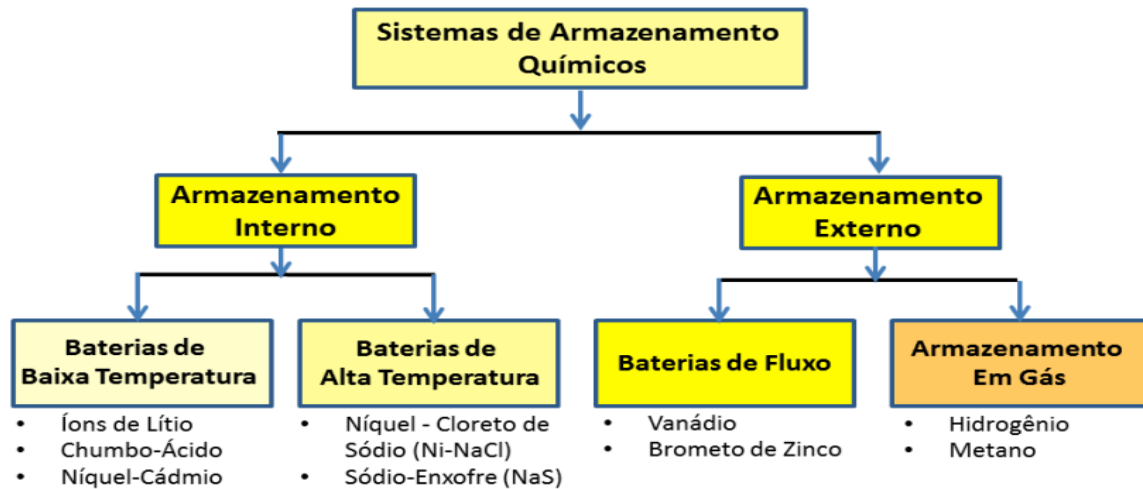
Nos primeiros estudos sobre energia elétrica já eram conhecidas movimentações das cargas elétricas que geravam reações eletroquímicas reversíveis para sistemas de armazenamento. Estudos apontam para a necessidade de desenvolver baterias com maior capacidade de armazenamento, reduzido índice de perdas, menor taxa de auto descarga, aumento dos ciclos, otimização dos materiais e descarte com menor impacto ambiental (BUENO; BRANDÃO, 2016).

As baterias estacionárias equipam sistemas de alimentação ininterrupta e são empregadas como backup de armazenamento em instalações de energias solar, eólica, subestações de energia e outras.

Um sistema de armazenamento com baterias consiste em células eletroquímicas ligadas em série ou em paralelo que produzem energia elétrica com determinada tensão e isso possibilita o uso em concessionárias, consumidores finais bem como nas finalidades comerciais e industriais (SERRA et al., 2016).

Na FIGURA 2 são classificados os sistemas químicos de armazenamento de energia.

FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS QUÍMICOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA



FONTE: BUENO; BRANDÃO (2016)

Baterias de Íons de Lítio (Li-íon)

Metal alcalino com grande poder eletroquímico, o lítio apresenta baixo peso, boa capacidade de armazenamento, ausência de efeito memória e alta densidade de energia (TAVARES, 2015).

É amplamente utilizado na eletrônica, em aplicações automotivas, armazena o dobro de uma bateria de hidreto metálico de níquel (NiMH) e o triplo de uma bateria de níquel cádmio (NiCd). Segundo Bueno e Brandão (2016), as baterias de Lítio também apresentam baixa taxa de auto descarga – perda de aproximadamente 5% da carga por mês que em comparação com as baterias NiMH esse índice é de 20% no mesmo período. Suportam de 400-500 ciclos de carga/descarga, mas são sensíveis a altas temperaturas. Recentes pesquisas incluem: aumento da capacidade de energia da bateria com o uso de materiais de nano escala e melhoria da bateria pelo desenvolvimento de novos materiais (LUO et al., 2015).

São recarregáveis e apresentam risco de exposição a agentes tóxicos, contaminação por lítio, fósforo e solventes orgânicos. A bateria de lítio começou a ser desenvolvida em 1912 por G. N. Lewis, entretanto só apareceu comercialmente na década de 70, e em função da instabilidade podem inflamar ou explodir (MATTOS, 2019).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a principal norma de baterias de íons de lítio é: NRB 16145:2013 para aplicação em 48 V (especificação). No cenário do IEC podem-se citar as normas IEC 62619 e 62620 (especificações, ensaios e requisitos de segurança).

Baterias de Chumbo-Ácido (Pb)

São as baterias mais antigas já desenvolvidas, com maior utilização no planeta e entre as baterias eletroquímicas é a mais madura (SERRA et al., 2016). Para sistemas que exigem tempo de armazenamento curto/médio são as mais indicadas e na indústria automotiva em sistemas de back-up são amplamente utilizadas. Apresenta baixo custo de aquisição, instalação, manutenção e competem com as baterias de íons de lítio quando o peso e o volume não são fatores de decisão. A tecnologia de Chumbo-ácido está disponível comercialmente desde 1890 (GARCHE, 1990).

As baterias de chumbo-ácido Tubulares Estacionárias Ventiladas Tipo (OPzS) e chumbo-ácido estacionárias ventiladas, apresentam as seguintes características: são 100% recicláveis, apresentam riscos de corrosão, exposição de agentes tóxicos, vazamento e potencial de contaminação por chumbo, antimônio e ácido sulfúrico. As baterias de chumbo-ácido carbono (PbC) também são 100% recicláveis, apresentam riscos de corrosão, exposição de agentes tóxicos, vazamento e potencial de contaminação por chumbo e ácido sulfúrico.

Nas subestações e setores de geração, são utilizadas no fornecimento de potência para equipamentos de controle e chaveamento (SERRA et al., 2016).

São as baterias recarregáveis mais utilizadas por ter tempo de resposta rápido, baixo percentual de auto descarga, entre outros. Podem ser utilizadas em dispositivos fixos como fontes de alimentação em redes de telecomunicações e como fontes de energia para veículos elétricos. No entanto, ainda existem limitações como densidade de energia e mal funcionamento em baixas temperaturas (LUO et al., 2015).

De acordo com a (ABNT) as principais normas de baterias estacionárias são: NRB 14197:2018 (especificação), NRB 14198:2017 (terminologia), NRB 14199:2018 (ensaios) e NRB 16487:2016 (manutenção). No cenário do IEC pode-se citar a norma

IEC 60896 (especificações e ensaios).

Baterias de Níquel Cádmio (NiCd)

Embora a densidade de energia seja baixa, esta bateria está entre as primeiras tecnologias reversíveis de armazenamento. São baterias em bom estágio de desenvolvimento, baixo custo, durabilidade e diferente de outras baterias, estas são indicadas para carga rápida e descarga em pulsos. Para uso eventual ou curtos períodos não são indicadas. Sua utilização vem sendo reduzida por limitações como a capacidade e a vida útil (BUENO; BRANDÃO, 2016). Outras limitações incluem: cádmio e níquel são metais pesados tóxicos que podem resultar em riscos ambientais; capacidade máxima pode ser drasticamente reduzida se a bateria for repetidamente recarregada depois de ter sido parcialmente descarregada (LUO et al., 2015).

Baterias de Sódio (Níquel / Cloreto de Sódio)

Trabalham em altas temperaturas, suas células são seladas em módulos de 20 kWh semelhantes a garrafas térmicas e são indicadas para tempos médios de armazenamento. Para seu funcionamento é necessário que a bateria atinja temperaturas entre 270°C a 350°C e a aplicação em grande escala é comprometida pelo fato de ser produzida por um número reduzido de fabricantes. São utilizadas em veículos elétricos, aplicações estacionárias, etc., porém inadequadas para aplicações com longos períodos *stand-by* e *no-breaks* (BUENO; BRANDÃO, 2016).

Baterias de Sódio Enxofre (NaS)

Diferente de outras baterias esta possui eletrólito sólido no lugar dos fluidos, requer temperaturas elevadas para alcançar condutividade suficiente para a transferência de carga no eletrólito na condição fluída e, também é indicada para tempos médios de armazenamento. Esta tecnologia apresenta alta densidade de energia, alta capacidade de ciclos, alta eficiência, baixa manutenção e 99% de

reciclagem (ÖZKAN et al., 2015).

Dentro de suas aplicações podem ser citadas: operação da rede elétrica de distribuição, integração de geração intermitente eólica e solar. Possui capacidade de respostas rápidas e manutenção da temperatura interna se termicamente isolada. Indicada para ciclos diários como carros elétricos, mas não indicada para *stand-by* de longa duração. Entre as características desejáveis das baterias NaS espera-se densidade alta de energia (150-300 Wh/kg). São consideradas fortes candidatas em aplicações de armazenamento de alta potência (LUO et al., 2015). Sua maior desvantagem é sua elevada taxa de degradação devido à corrosão pelo enxofre a elevadas temperaturas.

Aplicações dos sistemas de armazenamento de energia

Na FIGURA 3 são classificadas algumas aplicações dos sistemas de armazenamento de energia.

FIGURA 3 - APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Aplicação dos Sistemas de Armazenamento de Energia				
Relação Energia/Potência	Segundos até minutos	Base Diária	Base Semanal/Mensal	Potência
	< 15 minutos	1 a 10 horas	50 a 500 horas	Típica
Uso Geral	Veículos Elétricos Híbridos	Veículos Elétricos puros		1 kW
	Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede	Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede		a 1 MW
Uso na Rede Elétrica	Flywheels	Baterias Chumbo-Ácido	Baterias de Fluxo	
	Baterias íons de Lítio	Baterias íons de Lítio		1 kW
	Supercapacitores	Baterias de Sódio		a
	Sistemas Magnéticos	Baterias de Fluxo		100 MW
Tecnologia		Bombeamento reverso	Hidrogênio	100 MW
		Sistemas de ar comprimido	Metano	a
			Bombeamento Reverso	1 GW
Aplicações	Controle de Frequência	Controle de Frequência	Sistemas isolados	
	Reserva Girante	Reserva de Geração		
	Geração intermitente	Redução de Ponta de Carga		
	Controle de Tensão	Veículos Elétricos puros		
	Veículos Híbridos	Operação em Ilhamento		
	No-Breaks c/ geração diesel	Sistemas Isolados		
		Geração intermitente		
		Microgrids/sist. Individuais		
	No-Breaks s/ geração diesel			

FONTE: BUENO; BRANDÃO (2016).

Armazenamento de energia no Brasil e no Mundo

No Brasil, o sistema elétrico apresenta fatores diferenciados que o colocam numa posição privilegiada no quesito armazenamento de energia. Bueno e Brandão (2016), ressaltam alguns desses diferenciais:

- grande mercado para diversidade das tecnologias de armazenamento;
- conhecimento e grande experiência na geração hidroelétrica;
- crescimento da Geração Distribuída, em especial a Fotovoltaica e Eólica que apresentam crescimento superior ao nível mundial;
- mercado interno do Brasil, superior a 77 milhões de unidades consumidoras, logística para SAE com ampla margem de desenvolvimento;
- das reservas de lítio exploradas, a América do Sul detém mais de 60%;
- política de popularização dos serviços de energia, inclusive para áreas remotas;
- projeção de crescimento da geração intermitente, com percentuais entre 20% e 25% da potência instalada até o ano de 2023.

Dada sua importância na integração dos sistemas de geração renovável de grande escala, no mundo os SAE agregam benefícios desde a geração até consumo pelos usuários finais. Os custos de armazenamento já apontam quedas significativas pelo fato da tecnologia estar se tornando mais disponível, fato validado em países como os Estados Unidos que entre 2013 e 2014 cresceu aproximadamente 40% na capacidade instalada de armazenamento (BUENO; BRANDÃO, 2016).

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De acordo com Brasil (2002), foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que iniciou a regulamentação da geração distribuída no Brasil. O objetivo era aumentar a participação da energia elétrica produzida por produtores independentes com origem em fontes eólica, PCH - Pequena Central Hidrelétrica e biomassa.

Geração distribuída (GD) segundo MME (2004), foi definida como a produção

de energia elétrica originada em agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador exceto quando proveniente de hidroelétrica com capacidade superior a 30 MW; e termoelétrica, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75% conforme regulação da ANEEL.

A maneira organizacional adotada pelo sistema elétrico e obedecida ao longo de sua história consiste em grandes centrais de geração e uma extensa rede de linhas de transmissão e distribuição, conhecida como geração centralizada de energia. Quando a demanda de energia aumenta, a resposta é um aumento da geração, porém quando a demanda excede os limites da capacidade do sistema, a solução adotada é sempre a construção de novas unidades de geração, e por derivação o aumento do transporte e distribuição dessa maior energia comercializada. O questionamento quanto a essa forma de planejar a expansão da oferta de eletricidade do setor elétrico, aliada a introdução no mercado de novas tecnologias que reduzem significativamente o custo da energia produzida, localizadas próximas dos centros de carga, traduz o conceito de geração distribuída (GD). (BARBOSA FILHO, W.P.; AZEVEDO; 2013 p. 127).

Em geração distribuída existem fontes de tecnologia renovável ou não. As principais fontes renováveis distribuídas são: solar fotovoltaica, eólica e biomassa. As principais fontes não renováveis são: microturbinas, moto geradores a gás natural, cogeração a gás natural e motores a diesel (SILVA et al., 2018).

Entre as mudanças fundamentais relacionadas à qualidade da energia, importante as que visam atender os consumidores finais, padronizar indicadores, dar continuidade no fornecimento, reduzir emissões de gases e impactos ambientais. Algumas das características que atribuem importância para GD são: produção de energia elétrica próxima do consumidor, redução da utilização de combustíveis fósseis, redução das emissões de gases poluentes e ampliação da matriz energética brasileira (SILVA et al., 2018).

No caso específico do estado do Paraná existem duas normas técnicas que oferecem requisitos para acesso à geração distribuída em paralelismo permanente. De acordo com COPEL (2017), são contemplados critérios de acesso e requisitos para média tensão - MT (13,8 kV e 34,5 kV) e alta tensão - AT (69 kV e 138 kV), excluindo demais Instalações de Transmissão – DIT que pertençam às transmissoras e os casos do sistema de compensação com mini e micro geradores de energia. A norma contempla também requisitos técnicos, procedimentos de acesso, contratos, licença

ambiental, conexões, e se aplica aos geradores de energia conectados a Copel e que desejam comercializar energia no Ambiente de Contratação Livre ou regulado.

De acordo com a COPEL (2016), são aplicados ao acesso de micro e mini geração distribuída ao sistema de distribuição da Copel, os regulamentados pela REN ANEEL No. 482/2012 e que estejam dentro dos critérios técnicos de projeto, proteção, medição, controle, segurança e operação de unidades geradoras conforme legislação e PRODIST. No caso de paralelismo momentâneo a COPEL dispõe de outras normas técnicas, sendo NTC 903105 para operação de geração própria e a NTC 903107 para operação de geração própria isolada.

Dada à importância estratégica da GD e segundo MME (2015), importante citar que a criação do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia - ProGD apresentou entre outros objetivos: ampliar utilização da GD com fontes renováveis e cogeração; incentivar a GD em prédios públicos, comerciais, industriais e residenciais. A mesma Portaria nº 538, de 15 de dezembro de 2015, define valores anuais de referência e requisitos que devem ser atendidos para empreendimentos de GD com fontes solar fotovoltaica e cogeração a gás natural. No Brasil, temos pequeno banco de dados de GD que não permite analisar de forma totalmente confiável os registros históricos e isso pode dificultar as análises e projeções de modelos estatísticos.

2.3 PRODIST - MÓDULO 8

Objetivando padronizar e facilitar a identificação dos problemas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolveu os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. No módulo 8 são estabelecidos índices para avaliar a qualidade da energia elétrica e indicadores das faixas aceitáveis de distorção (ANEEL, 2018).

O prazo de adequação das distribuidoras para elaboração ou revisão das normas técnicas para ter acesso à micro geração e mini geração distribuída com o PRODIST, foi limitada a 240 (duzentos e quarenta) dias contados da publicação da REN nº 482 de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012).

Interrupções no fornecimento podem ser curtas ou longas, mas independente da intensidade elas geram desconforto aos consumidores e estão entre os principais problemas da qualidade da energia. As interrupções num intervalo de tempo inferior a três minutos são definidas como Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) (ANEEL, 2018).

De acordo com ANEEL (2018), objetivos do PRODIST, são elencados como qualidade:

- Qualidade do serviço;
- Qualidade do tratamento de reclamações;
- Qualidade do produto.

Qualidade do Serviço

Dentro dos objetivos são estabelecidos procedimentos quanto à qualidade dos serviços prestados pelas distribuidoras, centrais geradoras, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT. Também são definidos indicadores de qualidade para fornecer mecanismos de acompanhamento e controle do desempenho; subsídios para planos de reforma; melhoramento e expansão da infraestrutura das distribuidoras; e, disponibilizar aos consumidores e centrais geradoras referências de avaliação do serviço prestado pelas distribuidoras (ANEEL, 2018).

Acerca da qualidade do serviço, conforme ANEEL (2018), o PRODIST também estabelece procedimentos para:

- Sistema de atendimento às reclamações;
- Indicadores de tempo de atendimento às ocorrências emergenciais;
- Indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica;
- Indicadores de continuidade para transmissoras detentoras de DIT e distribuidoras acessadas por outras distribuidoras.

Qualidade do tratamento de reclamações

Segundo ANEEL (2018 p. 86) é “descrita à metodologia que estabelece os

limites anuais do indicador de qualidade comercial FER – Frequência Equivalente de Reclamação para as distribuidoras”.

Conforme ANEEL (2018), o PRODIST estabelece procedimentos de qualidade do tratamento de reclamações e os principais pontos são:

- Metodologia de estabelecimento dos limites do indicador de qualidade FER – frequência equivalente de reclamação;
- Fixação das referências mínimas e máximas por grupo;
- Fixação das referências por distribuidora;
- Estabelecimento dos limites.

Qualidade do Produto

Em qualidade do produto são abordados fenômenos de qualidade em regime permanente ou transitório. No regime permanente: tensão em regime permanente; fator de potência; distorções harmônicas; desequilíbrio de tensão; flutuações de tensão; variação de frequência. No regime transitório: VTCD (ANEEL, 2018).

Por fim, é importante destacar os avanços que o PRODIST Módulo 8 proporcionou em relação à qualidade da energia elétrica e como isso pode contribuir com o armazenamento de energia em baterias.

2.4 TOMADA DE DECISÃO

A Teoria da Decisão relata que a evolução e rumos da humanidade sempre estiveram atrelados aos processos de decisão. Uma gama de conceitos e técnicas são fornecidos pela teoria, e estes possibilitam melhor escolha entre alternativas que consideram a complexidade das decisões e a redução das incertezas (REIS; UFGD, 2012).

De acordo com Reis (2012), a Teoria da Decisão é fruto do esforço de diversos profissionais que tornaram possível a compreensão de como as decisões são ou devem ser tomadas. A teoria da decisão é uma excelente ferramenta de aconselhamento inclusive na análise de viabilidade em função do custo e benefício. Para análise de

problemas da vida cotidiana, ligados à área de pesquisa operacional, a Teoria da Decisão se apresenta como importante recurso no fornecimento de informações para decisões confiáveis.

Como contribuição ao processo estratégico e de decisão, também é importante destacar a teoria dos jogos. Modelo criado no ano de 1928 por John Von Neumann, notabilizado nos anos 50 pelo matemático John Nash (Prêmio Nobel de Economia em 1994), a teoria contribui nos processos negociais, possibilita a escolha racional estratégica e o condicionamento de escolha sobre o caráter genérico que as relações sociais geram nos conflitos de interesse (REIS; UFGD, 2012).

Segundo Colin (2015), a teoria dos jogos é uma teoria matemática que versa sobre como os jogadores (decisores) devem desenvolver suas estratégias considerando a influência recíproca. A teoria permite analisar o comportamento dos envolvidos em ambientes de competição e conflito, sejam empresas ou indivíduos.

Métodos de Tomada de Decisão Multicritério

Segundo Roy (1990 citado por RODRIGUEZ et al., 2013), em problemas de decisão associados a múltiplos critérios destacam-se duas correntes: tomada de decisão multicritério MCDM - *Multicriteria Decision Making* ou simplesmente método de decisão multicritério e, auxílio multicritério à decisão MCDA - *Multicriteria Decision Aid*.

Os métodos MCDM reconhecem a subjetividade e fornecem estrutura para análise de sensibilidade e consenso na busca da solução ideal frente a um número teoricamente infinito de alternativas (MCKENNA et al., 2018). Os inúmeros indicadores de desempenho associados aos mais variados critérios conferem aos métodos MCDM importância na resolução de problemas que envolvam decisões na área de energia (GEORGIU; MOHAMMED; ROZAKIS, 2015).

De acordo com Lima Júnior e Carpinetti (2015) o MCDM considera o uso de mais de um critério e visa avaliar uma ou mais alternativas onde os tomadores de decisão são confrontados com conflitos e incertezas. A literatura divide os MCDM em duas categorias: (MADM) – *Multiple Attribute Decision Making* e (MODM) - *Multiple Objective Decision Making*. Os métodos MADM resolvem problemas com alternativas

predeterminadas, descritas por múltiplas características relacionadas e desde o início consiste num número de alternativas finito. Exemplo: descrição e ordenamento das alternativas. Os métodos MODM impõem limites à área de soluções e são utilizados com programação linear, normalmente no processo final de escolha.

A FIGURA 4 apresenta os principais métodos MCDA, classificação e referências seminais.

FIGURA 4 - PRINCIPAIS MÉTODOS MCDA

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

FONTE: RODRIGUEZ; COSTA; CARMO (2013).

Segundo Alves (2018) as etapas da tomada de decisão multicritério são:

- (a) Identificar o problema de decisão;
- (b) Estabelecer os critérios C_j de avaliação;
- (c) Elencar possíveis soluções, alternativas a_i , para o problema. Elas podem ser obtidas, inclusive, por meio da resolução de um problema de otimização com um ou mais objetivos;
- (d) Avaliar as alternativas em termos dos critérios;
- (e) Determinar os pesos dos critérios;

- (f) Aplicar um método multicritério;
 (g) Aceitar a solução preferida ou retornar ao passo (b) ou (e).

Seja C_j o j -ésimo critério e a_i a i -ésima alternativa. Em um problema de tomada de decisão determinístico, o julgamento da alternativa a_i pelo critério C_j é dado por $C_j(a_i)$. Os julgamentos de todas as alternativas por todos os critérios, passos (b) a (d), podem ser armazenados em uma estrutura de matriz, denominada matriz de decisão, ou $[D]_{ji} = C_j(a_i)$. (ALVES, 2018, p. 8)

A FIGURA 5 representa a matriz de decisão que dispõe sobre o julgamento das alternativas por todos os critérios.

FIGURA 5 - MATRIZ DE DECISÃO

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

FONTE: ALVES (2018).

onde:

$a_i, i = 1, \dots, n$ representa as alternativas viáveis

$C_j, j = 1, \dots, m$ representa os critérios de decisão

x_{ij} indica desempenho da alternativa a_i segundo o critério C_i

A etapa (e) se refere ao vetor de pesos $W = (w_1, w_2 \dots w_m)$, que contem pesos individuais dos critérios, sendo $w_j \geq 0$ e $\sum_{i=1}^m w_j = 1$, para avaliação dos critérios. A importância do item de decisão aumenta quando o peso do critério for maior.

De acordo com Lima e Carpinetti (2015) os métodos MCDM se dividem em duas escolas clássicas: norte-americana e europeia.

2.4.1 Métodos da Escola Americana

A Escola Americana apresenta como fundamentação teórica a meta de absorver todas as informações sobre determinado problema e promover grande síntese (JESUS DE ARAUJO; MAGALHÃES AMARAL, 2016). Estes métodos estão ancorados na função utilidade, ou seja, descrevem o índice de satisfação do tomador de decisão sobre a escolha de cada alternativa (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015). Os principais métodos da escola americana são:

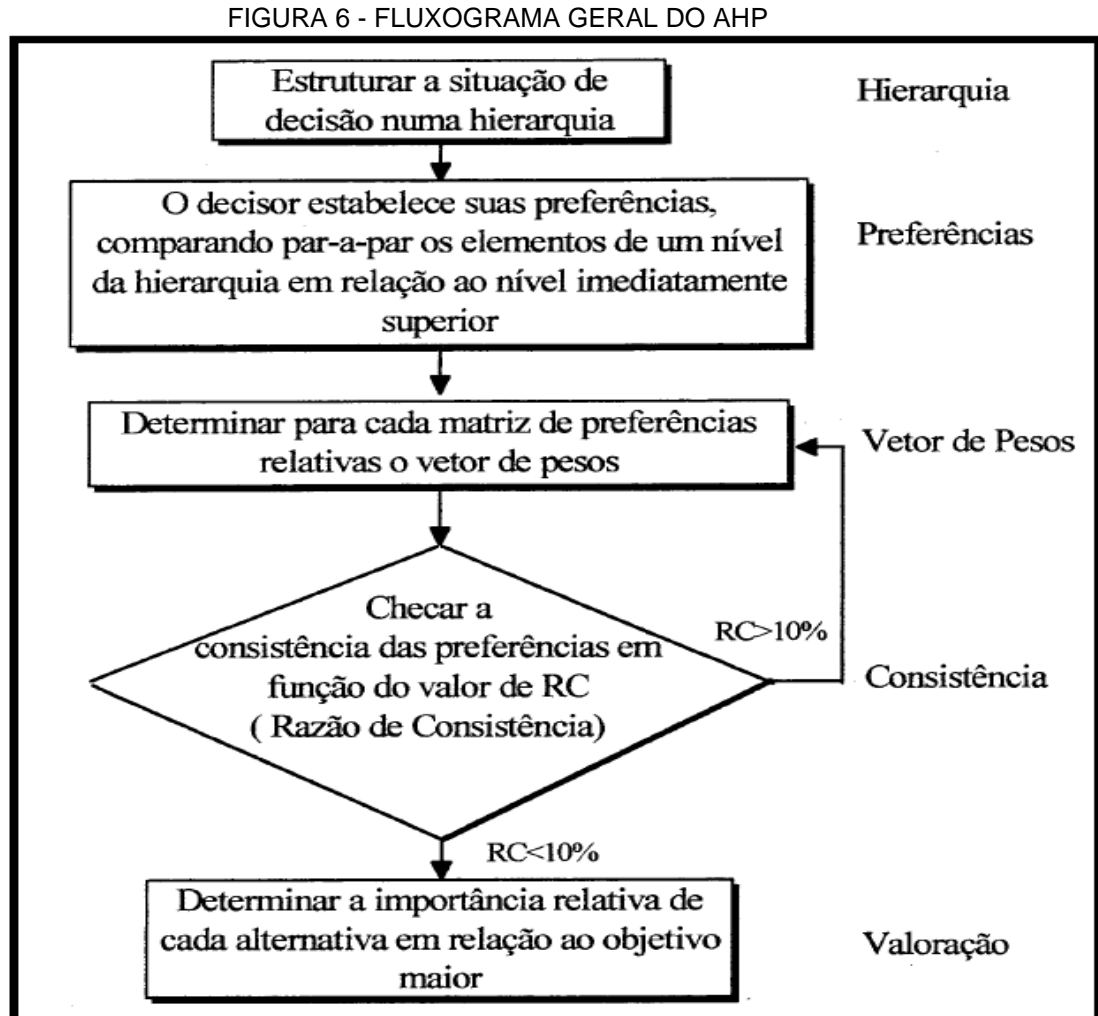
AHP - Analytic Hierarchy Process (Processo Hierárquico Analítico)

Um dos pilares do AHP é decompor as relações entre critérios para chegar à priorização das alternativas que buscam uma única medição de desempenho. Problemas complexos e de definição menos clara são resolvidos matematicamente por este método de tomada de decisão multicritério. Criado por Thomas L. Saaty nos anos 70 o método permite a utilização de critérios quantitativos, qualitativos e sugere a estruturação dos problemas em níveis hierárquicos. A partir dos julgamentos dos tomadores de decisão dos critérios, se obtém avaliação simultânea dos elementos mesmo para dimensões diferentes. A aplicação do AHP pode ser dividida em: representação da hierarquia, comparações de pares, método de autovalor e agregação das prioridades (COLIN, 2015). Além das comparações aos pares, o método utiliza avaliação subjetiva de importância convertida em um conjunto de pontuações gerais (pesos) (BARIN et al., 2011).

De acordo com Alves (2018, p.13) sobre o método AHP, “O modelo busca dividir o problema em partes menores, solucionando-as individualmente e depois soma as partes”.

De acordo com Saaty (1977), para desenvolver um problema de tomada de decisão com o AHP é necessário principalmente três princípios: construir hierarquias, estabelecer prioridades e testar a lógica de consistência. O problema deve ser modelado de forma que os níveis hierárquicos tenham objetivo, critérios, subcritérios e

alternativas para mostrar a relação entre os elementos de um nível com os demais. O fluxograma geral do AHP está representado na FIGURA 6.

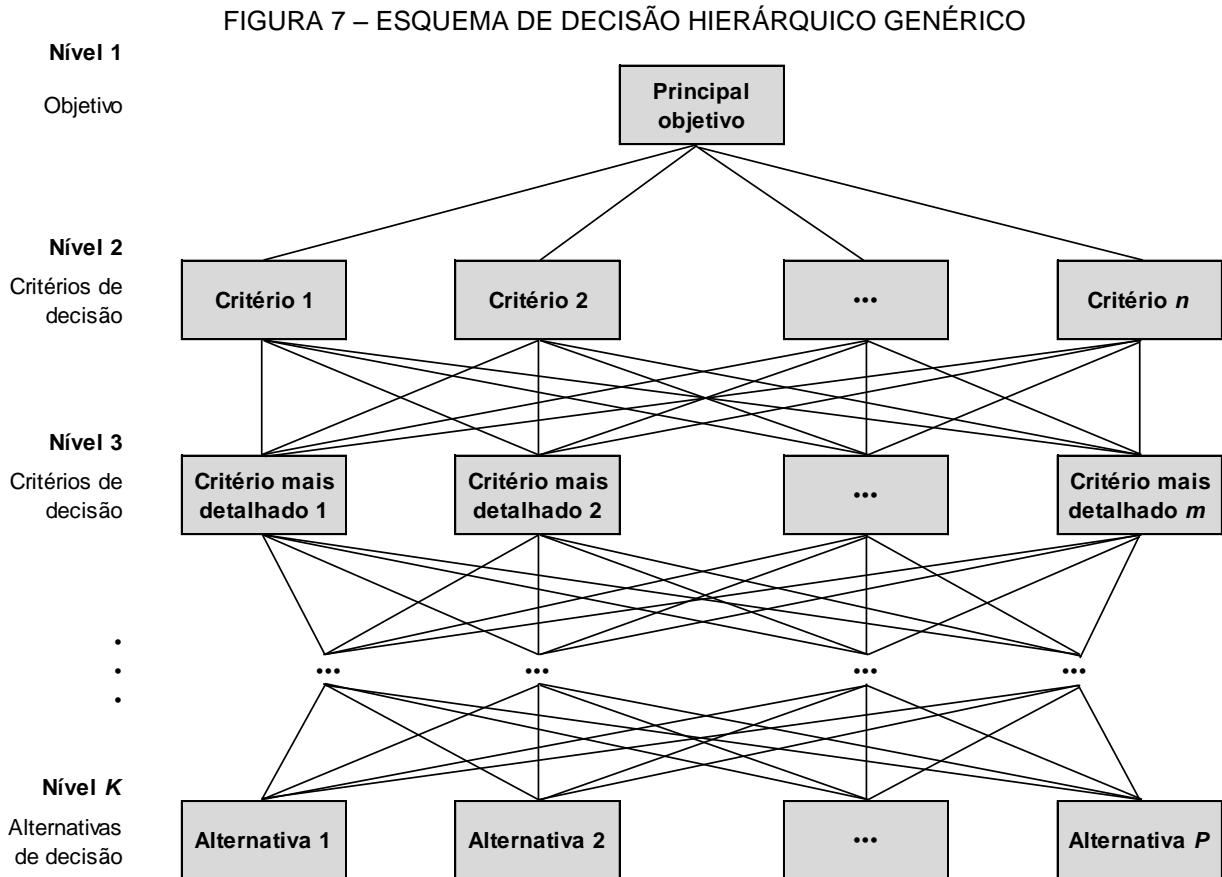


FONTE: SCHMIDT (1995).

Segundo Rojas-Zerpa e Yusta (2015), o método AHP tem como objetivo permitir que um tomador de decisão possa estruturar um problema multicritérios mediante a construção de um modelo hierárquico. O método AHP foi desenvolvido com o intuito de apresentar uma metodologia de fácil compreensão para tomada de decisões mais complexas. A simplicidade do AHP levou o seu uso para vários segmentos onde a escolha, priorização ou previsão são necessários (ARAGONÉS-BELTRÁN et al., 2014). Exemplo: análise de fornecimento de eletricidade utilizando

cinco critérios: custo total, emissões de CO₂, NO_x, SO₂ e resíduos nucleares onde os pesos são obtidos mediante aplicação do método AHP (MCKENNA et al., 2018).

Com os critérios, subcritérios e alternativas determinadas, estão preenchidas as condições necessárias para estruturação da hierarquia utilizando o método AHP. O esquema estrutural genérico está representado por meio da FIGURA 7.



FONTE: Adaptada de COLIN (2015).

Após definidas as alternativas, critérios, subcritérios, estrutura hierárquica, se faz necessário atribuir os pesos. Utilizando a escala fundamental de Saaty conforme TABELA 1, atribui-se intensidade de importância em função das definições.

TABELA 1 - DESCRIÇÃO E ESCALA DE SAATY

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é fortemente favorecida; sua dominação de importância é demonstrado na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se deseja maior compromisso
Recíprocos dos valores acima	Se a atividade j recebe um dos valores acima, quando comparada com a atividade i, então j tem o valor recíproco de i	Uma designação razoável
Racionais	Razões da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter n valores numéricos para completar a matriz

FONTE: Adaptada de (SAATY, 1977).

Admite-se como exemplo uma empresa que deseja aumentar suas vendas e para isso utiliza quatro critérios: aumento das vendas, devoluções, lucratividade e governança conforme TABELA 2.

TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE PARES DE CRITÉRIOS - APLICAÇÃO DA ESCALA SAATY

Critério	Aumento das Vendas	Devoluções	Lucratividade	Governança
Aumento das Vendas				
Devoluções	3			
Lucratividade	7	5		
Governança	9	7	3	

FONTE: O autor (2019).

Neste exemplo o item devoluções-aumento das vendas igual a 3 indica que as devoluções tem importância pequena sobre o aumento das vendas. Da mesma forma, a lucratividade tem importância muito grande sobre o aumento de vendas e importância

grande sobre as devoluções, a governança tem importância absoluta sobre o aumento das vendas, muito grande sobre as devoluções e pequena sobre a lucratividade.

Para completar a matriz devem-se observar duas situações:

- A diagonal que comparam os critérios por eles mesmos é igual a 1;
- Como as devoluções é preferível 3 vezes em relação ao aumento das vendas, admite-se que o aumento das vendas é $\frac{1}{3}$ preferível em relação às devoluções e assim respectivamente.

A matriz completa é apresentada na TABELA 3.

TABELA 3 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO ENTRE PARES DE CRITÉRIOS - COMPLETA

Critério	Aumento das Vendas	Devoluções	Lucratividade	Governança
Aumento das Vendas	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{9}$
Devoluções	3	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{7}$
Lucratividade	7	5	1	$\frac{1}{3}$
Governança	9	7	3	1

FONTE: O autor (2019).

Desta forma os números de critérios no mesmo nível são comparados usando Saaty Escala de 1 a 9. Para cada nível, uma matriz de comparação A é obtida com base nos julgamentos do tomador de decisão conforme FIGURA 8.

FIGURA 8 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \text{ where } a_{ji} = 1/a_{ij} \quad i, j = 1, \dots, n$$

FONTE: ARAGONÉS-BELTRÁN et al., (2014).

De acordo com Rojas-Zerpa e Yusta (2015), com as decisões introduzidas na matriz de comparação, o problema se reduz ao cálculo de valores e vetores que representam as prioridades e o índice de consistência do processo respectivamente.

Nas matrizes são calculados os autovetores e autovalores máximos (λ_{max}) utilizando o método da prioridade relativa aproximada por meio da normalização dos valores de cada uma das colunas e cálculo da média das linhas. Mediante o somatório dos pesos da avaliação é calculado o autovetor máximo. Em seguida calcula-se a matriz de comparação normalizada, por meio da divisão de cada elemento da matriz original pelo somatório dos pesos da avaliação. No final, para calcular o autovetor máximo, divide-se o somatório das linhas da matriz normalizada pelo somatório dos somatórios.

Para cálculo do autovalor máximo (λ_{max}), citado pelo autores como método da média dos valores normalizados, deve-se utilizar a equação (1):

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n \text{ pes}} * \sum_{i=1}^n \frac{[AB]i}{w i} \quad (1)$$

onde:

λ_{max}	autovalor máximo da matriz de consistência
$n \text{ pes}$	número de pesos
AB	multiplicação da matriz pelo vetor de pesos
$w i$	vetor de pesos

Depois do autovalor, calcula-se o índice de consistência conforme equação (2):

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (2)$$

onde:

IC	índice de consistência
λ_{max}	autovalor máximo da matriz de consistência
n	número de elementos comparados

Em seguida calcula-se a taxa de Consistência das preferências de cada tomador de decisão pela equação (3):

$$TC = \frac{IC}{ICA} \quad (3)$$

onde:

<i>TC</i>	taxa de consistência
<i>IC</i>	índice de consistência de A
<i>ICA (ou RCI)</i>	índice de consistência aleatório de A conforme o número de critérios da matriz, TABELA 4.

TABELA 4 - INDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIO

(n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

FONTE: Adaptada de ROJAS-ZERPA; YUSTA (2015).

Segundo Saaty (1977), valores de $TC < 0,10$ (inferior a 10%), são considerados aceitáveis e de grau de consistência satisfatório. Do contrário, existindo inconsistência, é necessário determinar novos pesos para os critérios.

ANP - *Analytic Network Process*

Técnica também desenvolvida por Thomas L. Saaty, o ANP não tem níveis de hierarquia como o AHP. Esta técnica de tomada de decisão absorve o resultado da dependência entre grupos de elementos que permite relações complexas entre os níveis de decisão. Parte da construção de um modelo estruturado com o problema que contém os elementos e a influência em relação ao outro. Determina a influência recíproca entre os elementos com base no seu conhecimento sobre o problema, isso decorre de uma etapa crítica da abordagem ANP por causa da dificuldade de identificar os critérios de influência mútua (ARAGONÉS-BELTRÁN et al., 2014).

MAUT - *Multiattribute Utility Theory* (Método da Teoria da Utilidade Multiatributo)

Teoria sistemática, estruturada e consistente para análise de decisões que de maneira lógica trabalham os objetivos conflitantes. Intimamente ligada a Teoria dos Jogos e Teoria da Decisão, teve origem na Teoria da Utilidade e discorre sobre atributos (critérios) que representam os múltiplos objetivos (JESUS DE ARAUJO; MAGALHÃES AMARAL, 2016).

De acordo com Rivas (2016), o método apresenta as seguintes etapas:

- Especificações / combinações das alternativas do projeto;
- Distribuição das probabilidades originadas no decisor;
- Resultados de cada atributo, função utilidade;
- Função utilidade de cada alternativa do projeto;
- Escolha da alternativa com melhor representatividade.

REGIME

De acordo com o trabalho de Rivas (2016), este método pertence ao grupo que apresenta como definição um quadro de análise de dominância para avaliação qualitativa. Apresenta características como: permissão de utilização de dados cardinais e ordinais na tabela de avaliação; o vetor REGIME é a base do método e contém sinais positivos, negativos que indicam por pares o grau de domínio entre as opções.

TOPSIS - *Technique for order of preference by similarity to ideal solution*

Método de preferência por semelhança de uma solução ideal que é utilizada para ranquear a ordem das prioridades. A melhor alternativa, durante avaliação, decorre da proximidade da solução ideal positiva e distanciamento da solução ideal negativa quando comparada a cada critério de decisão. Solução ideal positiva é formada pelos melhores atributos e solução ideal negativa é formada pelos piores atributos atingidos (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015).

O método parte da elaboração de uma matriz de decisão, um vetor de pesos e

possivelmente esse seja o segundo método mais utilizados na literatura, sendo o primeiro em extensões. (ALVES, 2018).

VIKOR – Otimização Multicritério e Solução de Compromisso

Consiste determinar uma medida de proximidade da solução ideal associada a conceitos de estabilidade. De acordo com Rojas-Zerpa e Yusta (2015) é um método desenvolvido para otimização multicritério de sistemas complexos, com o ordenamento das alternativas, classificação das soluções de compromisso e ponderação do intervalo de estabilidade. Ferramenta útil na tomada de decisão quando o decisor é incapaz de expressar sua preferência no início do projeto.

Segundo Alves (2018) o método consiste determinar o melhor e o pior valor de cada critério a partir da matriz de decisão e após ordenamento e cálculo do peso são obtidas as classificações das alternativas.

2.4.2 Métodos da Escola Europeia

A busca da melhor alternativa de desempenho sobre a totalidade das demais alternativas em todos os critérios revela a base de dominância que caracterizam estes métodos (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015). Conceitualmente são métodos que utilizam as classificações das preferências do decisor mediante análise dos dados disponíveis, para no final, a melhor avaliação ser aquela que apresenta dominância sobre a maioria dos critérios (ALVES, 2018). Os principais métodos da escola europeia são:

ELECTRE - *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*

Desenvolvido em duas fases, tem como finalidade agregar caráter mais concreto à tomada de decisão por meio de pesos e construção de matrizes de concordância e discordância. Na fase inicial prioriza a prevalência e o comparativo entre as alternativas, na segunda fase aplica o algoritmo para solucionar a prevalência. Os

métodos ELECTRE I, IV e IS se aplicam à problemática de escolha quando o objetivo é selecionar um conjunto menor das alternativas melhores, e os métodos ELECTRE II, III e IV se aplicam na construção ordenada de alternativas da melhor para o pior. Segundo Rivas (2016) o método permite que as alternativas não sejam comparáveis entre si e ainda possibilita considerar o fator de afinidade do decisor.

Na TABELA 5 são apresentados os problemas de decisão, métodos e software do ELECTRE.

TABELA 5 – ELECTRE E PROBLEMAS DE DECISÃO

Problema de Decisão	Método	Software
Escolha	ELECTRE I	-
	ELECTRE IV	-
	ELECTRE IS	Electre Is
Ordenação	ELECTRE II	-
	ELECTRE III	Electre III – Electre IV
	ELECTRE IV	Electre III – Electre IV
Classificação	ELECTRE-Tri-B	Electre-Tri
	ELECTRE-Tri-C	IRIS
Descrição	Elicitação dos pesos em	SRF
	ELECTRE	IRIS
	Elicitação para ELECTRE-Tri:	Electre Tri Assistant
	- método IRIS - outros métodos de elicitación	

FONTE: JESUS DE ARAUJO; MAGALHÃES AMARAL (2016).

PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*

Entre os diversos métodos multicritério, este apresentou rápido desenvolvimento em virtude de sua capacidade de adaptação. É um dos métodos mais conhecidos e aplicados, pois inclui a construção de relações de classificação mediante comparação par-a-par das alternativas. A implementação ocorre em cinco fases: determinação das relações de preferência; cálculo do índice de preferência; gráfico de classificação; ordenação parcial das ações; classificação e ranking (GEORGIU;

MOHAMMED; ROZAKIS, 2015) Para construção e ordenação das alternativas, o método utiliza dois caminhos hierárquicos sendo um positivo e outro negativo. O positivo indica como uma alternativa é mais relevante que outra e o negativo como a alternativa é superada pelas outras (LONGARAY et al., 2016). Segundo Rivas (2016), os conceitos podem ser rapidamente aplicados em linguagem computacional e são de fácil compreensão pelos decisores. O método se divide em:

- PROMETHEE I - Ranqueamento parcial;
- PROMETHEE II - Ranqueamento total;
- PROMETHEE III – Tratamento das preferências dos intervalos;
- PROMETHEE IV – Ranqueamento parcial ou total, problemas de escolha;
- PROMETHEE V – Após definição da ordem completa, são inseridas restrições para otimização;
- PROMETHEE VI - Ranqueamento parcial ou total, problema de escolha. Quando o decisor não consegue definir peso fixo para os critérios;
- PROMETHEE GAIA – Procedimento visual e interativo que proporciona amplificação dos resultados.

2.4.3 Outros métodos

Existem métodos multicritério de tomada de decisão que conjugam requisitos técnicos das Escolas Americana e Europeia. Estes métodos podem ser chamados de métodos híbridos e os principais são:

MACBETH - Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique

Este método de apoio à decisão possibilita a transformação de escalas com base nos valores absolutos e a diferença de atração entre as alternativas, ou seja, com duas alternativas, o tomador de decisão deverá indicar a mais coerente. O método requer análise qualitativa e isso ajuda mensurar a atratividade das opções (LONGARAY et al., 2016).

De acordo com Bana et. al. (2013, p. 4), o MACBETH “distingue-se de outros

métodos multicritérios por basear a ponderação dos critérios e a avaliação das opções em julgamentos qualitativos sobre a diferença de atratividade.”

TODIM - Interactive and Multicriteria Decision Making

Tomada de Decisão Interativa e Multicritério (TODIM), é um método desenvolvido por brasileiros e que se baseia na comprovação efetiva de como as decisões são tomadas em relação ao risco. Usa noção de medida geral com a aplicação da Teoria dos Prospectos, ou seja, a função perda e ganho. Pesquisas apontam que o método é bastante eficiente na identificação das alternativas mais relevantes e suas etapas são definidas conforme sequência: avaliação da matriz decisão e vetor de pesos para normalização de cada critério; cálculo das matrizes de dominância parcial, final e incorporação da Teoria dos Prospectos; normalização da matriz de dominância final; ranqueamento das alternativas e ordenamento dos valores (ALVES, 2018).

3 ESTADO DA ARTE

Para seleção dos artigos realizou-se uma investigação preliminar por meio de pesquisas em sites e periódicos, especialmente nos bancos de dados do *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *Scielo* e *Scopus*. Inicialmente foi realizada a leitura das publicações de artigos científicos e na sequência foi analisada a aplicabilidade dos temas a este trabalho. Da análise final, foram selecionados alguns artigos que serão vistos a seguir.

O trabalho de Rojas-Zerpa e Yusta (2015) utilizou a aplicação combinada dos métodos de decisão multicritério AHP e VIKOR para analisar o fornecimento e planejamento elétrico em áreas rurais e remotas nos andes da Venezuela. Na integração de projetos de eletrificação rural foram utilizados 4 critérios (Técnicos, Econômicos, Ambientais, Sociais) e 13 subcritérios (coeficiente de eficiência, energia não servida, disponibilidade de energia primária, viabilidade das tecnologias, valor presente líquido, custo de operação e manutenção, emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio, uso da terra, criação de emprego, aceitação social e índice de desenvolvimento humano). Após análise de um grupo de especialistas, foram propostas 13 alternativas para fornecimento elétrico: seis primeiras associadas a soluções pertencentes à geração descentralizada dispersa, outras seis opções para geração descentralizada compacta e, por último, extensão da rede elétrica pública conforme TABELA 6.

TABELA 6 - ALTERNATIVAS PARA FORNECIMENTO ELÉTRICO

Alternatives	Configuration	Description
DDG1	HRES	Hybrid system, consisting of SPV, SHP and batteries, placed in each house in the village
DDG2	HRES	
DDG3	HRES-ICE	Hybrid system, consisting of SPV, SHP, ICE and batteries, placed in each house in the village
DDG4	HRES-ICE	
DDG5	ICE	Power supply with generator set in each dwelling
DDG6	SPV	Power supply with solar panels (SPV) and batteries in each dwelling
CDG7	HRES-MICROGRID	Power supply by means of a compact hybrid system for all village, consisting of SPV, SHP, batteries and micro-grid
CDG8	HRES-MICROGRID	
CDG9	HRES-ICE-MICROGRID	Power supply by means of a compact hybrid system for all village, consisting of SPV, SHP, ICE, batteries and micro-grid
CDG10	HRES-ICE-MICROGRID	
CDG11	ICE-MICROGRID	Power supply with generator set and micro-grid
CDG12	SPV-MICROGRID	Power supply with SPV, batteries and micro-grid
CG13	Extension of the public network	Medium and low voltage electric network

DDG: Dispersed Decentralized Generation; CDG: Compact Decentralized Generation; CG: Centralized Generation; HRES: Hybrid Renewable Energy System; SPV: Solar Photovoltaic; SHP: Small Hydropower; ICE: Internal Combustion Engine; Micro-grid: Low-voltage electricity distribution system.

FONTE: ROJAS-ZERPA; YUSTA (2015).

Os resultados da combinação dos métodos multicritério revelaram como melhor opção a micro rede de geração descentralizada compacta (CDG). A este respeito, um micro-grid com alimentação por meio de um sistema híbrido, composto por painéis fotovoltaicos, pequena central hidroelétrica e um sistema de armazenamento (baterias elétricas), apresentaram os melhores resultados.

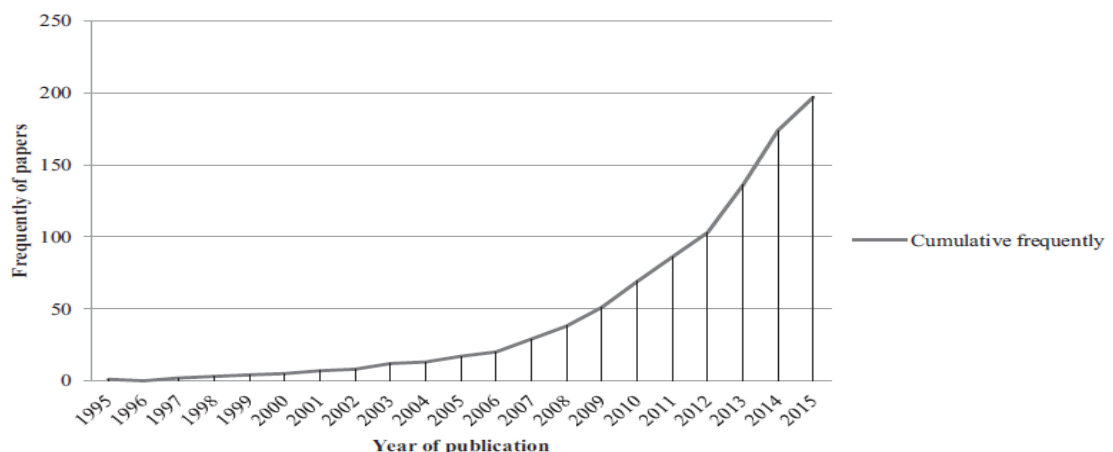
Spataru et al. (2015) desenvolveram um modelo matemático de tomada de decisão, baseado no método de Análise Hierárquica (AHP), para avaliar opções de armazenamento de energia. O estudo de caso que se realizou no Reino Unido, encontrou limitações na análise dos custos face às limitações impostas pela desatualização das fontes de dados. Para identificar a melhor forma de armazenamento de energia foram considerados três cenários: integração renovável, deslocamento de carga e qualidade da energia. Os resultados deste modelo indicaram como melhores opções dos cenários - integração renovável: hidrelétrica bombeada e hidrogênio; deslocamento de carga: hidroelétrica bombeada seguida de armazenagem térmica e baterias.

O artigo de Özkan et al. (2015) também utilizam um híbrido multicritério com metodologia combinada do AHP e TOPSIS e lógica Fuzzy tipo-2 para determinar as melhores alternativas de armazenamento de energia. O AHP foi utilizado para

determinar os pesos, critérios, subcritérios e o TOPSIS para analisar as melhores alternativas. Utilizados quatro critérios (Político e Social, Impacto Ambiental, Custo, Técnico) e 16 subcritérios (Aceitação social e política; impactos na terra, ecológico, tóxicos e saúde humana; custos do capital, armazenamento, operação & manutenção e energia; capacidade de armazenamento, Densidade, Eficiência, Relação de descarga, maturidade, tempo de vida). Foram propostas 6 alternativas de armazenamento elétrico: hidráulica bombeada, ar comprimido, baterias, volante de inércia, capacitor e magnética supercondutora. O resultado deste modelo indicou o ar comprimido como melhor opção para armazenamento de energia.

Mardani et al. (2017) revisaram estudos de duas décadas de publicações, 196 artigos entre 1995 e 2015, que utilizaram MCDM na resolução de problemas relacionados ao gerenciamento de energia associados ao desenvolvimento social e econômico. O objetivo do trabalho é identificar e fornecer informações sobre a aplicação e utilização dos métodos multicritério na tomada de decisão. Os artigos foram separados em 13 grupos: avaliação do impacto ambiental, gestão de resíduos, sustentabilidade, energia renovável, sustentabilidade energética, etc. Como resultado, o estudo ressalta importância dos diversos métodos multicritério e também a crescente tendência no desenvolvimento destes métodos. A FIGURA 9 demonstra o aumento da frequência de publicações entre 1995 e 2015 que usaram métodos de tomada de decisão multicritério.

FIGURA 9 - PUBLICAÇÕES SOBRE MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITERIO ENTRE 1995 E 2015



FONTE: MARDANI et al. (2017).

O artigo de Celli et al. (2018) analisaram a distribuição e o planejamento de rede elétrica por meio do AHP. Realizaram o estudo em uma rede de distribuição rural na Itália, consideraram nove critérios e apresentaram uma abordagem para seleção de projetos de desenvolvimento de redes inteligentes. A proposta A1069 de armazenamento obteve o melhor resultado na redução de interrupções e aprimoramento da qualidade de tensão em áreas rurais com geração distribuída.

O trabalho de Mckenna et al. (2018) utilizaram a combinação de métodos de preferências locais com análise multicritério para desenvolver conceitos de viabilidade energética em pequenas comunidades. Como exemplo, utilizaram um município da Alemanha com apoio da análise de decisão (MCDA). Identificaram três fontes de análise: sustentabilidade econômica, sustentabilidade ambiental e autonomia energética local. Ponderaram que embora a abordagem seja compreensível pelos especialistas sua viabilidade e aplicação em outros contextos depende do envolvimento das comunidades e da disponibilidade de dados detalhados sobre o sistema energético existente. Descreveram que o MCDA como ferramenta unificada exigiria predefinição dos critérios. Como melhor resultado observaram as alternativas que buscavam a maximização da sustentabilidade ambiental e restrições sobre a sustentabilidade econômica e autonomia energética.

Li et al. (2018) desenvolveram uma metodologia geral de apoio à decisão, modelo de otimização multicritério, para seleção da melhor tecnologia de armazenamento de energia. Foram considerados critérios ambientais (baixo impacto), econômicos (baixo custo total) e técnicos (maturidade) em sistemas de energia centralizada e distribuída. Os subcritérios foram distribuídos em: maturidade, CAPEX (custos de despesas de capital), OPEX (despesas operacionais), custo de reposição, alterações climáticas, toxicidade, particularidade dos materiais, esgotamento, potência nominal e tempo de descarga. O trabalho apresentou como melhores resultados: em sistemas centralizados: baterias de fluxo e hidráulica bombeada; em sistemas distribuídos: baterias de fluxo e hidrogênio.

O trabalho de Baumann et al. (2019) revisaram a literatura de MCDA de MADM para avaliar as aplicações de rede no que tange os sistemas de armazenamento de

energia. O estudo abrangeu as tecnologias: eletroquímica, mecânica e elétrica. Foram considerados os critérios: tecnologia, economia, sociedade e meio ambiente. A análise dos critérios foi realizada principalmente por meio do AHP que identificou que a maioria dos estudos concentrava-se na energia proveniente de fontes renováveis. Com base nos estudos publicados até 2018, para instalações de maior escala as tecnologias são as mais promissoras. Baterias de íon de lítio e outras tecnologias de armazenamento eletroquímico também obtiveram boas pontuações na maioria dos trabalhos revisados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para aplicação da metodologia de análise multicritério para definição da melhor tecnologia de bateria para armazenamento de energia.

4.1 MATERIAIS

Com intuito de tornar menos complexa a aplicação da metodologia, decidiu-se usar o *software* Microsoft Excel como ferramenta de apoio. O Excel é uma ferramenta disponível em praticamente todos os computadores e, portanto, acessível para a maioria das pessoas, principalmente no âmbito empresarial.

Os dados dos equipamentos foram obtidos a partir da literatura, cálculos e catálogos dos fabricantes.

4.2 MÉTODOS

O método utilizado neste trabalho é baseado nas técnicas do AHP multicritério desenvolvido por Thomas Saaty. Por apresentar facilidade de manuseio dos julgamentos inconsistentes e agregar fatores quantitativos e qualitativos foi o método escolhido (SAATY, 1977).

Segundo Mardani et al. (2017), o AHP é um dos métodos multicritério mais utilizados em estudos que envolvam gerenciamento de energia. A aplicação prática do AHP foi adaptada conforme estudo de caso e é apresentada no capítulo 5.

As fases para aplicação da metodologia estão descritas na TABELA 7.

TABELA 7 - FASES PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

FASES DA METODOLOGIA	DEFINIÇÃO
FASE 1	ALTERNATIVAS, CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS
FASE 2	ESTRUTURAÇÃO HIERÁRQUICA
FASE 3	NORMALIZAÇÃO E CONSISTÊNCIA
FASE 4	INTERDEPENDÊNCIA DOS PESOS E ALTERNATIVAS
FASE 5	ANÁLISE DE RESULTADOS

FONTE: O autor (2019).

4.2.1 Fase 1 - Alternativas, Critérios e Subcritérios

Para este modelo de tomada de decisão foram utilizados quatro tipos de tecnologias de armazenamento de energia sendo: três de chumbo-ácido e uma de íons de lítio. Por se tratarem de tecnologias recomendadas nas reuniões, e também pela disponibilidade das informações, foram as baterias escolhidas.

Para complementar as definições foram realizadas reuniões com pesquisadores do LACTEC, que agregaram profissionais de diversas áreas, onde foram definidas as alternativas, critérios, subcritérios e códigos, conforme TABELA 8.

Observações: Nível (1) se refere ao objetivo, ou seja, escolha da bateria e o nível (5) se referem às alternativas de resultados, ou seja, as opções de baterias.

TABELA 8 – CRITÉRIOS, SUBCRITÉRIOS E NÍVEIS

Cód.	CRITÉRIOS - Nível (2)	Cód.	SUBCRITÉRIOS - Nível (3)	Cód.	SUBCRITÉRIOS - Nível (4)
CA	AMBIENTAL	ca1	Segurança		
		ca2	Desmobilização		
		ca3	Impacto Visual		
		ca4	Potencial Contaminador		
CT	TECNOLÓGICO	ct1	Maturidade Tecnológica	ct11	Sistemas Instalados no Mundo
				ct12	Energia Instalada
				ct13	Disponibilidade dos Fornecedores
				ct14	Tempo de Uso Comercial da Tecnologia
		ct2	Eficiência (%)		
		ct3	Densidade	ct31	Densidade Volumétrica de Energia
ct32	Densidade Gravimétrica de Energia				
CR	REGULATÓRIO	cr1	Legislação Ambiental Aplicável		
		cr2	Atendimento às Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho		
		cr3	Fabricação / Importação		
CF	FINANCEIRO	cf1	Custo Médio		
		cf2	Facilidade de Transporte		

FONTE: O autor (2019).

Além do autor e orientadoras participaram da pesquisa outros oito profissionais com formação nas áreas de Engenharias Elétrica, Ambiental, Química, Materiais e Florestal e também Matemática, Biologia e Ecologia. Os nomes e as formações dos especialistas que autorizaram a publicação podem ser visto na TABELA 9.

TABELA 9 - ESPECIALISTAS QUE PARTICIPARAM DA PESQUISA

Profissão	Nome	Empresa
Eng. Eletricista	Crescencio Silvio Segura Salas	Institutos Lactec
Eng. Eletricista	Felipe José Lachovicz	Institutos Lactec
Eng. Eletricista	Filipe Perez	Institutos Lactec
Eng. Eletricista	Henry Leonardo Lopez Salamanca	Institutos Lactec
Eng. Ambiental	Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc	Institutos Lactec
Eng. Químico e de Materiais	Juliano de Andrade	Institutos Lactec
Biólogo e Ecologista	Marcelo Alejandro Villegas Vallejos	Institutos Lactec
Eng. Florestal	Fernando Camargo da Silva	Institutos Lactec

FONTE: O autor (2019).

CRITÉRIOS AMBIENTAIS: para o desenvolvimento do processo, devem-se considerar os critérios mais importantes dentro das alternativas tecnológicas sob a ótica ambiental. Devem-se analisar os indicadores de riscos, reciclagem, dano visual, danos sobre a Biota. Para este trabalho foram selecionados os seguintes subcritérios: segurança, desmobilização, impacto visual e potencial contaminador.

- **Segurança:** para avaliação deste subcritério, define-se como quanto maior o risco, menor a importância da tecnologia de bateria. As alternativas foram classificadas em riscos de: explosão, corrosão, contaminação por vazamentos de fluidos e exposição a agentes tóxicos. Os riscos de explosão estão associados ao uso de materiais que produzem vapores ou gases que em contato com o ar ou outra substância podem causar explosão ou incêndio. Os riscos de contaminação por vazamento de fluidos se referem ao vazamento nas baterias. Entre os principais motivos está a falta de descarte

adequado, mas também pode ocorrer no transporte e operação. O risco de explosão pode atentar contra vida e a contaminação por vazamento pode afetar áreas distantes da instalação, por esse motivo consideram-se esses riscos elevados e com grau de importância pequeno. O risco de exposição a agentes tóxicos se enquadra na definição de equipamentos com alta toxicidade, não necessariamente fluidos. O risco de corrosão se refere à presença de produtos químicos como ácido sulfúrico presente nas baterias de chumbo-ácido. Estes dois últimos riscos comparados como os demais, tendo em vista a previsibilidade das inspeções, são considerados de fácil detecção, ou seja, risco reduzido e grau de importância grande.

- Desmobilização: analisam-se os aspectos: descartável, parcialmente reciclável e integralmente reciclável. Refere-se à reciclagem, que depende dos materiais das baterias e também os tipos de resíduos gerados no final da vida útil do equipamento. Algumas tecnologias dispõem de técnicas já estabelecidas para reciclagem, bem como infraestrutura capaz de realizar esses processos, enquanto outras tecnologias ainda estão sendo estudadas (DEGHANI-SANIJ et al., 2019). O montante de material descartado deve ser reduzido e, sob esse ponto de vista, a melhor alternativa deve ser aquela que possibilite reciclagem integral.

- Impacto Visual: se refere ao impacto visual causado pelas dimensões do container que será utilizado na instalação de armazenamento de energia, considerando que quanto maior o tamanho, menor o grau de importância. Em função do volume foram definidas as seguintes classes: equivalente a containers com volume superior a 135,20 m³; equivalente a containers entre 67,60 m³ e 135,20 m³; equivalente a containers entre 33 m³ e 67,60 m³ e equivalente a container de até 33 m³.

O padrão internacional estabelece que os containers mais utilizados sejam os de 20 e 40 pés, conforme dimensionado na FIGURA 10.

FIGURA 10 – DIMENSÕES DO CONTAINER

Dimensões		20 pés	40 pés
Externa	Comprimento	6,058m	12,192m
	Largura	2,438m	2,438m
	Altura	2,591m	2,591m
Interna	Comprimento	5,900m	12,033m
	Largura	2,352m	2,352m
	Altura	2,386m	2,386m
Porta	Largura	2,340m	2,340m
	Altura	2,280m	2,275m
Capacidade Cúbica		33,00m.cu.	67,60m.cu.

FONTE: PRIMEX (2019).

- Potencial Contaminador: se refere aos danos ambientais sobre a Biota causados pelos componentes químicos das baterias. A avaliação deste critério define que quanto menor o dano, maior a importância da tecnologia. Foram definidas as seguintes classes de danos: baixos, médios, altos e muito altos. Danos baixos quando os elementos contaminantes que podem atingir o meio ambiente produzem a diminuição da qualidade da fauna e flora e ainda afetam os ecossistemas locais. Danos médios quando podem reduzir a reprodução ou sobrevivência biológica. Exemplo: intoxicação por ferro. Danos altos ou muito altos quando os elementos componentes das baterias ocasionam danos que podem levar a morte de organismos e a impossibilidade reprodutiva. Exemplo: contaminação por chumbo ou contato com ácido sulfúrico.

De forma resumida, as classificações dos subcritérios ambientais constam na TABELA 10.

TABELA 10 – SUBCRITÉRIOS AMBIENTAIS (NÍVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO

	Indicador de importância	Grau de importância
Segurança	Risco de explosão	Pequena
	Risco de vazamentos de fluidos	Pequena
	Risco de exposição a agentes tóxicos	Grande
	Risco de corrosão	Grande
Desmobilização	Descartável	Pequena
	Parcialmente reciclável	Grande
	Integralmente reciclável	Muito Grande
Impacto Visual	Equivalente a containers com volume superior a 135,20 m ³	Pequena
	Equivalente a containers entre 67,60 m ³ e 135,20 m ³	Grande
	Equivalente a containers entre 33 m ³ e 67,60 m ³	Muito Grande
	Equivalente a container de até 33 m ³	Absoluta
Potencial Contaminador	Danos muito altos sobre a Biota	Pequena
	Danos altos sobre a Biota	Pequena
	Danos médios sobre a Biota	Grande
	Danos baixos sobre a Biota	Muito Grande

FONTE: O autor (2019).

CRITÉRIOS TECNOLÓGICOS: a especificidade de cada estudo é o que determina a seleção dos critérios tecnológicos (BAUMANN et al., 2019). Da mesma forma devem-se considerar os subcritérios mais importantes dentro das alternativas com aspectos tecnológicos e analisar os sistemas instalados no mundo, energia instalada, disponibilidade dos fornecedores, tempo de uso da tecnologia, densidade gravimétrica e volumétrica. Foram selecionados neste trabalho os seguintes subcritérios: maturidade tecnológica, eficiência (%) e densidade.

- Eficiência (%): definida em função do processo químico utilizado pela bateria, é a porcentagem máxima de carga e descarga de energia armazenada para trabalhar com o mínimo reflexo na vida útil (MONTEIRO, 2011). Para avaliação deste critério define-se que quanto maior o percentual, maior o grau de importância.

De forma resumida, as classificações do subcritério tecnológico constam na TABELA 11.

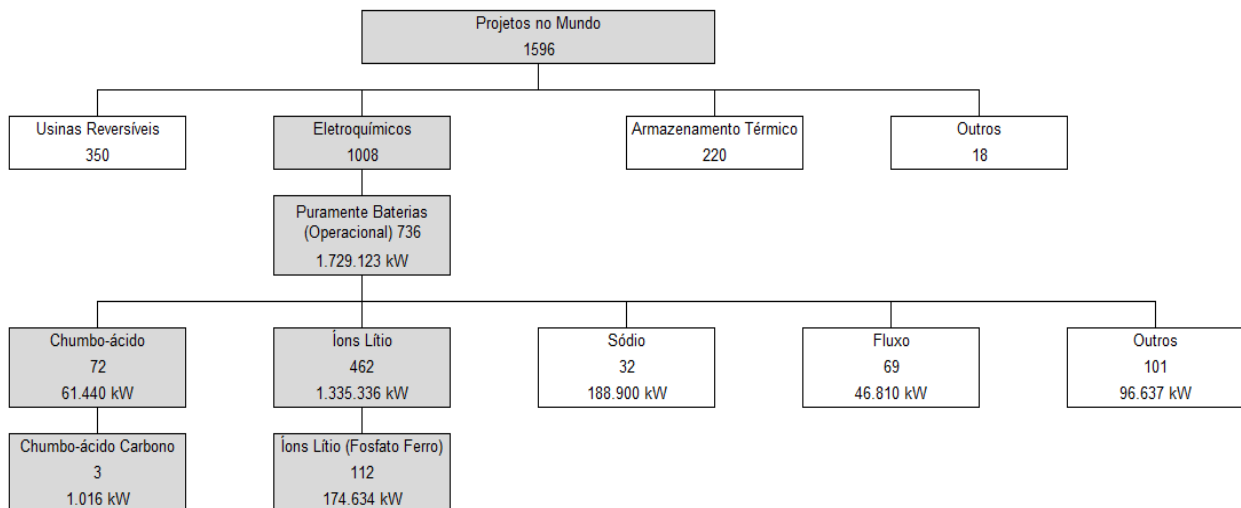
TABELA 11 – SUBCRITÉRIOS TECNOLÓGICOS (NÍVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO

	Indicador de importância	Grau de importância
Eficiência (%)	Abaixo de 80%	Pequena
	Entre 80% a 90%	Grande
	Entre 90% e 95%	Muito Grande
	Superior a 95%	Absoluta

FONTE: O autor (2019).

- Sistemas Instalados no Mundo: para análise deste subcritério, em novembro de 2019, foi realizada uma avaliação mundial com um conjunto de 1596 projetos de armazenamento de energia. As informações foram extraídas do site do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) - *Global Energy Storage Database* (DOE, 2019). Como forma de mensuração, esta metodologia adotou como maior grau de importância o número de projetos em operação, ou seja, quanto maior o número de projetos, maior a importância da tecnologia. Os projetos operacionais distribuídos no mundo estão representados na e FIGURA 11.

FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DOS PROJETOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NO MUNDO



FONTE: Adaptado de (DOE, 2019).

- Energia Instalada: foram utilizados os dados de um conjunto de 1596 projetos de armazenamento de energia extraídos do site do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) - *Global Energy Storage Database* (DOE, 2019). Adota-se

como maior grau de importância a quantidade de energia instalada, ou seja, quanto maior a quantidade, maior a importância da tecnologia.

- Disponibilidade dos Fornecedores: indicados pela quantidade de fornecedores disponíveis para cada tipo de tecnologia foram utilizados dados do site do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) - *Global Energy Storage Database* (DOE, 2019). O grau de importância esta atrelada à quantidade, ou seja, quanto maior o número de fornecedores, maior a importância da tecnologia.

- Tempo de Uso da Tecnologia: indicado pelo tempo que a tecnologia esta disponível comercialmente, ou seja, quanto mais tempo, maior o grau de importância da tecnologia.

- Densidade Volumétrica de Energia: quanto maior a densidade, maior o grau de importância, sendo medida em (Wh/mm³). A densidade volumétrica de energia é calculada pela equação (4):

$$DVE = \frac{C \times T}{V} \quad (4)$$

onde:

<i>DVE</i>	Densidade Volumétrica de Energia
<i>C</i>	Capacidade (Ah, amperes-hora)
<i>T</i>	Tensão (V)
<i>V</i>	Volume (mm ³)

- Densidade Gravimétrica de Energia: quantidade de energia armazenada por unidade de volume ou massa, sendo expressa em *Wh/litro* ou *Wh/Kg*. Quanto mais alta a densidade de energia, mais energia pode ser armazenada ou transportada pela mesma quantidade de massa. Em relação às baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio e sódio, as baterias de íons de lítio são as que possuem maior: densidade de potência e de

energia, número de ciclos e eficiência (TAVARES, 2015). Para os critérios de densidade, quanto maior a densidade, maior o grau de importância. A densidade gravimétrica de energia é calculada pela equação (5):

$$DGE = \frac{C \times T}{P} \quad (5)$$

onde:

<i>DGE</i>	Densidade Gravimétrica de Energia
<i>C</i>	Capacidade (Ah, amperes-hora)
<i>T</i>	Tensão (V)
<i>P</i>	Peso (Kg)

De forma resumida, as classificações do subcritério tecnológico constam na TABELA 12.

TABELA 12 – SUBCRITÉRIOS TECNOLÓGICOS (NÍVEL 4) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO

	Indicador de importância	Grau de importância
Sistemas Instalados no Mundo	Até 10 projetos no mundo	Pequena
	Entre 10 e 40 projetos no mundo	Grande
	Entre 40 e 80 projetos no mundo	Muito Grande
	Superior a 80 projetos no mundo	Absoluta
Energia Instalada	Até 10 MW	Pequena
	Entre 10 e 50 MW	Grande
	Entre 50 e 100 MW	Muito Grande
	Superior a 100 MW	Absoluta
Disponibilidade dos Fornecedores	Até 5 fornecedores	Pequena
	Entre 5 e 20 fornecedores	Grande
	Entre 20 e 40 fornecedores	Muito Grande
	Superior a 40 fornecedores	Absoluta
Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	Comercialmente até 10 anos	Pequena
	Comercialmente entre 10 e 30 anos	Grande
	Comercialmente entre 30 e 60 anos	Muito Grande
	Comercialmente a mais de 60 anos	Absoluta
Densidade Volumétrica de Energia	Até 0,00004 Wh/mm ³	Pequena
	Entre 0,00004 Wh/mm ³ e 0,00006 Wh/mm ³	Grande
	Entre 0,00006 Wh/mm ³ e 0,00007 Wh/mm ³	Muito Grande
	Superior a 0,00007 Wh/mm ³	Absoluta
Densidade Gravimétrica de Energia	Até 20 Wh/Kg	Pequena
	Entre 20 Wh/Kg e 60 Wh/Kg	Grande
	Entre 60 Wh/Kg e 100 Wh/Kg	Muito Grande
	Superior a 100 Wh/Kg	Absoluta

FONTE: O autor (2019).

CRITÉRIOS REGULATÓRIOS: mesmo com relevante importância e diversidade nas aplicações, o armazenamento de energia em baterias ainda depende de aprimoramentos de ordem regulatória. Neste trabalho foram selecionados os seguintes subcritérios: legislação ambiental aplicável, atendimento às normas e leis de Comissionamento e desempenho e fabricação / importação.

- **Legislação Ambiental Aplicável:** se refere à existência de dispositivos legais para análise das tecnologias no âmbito de operação. Um dos motivos que ressalta a

importância destes subcritérios é fato de dar segurança jurídica aos contratos e garantir a usabilidade dos equipamentos. A adaptabilidade da legislação pode ser considerada pela ausência de dispositivos legais específicos, mas o grau de importância é aumentado à medida que a alternativa dispõe de legislação válida e aplicável.

- Atendimento às Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho: o grau de importância aumenta em função da existência de norma e lei específica.

- Fabricação / Importação: dispõe sobre a existência de fábricas de baterias no Brasil ou no Exterior. Dada à proximidade geográfica, o grau de importância é aumentado caso a empresa tenha domicílio no Brasil.

De forma resumida, as classificações do subcritério regulatório constam na TABELA 13.

TABELA 13 – SUBCRITÉRIOS REGULATÓRIOS (NIVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO

	Indicador de importância	Grau de importância
Legislação Ambiental Aplicável	Não aplicável	Pequena
	Lei pode ser adaptada para regulamentar tecnologia	Grande
	Lei estabelecida e aplicável à tecnologia	Absoluta
Atendimento à Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho	Não existe nenhuma norma ou lei	Pequena
	Existe Norma	Grande
	Existe Norma e Lei	Muito Grande
Fabricação / Importação	Fábrica no Exterior	Pequena
	Fábrica no Brasil	Grande

FONTE: O autor (2019).

CRITÉRIOS FINANCEIROS: a importância evolui em função da crescente participação das tecnologias de geração renovável e sistemas de armazenamento de energia. A temporização para a implantação das tecnologias de armazenamento é afetada pela competitividade intrínseca, que, por sua vez, depende da evolução dos custos da tecnologia (HENDERSON, 2017, p.18). Neste trabalho foram selecionados os seguintes subcritérios financeiros: custo médio e facilidade de transporte.

- Custo médio: mesmo com os inúmeros benefícios para o sistema elétrico, o custo médio do armazenamento de energia é relativamente elevado e existem poucas informações disponíveis no Brasil (SERRA et al., 2016). As baterias estão envolvidas na geração, transmissão, distribuição e suporte ao usuário final, desempenhando importante papel na consolidação de capacidade renovável, nivelamento de carga e diferimento do capital investido. Armazenamento de energia em sistemas equipados com bateria de íon-lítio (Li-Íon) estão evoluindo rapidamente e avançam para aumentar a escala de capacidade e adequação para várias aplicações na rede. Baterias podem mostrar benefícios de custo num futuro próximo devido ao crescimento da maturidade e economia de escala (HENDERSON, 2017, p.24). Para avaliação do subcritério define-se que quanto maior o custo médio de compra, menor o grau de importância.

-Facilidade de Transporte: o peso (kg) das baterias alojadas dentro dos containers é um fator que aumenta os custos de transporte dos equipamentos. Para efeito desta metodologia, tendo em vista que junto das baterias deve ser reservado espaço para cabeamento, refrigeração e área de circulação, adota-se 60% como percentual máximo de ocupação do container. Para determinar o grau de importância, calcula-se a quantidade de containers necessários, onde quanto maior o número de containers, menor o grau de importância. De forma resumida, as classificações do subcritério financeiro constam na TABELA 14.

TABELA 14 – SUBCRITÉRIOS FINANCEIROS (NÍVEL 3) – INDICADOR, GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO NORMALIZADO

	Indicador de importância	Grau de importância
Custo Médio	Superior a U\$ 1.000 / MWh	Pequena
	Entre U\$ 500 e U\$ 1.000 / MWh	Grande
	Entre U\$ 100 e U\$ 500 / MWh	Muito Grande
	Até U\$ 100 / MWh	Absoluta
Facilidade de Transporte	Peso superior a 10.000 kg	Pequena
	Peso entre 5.000 kg e 10.000 kg	Grande
	Peso entre 1.000 kg e 5.000 kg	Muito Grande
	Peso de até 1.000 kg	Absoluta

FONTE: O autor (2019).

4.2.2 Fase 2 – Estruturação Hierárquica AHP

Segundo Cebi et al. (2016), os indicadores do nível e grau de importância que determinam os pesos dos critérios e subcritérios podem ser obtidos por meio da revisão da literatura, pela avaliação dos peritos, mas principalmente mediante as comparações de pares. Antes dos cálculos e comparações é necessário montar esquema hierárquico conforme exemplo da FIGURA 7 e em seguida obter os pesos por meio de questionários.

Os questionários devem ser respondidos conforme exemplo da FIGURA 12, e a versão completa encontra-se no apêndice, FIGURA 14.

FIGURA 12 - QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO COMPARATIVA

Assinale com (X) <u>somente um</u> critério. (De maior importância)					Assinale com (X) <u>somente um</u> número de acordo com a importância:														
					1	2	3	4	5	6	7	8	9						
	CA	AMBIENTAL		CT	TECNOLÓGICO														
	CA	AMBIENTAL		CR	REGULATÓRIO														
	CA	AMBIENTAL		CF	FINANCEIRO														
	CT	TECNOLÓGICO		CR	REGULATÓRIO														
	CT	TECNOLÓGICO		CF	FINANCEIRO														
	CR	REGULATÓRIO		CF	FINANCEIRO														

FONTE: O autor (2019).

Com as respostas dos questionários utilizando a Escala Saaty, TABELA 1, somam-se individualmente os pesos dos critérios e subcritérios e calcula-se a média. Parte-se para a construção das matrizes, onde os valores médios das respostas dos questionários são transportados para as tabelas de distribuição. Aplica-se o método AHP e obtém-se: normalização, média, autovalor e consistência.

Com apoio do Excel, são facilitadas as comparações par a par em matrizes quadradas de valores unitários na diagonal principal. A avaliação comparativa entre critérios e subcritérios, normalização, consistência, serão observadas nos exemplos a

seguir. As distribuições dos critérios por linhas e colunas utilizando o método AHP estão representadas no exemplo, TABELA 15.

TABELA 15 – DISTRIBUIÇÃO DOS CRITÉRIOS – MATRIZ DE PONDERAÇÕES

	A	B	C	D	E	F	G
1	1ª Coluna	2ª Coluna	3ª Coluna	4ª Coluna			
2	Critério	Saaty	Critério	Saaty			
3	CA	9	CT				
4		7	CR				
5		5	CF				
6	CT	3	CR				
7			CF	1			
8	CR		CF	2			
9	CF						
10							
11		CA	CT	CR	CF	TOTAL	PESO
12	CA	1,00	9,00	7,00	5,00	22,00	0,6609
13	CT	0,11	1,00	3,00	1,00	5,11	0,1535
14	CR	0,14	0,33	1,00	0,50	1,98	0,0594
15	CF	0,20	1,00	2,00	1,00	4,20	0,1262
16	TOTAL	1,45	11,33	13,00	7,50	33,29	1,00

FONTE: O autor (2019).

Tem-se a partir dos resultados dos pesos do exemplo que o Critério Ambiental (CA) é o mais relevante, seguido do Critério Tecnológico (CT), Critério Financeiro (CF) e por último Critério Regulatório (CR).

Para preenchimento das colunas azuis (B3:B8 e D3:D8), da área triangular azul (células C12, D12, E12, D13, E13 e E14), da área triangular branca (células B13, B14, C14, B15, C15 e D15), devem ser observadas as seguintes normas:

- Intensidade de importância, deve-se atribuir um único peso, para uma única coluna (B3:B8 ou D3:D8) conforme escala Saaty;
- Quando os pesos julgados forem igualmente importantes, deve-se atribuir peso 1 para apenas uma das colunas (B3:B8 ou D3:D8);
- Células da diagonal principal: quando se comparam os critérios por eles mesmos o valor é igual a 1, (B12, C13, D14 e E15);

- No preenchimento da área triangular azul, se o peso julgado estiver na coluna (B3:B8), quando comparado com seu par da coluna (D3:D8), o valor deve ser inteiro (mais importante); se o peso julgado estiver na coluna (D3:D8), quando comparado com seu par da coluna (B3:B8), o valor deve ser dividido de 1 (menos importante); conforme flechas indicativas da TABELA 15;
- No preenchimento da área triangular branca, devem-se dividir de 1 seus respectivos pares;
- Somam-se as linhas conforme linha 16 e as colunas conforme coluna F;
- O peso individual normalizado (coluna G) é calculado por meio do total de cada linha do critério, dividido pelo total da coluna F.

Como forma de exemplificar, as fórmulas da planilha da matriz de ponderações foram automatizadas conforme TABELA 16.

TABELA 16 – AUTOMATIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS CRITÉRIOS – MATRIZ DE PONDERAÇÕES

	A	B	C	D	E	F	G
11		CA	CT	CR	CF	TOTAL	PESO
12	CA	1	=SE(B3>0;B3;1/D3)	=SE(B4>0;B4;1/D4)	=SE(B5>0;B5;1/D5)	=SOMA(B12:E12)	=F12/F16
13	CT	=1/C12	1	=SE(B6>0;B6;1/D6)	=SE(B7>0;B7;1/D7)	=SOMA(B13:E13)	=F13/F16
14	CR	=1/D12	=1/D13	1	=SE(B8>0;B8;1/D8)	=SOMA(B14:E14)	=F14/F16
15	CF	=1/E12	=1/E13	=1/E14	1	=SOMA(B15:E15)	=F15/F16
16	TOTAL	=SOMA(B12:B15)	=SOMA(C12:C15)	=SOMA(D12:D15)	=SOMA(E12:E15)	=SOMA(F12:F15)	=SOMA(G12:G15)

FONTE: O autor (2019).

4.2.3 Fase 3 – Normalização e Consistência

Normalização

O processo de normalização requer a elaboração de uma nova matriz que utiliza os valores da matriz anterior. Os valores são obtidos por meio do valor de cada célula dividido pela soma de cada coluna. A média é obtida mediante a soma das linhas divididas pelo número de critérios. Com isso obtém-se a média individual e a matriz normalizada (vetor de prioridades) conforme exemplo da TABELA 17.

TABELA 17 – MATRIZ NORMALIZADA

18		CA	CT	CR	CF	TOTAL	MEDIA
19	CA	0,69	0,79	0,54	0,67	2,69	0,671755
20	CT	0,08	0,09	0,23	0,13	0,53	0,132189
21	CR	0,10	0,03	0,08	0,07	0,27	0,067814
22	CF	0,14	0,09	0,15	0,13	0,51	0,128242
23	TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,000000

FONTE: O autor (2019).

No Excel, de forma automatizada, o exemplo de normalização pode ser escrito conforme TABELA 18.

TABELA 18 – AUTOMATIZAÇÃO DA MATRIZ NORMALIZADA

	A	B	C	D	E	F	G
18		CA	CT	CR	CF	TOTAL	MEDIA
19	CA	=B12/B16	=C12/C16	=D12/D16	=E12/E16	=SOMA(B19:E19)	=F19/F23
20	CT	=B13/B16	=C13/C16	=D13/D16	=E13/E16	=SOMA(B20:E20)	=F20/F23
21	CR	=B14/B16	=C14/C16	=D14/D16	=E14/E16	=SOMA(B21:E21)	=F21/F23
22	CF	=B15/B16	=C15/C16	=D15/D16	=E15/E16	=SOMA(B22:E22)	=F22/F23
23	TOTAL	=SOMA(B19:B22)	=SOMA(C19:C22)	=SOMA(D19:D22)	=SOMA(E19:E22)	=SOMA(F19:F22)	=SOMA(G19:G22)

FONTE: O autor (2019).

Consistência

Pequenas inconsistências são comuns e não causam maiores problemas, mas quanto menor o índice de consistência em relação à zero, maior a consistência do processo com um todo (GEORGIU; MOHAMMED; ROZAKIS, 2015).

Utilizando os dados da TABELA 17, cria-se a coluna (H) para cálculo do autovalor máximo (λ_{max}), e em seguida calculam-se os índices e taxa de consistência: IC, ICA e TC, conforme exemplo da TABELA 19.

TABELA 19 – CÁLCULO DA CONSISTÊNCIA – AUTOVALOR, IC, ICA E TC

	A	B	C	D	E	F	G	H
18		CA	CT	CR	CF	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
19	CA	0,69	0,79	0,54	0,67	2,69	0,671755	4,43
20	CT	0,08	0,09	0,23	0,13	0,53	0,132189	4,07
21	CR	0,10	0,03	0,08	0,07	0,27	0,067814	4,01
22	CF	0,14	0,09	0,15	0,13	0,51	0,128242	4,14
23	TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,000000	4,16
24								
25	IC =	0,0544						
26	ICA =	0,89						
27	TC =	6,11%	< 0,1 ~ 10% (referência)					

FONTE: O autor (2019).

De forma automatizada no Excel, os cálculos podem ser escritos conforme TABELA 20.

TABELA 20 – AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE CONSISTÊNCIA – AUTOVALOR, IC, ICA E TC

	CA	CT	CR	CF	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
CA	=B12/B16	=C12/C16	=D12/D16	=E12/E16	=SOMA(B19:E19)	=F19/F23	=MATRIZ.MULT(B12:E12;G19:G22)/G19
CT	=B13/B16	=C13/C16	=D13/D16	=E13/E16	=SOMA(B20:E20)	=F20/F23	=MATRIZ.MULT(B13:E13;G19:G22)/G20
CR	=B14/B16	=C14/C16	=D14/D16	=E14/E16	=SOMA(B21:E21)	=F21/F23	=MATRIZ.MULT(B14:E14;G19:G22)/G21
CF	=B15/B16	=C15/C16	=D15/D16	=E15/E16	=SOMA(B22:E22)	=F22/F23	=MATRIZ.MULT(B15:E15;G19:G22)/G22
TOTAL	=SOMA(B19:B22)	=SOMA(C19:C22)	=SOMA(D19:D22)	=SOMA(E19:E22)	=SOMA(F19:F22)	=SOMA(G19:G22)	=SOMA(H19:H22)/F23

IC =	= (H23-F23)/(F23-1)
ICA =	= 0,89
TC =	= B25/B26 < 0,1 ~ 10% (referência)

FONTE: O autor (2019).

4.2.4 Fase 4 – Interdependência dos Pesos e Alternativas

Como forma de padronizar em ordem crescente o grau de importância, foram atribuídos valores de acordo com a escala Saaty e normalizados os pesos conforme

TABELA 21. Esses valores serão considerados na interdependência de pesos e alternativas.

TABELA 21 – NORMALIZAÇÃO DO GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO (PADRONIZAÇÃO)

1ª Coluna	2ª Coluna	3ª Coluna	4ª Coluna
Subcritério	Saaty	Subcritério	Saaty
Pequena		Grande	2
		Muito Grande	3
		Absoluta	4
Grande		Muito Grande	3
		Absoluta	4
Muito Grande		Absoluta	4

	Pequena	Grande	Muito Grande	Absoluta	TOTAL	PESO
Pequena	1,00	0,50	0,33	0,25	2,08	0,080386
Grande	2,00	1,00	0,33	0,25	3,58	0,138264
Muito Grande	3,00	3,00	1,00	0,25	7,25	0,279743
Absoluta	4,00	4,00	4,00	1,00	13,00	0,501608
TOTAL	10,00	8,50	5,67	1,75	25,92	1,00

FONTE: O autor (2019).

Os pesos normalizados da TABELA 21 são inseridos TABELA 22 conforme exemplo. Com os pesos calculados, associa-se o grau de importância para cada uma das alternativas e multiplica pelos pesos dos níveis anteriores. No estudo de caso os resultados serão associados às alternativas que melhor se ajustam.

TABELA 22 – INTERDEPENDÊNCIA DE PESOS E ALTERNATIVAS

Segurança		
Qual o nível de risco? (quanto maior o risco, menor a importância da bateria)		
GRAU DE IMPORTÂNCIA		
	Pequena	0,080386
	Grande	0,138264
	Muito Grande	0,279743
	Absoluta	0,501608
PESOS		
	Peso do critério (Nível 2)	0,154545
	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,362329
Peso Critério X Subcritérios		0,055996
ALTERNATIVAS		
B1	Grande	0,138264
B2	Grande	0,138264
B3	Grande	0,138264
B4	Pequena	0,080386

FONTE: O autor (2019).

4.2.5 Fase 5 – Análise dos Resultados

Os resultados individuais das alternativas em relação aos critérios, correspondente a cada bateria de armazenamento de energia (B1, B2, B3 e B4), são obtidos por meio da multiplicação dos pesos dos níveis pelo grau de importância associado a cada alternativa, conforme exemplo da TABELA 23.

TABELA 23 - INTERDEPENDÊNCIA DE PESOS E ALTERNATIVAS (RESULTADOS)

		Segurança	
		Qual o nível de risco? (quanto maior o risco, menor a importância da bateria)	
GRAU DE IMPORTÂNCIA			
	Pequena		0,080386
	Grande		0,138264
	Muito Grande		0,279743
	Absoluta		0,501608
PESOS			
	Peso do critério (Nível 2)		0,154545
	Peso dos subcritérios (Nível 3)		0,362329
Peso Critério X Subcritérios			0,055996
ALTERNATIVAS			
B1	Grande		0,138264
B2	Grande		0,138264
B3	Grande		0,138264
B4	Pequena		0,080386
RESULTADOS		Segurança	
B1		0,007742	
B2		0,007742	
B3		0,007742	
B4		0,004501	

FONTE: O autor (2019).

Após os cálculos individuais, onde cada alternativa tecnológica passa a ser avaliada de acordo com cada um dos critérios, analisa-se o somatório de todas as linhas de cada alternativa. O resultado com o maior valor será a melhor alternativa de armazenamento de energia.

5 ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso que utiliza dados reais, estão detalhadas as atividades de descrição dos equipamentos, classificação dos dados segundo importância e simulação. Na análise dos resultados serão observados os dados gerados, assertividade e respostas sobre a eficácia do método.

5.1.1 Fase 1 – Alternativas, Critérios e Subcritérios

Os critérios e subcritérios foram escolhidos por meio de reuniões no Lactec, conforme descrições do capítulo anterior. Tendo em vista a disponibilidade das informações, seja por catálogos dos fornecedores, reuniões ou literatura, em seguida foram escolhidas as alternativas, sendo quatro tipos de tecnologias de armazenamento de energia. As alternativas tecnológicas estão descritas conforme TABELA 24.

TABELA 24 – ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE BATERIAS

Cód.	Alternativas de Baterias - Nível (5)	Fabricante	Modelo
B1	Chumbo-Ácido Tubular Estacionária Ventilada (OPzS)	Fulguris	3OPzs150
B2	Chumbo-Ácido Carbono (PbC)	Narada	12RECX120
B3	Chumbo-Ácido Estacionária Ventilada	Moura Clean	12MF175
B4	Íons de Lítio LFP (Fosfato de Ferro)	UniPower	UP-LFP 4875

FONTE: O autor baseado nos catálogos dos fabricantes (2019).

Além da identificação das baterias, este capítulo objetiva modelar o problema de otimização multicritério, aplicar, testar a metodologia e avaliar os dados gerados. Como forma de padronizar os cálculos para todas as alternativas, convencionou-se que demanda de aplicação (medida em kWh), será no montante de 50 kWh.

Com base na literatura e catálogo dos fabricantes, foram obtidas e calculadas as características das baterias conforme tabelas TABELA 25 e TABELA 26.

TABELA 25 – PANORAMA GERAL DO BANCO DE BATERIAS

	Capacidade (Ah)	Tensão (V)	DOD	Vida útil (anos)	Volume (mm ³)	Dimensões C x L x A (mm)	Peso (Kg)	ICC (A) ¹	Eficiência de Carga/ Descarga	Densidade Gravimétrica de Energia (Wh/kg)	Densidade Volumétrica Energia (Wh/mm ³)
B1	150	2	0,2	12	7.977.968	103x206x376	16	2000	85,00%	18,75	0,0000376036
B2	100	12	0,7	20	19.131.168	290,5x294x224	51	1996	92,00%	23,53	0,0000627249
B3	160	12	0,2	10	34.593.504	517x272x246	54,2	4813	85,00%	35,42	0,0000555017
B4	75	48	0,8	10	31.293.600	442x400x177	41	75	98,00%	87,80	0,0001150395

FONTE: O autor baseado nos catálogos dos fabricantes (2019).

TABELA 26 – DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS

	Energia do Banco de Baterias [kWh]	Potência do Banco de Baterias [kW]	Tempo de uso calculado [anos]	Peso do Banco de baterias pela energia (kg)	Volume a partir da energia (m ³)	Nº de baterias	% utilizado do Container (60% da capacidade)
B1	250,00	12,50	2,10	13.333,33	6,65	833,33	20,08%
B2	71,43	3,57	3,15	3.035,71	1,14	59,52	3,44%
B3	250,00	12,50	2,47	7.057,29	4,50	130,21	13,60%
B4	62,50	3,13	5,03	711,81	0,54	17,36	1,64%

FONTE: O autor baseado nos catálogos dos fabricantes (2019).

Com as características calculadas e literatura analisada, descrevem-se os resultados e grau de importância de cada bateria. Os pesos associados foram obtidos conforme TABELA 21.

Os resultados da bateria de Chumbo-Ácido Tubular Estacionária Ventilada (OPzS) estão descritos na TABELA 27.

TABELA 27 – RESULTADOS BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO TUBULAR ESTACIONÁRIA VENTILADA (OPzS)

Critério / Subcritério	Resultado	Grau de Importância	Peso
Segurança	Corrosão, exposição a agentes tóxicos	Grande	0,138264
Desmobilização	Integralmente reciclável	Muito Grande	0,279743
Impacto Visual	Equivalente a container de até 33 m ³	Absoluta	0,501608
Potencial Contaminador	Chumbo, antimônio, ácido sulfúrico	Pequena	0,080386
Eficiência (%)	85,00%	Grande	0,138264
Sistemas Instalados no Mundo	45	Muito Grande	0,279743
Energia Instalada	61.440 kW	Muito Grande	0,279743
Disponibilidade dos Fornecedores	Superior a 40	Absoluta	0,501608
Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	Comercialmente a mais de 60 anos	Absoluta	0,501608
Densidade Volumétrica de Energia	0,00003760	Pequena	0,080386
Densidade Gravimétrica de Energia	18,75	Pequena	0,080386
Legislação Ambiental Aplicável	Lei estabelecida e aplicável à tecnologia	Absoluta	0,501608
Atendimento às Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho	Existe somente norma	Grande	0,138264
Fabricação / Importação	Fabrica no Brasil	Grande	0,138264
Custo Médio	Entre U\$ 500 e 1.000	Muito Grande	0,279743
Facilidade de Transporte	40.000,00	Pequena	0,080386

FONTE: O autor (2019).

Os resultados da bateria de Chumbo-Ácido Carbono (PbC) estão descritos na TABELA 28.

TABELA 28 – RESULTADOS BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO CARBONO

Critério / Subcritério	Resultado	Grau de Importância	Peso
Segurança	Corrosão, exposição a agentes tóxicos	Grande	0,138264
Desmobilização	Integralmente reciclável	Muito Grande	0,279743
Impacto Visual	Equivalente a container de até 33 m3	Absoluta	0,501608
Potencial Contaminador	Chumbo, antimônio, ácido sulfúrico (danos altos)	Pequena	0,080386
Eficiência (%)	92,00%	Muito Grande	0,279743
Sistemas Instalados no Mundo	3	Pequena	0,080386
Energia Instalada	1.016 kW	Grande	0,138264
Disponibilidade dos Fornecedores	Entre 5 e 20 fornecedores	Grande	0,138264
Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	Comercialmente até 10 anos	Pequena	0,080386
Densidade Volumétrica de Energia	0,00006272	Muito Grande	0,279743
Densidade Gravimétrica de Energia	23,53	Grande	0,138264
Legislação Ambiental Aplicável	Lei pode ser adaptada	Grande	0,138264
Atendimento às Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho	Não existe nenhuma norma	Pequena	0,080386
Fabricação / Importação	Fabrica no Exterior	Pequena	0,080386
Custo Médio	Entre U\$ 500 e 1.000	Muito Grande	0,279743
Facilidade de Transporte	9.107,14	Muito Grande	0,279743

FONTE: O autor (2019).

Os resultados da bateria de Chumbo-Ácido Estacionária Ventilada estão descritos na TABELA 29.

TABELA 29 – RESULTADOS BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO ESTACIONÁRIA VENTILADA

Critério / Subcritério	Resultado	Grau de Importância	Peso
Segurança	Corrosão, exposição a agentes tóxicos	Grande	0,138264
Desmobilização	Integralmente reciclável	Muito Grande	0,279743
Impacto Visual	Equivalente a container de até 33 m3	Absoluta	0,501608
Potencial Contaminador	Chumbo, ácido sulfúrico (danos médios)	Grande	0,138264
Eficiência (%)	85,00%	Grande	0,138264
Sistemas Instalados no Mundo	69	Muito Grande	0,279743
Energia Instalada	61.440 kW	Muito Grande	0,279743
Disponibilidade dos Fornecedores	Superior a 40	Absoluta	0,501608
Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	Comercialmente a mais de 60 anos	Absoluta	0,501608
Densidade Volumétrica de Energia	0,00005550	Grande	0,138264
Densidade Gravimétrica de Energia	35,42	Grande	0,138264
Legislação Ambiental Aplicável	Lei estabelecida e aplicável à tecnologia	Absoluta	0,501608
Atendimento às Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho	Existe somente norma	Grande	0,138264
Fabricação / Importação	Fabrica no Brasil	Grande	0,138264
Custo Médio	Entre U\$ 100 e 500	Muito Grande	0,279743
Facilidade de Transporte	21.171,88	Grande	0,138264

FONTE: O autor (2019).

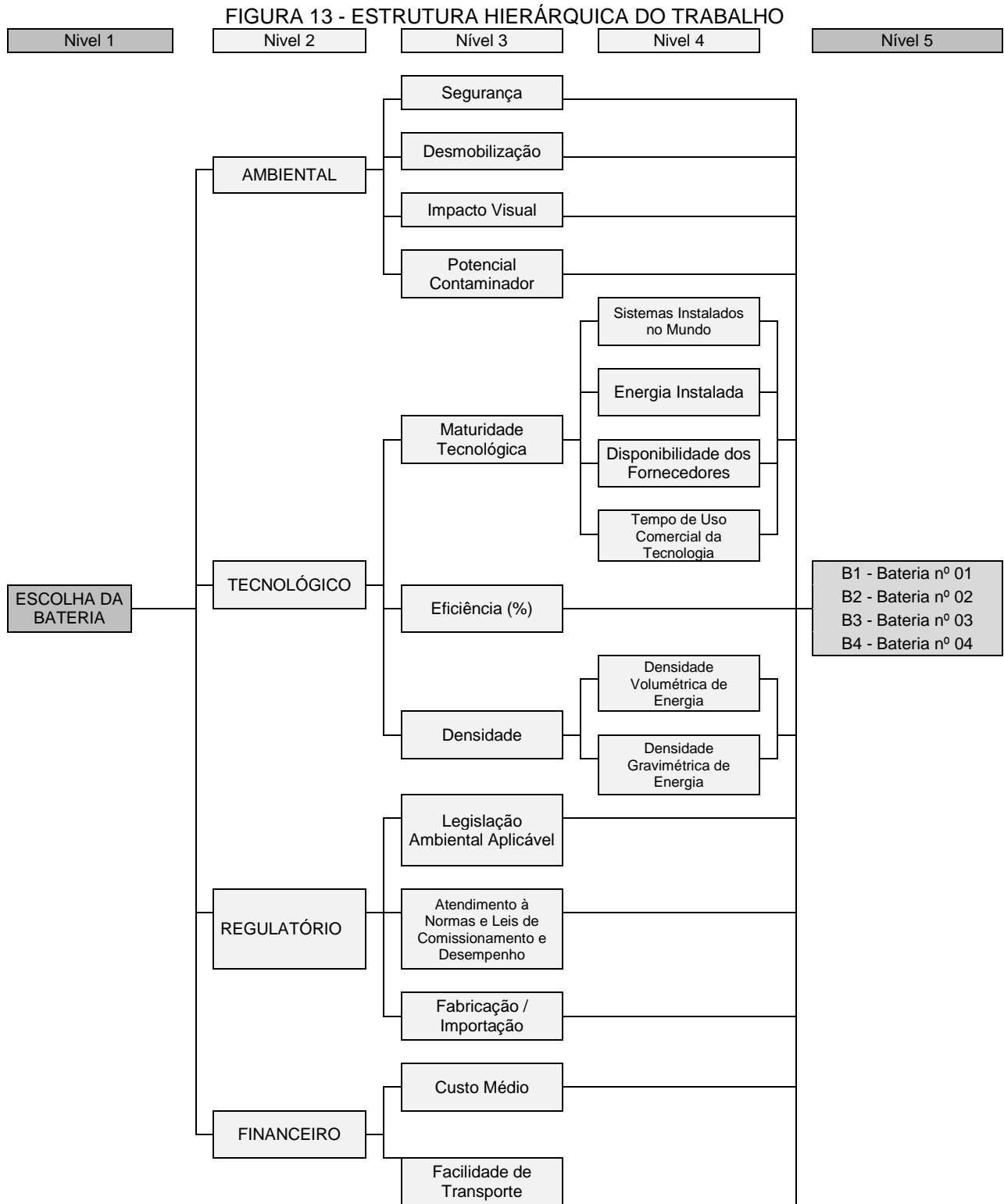
Os resultados da bateria de Íons de Lítio LFP (Fosfato de Ferro) estão descritos na TABELA 30.

TABELA 30 – RESULTADOS BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO LFP

Critério / Subcritério	Resultado	Grau de Importância	Peso
Segurança	Explosão, exposição a agentes tóxicos	Pequena	0,080386
Desmobilização	Descartável	Pequena	0,080386
Impacto Visual	Equivalente a container de até 33 m3	Absoluta	0,501608
Potencial Contaminador	Lítio, óxidos de titânio, solventes orgânicos tipo dimetoxietano (danos baixos)	Muito Grande	0,279743
Eficiência (%)	98,00%	Absoluta	0,501608
Sistemas Instalados no Mundo	112	Absoluta	0,501608
Energia Instalada	174.634 kW	Absoluta	0,501608
Disponibilidade dos Fornecedores	Superior a 40	Absoluta	0,501608
Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	Comercialmente desde os anos 70	Muito Grande	0,279743
Densidade Volumétrica de Energia	0,00011504	Absoluta	0,501608
Densidade Gravimétrica de Energia	87,80	Muito Grande	0,279743
Legislação Ambiental Aplicável	Lei pode ser adaptada	Grande	0,138264
Atendimento às Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho	Existe somente norma	Grande	0,138264
Fabricação / Importação	Fabrica no Exterior	Pequena	0,080386
Custo Médio	Superior a U\$ 1.000	Pequena	0,080386
Facilidade de Transporte	2.135,42	Absoluta	0,501608

FONTE: O autor (2019).

5.1.2 Fase 2 – Estruturação Hierárquica AHP



5.1.3 Fase 3 – Normalização e Consistência

Crítérios X Crítérios

Todas as matrizes de distribuição e comparação a seguir, se originaram na média dos pesos atribuídos pelos profissionais que responderam os questionários de pesquisa. Para cada um dos casos, foi formulada uma matriz comparativa entre critérios/subcritérios para cálculo da normalização, média, autovalor e consistências. Os procedimentos de cálculo foram descritos na seção 4.2 – método. Os cálculos dos Crítérios X Crítérios estão representados na TABELA 31.

TABELA 31 – DISTRIBUIÇÃO DOS CRITÉRIOS, NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA (CRITÉRIOS X CRITÉRIOS)

	CA	CT	CR	CF	TOTAL	PESO NORMALIZADO
CA	1,00	0,33	0,50	1,00	2,83	0,1545
CT	3,00	1,00	2,00	1,00	7,00	0,3818
CR	2,00	0,50	1,00	1,00	4,50	0,2455
CF	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	0,2182
TOTAL	7,00	2,83	4,50	4,00	18,33	1,00

Normalização Autovalor

	CA	CT	CR	CF	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
CA	0,14	0,12	0,11	0,25	0,62	0,155404	4,10
CT	0,43	0,35	0,44	0,25	1,48	0,368989	4,19
CR	0,29	0,18	0,22	0,25	0,93	0,233602	4,16
CF	0,14	0,35	0,22	0,25	0,97	0,242005	4,13
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,000000	4,14

Consistência

IC =	0,0479
ICA =	0,89
TC =	5,38%

FONTE: O autor (2019).

Este procedimento deve ser aplicado em todos os subcritérios e depois aos subcritérios relacionamentos aos atributos de qualidade.

Subcritérios X Subcritérios (AMBIENTAL – Nível 3)

De forma análoga, a distribuição, normalização, média, autovalor e consistência estão representados na TABELA 32.

TABELA 32 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO AMBIENTAL (NÍVEL 3), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA

	ca1	ca2	ca3	ca4	TOTAL	PESO
ca1	1,00	3,00	7,00	1,00	12,00	0,362329
ca2	0,33	1,00	6,00	0,33	7,67	0,231488
ca3	0,14	0,17	1,00	0,14	1,45	0,043853
ca4	1,00	3,00	7,00	1,00	12,00	0,362329
TOTAL	2,48	7,17	21,00	2,48	33,12	1,00

Normalização Autovalor

	ca1	ca2	ca3	ca4	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
ca1	0,40	0,42	0,33	0,40	1,56	0,389908	4,17
ca2	0,13	0,14	0,29	0,13	0,69	0,173620	4,11
ca3	0,06	0,02	0,05	0,06	0,19	0,046565	4,01
ca4	0,40	0,42	0,33	0,40	1,56	0,389908	4,17
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,000000	4,12

Consistência

IC =	0,0387
ICA =	0,89
TC =	4,34%

FONTE: O autor (2019).

Subcritérios X Subcritérios (TECNOLÓGICO– Nível 3)

A distribuição, normalização, média, autovalor e consistência estão representados na TABELA 33.

TABELA 33 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO (NÍVEL 3), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA

	ct1	ct2	ct3	TOTAL	PESO
ct1	1,00	0,33	0,50	1,83	0,169231
ct2	3,00	1,00	1,00	5,00	0,461538
ct3	2,00	1,00	1,00	4,00	0,369231
TOTAL	6,00	2,33	2,50	10,83	1,00

Normalização Autovalor

	ct1	ct2	ct3	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
ct1	0,17	0,14	0,20	0,51	0,169841	3,01
ct2	0,50	0,43	0,40	1,33	0,442857	3,03
ct3	0,33	0,43	0,40	1,16	0,387302	3,02
TOTAL	1,00	1,00	1,00	3,00	1,000000	3,02

Consistência

IC =	0,0092
ICA =	0,52
TC =	1,76%

FONTE: O autor (2019).

Subcritérios X Subcritérios (TECNOLÓGICO – Nível 4)

A distribuição, normalização, média, autovalor e consistência estão representados nas TABELA 34 e TABELA 35.

TABELA 34 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO – MATURIDADE TECNOLÓGICA (NÍVEL 4), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA

	ct11	ct12	ct13	ct14	TOTAL	PESO
ct11	1,00	1,00	0,25	1,00	3,25	0,168831
ct12	1,00	1,00	0,50	1,00	3,50	0,181818
ct13	4,00	2,00	1,00	2,00	9,00	0,467532
ct14	1,00	1,00	0,50	1,00	3,50	0,181818
TOTAL	7,00	5,00	2,25	5,00	19,25	1,00

Normalização Autovalor

	ct11	ct12	ct13	ct14	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
ct11	0,14	0,20	0,11	0,20	0,65	0,163492	4,03
ct12	0,14	0,20	0,22	0,20	0,77	0,191270	4,04
ct13	0,57	0,40	0,44	0,40	1,82	0,453968	4,13
ct14	0,14	0,20	0,22	0,20	0,77	0,191270	4,04
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,000000	4,06

Consistência

IC =	0,0202
ICA =	0,89
TC =	2,27%

FONTE: O autor (2019).

TABELA 35 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO TECNOLÓGICO - DENSIDADE (NÍVEL 4)

	ct31	ct32	TOTAL	PESO
ct31	1,00	1,00	2,00	0,500000
ct32	1,00	1,00	2,00	0,500000
TOTAL	2,00	2,00	4,00	1,00

FONTE: O autor (2019).

Subcritérios X Subcritérios (REGULATÓRIO– Nível 3)

A distribuição, normalização, média, autovalor e consistência estão representados na TABELA 36.

TABELA 36 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO REGULATÓRIO (NÍVEL 3), NORMALIZAÇÃO, MÉDIA, AUTOVALOR E CONSISTÊNCIA

	cr1	cr2	cr3	TOTAL	PESO
cr1	1,00	1,00	2,00	4,00	0,340426
cr2	1,00	1,00	4,00	6,00	0,510638
cr3	0,50	0,25	1,00	1,75	0,148936
TOTAL	2,50	2,25	7,00	11,75	1,00

Normalização Autovalor

	cr1	cr2	cr3	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
cr1	0,40	0,44	0,29	1,13	0,376720	3,06
cr2	0,40	0,44	0,57	1,42	0,471958	3,08
cr3	0,20	0,11	0,14	0,45	0,151323	3,02
TOTAL	1,00	1,00	1,00	3,00	1,000000	3,05

Consistência

IC =	0,0269
ICA =	0,52
TC =	5,17%

FONTE: O autor (2019).

Subcritérios X Subcritérios (FINANCEIRO– Nível 3)

A distribuição esta representada na TABELA 37.

TABELA 37 – DISTRIBUIÇÃO DO SUBCRITÉRIO FINANCEIRO (NÍVEL 3)

	cf1	cf2	TOTAL	PESO
cf1	1,00	4,00	5,00	0,800000
cf2	0,25	1,00	1,25	0,200000
TOTAL	1,25	5,00	6,25	1,00

FONTE: O autor (2019).

Alternativas X Alternativas

Os pesos normalizados das qualidades dos critérios padronizam a distribuição das alternativas pelo nível de importância e estão representados conforme cálculos da TABELA 21 e TABELA 38. Estes pesos são associados a cada alternativa.

TABELA 38 – NORMALIZAÇÃO DO GRAU DE IMPORTÂNCIA E PESO

	Pequena	Grande	Muito Grande	Absoluta	TOTAL	PESO
Pequena	1,00	0,50	0,33	0,25	2,08	0,080386
Grande	2,00	1,00	0,33	0,25	3,58	0,138264
Muito Grande	3,00	3,00	1,00	0,25	7,25	0,279743
Absoluta	4,00	4,00	4,00	1,00	13,00	0,501608
TOTAL	10,00	8,50	5,67	1,75	25,92	1,00

Normalização Autovalor

	Pequena	Grande	Muito Grande	Absoluta	TOTAL	MEDIA	λ_{max}
Pequena	0,10	0,06	0,06	0,14	0,36	0,090126	4,11
Grande	0,20	0,12	0,06	0,14	0,52	0,129832	4,05
Muito Grande	0,30	0,35	0,18	0,14	0,97	0,243067	4,27
Absoluta	0,40	0,47	0,71	0,57	2,15	0,536975	4,45
TOTAL	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,000000	4,22

Consistência

IC =	0,0726
ICA =	0,89
TC =	8,16%

FONTE: O autor (2019).

5.1.4 Fase 4 – Interdependência dos Pesos e Alternativas

Com os valores dos pesos padronizados da TABELA 38, calculam-se as interdependências dos pesos e alternativas. O peso de cada subcritério multiplicado pelo valor do subcritério distribuído globalmente estão representados nas TABELA 39, TABELA 40, TABELA 41, TABELA 42 e TABELA 43.

CRITÉRIOS AMBIENTAIS

TABELA 39 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS – AMBIENTAIS

		Segurança		Desmobilização		Impacto Visual		Potencial Contaminador	
		Qual o nível de risco? (quanto maior o risco, menor a importância da bateria)		Quão reciclável é a bateria?		Qual o impacto visual dos containers? (quanto maior o volume visual, menor a importância)		Qual o nível de danos causados sobre a biota? (quanto maior o dano, menor a importância)	
GRAU DE IMPORTÂNCIA									
	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	
	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Grande	0,138264	
	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	
	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	
PESOS									
	Peso do critério (Nível 2)	0,154545	Peso do critério (Nível 2)	0,154545	Peso do critério (Nível 2)	0,154545	Peso do critério (Nível 2)	0,154545	
	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,362329	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,231488	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,043853	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,362329	
Peso Critério X Subcritérios		0,055996		0,035775		0,006777		0,055996	
ALTERNATIVAS									
B1	Grande	0,138264	Muito Grande	0,279743	Absoluta	0,501608	Pequena	0,080386	
B2	Grande	0,138264	Muito Grande	0,279743	Absoluta	0,501608	Pequena	0,080386	
B3	Grande	0,138264	Muito Grande	0,279743	Absoluta	0,501608	Grande	0,138264	
B4	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	Absoluta	0,501608	Muito Grande	0,279743	
RESULTADOS									
	Segurança		Desmobilização		Impacto Visual		Potencial Contaminador		
B1	0,007742		0,010008		0,003400		0,004501		
B2	0,007742		0,010008		0,003400		0,004501		
B3	0,007742		0,010008		0,003400		0,007742		
B4	0,004501		0,002876		0,003400		0,015665		

FONTE: O autor (2019).

CRITÉRIOS TECNOLÓGICOS

TABELA 40 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS TECNOLÓGICOS (continua)

	Sistemas Instalados no Mundo		Energia Instalada		Disponibilidade dos Fornecedores		Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	
	Quão relevante é o número de projetos instalados no mundo?		Quão importante é a quantidade da energia instalada?		Quão relevante é o número de fornecedores?		O fato da tecnologia estar disponível comercialmente a mais tempo é importante?	
GRAU DE IMPORTÂNCIA								
	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386
	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Grande	0,138264
	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743
	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608
PESOS								
	Peso do critério (Nível 2)	0,381818	Peso do critério (Nível 2)	0,381818	Peso do critério (Nível 2)	0,381818	Peso do critério (Nível 2)	0,381818
	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,169231	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,169231	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,169231	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,169231
	Peso dos subcritérios (Nível 4)	0,168831	Peso dos subcritérios (Nível 4)	0,181818	Peso dos subcritérios (Nível 4)	0,467532	Peso dos subcritérios (Nível 4)	0,181818
Peso Critério X Subcritérios		0,010909		0,011748		0,030210		0,011748
ALTERNATIVAS								
B1	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608
B2	Pequena	0,080386	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Pequena	0,080386
B3	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608
B4	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Muito Grande	0,279743
RESULTADOS	Sistemas Instalados no Mundo		Energia Instalada		Disponibilidade dos Fornecedores		Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	
B1	0,003052		0,003286		0,015153		0,005893	
B2	0,000877		0,001624		0,004177		0,000944	
B3	0,003052		0,003286		0,015153		0,005893	
B4	0,005472		0,005893		0,015153		0,003286	

FONTE: O autor (2019).

TABELA 41 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS – TECNOLÓGICOS (conclusão)

	Eficiência (%)		Densidade Volumétrica de Energia		Densidade Gravimétrica de Energia	
	Quão eficiente deve ser a bateria?		Quão importante é o nível densidade volumétrica ?		Quão importante é o nível densidade gravimétrica ?	
GRAU DE IMPORTÂNCIA						
	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386
	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Grande	0,138264
	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743
	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608
PESOS						
	Peso do critério (Nível 2)	0,381818	Peso do critério (Nível 2)	0,381818	Peso do critério (Nível 2)	0,381818
	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,461538	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,369231	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,369231
	Peso dos subcritérios (Nível 4)	1,000000	Peso dos subcritérios (Nível 4)	0,500000	Peso dos subcritérios (Nível 4)	0,500000
Peso Critério X Subcritérios		0,176224		0,070490		0,070490
ALTERNATIVAS						
B1	Grande	0,138264	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386
B2	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Grande	0,138264
B3	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Grande	0,138264
B4	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Muito Grande	0,279743
RESULTADOS	Eficiência (%)		Densidade Volumétrica de Energia		Densidade Gravimétrica de Energia	
B1	0,024365		0,005666		0,005666	
B2	0,049297		0,019719		0,009746	
B3	0,024365		0,009746		0,009746	
B4	0,088395		0,035358		0,019719	

FONTE: O autor (2019).

CRITÉRIOS REGULATÓRIOS

TABELA 42 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS - REGULATÓRIOS

		Legislação Ambiental Aplicável		Atendimento à Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho		Fabricação / Importação	
		A legislação ambiental é aplicável?		Atende as normas e leis?		Quão importante é para o projeto a bateria ser de fabricação nacional?	
GRAU DE IMPORTÂNCIA	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	
	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Grande	0,138264	
	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743	
	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	Absoluta	0,501608	
PESOS							
	Peso do critério (Nível 2)	0,245455	Peso do critério (Nível 2)	0,245455	Peso do critério (Nível 2)	0,245455	
	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,340426	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,510638	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,148936	
Peso Critério X Subcritérios		0,083559		0,125338		0,036557	
ALTERNATIVAS							
B1	Absoluta	0,501608	Grande	0,138264	Grande	0,138264	
B2	Grande	0,138264	Pequena	0,080386	Pequena	0,080386	
B3	Absoluta	0,501608	Grande	0,138264	Grande	0,138264	
B4	Grande	0,138264	Grande	0,138264	Pequena	0,080386	
RESULTADOS		Legislação Ambiental Aplicável		Atendimento à Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho		Fabricação / Importação	
B1		0,041914		0,017330		0,005055	
B2		0,011553		0,010075		0,002939	
B3		0,041914		0,017330		0,005055	
B4		0,011553		0,017330		0,002939	

FONTE: O autor (2019).

CRITÉRIOS FINANCEIROS

TABELA 43 – INTERDEPENDÊNCIA DOS VALORES, PESOS E ALTERNATIVAS – FINANCEIROS

	Custo Médio		Facilidade de Transporte	
	Quão importante é o comprometimento dos recursos financeiros? (quanto maior o comprometimento, menor a importância)		O peso do container impacta no transporte?	
GRAU DE IMPORTÂNCIA				
	Pequena	0,080385852	Pequena	0,080386
	Grande	0,138263666	Grande	0,138264
	Muito Grande	0,279742765	Muito Grande	0,279743
	Absoluta	0,501607717	Absoluta	0,501608
PESOS				
	Peso do critério (Nível 2)	0,218182	Peso do critério (Nível 2)	0,218182
	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,800000	Peso dos subcritérios (Nível 3)	0,200000
Peso Critério X Subcritérios		0,174545		0,043636
ALTERNATIVAS				
B1	Muito Grande	0,279743	Pequena	0,080386
B2	Muito Grande	0,279743	Muito Grande	0,279743
B3	Muito Grande	0,279743	Grande	0,138264
B4	Pequena	0,080386	Absoluta	0,501608
RESULTADOS		Custo Médio		Facilidade de Transporte
B1		0,048828		0,003508
B2		0,048828		0,012207
B3		0,048828		0,006033
B4		0,014031		0,021888

FONTE: O autor (2019).

5.1.5 Fase 5 – Análise dos Resultados

Os resultados observados são consistentes com os pressupostos teorizados e testados. A partir dos cálculos realizados, confirmada a consistência de todas as matrizes por meio do método AHP, observaram-se os seguintes resultados: TABELA 31 apresentam os resultados das avaliações de distribuição entre os critérios. Dentre as quatro possibilidades o critério técnico (CT) foi o que apresentou o melhor resultado com 38,18% de prioridade; a TABELA 32 apresentam os resultados das avaliações de distribuição dos subcritérios ambientais. Dentre as quatro possibilidades, dois critérios foram melhores avaliados e obtiveram a mesma prioridade: segurança (ca1) 36,23% e potencial contaminador (ca4) também 36,23%; a TABELA 33 apresentam os resultados das avaliações de distribuição dos subcritérios tecnológicos, nível 3. Dentre as três possibilidades, o subcritério eficiência (%) (ct2) apresentou o melhor resultado com 46,15% de prioridade; a TABELA 34 apresentam os resultados das avaliações de distribuição dos subcritérios tecnológicos, nível 4 – maturidade tecnológica. Dentre as possibilidades, o subcritério disponibilidade dos fornecedores (ct13) apresentou o melhor resultado com 46,75% de prioridade; a TABELA 35 apresentam os resultados das avaliações de distribuição dos subcritérios tecnológicos, nível 4 – densidade. Dentre as possibilidades, os subcritérios apresentaram a mesma avaliação, ou seja, 50% de prioridade cada; a TABELA 36 apresentam os resultados das avaliações de distribuição dos subcritérios regulatórios. Dentre as possibilidades, o subcritério atendimento à norma e leis de comissionamento e desempenho (cr2) apresentou o melhor resultado com 51,06% de prioridade; a TABELA 37 apresentam os resultados das avaliações de distribuição dos subcritérios financeiros. Dentre as possibilidades, o subcritério custo médio (cf1) apresentou o melhor resultado com 80% de prioridade.

Individualmente os pesos dos critérios e subcritérios foram associados ao grau de importância e alternativas para cálculo das interdependências. Somando-se as linhas dos resultados das tabelas TABELA 39, TABELA 40, TABELA 41, TABELA 42 e TABELA 43, evidenciam-se os melhores resultados:

- critério ambiental: bateria de chumbo-ácido ventilada (B3);
- critério tecnológico: bateria de íons de lítio LFP (B4);

- critério regulatório: bateria de chumbo-ácido (OpzS) (B1) e bateria de chumbo-ácido ventilada (B3) obtiveram o mesmo resultado;
- critério financeiro: bateria de chumbo-ácido carbono (B2).

O critério tecnológico foi o de melhor avaliação entre os profissionais. A bateria de íons de lítio LFP (B4) obteve o melhor desempenho no quesito tecnológico, que aliado aos bons resultados nos demais critérios possibilitou os melhores resultados no total. O *ranking* gerado pelos diferentes conjuntos de pesos foi apresentado separadamente na metodologia implementada e os quatro critérios iniciais foram comparados em relação a cada um dos subcritérios no contexto dos objetivos. A classificação final resultou nas prioridades globais das baterias conforme TABELA 44.

TABELA 44 – RESULTADOS FINAIS

		SOMATÓRIO DOS RESULTADOS DAS INTERDEPENDÊNCIAS	PRIORIDADE
B1	CHUMBO-ÁCIDO TUBULAR ESTACIONÁRIA VENTILADA (OPZS)	0,205368	23,08%
B2	CHUMBO-ÁCIDO CARBONO (PBC)	0,197638	22,21%
B3	CHUMBO-ÁCIDO ESTACIONÁRIA VENTILADA	0,219294	24,65%
B4	ÍONS DE LÍTIO LFP (FOSFATO DE FERRO)	0,267459	30,06%
	TOTAL	0,889759	100,00%

FONTE: O autor (2019).

Por fim, constatou-se que o resultado geral apontou a tecnologia Íons de Lítio LFP (B4) como a melhor alternativa para armazenamento de energia, tomando-se como base os critérios e subcritérios definidos neste trabalho.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O método AHP é teoricamente sólido, facilmente implementável e capaz de gerar resultados consistentes. Com o apoio deste método, a presente dissertação desenvolveu uma estrutura de apoio à decisão, visando a melhor opção de bateria de armazenamento de energia, para uma aplicação específica dos tomadores de decisão. A análise de resultados apresentados levaram as seguintes conclusões:

Durante o levantamento das informações dos questionários, literatura, normas e catálogos, foram possíveis conhecer as particularidades dos equipamentos utilizados e isso melhorou o desenvolvimento do método.

A prévia classificação dos critérios e subcritérios facilitou o desenvolvimento das etapas de simulação e levou a melhor compreensão do método. O AHP se mostrou eficiente, mas requer alguns cuidados como: a importância de analisar os níveis que afetam a *performance* dos níveis mais altos; o consenso é mais necessário nos níveis mais altos, pois eles indicam a direção para o restante da hierarquia, mas para superar esses problemas podem ser feitas adaptações no método.

O AHP apresentou algumas vantagens como a facilidade de uso e a rápida identificação dos julgamentos inconsistentes. Também foi possível observar que: o esquema hierárquico ajuda descrever mudanças de prioridade nos níveis altos e que afetam os níveis mais baixos; a organização mediante hierarquia é mais eficiente que a estruturada de forma geral; o nível hierárquico é estável e pequenas alterações produzem pequeno efeito e não afetam o desempenho.

Dos resultados foi observado que a partir das experiências, literatura e informações dos fabricantes, o método AHP pode fornecer informações rápidas na identificação e seleção dos tipos de baterias. Desenvolvida e aplicada, a metodologia de análise multicritério se mostrou adequada para auxiliar os tomadores de decisão com a escolha da melhor alternativa tecnológica.

A metodologia se mostrou aplicável, considerando que a partir dos dados de entrada fornecidos pelo decisor é possível sugerir a alternativa tecnológica para determinada finalidade. Por isso, entende-se como atendido o objetivo geral de aplicar e testar uma metodologia de análise multicritério que permita auxiliar na escolha da tecnologia de bateria para armazenamento de energia em sistemas estacionários.

As simulações realizadas sugerem que a metodologia apresenta potencialidade de evoluir e funcionar numa situação real.

A partir dessa dissertação é possível indicar algumas sugestões de trabalhos futuros:

- testar o modelo em outras metodologias multicritério;
- aprimorar modelo no Excel e ampliar o número de alternativas;
- realizar ensaios reais e integrar o método automatizado;
- calcular automaticamente a partir dos dados de entrada o ideal dimensionamento do sistema de armazenamento.

REFERÊNCIAS

ALCANTARA, M. V. P.; SILVA, L. C. P.; GERALDI, D. Energy efficiency in smart cities. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, 2013.

ALVES, M. A.; **Proposta de Agregação Robusta de Múltiplos Métodos com Incertezas em Problemas de Tomada de Decisão Multicritério**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ANEEL. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ANEEL. Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. **Revista P&D**, p. 107, 2016.

ANEEL. **Resolução normativa nº 786, de 17 de outubro de 2017**. Aneel, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>>

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Cálculo de Perdas na Distribuição (Revisão 10 - vigência a partir de 01/01/2018)**, 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo_8-Revisão_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>

ANEEL, A. N. DE E. E.-. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª Edição ed. Brasília: Aneel, 2008.: [s.n.].

ARAGONÉS-BELTRÁN, P. et al. An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects. **Energy**, v. 66, p. 222–238, 2014.

BANA, C. A.; MEZA, L. A.; OLIVEIRA, M. D. O método MACBETH e aplicação no Brasil.

Engevista, v. 15, p. 3–27, 2013.

BARBOSA FILHO, W.P.; AZEVEDO, A. C. S. Geração Distribuída: vantagens e desvantagens. **Simpósio de estudos e pesquisas em ciências ambientais na Amazônia. Belém, Pará.**, v. II, n. Volume II, p. 127, 2013.

BARIN, A. et al. Multiple Criteria Analysis for Energy Storage Selection. **Energy and Power Engineering**, v. 03, n. 04, p. 557–564, 2011.

BAUMANN, M. et al. A review of multi-criteria decision making approaches for evaluating energy storage systems for grid applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, n. February, p. 516–534, 2019.

BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/2002/L10438.htm>.

BRASIL. **Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm>.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. Visão Geral de Tecnologia e Mercado para os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica no Brasil. **Abaque**, p. 62, 2016.

CEBI, S.; ILBAHAR, E.; ATASOY, A. A fuzzy information axiom based method to determine the optimal location for a biomass power plant: A case study in Aegean Region of Turkey. **Energy**, v. 116, p. 894–907, 2016.

ÇELIKBILEK, Y.; TÜYSÜZ, F. An integrated grey based multi-criteria decision making approach for the evaluation of renewable energy sources. **Energy**, v. 115, p. 1246–1258, 2016.

CELLI, G. et al. Multi-Criteria Analysis for decision making applied to active distribution network planning. **Electric Power Systems Research**, v. 164, p. 103–111, 2018.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

COPEL. **NTC 905200 - Normas Técnicas. Acesso de Micro e Minigeração**

Distribuída ao Sistema da Copel, 2016.

COPEL. **NTC 905100 - Normas Técnicas Complementar. Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da Copel (com comercialização de energia), 2017.**

DEHGHANI-SANIJ, A.R.; THARUMALINGAMA, E.; DUSSEAULT, M.B.; FRASERB, R. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries.**, v. 104, p. 192–208, 2019.

DOE, D. E. U. **DOE Global Energy Storage Database.** Disponível em: <<https://www.energystorageexchange.org/projects>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

DOS REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica** (Manole, Ed.)Barueri-SP, 2015.

ECONOMY, F.; VEHICLES, R. Technology Roadmap. **SpringerReference**, 2014.

ENERGIA, A. **Maior Bateria do Mundo Terá 100MW de Armazenamento**, 2017. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2017/05/maior-bateria-mundo-tera-100mw-de-armazenamento/31633#.XBAkBzHJ2M8>>

GARCHE, J. On the Historical Development of the Lead/Acid Battery, Especially in Europe. **Journal Of Power Sources**, v. 31, n. 1–4, p. 401–406, 1990.

GEORGIU, D.; MOHAMMED, E. S.; ROZAKIS, S. Multi-criteria decision making on the energy supply configuration of autonomous desalination units. **Renewable Energy**, v. 75, p. 459–467, 2015.

HENDERSON, M. I. (ED.). **IEEE POWER & ENERGYUSA**, 2017.

JESUS DE ARAUJO, J.; MAGALHÃES AMARAL, T. Application of the ELECTRE I method for selection problems involving free software development projects. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 11, n. 2, p. 121–138, 2016.

KUMAR, A. et al. A Multi Criteria Decision based rural electrification system. **IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, p. 4025–4030, 2016.

LI, L. et al. A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems. **Computers and Chemical Engineering**, v. 115, p. 213–225, 2018.

LI, X.; HUI, D.; LAI, X. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 2, p. 464–473, 2013.

LIMA JUNIOR, F. R.; CARPINETTI, L. C. R. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 1, p. 17–34, 2015.

LONGARAY, ANDRÉ ANDRADE; ENSSLIN, L. et al. **MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO CONSTRUTIVISTA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO TRADE MARKETING : UM CASO ILUSTRADO NO SETOR FARMACÊUTICO MCDA-C MODEL FOR TRADE MARKETING PERFORMANCE EVALUATION: AN ILLUSTRATED CASE IN THE PHARMACEUTICAL SECTOR** And, 2016.

LUO, X. et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, v. 137, p. 511–536, 2015.

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

MATTOS, C. A. P. **Projeto de controlador de carga de bateria de li-íon**. Florianópolis: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA, 2019.

MCKENNA, R. et al. Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimization to develop feasible energy concepts in small communities. **European Journal of Operational Research**, v. 268, n. 3, p. 1092–1110, 2018.

MME. **Ministério De Minas E Energia Agência Nacional Do Petróleo**, 2004. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2004/decreto-5163-30-julho>>

2004-533148-publicacaooriginal-16354-pe.html>

MME. **Portaria n. 538 de 15 de dezembro de 2015.**, 2015.

MME. **Boletim Mensal Energia MME**Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/7994286/Boletim+Mensal+de+Energia+jan+2017.pdf/f9f255a3-7c0e-491d-8f6a-672907692b77>>

MONTEIRO, F. M. DOS S. **Planejamento de alocação e atuação de sistemas de armazenamento de energia a baterias para a melhoria do perfil de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica.** [s.l.] Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2011.

ÖZKAN, B. et al. A hybrid multicriteria decision making methodology based on type-2 fuzzy sets for selection among energy storage alternatives. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 8, n. 5, p. 914–927, 2015.

PRIMEX, C. **Primex Containers.** Disponível em: <<http://www.primexcontainers.com.br/containers-dry.asp>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

REIS, C.; UFGD, S. O processo de tomada de decisões no âmbito da Administração Pública: reflexões teórico-empíricas sob a perspectiva da Teoria da Decisão e da Teoria dos Jogos The process of decision-making in Public Administration : theoretical and empirical reflections. 2012.

RIVAS, R. E. G. **Uso Do Método Multicritério Para Tomada De Decisão Operacional Tendo em Conta Riscos Operacionais, à Segurança, Ambientais e à Qualidade.** 2016.

RODRIGUEZ, D. S. S.; COSTA, H. G.; CARMO, L. F. R. R. S. DO. Métodos de auxílio multicritério à decisão aplicados a problemas de PCP: mapeamento da produção em periódicos publicados no Brasil. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 1, p. 134–146, 2013.

ROJAS-ZERPA, J. C.; YUSTA, J. M. Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 557–571, 2015.

SAATY, T. L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 281, p. 234–281, 1977.

SCHMIDT, A. M. A. Processo de apoio à tomada de decisão - abordagens: AHP e Macbeth. **Dissertação Mestrado**, v. UFSC, 1995.

SERRA, E. T. et al. Armazenamento De Energia: Situação Atual, Perspectivas e Recomendações. **Comitê De Energia Da Academia Nacional De Engenharia**, p. 1–46, 2016.

SILVA, J. L. DE S. et al. Análise Do Avanço Da Geração Distribuída No Brasil. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2018**, v. 0, 2018.

SPATARU, C. et al. Techno-economic assessment for optimal energy storage mix. **Energy Procedia**, v. 83, p. 515–524, 2015.

TAVARES, J. H. F. E. C. **DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS**. [s.l.] UNIVERSIDADE DO PORTO, 2015.

UOL. **Apagão atinge ao menos 12 Estados de Norte e Nordeste**. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2018/03/21/apagao-atinge-os-nove-estados-do-nordeste.htm>>. Acesso em: 8 jan. 2019.

APÊNDICE

FIGURA 14 - QUESTIONÁRIO COMPLETO DE AVALIAÇÃO COMPARATIVA

(continua)

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO		
Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia		
Aluno: Antonio Pereira dos Santos Filho		
Orientadora: Profa. Dra. Débora Cintia Marcilio		
Coorientadora: Profa. Dra. Ana Paula Oening		
Pesquisa de Avaliação para Escolha de Tecnologias de Baterias para Armazenamento de Energia		
1) Nome do participante:		
2) Profissão e formação complementar:		
3) Empresa:		
4) Data:	5) Autorizo publicar meus dados na dissertação:	6) Idade
	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	

Instruções:

- 1 - Utilizando a Escala Saaty, responda o questionário e atribua valores de acordo com a intensidade de importância.
- 2 - Compare critérios, subcritérios e avalie de acordo com a MAIOR importância. (Atribua pesos que julgar SUPERIOR)
- 3 - Quando os critérios ou subcritérios forem igualmente importantes, atribua **peso 1** para apenas um deles.
- 4 - A descrição resumida dos critérios / subcritérios encontra-se na aba "Descrição resumida".

AVALIAÇÃO PELO MÉTODO AHP - Analytic Hierachy Process

Definição Escala Saaty	Intensidade de
Mesma importância	1
Importância pequena de uma sobre a outra	3
Importância grande ou essencial	5
Importância muito grande	7
Importância absoluta	9
Valores intermediários	2, 4, 6 e 8

Critérios e subcritérios:

Cód.	CRITÉRIOS - Nível (2)	Cód.	SUBCRITÉRIOS - Nível (3)	Cód.	SUBCRITÉRIOS - Nível (4)	ALTERNATIVAS DE BATERIAS - (Nível 5)
CA	AMBIENTAL	ca1	Segurança			B1 Chumbo-Ácido Tubular Estacionária
		ca2	Desmobilização			B2 Chumbo-Ácido Carbono (PbC)
		ca3	Impacto Visual			B3 Chumbo-Ácido Estacionária
		ca4	Potencial Contaminador			B4 Ions de Lítio LFP (Fosfato de Ferro)
CT	TECNOLÓGICO	ct1	Maturidade Tecnológica	ct11	Sistemas Instalados no Mundo	
				ct12	Energia Instalada	
				ct13	Disponibilidade dos Fornecedoros	
				ct14	Tempo de Uso Comercial da Tecnologia	
		ct2	Eficiência de Carga / Descarga			
		ct3	Densidade	ct31	Densidade Volumétrica de Energia	
				ct32	Densidade Gravimétrica de Energia	
CR	REGULATÓRIO	cr1	Legislação Ambiental Aplicável			
		cr2	Atendimento à Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho			
		cr3	Fabricação / Importação			
CF	FINANCEIRO	cf1	Custo Médio			
		cf2	Facilidade de Transporte			

(conclusão)

1) Avaliação comparativa - CRITÉRIOS - NÍVEL 2

Assinale com (X) somente um critério. (De maior importância)				Assinale com (X) somente um número de acordo com a importância:									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
CA	AMBIENTAL	CT	TECNOLÓGICO										
CA	AMBIENTAL	CR	REGULATÓRIO										
CA	AMBIENTAL	CF	FINANCEIRO										
CT	TECNOLÓGICO	CR	REGULATÓRIO										
CT	TECNOLÓGICO	CF	FINANCEIRO										
CR	REGULATÓRIO	CF	FINANCEIRO										

2) Avaliação Comparativa - SUBCRITÉRIOS - NÍVEL 3**Subcritério AMBIENTAL**

Assinale com (X) somente um subcritério. (De maior importância)				Assinale com (X) somente um número de acordo com a importância:									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ca1	Segurança	ca2	Desmobilização										
ca1	Segurança	ca3	Impacto Visual										
ca1	Segurança	ca4	Potencial Contaminador										
ca2	Desmobilização	ca3	Impacto Visual										
ca2	Desmobilização	ca4	Potencial Contaminador										
ca3	Impacto Visual	ca4	Potencial Contaminador										

Subcritério TECNOLÓGICO

Assinale com (X) somente um subcritério. (De maior importância)				Assinale com (X) somente um número de acordo com a importância:									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ct1	Maturidade Tecnológica	ct2	Eficiência de Carga / Descarga										
ct1	Maturidade Tecnológica	ct3	Densidade										
ct2	Eficiência de Carga / Descarga	ct3	Densidade										

Subcritério REGULATÓRIO

Assinale com (X) somente um subcritério. (De maior importância)				Assinale com (X) somente um número de acordo com a importância:									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
cr1	Legislação Ambiental Aplicável	cr2	Atendimento à Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho										
cr1	Legislação Ambiental Aplicável	cr3	Fabricação / Importação										
cr2	Atendimento à Normas e Leis de Comissionamento e Desempenho	cr3	Fabricação / Importação										

Subcritério FINANCEIRO

Assinale com (X) somente um subcritério. (De maior importância)				Assinale com (X) somente um número de acordo com a importância:									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
cf1	Custo Médio	cf2	Facilidade de Transporte										

3) Avaliação Comparativa - SUBCRITÉRIOS - NÍVEL 4**Subcritério TECNOLÓGICO - Maturidade Tecnológica**

Assinale com (X) somente um subcritério. (De maior importância)				Assinale com (X) somente um número de acordo com a importância:									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ct11	Sistemas Instalados no Mundo	ct12	Energia Instalada										
ct11	Sistemas Instalados no Mundo	ct13	Disponibilidade dos Fornecedoros										
ct11	Sistemas Instalados no Mundo	ct14	Tempo de Uso Comercial da Tecnologia										
ct12	Energia Instalada	ct13	Disponibilidade dos Fornecedoros										
ct12	Energia Instalada	ct14	Tempo de Uso Comercial da Tecnologia										
ct13	Disponibilidade dos Fornecedoros	ct14	Tempo de Uso Comercial da Tecnologia										

Subcritério TECNOLÓGICO - Densidade

Assinale com (X) somente um subcritério. (De maior importância)				Assinale com (X) somente um número de acordo com a importância:									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ct31	Densidade Volumétrica de Energia	ct32	Densidade Gravimétrica de Energia										

FONTE: O autor (2019).