

Seleção de Baterias para Sistemas de Armazenamento de Energia pela Aplicação do Método AHP

Yuri C. Lima*. Adriany F. S. Alves*. Italo Roger F. M. P. da Silva*. Fabiano Salvadori**. Marcel A. Araújo*

*Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA),
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Cabo de Santo Agostinho, PE

e-mail: yuri.chaves@ufrpe.br; adriany.fabricia@ufrpe.br; italo.rogersilva@ufrpe.br; marcel.araujo@ufrpe.br

**Smart Grid Group, Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa, PB, (e-mail: salvadori.fabiano@gmail.com)

Abstract: The implementation of battery energy storage systems has grown together with the electrical system, mainly, with the advent of smart grids and integration of distributed generation by renewable sources. Facing the different application possibilities and the diversity of battery technologies, the systematization of the battery selection process is essential. In this context, this paper proposes the use of an Analytic Hierarchy Process (AHP) for decision making in the selection of battery technologies. The procedure developed from the AHP method promotes the evaluation of technical-economic characteristics by means of quantitative and qualitative indicators, establishing criteria and priorities for comparing and ranking these attributes. The results demonstrate the objectivity of the method, its coherence with the current technological development of batteries and its coverage of application due to the knowledge base built, besides not requiring specific information on the storage system to be implemented.

Resumo: A implantação dos sistemas de armazenamento de energia por baterias tem crescido junto ao sistema elétrico, principalmente, com o advento das redes elétricas inteligentes e integração de geração distribuída por fontes renováveis. Frente às diferentes possibilidades de aplicação e diversidade de tecnologias das baterias, a sistematização do processo de seleção mostra-se fundamental. Nesta conjuntura, este artigo propõe o uso de um processo hierárquico analítico pela aplicação do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para tomada de decisão na seleção de tecnologias de baterias. O procedimento desenvolvido com método AHP promove a avaliação de características técnico-econômicas por meio de indicadores quantitativos e qualitativos estabelecendo critérios e prioridades para comparação e hierarquização destes atributos. Os resultados obtidos demonstram a objetividade do método, sua coerência com o desenvolvimento tecnológico atual das baterias e sua abrangência de aplicação devido à base de conhecimento construída, além de não exigir informações específicas do sistema de armazenamento a ser implantado.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, Battery Energy Storage System, Distributed generation, Energy Storage, Smart Grid.

Palavras-chaves: Armazenamento de energia, Geração Distribuída, Processo hierárquico analítico, Rede elétrica inteligente, Sistemas de armazenamento de energia em baterias.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e social, e consequente aumento do consumo de energia elétrica, atrelados a crescente escassez de recursos energéticos e a implantação de ações sustentáveis, tem levado à busca por novas soluções para geração de energia. Do ponto de vista de geração de energia elétrica e integração aos sistemas elétricos modernos trazidos pelas *Smart Grids* (SGs), fontes renováveis de Geração Distribuída (GD) vêm se consolidando como as melhores alternativas (Borlase, 2013; Kakran e Chanana, 2018; Mbungu et al., 2020). Destacam-se, sobretudo, a mini e microgeração distribuída (Qiu et al., 2018; Mbungu et al., 2020), instaladas junto a unidades consumidoras, as quais além de gerar a própria energia, podem fazer uso do sistema de compensação

conforme Resolução Normativa ANEEL n° 687/2015 (ANEEL, 2020).

Neste contexto, frente ao desenvolvimento tecnológico e progresso de implantação das SGs e fontes de GD, tem crescido a necessidade de utilização dos sistemas de armazenamento de energia, não apenas para garantir o fornecimento ininterrupto de energia em condições de geração intermitente, mas também para melhorar a operação dos Sistema Elétricos de Potência (SEPs) com uma matriz híbrida e renovável (Bayindir et al., 2016; Montoya et al., 2017; Faisal et al., 2018). Além disso, a implantação e o gerenciamento dos sistemas de armazenamento de larga (> 50 MW), média (250kW a 50 MW) ou pequena escala (< 250kW) pode contribuir para o suprimento ininterrupto de energia, a autonomia de sistemas de mini e microgeração, a gestão da

demanda e da energia de reserva, melhoria da qualidade do produto e do serviço, e a prestação de serviços ancilares, entre outros (Dugan et al., 2017; Qiu et al., 2018; Faisal et al., 2018; Das et al., 2018; Akram et al., 2020).

Dentre as tecnologias para armazenamento de energia em média e pequena escala integráveis a unidades com mini e microgeração distribuída, tem se sobressaído o uso de baterias. Em virtude das diferentes tecnologias e tipos de baterias comerciais atuais, faz-se necessária a análise de características operacionais e construtivas visando definir qual das suas tecnologias é a mais adequada para este tipo de aplicação (Yuqing et al., 2018, Akram et al., 2020; Padmanabhan et al., 2020).

Nesta conjuntura, esta pesquisa faz uso de um método baseado em um processo hierárquico analítico (*Analytic Hierarchy Process - AHP*) apresentado em (Saaty, 1990) para tomada de decisão da escolha da melhor tecnologia de baterias para um sistema de integração de GD em unidades consumidoras residências, comerciais ou industriais de pequeno porte. O método proposto tem sua aplicação voltada para o atendimento das necessidades de concessionárias, pesquisadores, e sobretudo projetistas e vendedores de sistemas de armazenamento de energia, mas tendo em vista sua abrangência também pode ser utilizado por outros agentes atuantes no setor de armazenamento de energia desde que possuam conhecimento sobre aspectos fundamentais destes sistemas.

Destaca-se que com este método o processo de seleção da tecnologia de baterias torna-se direto e objetivo por meio de uma avaliação que engloba indicadores quantitativos e qualitativos essenciais para a aplicação em questão. A partir da análise técnica e estratificação dos atributos de diferentes tecnologias de baterias e empregando o método AHP, são estabelecidos critérios e prioridades para comparação e hierarquização desses atributos, visando a tomada de decisão de uma forma mais assertiva.

Posto isto, na sequência, a segunda seção apresenta as tecnologias de baterias avaliadas no presente estudo e a terceira expõe a fundamentação do método utilizado. Posteriormente, na quarta seção, apresenta-se a aplicação do método e seus resultados, e por fim, na quinta, a conclusão da pesquisa realizada.

2. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS

Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (*Battery Energy Storage Systems – BESSs*) consistem na associação em série e/ou paralelo de um conjunto de baterias. A fim de monitorar os níveis de tensão, corrente e temperatura das baterias desta associação e para uma operação segura com uniformidade de carga/descargas evitando desequilíbrios e redução do tempo de vida útil ou até mesmo danificação das células das baterias, faz-se uso de um sistema de gerenciamento de bateria (*Battery Management System – BMS*) (Das et al., 2018; Yuqing et al., 2018).

As baterias são compostas por células eletroquímicas responsáveis por converter energia química em elétrica e energia elétrica em química por meio de reações eletroquímicas, o que as tornam recarregáveis. No processo de

descarga ou fornecimento de energia, há fluxo de íons entre os eletrodos e o eletrólito e fluxo de elétrons do polo negativo para o positivo da bateria, enquanto no processo de carregamento o fluxo de elétrons se inverte, e com o auxílio de uma fonte de tensão externa tomam sentido do polo positivo para o negativo (Luo et al. 2015; Zhang et al., 2018).

A energia elétrica disponibilizada por massa ou volume de uma bateria depende da tensão e capacidade de corrente de suas células. Estas, por sua vez, são consequência do número de ciclos de carga/descarga que pode ser realizado com a bateria até que sua capacidade se reduza ao valor limite especificado por sua tecnologia, a qual depende da composição química dos eletrodos e eletrólito (Luo et al. 2015; Yuqing et al., 2018).

Atualmente, as baterias são amplamente utilizadas, desde aplicações em dispositivos móveis até sistemas de energia de reserva de médio porte de acordo com sua tecnologia, custos para aquisição e manutenção, ciclos de vida, características mecânicas e impacto ambiental para fabricação, reciclagem ou descarte de materiais. Nesta conjuntura, baseando em (Luo et al. 2015; Das et al., 2018; May et al., 2018; Farias e Canha, 2018; Zhang et al., 2018; Dehghani-Sanij et al., 2019; Mongrid et al., 2019), a seguir são apresentados os tipos de baterias mais utilizados atualmente e que são avaliados pela aplicação do método AHP para tomada de decisão sobre o tipo de baterias mais adequado para a aplicação de integração de GD em unidades consumidoras de pequeno porte.

2.1 Bateria de chumbo-ácido

Este tipo de baterias foi um dos primeiros a ser desenvolvido, possui tecnologia consolidada e atualmente é um dos mais utilizados em soluções para *backup* de energia em sistema de comunicação, monitoramento e alarme, alimentação de cargas críticas, e uso em automóveis, entre outros. A energia específica mássica e a energia específica volumétrica, (i.e., quantidade de energia de uma célula/bateria em relação a sua massa ou volume), ainda são fatores limitantes para determinadas aplicações em virtude do grande peso e volume desse tipo de baterias quando comparado a outras tecnologias como das baterias de lítio.

Quando o sistema a ser alimentado não requer alta densidade de potência e energia, e o peso e volume não são fatores determinantes para a aplicação, esse tipo de bateria torna-se economicamente viável. Contudo, apresenta reduzida vida útil se comparada às demais tecnologias; fato que para sistemas de armazenamento em média e grande escala com elevada ciclagem torna este tipo de bateria pouco competitivo. Os elementos que compõem este tipo de bateria possuem processos de reciclagem e descarte com tecnologias consolidadas, porém são tóxicos e requerem atenção devido ao alto risco de impactos ambientais.

2.2 Bateria de níquel-cádmio (NiCd)

Este tipo de bateria também foi um dos primeiros a ser desenvolvido e possui tecnologia consolidada, assim como a bateria de chumbo-ácido. É uma das baterias mais utilizadas em dispositivos eletroeletrônicos portáteis que requerem baixa

densidade de potência e energia, baixo volume e peso, e alta capacidade de fornecimento de energia. Apresenta eficiência energética muito semelhante a bateria chumbo-ácido, porém com custo de aquisição maior. Sua maior vantagem é possuir ótimo desempenho sob rigorosas condições de operação em baixas temperaturas, subtensão e sobrecarga. Recomenda-se que seja realizada periodicamente sua descarga completa para evitar a formação de cristais nas placas das células, processo este conhecido por efeito memória, o qual leva a perda de capacidade de armazenamento de energia.

Um dos grandes desafios técnicos dessa tecnologia de baterias recai sobre o desenvolvimento de processos de reciclagem e descarte do seu principal componente, o cádmio, por ser um metal altamente tóxico, mesmo em pequenas quantidades, e bioacumulativo. Além disso, tendo em vista sua ampla aplicação em dispositivos eletroeletrônicos portáteis, uma grande porcentagem vai para o lixo domiciliar após o final da vida útil, causando alto impacto ambiental.

2.3 Bateria de fluxo redox

Este tipo de bateria possui uma estrutura bem diferente das demais, sendo constituída por dois tanques constituídos por eletrólitos em soluções salinas que são bombeadas para uma célula de reações eletroquímicas reversíveis que ocorrem por uma membrana semipermeável da pilha de combustível. Este tipo de bateria possui baixa densidade de potência e energia, porém alto volume e peso, e facilidade de crescimento de capacidade pelo aumento no volume ou no número de tanques de eletrólitos. Também se caracteriza por uma resposta rápida no processo de conversão de energia, da ordem de centenas de microssegundo, pelo longo período de vida útil mesmo com descargas e/ou cargas profundas sem afetar seu rendimento, e pela quase inexistência de auto descarga.

Sua eficiência é semelhante à das baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio, tendo aplicação voltada para sistemas estáticos em ambientes cuja disponibilidade de espaço é grande e nos quais haja pequena possibilidade de contaminação dos eletrólitos de soluções salinas de seus tanques. Possui uma variedade de tipos de acordo com os eletrólitos, dentre as quais destacam-se ferrocromo (FeCr), ferro-zinco (FeZn), zinco-bromo (ZnBr) e vanádio redox (VR). De forma geral, seus compostos não são tóxicos, possuem processos seguros de descarte de resíduos e de contenção de vazamentos dos tanques de eletrólitos, apresentando risco ambiental moderado se comparado às demais tecnologias de baterias.

2.4 Bateria de íons de lítio

Este tipo de bateria tem ganho destaque e sido alvo de pesquisas e desenvolvimentos em virtude de seu principal elemento, o lítio, ser um metal leve, possuir elevado potencial eletroquímico e ser um dos metais com maior densidade energética. Tais características tornam as baterias de lítio uma boa alternativa para aplicações em que se necessita de elevada densidade de potência e energia com baixo volume e peso. Por outro lado, a menor disponibilidade de reservas de lítio e a grande demanda por este tipo de baterias para aplicação em dispositivos móveis e uso em veículos elétricos tem tornado

seu custo de aquisição elevado se comparado aos demais tipos de baterias.

Destaca-se também que dentre as tecnologias atuais é a que apresenta maior eficiência energética e maior ciclo de vida, além de ter como fator positivo uma das menores agressividades ao meio ambiente pelo seu principal elemento, sobretudo quando se compara com baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio. Um ponto a se tomar atenção e que tem sido bastante trabalhado é a segurança dessas baterias devido à alta reatividade do lítio, o qual em contato com a água ou oxigênio presente no ar, inicia um processo de combustão espontânea originando reações violentas que podem ocasionar explosões.

3. METODOLOGIA

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (Saaty, 1990) baseia-se em uma análise hierárquica de atributos objetivos e/ou subjetivos de um problema por meio de uma sequência de comparações paritárias de aspectos qualitativos e quantitativos para a tomada de decisão. O método é estruturado pela construção de uma árvore hierárquica com atribuição comparativa de graus de importância a cada um de seus critérios e subcritérios de acordo com a prioridade relativa entre eles. A seguir, montam-se uma matriz de comparação entre os critérios e matrizes de comparação entre os subcritérios de cada um dos critérios seguindo seu nível hierárquico. Essas matrizes de comparação resultam em pesos para os critérios e subcritérios, os quais compõem uma matriz de comparação de pesos, cujos resultados orientam a tomada de decisão.

Para esta atribuição comparativa de graus de importância, Saaty (1990) recomenda a utilização de uma escala de 1 a 9 conforme apresentado na Tabela 1, em que 1 representa que determinado critério/subcritério possui mesma importância em relação a outro, e 9 significa a absoluta importância de um critério/subcritério sobre outro. Ressalta-se que nas matrizes: i) as posições da diagonal são sempre 1, uma vez que um elemento é igualmente importante a ele mesmo, ii) o critério mais importante da comparação deve ter peso representado por um valor inteiro proporcional a sua importância seguindo a escala da Tabela 1, e iii) o menos importante como o inverso dessa unidade na posição recíproca correspondente na matriz. Por exemplo, comparando-se um elemento A com peso 4 em relação a um elemento B, na posição recíproca da matriz, atribui-se um peso de 1/4 para o elemento B em relação ao elemento A (Godoi, 2017).

Após a montagem da matriz, calcula-se seu Índice de Consistência (I_c), conforme (1), o qual deve ser menor do que 10% para que a comparação apresentada na matriz seja considerada consistente.

$$I_c = (\lambda - n) / (n - 1) \quad (1)$$

em que λ representa o maior autovalor da matriz e n o número de critérios da matriz.

Tabela 1. Escala Fundamental de Saaty (adaptado de Saaty, 1990).

Grau de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambos critérios contribuem igualmente para atingir o objetivo
3	Importância moderada	A comparação favorece ligeiramente um critério em relação ao outro
5	Forte importância	A comparação favorece fortemente um critério em relação ao outro
7	Importância muito forte	A comparação favorece muito fortemente um critério em relação ao outro
9	Importância absoluta	A comparação favorece de forma absoluta um critério em relação ao outro
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre os níveis de comparação	Quando se procura uma condição intermediária entre dois níveis consecutivos
Recíprocos	(1/n) em que "n" é o peso atribuído a determinado critério	Suposição lógica

4. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Na presente pesquisa, o método AHP foi aplicado aos quatro tipos de baterias supracitadas em duas etapas: na primeira para escolha dos critérios/subcritérios mais importantes a serem considerados; e na segunda para a tomada de decisão de qual é a tecnologia de baterias mais adequada no contexto da presente análise.

Sendo assim, tendo em vista o atendimento das necessidades de um sistema de armazenamento para integração de GD, inicialmente foi montada a árvore hierárquica, apresentada na Fig. 1, para caracterização dos tipos de baterias por meio de 4 critérios e 15 subcritérios de maior relevância para esta pesquisa. Ressalta-se que a montagem desta árvore e a atribuição dos graus de importância nas matrizes de comparação ao longo de todo processo de análise, baseou-se nas necessidades da aplicação em questão e nos conhecimentos adquiridos na literatura correlata (Luo et al. 2015; Faisal et al., 2018; Das et al., 2018; May et al., 2018; Farias e Canha, 2018; Zhang et al., 2018; Dehghani-Sanij et al., 2019; Mongrid et al., 2019; Padmanabhan et al., 2020).

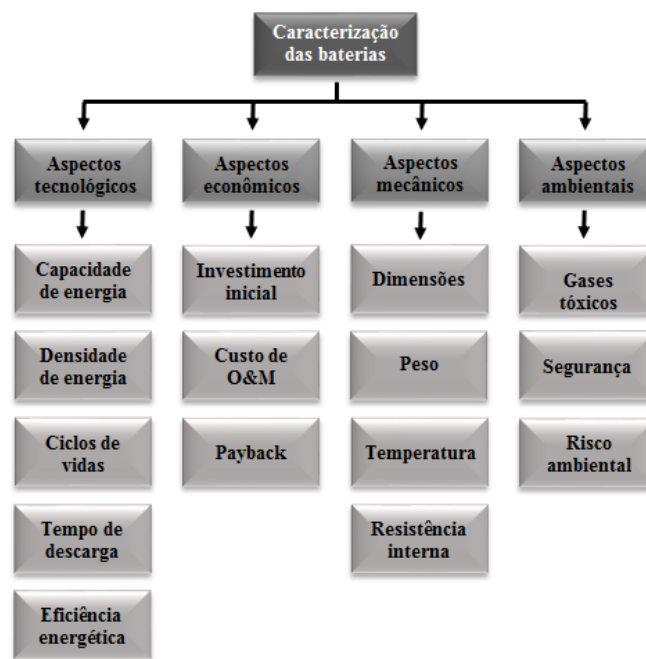


Fig. 1 Árvore hierárquica com critérios e subcritérios para análise das tecnologias de baterias.

Tomando como base a Escala Fundamental de Saaty, apresentada na Tabela 1, foram atribuídos graus de importância aos 4 critérios estabelecidos para análise e foi elaborada a matriz de comparação na Tabela 2. Cabe destacar que a matriz foi montada com a predominância dos elementos linha sobre os elementos coluna, em que, por exemplo, o aspecto econômico tem grau de importância 1/2 em relação ao tecnológico, e reciprocamente o tecnológico tem grau de importância 2 em relação ao econômico. O índice I_c calculado para esta primeira matriz é 2,3%, o que indica que a mesma é consistente para o prosseguimento da análise.

Os pesos da Tabela 2 foram obtidos da seguinte forma: calculou-se o autovetor de cada linha, somaram-se esses autovetores, e os pesos são o resultado da divisão de cada autovetor pela soma dos autovetores. A título de exemplificação, o autovetor da primeira linha é a média geométrica dos graus de importância desta linha cujo valor é 2,449, da segunda é 1,654, da terceira 0,359, da quarta 0,685 e o somatório é 5,150, logo, o peso da primeira linha é 0,475. Ressalta-se que a determinação dos pesos das demais tabelas e matrizes seguem este mesmo procedimento de cálculo.

A partir das Tabelas 3, a 6, são realizadas as análises comparativas entre os 4 critérios e seus respectivos subcritérios, sendo que os I_c calculados foram de 5%, 0,8%, 4,5% e 1,6% respectivamente, indicando a consistência das comparações realizadas.

Tabela 2: Graus de importância e pesos dos critérios das baterias.

Aspectos	Tecnológico	Econômico	Mecânico	Ambiental	Pesos
Tecnológico	1	2	6	3	0,4756
Econômico	1/2	1	5	3	0,3213
Mecânico	1/6	1/5	1	1/2	0,0698
Ambiental	1/3	1/3	2	1	0,1333

Tabela 3: Graus de importância e pesos dos subcritérios do aspecto Tecnológico.

Tecnológico	Capacidade de energia	Densidade de energia	Ciclos de Vida	Tempo de descarga	Eficiência energética	Pesos
Capacidade de energia	1	1/6	1/4	2	1/5	0,0681
Densidade de energia	6	1	2	4	2	0,3846
Ciclos de vida	4	1/2	1	4	2	0,2687
Tempo de descarga	1/2	1/4	1/4	1	1/5	0,0559
Eficiência energética	5	1/2	1/2	5	1	0,2227

Tabela 4: Graus de importância e pesos dos subcritérios do aspecto Econômico.

Econômico	Investimento Inicial	Custo de O&M.	Payback	Pesos
Investimento Inicial	1	2	1/2	0,2970
Custo de O&M	1/2	1	1/3	0,1634
Payback	2	3	1	0,5396

Tabela 5: Graus de importância e pesos dos subcritérios do aspecto Mecânico.

Mecânico	Dimensões	Peso	Temperatura	Resistência Interna	Pesos
Dimensões	1	6	1/3	1/4	0,1523
Peso	1/6	1	1/6	1/8	0,0440
Temperatura	3	6	1	1	0,3730
Resistência Interna	4	8	1	1	0,4307

Tabela 6: Graus de importância e pesos dos subcritérios do aspecto Ambiental.

Ambiental	Gases Tóxicos	Segurança	Risco Ambiental	Pesos
Gases Tóxicos	1	1/3	1/4	0,1220
Segurança	3	1	1/2	0,2196
Risco Ambiental	4	2	1	0,5584

Após as avaliações comparativas dos graus de importância de cada critério e estabelecimento de seus pesos, assim como definição dos pesos de cada subcritério, faz-se necessário o cruzamento desses pesos para obtenção de quais características são mais relevantes para a presente análise. Para tanto, montou-se a Tabela 7 com a comparação entre estas características, e multiplicando os pesos dos critérios pelos pesos dos respectivos subcritérios, chegam-se aos pesos resultantes percentuais de relevância de cada um deles.

A partir dos pesos resultantes da Tabela 7, observa-se que as 7 características/parâmetros mais relevantes em ordem decrescente e destacadas para as baterias são: densidade de energia, *payback*, ciclos de vida, eficiência energética, investimento inicial, risco ambiental, e custo de operação e manutenção (O&M). Ressalta-se que em virtude da

necessidade de conhecimento de taxas e indicadores financeiros específicos do empreendimento de armazenamento e de suas condições econômicas de caixa para estimação do *payback*, cujos dados não estão disponíveis para o presente tipo de análise, esta característica apesar de relevante não é avaliada na próxima etapa.

Para a segunda fase de aplicação do método AHP, pautando-se no conhecimento adquirido sobre o tema e tomando como base a Escala Fundamental de Saaty, inicialmente foi realizada a avaliação qualitativa para atribuição dos graus de importância entre às 6 características de maior destaque. Assim, foi elaborada a matriz de comparação na Tabela 8, sendo que tanto a atribuição dos graus de importância quanto o cálculo dos pesos, foram feitos do mesmo modo que na fase anterior.

Tabela 7: Pesos resultantes da aplicação do método AHP para definição das características mais relevantes

	Pesos dos critérios				Pesos resultantes
	Tecnológico	Econômico	Mecânico	Ambiental	
	0,4756	0,3213	0,0698	0,1333	
Densidade de energia	0,3846	-	-	-	18,29%
Capacidade de energia	0,0681	-	-	-	3,24%
Ciclos de Vida	0,2687	-	-	-	12,78%
Tempo de descarga	0,0559	-	-	-	2,66%
Eficiência energética	0,2227	-	-	-	10,59%
Investimento Inicial	-	0,2970	-	-	9,54%
Custo de O&M	-	0,1634	-	-	5,25%
Payback	-	0,5396	-	-	17,34%
Dimensões	-	-	0,1523	-	1,06%
Peso	-	-	0,0440	-	0,31%
Temperatura	-	-	0,3730	-	2,60%
Resistência Interna	-	-	0,4307	-	3,01%
Gases tóxicos	-	-	-	0,1220	1,63%
Segurança	-	-	-	0,3196	4,26%
Risco ambiental	-	-	-	0,5584	7,44%

A seguir, retomando os dados das pesquisas bibliográficas realizadas, foi elaborada a Tabela 9, contendo informações específicas das características sob avaliação para os 4 tipos de baterias. Cabe destacar que para a confecção desta tabela, primeiramente, foram analisados os intervalos de valores para cada uma das características de acordo com (Luo et al. 2015; Das et al., 2018; May et al., 2018; Farias e Canha, 2018; Zhang et al., 2018; Dehghani-Sanij et al., 2019; Mongrid et al., 2019). Visando minimizar as diferenças entre valores máximos e mínimos encontrados em cada uma das referências, calculou-se o valor médio para cada característica de acordo com cada uma das referências. Posteriormente, unindo os valores médios obtidos, foi novamente calculado o valor médio para cada atributo, ou seja, a Tabela 9 contém a média dos valores médios pesquisados. Os subcritérios investimento inicial e custo de O&M possuem valores baseados em dólar como unidade monetária dólar. O subcritério risco ambiental fora definido a partir das mesmas referências supracitadas, porém por meio de informação qualitativa utilizando-se de uma análise comparativa das escalas de risco entre os 4 tipos de baterias.

Tendo em vista que na Tabela 9 são fornecidos dados quantitativos para a maioria dos subcritérios sob análise e que os mesmos têm ordens de grandeza relativas as características que representam, sendo, portanto, diferentes entre si, pelo método AHP, deve-se tratar esses dados para posterior obtenção dos seus respectivos pesos. Para tratamento dos

dados das características densidade de energia, ciclos de vida e eficiência energética foram feitas normalizações por meio de um processo em que há a divisão do valor de cada subcritério pela soma dos valores para os 4 tipos de bateria deste mesmo subcritério. Já as características investimento inicial e custo de O&M têm caráter inversamente proporcional aos valores numéricos para representar a melhor escolha de aquisição, ou seja, quanto menores seus valores, melhores são para investimento. Sendo assim, eles passam primeiro por um tratamento de inversão de ordem de grandeza entre si, no qual a soma dos 4 valores para determinado subcritério é dividida por cada um dos valores deste subcritério. A seguir eles passam pelo mesmo processo de normalização aplicado aos subcritérios anteriores. Por fim, a característica risco ambiental, necessitou passar pelo processo de atribuição de grau de importância semelhante a primeira etapa de aplicação do método AHP para determinação dos pesos, com o diferencial que seus graus de importância foram atribuídos de maneira inversamente proporcional, para que o de maior peso seja o de menor risco.

Após a realização das etapas descritas, chega-se a Tabela 10, na qual se apresentam os pesos das características/parâmetros específicos para os 4 tipos de baterias, cujos pesos resultantes demonstram que as baterias mais adequadas para o cenário avaliado nesta pesquisa são em ordem decrescente: Íons de lítio, Níquel-cádmio, Chumbo-ácido e Fluxo redox.

Tabela 8: Graus de importância e pesos das 6 características de maior relevância das baterias

Parâmetros	Densidade de energia	Ciclos de vida	Risco Ambiental	Investimento Inicial	Eficiência energética	Custo de O&M	Pesos
Densidade de energia	1	2	4	3	2	2	0,2970
Ciclos de vida	1/2	1	5	3	2	2	0,2447
Risco ambiental	1/4	1/5	1	1/4	1/5	1/4	0,0406
Investimento Inicial	1/3	1/3	4	1	1/3	2	0,1133
Eficiência energética	1/2	1/2	5	3	1	2	0,1942
Custo de O&M	1/2	1/2	4	1/2	1/2	1	0,1102

Tabela 9: Levantamento quantitativo das 6 características de maior relevância das baterias

Parâmetros	Chumbo-ácido	Íons de lítio	Fluxo redox	Níquel-cádmio
Densidade de energia (Wh/kg)	41,50	155	35	62,50
Ciclos de vida (Ciclos)	1.335	7.182	3.144	2.500
Risco ambiental	Alto	Baixo	Médio	Alto
Investimento Inicial (\$/kW)	392,86	2.103,13	1.132,14	1.070
Eficiência energética (%)	71,40	91,82	74,25	72,40
Custo de O&M (\$/kW/ano)	38,42	13	53,66	17,97

Tabela 10: Pesos resultantes da aplicação do método AHP para definição final do tipo de baterias

		Pesos dos critérios						Pesos resultantes
		Densidade de energia	Ciclos de vida	Risco ambiental	Investimento inicial	Eficiência energética	Custo de O&M	
		0,2970	0,2447	0,0406	0,1133	0,1942	0,1102	
Pesos das características	Chumbo-ácido	0,1412	0,0943	0,0963	0,5261	0,2304	0,1469	18,95%
	Íons de lítio	0,5272	0,5071	0,5579	0,0983	0,2963	0,4340	41,98%
	Fluxo redox	0,1190	0,2220	0,2495	0,1825	0,2396	0,1051	17,86%
	Níquel-cádmio	0,2126	0,1765	0,0963	0,1931	0,2336	0,3140	21,21%

5. CONCLUSÃO

Tendo em vista a variedade de tecnologias, características, parâmetros, modelos e estágios de desenvolvimento das baterias disponíveis comercialmente, bem como as possibilidades de adaptação de uso das mesmas em detrimento de especificidades e funcionalidades requeridas para determinada aplicação, a escolha do tipo de baterias tem-se tornado cada vez mais complexo.

Nessa conjuntura, este trabalho mostrou que a aplicação do método AHP torna o processo de seleção ágil e objetivo ao realizar a avaliação de indicadores quantitativos e qualitativos globais das tecnologias de baterias, sem necessidade de grandes detalhamentos e especificidades do sistema de armazenamento que se deseja montar. O resultado obtido, elencando de forma ordenada as baterias de Íons de lítio, Níquel-cádmio, Chumbo-ácido e Fluxo redox para a aplicação desta pesquisa, é condizente com a realidade de desenvolvimento atual das baterias.

A hierarquização e comparação de graus de importância relativos entre as características/parâmetros de cada tecnologia pautada na análise técnica e estratificação dos atributos de diferentes baterias, somados à sistematização da avaliação do índice de consistência das matrizes desenvolvidas pelo método AHP, trazem maior robustez e confiabilidade aos resultados obtidos.

Além disso, as etapas de levantamento das principais características/parâmetros das baterias de diferentes tecnologias, bem como a classificação de relevância das mesmas como um dos resultados intermediários do método, torna mais abrangente o processo de análise para tomada de decisão, podendo ampliá-lo para aplicações diversas de sistemas de armazenamento por meio da base de conhecimento construída.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e ao Laboratório Multiusuário de Geração Distribuída (LMGD) da UACSA/UFRPE pela disponibilização da infraestrutura e demais serviços realizados neste trabalho, bem como ao amparo e auxílio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Akram, U.; Nadarajah, M.; Shah, R.; Milano, F. A review on rapid responsive energy storage technologies for frequency regulation in modern power systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, 2020.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em 11/06/2020.
- Bayindir, R.; Colak, I.; Fulli, G.; Demirtas, K. Smart grid technologies and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 66, pp. 499-516, 2016.
- Borlase, S. *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, USA, 2013, 591 p.
- Das, C. K.; Bass, O.; Kothapalli, G.; Mahmoud, T. S.; Habibi, D. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 1205-1230, 2018.
- Dehghani-Sani, A. R.; Tharumalingam, E.; Dusseault, M. B.; Fraser, R. Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 192-208, 2019.

- Dugan, R. C.; Taylor, J. A. and Montenegro, D. "Energy Storage Modeling for Distribution Planning," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 954-962, March-April 2017.
- Faisal, M.; Hannan, M. A.; Ker, P. J.; Hussain, A.; Mansor M. B. and Blaabjerg, F. Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges, in IEEE Access, vol. 6, pp. 35143-35164, 2018.
- Farias, H. E. O. and Canha, L. N. "Battery Energy Storage Systems (BESS) Overview of Key Market Technologies," 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA), Lima, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511796.
- Godoi, W. C. Método De Construção Das Matrizes De Julgamento Paritários No Ahp – Método Do Julgamento Holístico. Revista Gestão Industrial v. 10, n. 03: p.474-493, 2014.
- Kakran, S. and Chanana, S. Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81, Part 1, pp. 524-535, 2018.
- Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, Applied Energy, vol. 137, n° 1, pp. 511-536, 2015.
- May, G. J.; Davidson, A.; Monahov, B. Lead batteries for utility energy storage: A review, Journal of Energy Storage, vol. 15, pp. 145-157, 2018.
- Mbungu, N. T.; Naidoo, R. M.; Bansal, R. C.; Siti, M. W.; Tungadio, D. H. An overview of renewable energy resources and grid integration for commercial building applications, Journal of Energy Storage, vol. 29, 2020.
- Mongird, K.; Fotedar, V.; Viswanathan, V.; Koritarov, V.; Balducci, P.; Hadjerioua, B.; Alam, J. Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. Hydro Wires, US Department of Energy, 2019.
- Montoya, O. D.; Grajales, A.; Garces A. and Castro, C. A. "Distribution Systems Operation Considering Energy Storage Devices and Distributed Generation," in IEEE Latin America Transactions, vol. 15, no. 5, pp. 890-900, May 2017.
- Padmanabhan, N.; Ahmed, M. and Bhattacharya, K. "Battery Energy Storage Systems in Energy and Reserve Markets," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 1, pp. 215-226, Jan. 2020.
- Qiu, J.; Xu, Z.; Zheng, Y.; Wang, D. and Dong, Z. Y. "Distributed generation and energy storage system planning for a distribution system operator," in IET Renewable Power Generation, vol. 12, no. 12, pp. 1345-1353, 10 9 2018.
- Saaty, T. L. How to make a decision - The Analytic Hierarchy Process, European Journal of Operational Research, vol. 48, n°1, pp. 9-26, 1990.
- Yang, Y.; Bremner, S.; Menictas, S.; Kay, M. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 91, pp. 109-125, 2018.
- Zhang, C.; Wei, Y.; Cao, P.; Lin, M. Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, Part 3, pp. 3091-3106, 2018.