



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GMA

A PERSPECTIVA SOCIOAMBIENTAL NA SELEÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA: UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO.

**TARCISIO LUIZ COELHO DE CASTRO; LUIZ RODOLPHO SAURET CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE (1);
RODRIGO FLORA CALILI (2)
PSR SOLUCOES E CONSULTORIA EM ENERGIA LTDA.
(1); PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO (2)**

RESUMO

A variabilidade de produção de energia das fontes intermitentes precisa ser coberta com recursos que aumentem a flexibilidade operativa do sistema elétrico. Nesse contexto, as soluções de armazenamento são relevantes, pois contribuem para equilibrar a carga, e regular a frequência do sistema. Entretanto, essas soluções produzem impactos socioambientais em todas as etapas de seu ciclo de vida. Este artigo tem por objetivo propor um modelo para hierarquizar as tecnologias de baterias para grandes sistemas de potência com o auxílio de métodos multicritério de apoio à decisão. A aplicação do modelo mostrou que as baterias mais promissoras podem ter maior impacto socioambiental.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 INTRODUÇÃO

Um renovado interesse em sistemas de armazenamento de energia (SAE) vem ocorrendo associado ao crescimento do uso de fontes de geração de energia elétrica renováveis variáveis a partir de meados dos anos 2000. Programas governamentais criaram subsídios para esse tipo de geração de energia buscando reduzir as emissões de gases de efeito estufa provocadas por queima de combustíveis fósseis em usinas térmicas (Jerzy Lepecki, 2018). Esse incentivo inicial permitiu uma grande evolução tecnológica e uma consequente queda de custos pela massificação da implantação de usinas eólicas e solares fotovoltaicas. Embora estas tecnologias tenham se tornado atrativas e não gerem emissões de gases de efeito estufa em sua operação, estas têm característica variável que pode trazer problemas ao sistema elétrico. Estas fontes renováveis variáveis têm sido a principal opção para a expansão de sistemas elétricos de muitos países, inclusive brasileiro, não somente por preocupações em relação ao aquecimento global, mas por razões econômicas, haja vista a queda substancial do preço da energia gerada por essas fontes (Instituto Escolhas e PSR, 2019; Salles *et al.*, 2016).

Segundo Deng *et al.* (2017), os recursos renováveis têm potencial de superar as demandas energéticas da sociedade a longo prazo para quase todas as regiões do globo. Adicionalmente, diversos países estabeleceram como meta para o Acordo de Paris, uma maior participação de fontes renováveis em suas matrizes elétricas (MMA, 2015). Para gerenciar a variabilidade de produção de energia das fontes renováveis é preciso dispor de recursos que aumentem a flexibilidade operativa e que ainda ofereçam outros serviços demandados pelo sistema elétrico de potência (SEP), os serviços ancilares (Dehghani-Sanij *et al.*, 2019). Mesmo em países com abundância de fontes flexíveis, como o Brasil, que dispõe de um grande parque de usinas hidrelétricas, a ampliação do nível de intermitência na matriz elétrica traz consigo desafios para a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Esta pesquisa visa utilizar técnicas de análise multicritério para selecionar sob a ótica socioambiental sistemas de bateria mais adequados para o sistema elétrico de potência. A avaliação será feita com base em critérios de desempenho socioambiental relativamente à minimização dos impactos gerados em cada fase de implantação e operação desses sistemas, quais sejam: fabricação, implantação e operação (Oliveira *et al.*, 2015).

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta revisão se procurou avaliar os métodos de análise multicritério, bem como os atributos ambientais e sociais empregados na avaliação das diversas alternativas de aplicação de SAE, inclusive baterias, objeto deste estudo. Conforme descrito por Pohekar *et al.* (2003) um processo de decisão multicritério aplicado à escolha de tecnologias de armazenamento pode ser dividido nas seguintes etapas: formulação das alternativas dos sistemas avaliados (SAE); seleção dos critérios de avaliação de desempenho; seleção do modelo de apoio a decisão; avaliação da

performance; avaliação dos parâmetros da decisão e sua consistência; aplicação do método; avaliação do resultado; e decisão. Esses métodos possibilitam a quem vai tomar uma decisão, que este processo seja conduzido a pensar sistematicamente sobre os problemas complexos que envolvem muitas dimensões. Os primeiros métodos estruturados foram desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1970 (Bernard Roy na França, com o método ELECTRE, e Thomas L. Saaty com o método AHP e Keeney e Raiffa, com o MAUT) Fernandes, 2009). Esses métodos resultaram numa corrente de pensamento para tratar problemas de decisão: Auxílio Multicritério à Decisão (AMD). Esse método tem o objetivo de analisar problemas com base em vários critérios, muitas vezes conflitantes e associados a muita subjetividade.

O AMD é uma ferramenta para apoiar os tomadores de decisão na organização e sistematização das informações disponíveis, repensando as consequências das diversas soluções, e verificando suas opiniões e necessidades (Wilkens, 2012). As decisões e preferências podem ser expressas matematicamente; dessa forma, podem ser associadas a observações e posteriormente reproduzidos para diferentes cenários elencados com a participação dos interlocutores ou especialistas (Alcamo, 2008). Os critérios considerados nessas metodologias podem ser estruturados em torno de algumas dimensões: tecnológica, econômica, socioambiental e institucional. Estes podem ainda compreender um elevado número de subcritérios individuais.

De acordo com a literatura (Bauman *et al.*, 2019), os métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA) podem ser separados em modelos de decisão multiobjetivo (MODM) e modelos de decisão multicritério (MADM). Ambas as abordagens compartilham características semelhantes. O primeiro conjunto de métodos lida com problemas de decisão onde o espaço é contínuo, com o objetivo de encontrar uma solução ideal dentro de limites predefinidos (por exemplo, programação de metas). Em contraste, os métodos MADM concentram-se nos problemas onde um conjunto de alternativas de decisão já foi predeterminado. Esses métodos podem ser esquematizados em duas fases que podem ser subdivididos da seguinte forma: Fase de construção - definição de objetivos, escopos e alternativas; Identificação e seleção de critérios; criação de uma interface com os interlocutores; Fase de exploração - estabelecimento de critérios de medição de desempenho; agregação dos critérios; comparação dos resultados.

A fase de construção deve prever a inclusão de uma interface (por exemplo, uma escala para comparações de pares) que permita a compreensão e decisão dos interlocutores para expressar suas preferências em relação aos critérios selecionados. O processo deve ser conduzido em cooperação com as partes interessadas (tomadores de decisão) por meio de pesquisas ou entrevistas. Portanto, é crucial identificar e integrar os atores relevantes neste processo, pois eles fornecem as entradas de dado fundamentais para a configuração do modelo.

A ponderação necessária à análise comparativa deve ser preferencialmente definida pelos tomadores de decisão durante a fase de exploração. Além da atribuição de pesos, também o desempenho de diferentes alternativas em relação aos critérios definidos deve ser medido. Essa etapa é frequentemente chamada de agregação. A maioria dos métodos MADM mostra alta flexibilidade quanto à entrada de dados, permitindo integrar uma grande variedade de tipologias de dados com vários graus de liberdade. Essas entradas podem ser custos de modelos técnico-econômicos, impactos ambientais de uma avaliação do ciclo de vida, mas também dados de revisões de literatura ou pesquisas (valores de custo, percepções sobre os impactos nos ecossistemas etc.).

Cada método MADM tem seus prós e contras, e é sempre um desafio selecionar um método apropriado. Além disso, alguns métodos podem levar a uma classificação diferente das alternativas. Alguns autores, portanto, recomendam o uso de uma combinação de métodos diferentes (Zavadskas, 2016; Sadok, 2008). Exemplos de tais combinações são o uso de AHP como um método para definição de preferência juntamente com o método TOPSIS ou PROMETHEE, por exemplo, usados para agregação de desempenho. A aplicação de tais abordagens complexas e mistas estão tendo um interesse crescente.

Uma vantagem significativa dos métodos MADM como abordagem integradora é a possibilidade de usar informações muito flexíveis de origem qualitativa ou quantitativa para medir o desempenho dos critérios considerados (Cinelli, 2014). Isso é fundamental para os critérios sociais e ambientais, pois algumas aferições dos níveis de impacto ambiental são meramente qualitativas e subjetivas. As medidas de desempenho devem estar alinhadas com as propriedades das alternativas estudadas no mundo real, o que é complexo no caso dos critérios sociais e ambientais. É comum numa discussão com as partes interessadas utilizar muitos critérios, tornando o processo de avaliação de desempenho demorado, complexo e nebuloso. (Kumar, 2017).

Vários métodos qualitativos e quantitativos são usados e, na maioria dos casos, combinados: revisão da literatura; uso de classificações de especialistas (por exemplo, para o grau de aceitação social, impactos sociais e ambientais); uso de estimativas (por exemplo, raciocínio usado para indexação de impactos ambientais); uso de cálculos próprios para quantificação de critérios (por exemplo, análise de ciclo de vida - ACV ou custo nivelado). No entanto, na maioria deles, os critérios são analisados através do uso de métodos e escalas específicos para medição de desempenho (escalas ordinais, cardinais e escalas de intervalo ou uma mistura dessas).

Em geral, a dimensão social é quantificada com base em apenas algumas fontes, o que é típico para problemas não muito bem definidos e estruturados. Isso torna difícil a medição de critérios, porque a maioria dos autores se baseiam em avaliações qualitativas de especialistas (Ren, 2018) ou não fornecem informações sobre a forma de sua investigação (Wei et al., 2016). Ambas as etapas (seleção de critérios e medição de desempenho) devem, portanto, ser conduzidas em paralelo para verificar se alguns critérios são “mensuráveis” antes de incluí-los, outra grande dificuldade nos aspectos ambientais. Essa verificação é parte integrante da fase de construção de qualquer MCDA, e as partes interessadas devem ser incluídas bem no início do processo.

3.0 METODOLOGIA

3.1 Definição dos critérios sociais e ambientais

É razoável supor que o uso de grandes baterias aumentará rapidamente na próxima geração com o armazenamento de energia em escala de rede (> 50MW) e para a geração distribuída. Por isso, é altamente recomendável que os SAE sejam analisados com muito mais rigor em termos do total de impactos no ciclo de vida.

Os principais impactos socioambientais relacionados à produção das baterias estão associados aos seguintes aspectos principais (Ren, 2018): participação das baterias no uso de matérias-primas e no esgotamento de recursos naturais; o papel das baterias em poluentes ambientais, gases de efeito estufa (GEE) e efeitos nocivos à saúde pública durante o período mineração, fabricação, uso, coleta, transporte e armazenamento; os perigos e problemas causados pelo descarte e reciclagem de baterias; a grande variedade de matérias-primas necessárias, incluindo metais e não-metais - o consumo global de fabricação de baterias é responsável por grandes frações de chumbo produzido (85%), cádmio (75%), cobalto (50%), lítio (46%), antimônio (27%), lantânio (10%) e grafite (10%).

O incremento acentuado da produção de baterias para veículos, armazenamento de energia por micro redes e as aplicações em redes de grande escala, certamente provocarão aumento nas pressões de exploração de recursos naturais e, conseqüentemente, aumento de preço de metais preciosos (Ag, In), mais caros e mais raros. As baterias podem gerar poluentes ambientais, incluindo resíduos perigosos, emissões e vapores tóxicos, de diferentes maneiras durante as fases do seu ciclo de vida. Podem gerar contaminantes e emitir gases no processo de fabricação (especialmente as emissões de CO₂ por causa do alto consumo de energia, em comparação com outros processos de armazenamento de energia). Os metais pesados usados na fabricação de baterias (por exemplo, Pb, Cd, Hg, As, Cr) são prejudiciais à saúde humana se a exposição exceder certos limites. Além disso, a coleta, a reciclagem e o descarte de baterias ainda são um desafio, embora as soluções sejam conhecidas, mas de difíceis implementação, além de muito caras para as economias menos desenvolvidas.

As baterias de veículos com chumbo-ácido são quase totalmente recicladas nos países desenvolvidos, mas os controles relaxados e instalações inadequadas em muitos outros países causam grandes problemas ambientais e de saúde. Existem dúvidas sobre os impactos socioambientais provocados pela extração e fabricação de baterias de Íon-Li usadas para armazenamento em grande escala na tentativa de limpar a rede de energia elétrica e substituir as usinas de combustíveis fósseis (Bauman, M., 2019, Oliveira, 2015) Embora possam ser a melhor solução econômica, a principal questão em torno do futuro dessas baterias em escala de rede são os custos socioambientais envolvidos, que não são contabilizados de forma adequada, notadamente aqueles relativos à extração das matérias primas. Uma reportagem da NS Energy¹ mostra impactos ambientais em rios e habitats da fauna selvagem devidos à extração de minerais essenciais às baterias. Vários deles foram relatados na região da mina de lítio Ganzizhou-Rongda no Tibete.

Outro impacto que deve ser contabilizado nos efeitos deletérios ao meio ambiente são as emissões atmosféricas (Tabela 1). Uma análise do ciclo de vida das baterias mostrou as emissões criadas durante a produção de materiais, fabricação e montagem, bem como associadas à reciclagem do material. Essas emissões incluem CO₂, contaminantes (devido à combustão) e emissões específicas do processo (por exemplo, metais pesados), tanto para o ar quanto para a água. As baterias de íon-lítio, NaS e de NiMH são os maiores emissores de CO_{2eq}. Note-se que as de Íon-Li são capazes de gerar condições para um incêndio se expostas à umidade por um período suficiente para levar à corrosão das células (Dehghani Sanija, et al., 2019).

Tabela 1 - Emissões atmosféricas relacionadas às baterias

| Emissões atmosféricas (g/kg) | VOC | CO | NO _x | PM | SO _x | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ (kg/kg) |
|------------------------------------|-----|-----|-----------------|------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| Chumbo ácido (PbA) | 0,7 | 1,1 | 4,6 | 4,5 | 7,0 | 3,8 | 0,0 | 3,2 |
| Níquel-cádmio (NiCd) | 2 | 3,5 | 17,0 | 12,1 | 79,0 | 8,8 | 0,1 | 7,7 |
| Níquel metal hidreto (NiMH) | 1,2 | 4,5 | 17,6 | 18 | 71,1 | 19,6 | 0,2 | 13,6 |
| Íon-lítio (Ion-Li) | 0,9 | 3,0 | 14,5 | 19,6 | 19,7 | 13,7 | 0,1 | 12,5 |

¹ <https://www.nsenergybusiness.com/features/lithium-ion-battery-environmental-impact/>

| | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|-----|----|------|------|------|-----|------|
| Sódio-enxofre (NaS) | 1,3 | 4,9 | 16 | 23,7 | 29,3 | 21,4 | 0,2 | 14,3 |
|----------------------------|-----|-----|----|------|------|------|-----|------|

Fonte: Adaptado de Dehghani Sanija, 2019.

Com exceção das emissões de SO_x para baterias NiMH e NiCd, as médias de emissão de cada tecnologia são inferiores a 20 g/kg de bateria e a variação relativa das médias dessas tecnologias é praticamente a mesma. Uma parte substancial dessas emissões não é resultado de combustão, mas é incorrida durante a torrefação de minérios de sulfeto de Ni e produção de Cd. Em resumo, a lista classificada de emissões de CO₂ por quilograma de bateria, em ordem crescente, é: menor para PbA, um pouco maior para NiCd, e mais alto para as demais baterias de tecnologia avançada. As baterias de Íon-Li que usam cátodos com níquel e cobalto, bem como o processamento de eletrodos à base de solvente, têm o maior potencial de impactos ambientais. Esses impactos incluem esgotamento de recursos, aquecimento global, toxicidade ecológica e impactos na saúde. Além disso, o uso de baterias de íon-lítio em alguns casos impõe riscos de segurança (Feng *et al.* 2018). Sobrecarga, altas temperaturas e estresse físico das células da bateria podem causar uma fuga térmica, o que geralmente leva à destruição da bateria, fogo e até explosões.

Os eletrólitos corrosivos de uma bateria podem vaziar se quebrarem durante o armazenamento, uso ou transporte. Além disso, o eletrólito pode conter metais dissolvidos como chumbo, que podem se tornar residentes na água ou no solo em várias formas químicas móveis. Devido à presença de vários metais (especialmente metais pesados) e eletrólitos (por exemplo, LiPF₆ em baterias de íons de lítio, ácido sulfúrico (H₂SO₄) em baterias de Pb-A), águas residuais geradas durante os processos (ex. fabricação, tratamento, reciclagem) também podem ser perigosas. O Quadro 1 a seguir ilustra os principais impactos e riscos dos diferentes tipos de baterias.

Quadro 1 – Riscos e impactos socioambientais associados às baterias

| Baterias | Impactos socioambientais | Riscos |
|-----------------|--|--|
| PbA | Ciclos de alta temperatura limitados, e o chumbo é tóxico, mas a bateria pode ser até 90% reciclável | Metais pesados e os eletrólitos podem ser líquidos |
| NiCd | Níquel é difícil de extrair por sua instabilidade, é tóxico, e a bateria tem reciclagem limitada | Toxicidade |
| NiMH | Níquel é difícil de extrair por sua instabilidade, é tóxico, e sua reciclagem é limitada | Normalmente sem riscos de danos, mas os eletrodos são inflamáveis se expostos ao ar. |
| Íon-Li | Elementos esgotáveis na maioria das aplicações (cobalto), mas substituíveis por manganês ou ferro que são explorações sustentáveis | Risco médio de incêndio, curtos-circuitos internos, aspectos de segurança |
| NaS | Sódio e enxofre são “verdes” e a bateria é reciclável, e tem baixa pegada de carbono | Sem riscos relatados |

Fonte: Adaptado de Dehghani Sanija, 2019

2.2 Alternativas de metodologias de avaliação multicritério e seleção do modelo

A experiência em estudos socioambientais no Brasil mostra que mesmo utilizando métodos com menores esforços de cálculo, como o AHP, ou elementares como feito nas avaliações ambientais integradas, tem sido difícil comparar as alternativas de fontes de geração ou mesmo de empreendimentos em particular, e tomar uma decisão consensual. É mais difícil ainda utilizar métodos de avaliação por superação, como feito pelo modelo SINV do CEPEL (Eletrobrás, 2007) para estudos de alternativas de divisão de quedas em inventários hidrelétricos. Por isso, neste estudo optou-se por utilizar um método híbrido. Para avaliação dos SAE foi aplicado o modelo TOPSIS *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (Hwang e Yoon, 1981), pelos seguintes motivos principais: o método permite a inclusão de um número ilimitado de propriedades e atributos (critérios); ordena as alternativas através de desempenhos dos critérios, facilitando o entendimento das diferenças e similaridades entre elas; e pode ser facilmente implementado em planilha eletrônica, facilitando a sua utilização.

Um problema que pode ocorrer neste método, como também em outros de análise hierárquica, é a inversão de ordem das alternativas. Como solução é proposto o *modified* TOPSIS ou M-TOPSIS (Ren *et al.*, 2007). Porém, a adoção da entropia dos dados para definição dos pesos pode acarretar problemas na base de dados, além de ser mais complexo de explicar aos interessados e não refletir a verdadeira preferência dos especialistas pela melhor alternativa, bem como na compreensão do processo e dos seus resultados. Assim, para corrigir isso, pode-se utilizar outros métodos (AHP, por exemplo) para complementar a definição dos pesos dos critérios. Embora possa ser utilizado por indivíduos lidando com decisões simples, o método AHP é mais útil quando equipes estão envolvidas em problemas complexos e que necessitam de percepção humana e cuja resolução terá repercussão de longo-prazo (Bhushan & Rai, 2004).

A abordagem multicritério AHP-TOPSIS compreende as seguintes etapas: Definição da estrutura hierárquica de decisão e os critérios (e subcritérios) para validação dos indicadores para mensuração e avaliação das tecnologias; Atribuição de pesos aos critérios pelo método AHP; Avaliação quantitativa do grau de atendimento dos indicadores aos critérios pelo método TOPSIS; e Avaliação qualitativa a partir dos resultados da avaliação quantitativa do grau de atendimento dos indicadores propostos aos critérios previamente estabelecidos. De acordo com essa

metodologia, a melhor alternativa seria aquela mais próxima da solução ideal positiva (*positive ideal solution*, ou PIS) e a mais distante da solução ideal negativa (*negative ideal solution*, ou NIS). A solução ideal positiva é composta por todos os melhores valores atingíveis de cada critério e solução negativa o inverso, com os piores valores de cada critério (Hwang & Yoon, 1981). Pode-se dizer também que a PIS é uma solução que minimiza os impactos ambientais negativos, enquanto a NIS maximiza os impactos ambientais negativos.

A aplicação do AHP envolve a síntese matemática de vários julgamentos sobre o problema de decisão. O método objetiva a seleção de alternativas em um processo que leve em consideração diferentes critérios de avaliação. Segundo Saaty *et al.* (2012) ele está baseado em três princípios básicos: construção de uma ordenação em determinados atributos selecionados pelos interessados; definição das prioridades por comparação pareada; e verificação da consistência lógica para analisar os resultados do modelo.

Foi usado uma planilha para fazer as classificações dos processos de obtenção das baterias, e dos atributos correspondentes aos impactos ambientais: Dimensão processos: extração/produção; operação, e descarte/reciclagem; Critérios: impactos ambientais. Foi realizada uma pesquisa relativamente a definição desses critérios na avaliação multicritério, e em particular do SAE. O Quadro 2 a seguir resume o resultado dessa pesquisa.

Quadro 2 - Critérios de avaliação identificados na literatura

| Citação | Critérios |
|--|---|
| Çolaka & Kayab, 2020 | Qualidade do ar, recursos hídricos, ecossistemas, recursos naturais, uso da terra |
| Wua <i>et al.</i> , 2020 | Harmonia ecológica, GEE, eficiência energética |
| Baumann <i>et al.</i> , 2019 | GEE, qualidade do ar, vida selvagem |
| Quader <i>et al.</i> , 2019 | CO ₂ , CO, SO ₂ , NO _x , material particulado, uso da terra, eutrofização, aquecimento global |
| Feng, 2019 | Risco de explosão |
| Hester & Harrison, 2019 | Recursos hídricos, uso da terra, mudança climática, toxidade, eutrofização, acidificação, ozônio, saúde |
| Dehghani-Sanij <i>et al.</i> , 2019 | Emissões atmosféricas, reciclagem, qualidade do ar, recursos hídricos, resíduos sólidos, VOC, CO, NO _x , material particulado, CH ₄ , CO ₂ |
| Truc, 2017 | Emissões e impactos genéricos |
| Witt, 2020 | Recursos minerais, aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxidade, uso da terra |
| Oliveira, 2015 | Saúde, Ecossistemas, Recursos Naturais, Toxidade, Eutrofização, Uso da terra, Minerais, mudança climática |
| Shaktawat <i>et al.</i> , 2020 | Custo nivelado, GEE, SO _x , uso da terra |
| Petrillo <i>et al.</i> , 2016 | Saúde, ecossistemas, recursos naturais, ruídos |
| Acar <i>et al.</i> , 2019 | Emissões, poluentes, recursos hídricos, qualidade da água, resíduos sólidos |
| Sonter <i>et al.</i> , 2020 | Recursos naturais, biodiversidade |
| Ghose <i>et al.</i> (2019) / Ozorhon <i>et al.</i> (2018) / Yazdani <i>et al.</i> (2018) / Büyüközkan & Karabulut (2017) / Büyüközkan & Gülerüz. (2017) / Kumar <i>et al.</i> (2017) | Emissões, uso da terra |
| Ozorhon <i>et al.</i> (2018) / Jovanović, & Cvetković. (2018) / Wu <i>et al.</i> (2018) / Büyüközkan & Karabulut (2017) / Büyüközkan & Gülerüz, S. (2017) / Kumar <i>et al.</i> (2017) | Ecossistemas |
| Ozorhon <i>et al.</i> (2018) / Yazdani <i>et al.</i> (2018) / Kumar <i>et al.</i> (2017) | Saúde, toxidade humana |

Com base nos resultados acima se escolheram os seguintes critérios e subcritérios para a avaliação do desempenho socioambiental dos SAEs. Isto é, aqueles com maior presença nesses artigos, levando em conta sua importância na sustentabilidade ambiental dessas tecnologias, bem como algumas fases do ciclo de vida das baterias objeto de análise, quais sejam: extração; processo de fabricação/operação; e descarte/descomissionamento. Cada um dos critérios e adotados nestas fases do ciclo de vida é explicitado na sequência.

a) Extração

- Emissão de GEE, pela importância do tema das alterações climáticas que estão em curso;
- Impactos nos recursos hídricos – qualidade e quantidade, por poderem gerar muitos impactos na exploração da água, seja pela sua exploração ou contaminação;
- Impactos na saúde humana associados a contaminação do solo e da água, e aos trabalhadores da mineração;

- Uso de matérias-primas e no esgotamento de recursos naturais, justificado pela demanda crescente, pela superexploração e pela mineração inadequada, além dos impactos nos ecossistemas naturais;
- Riscos de contaminação do solo, pela exploração inadequada na mineração de matéria-prima.

b) Processo de fabricação/operação

- Emissão de GEE, pelas alterações climáticas;
- Emissões de líquidos e sólidos, pela possibilidade de vazamentos no meio ambiente na operação;
- Impactos nos recursos hídricos – qualidade e quantidade, pela possibilidade de contaminação dos lençóis;
- Impactos na saúde humana, pela contaminação dos aquíferos e do solo e pela possibilidade de acidentes;
- Riscos de explosão, pela possibilidade de explosão dos equipamentos;
- Riscos de contaminação do solo, pela possibilidade de vazamentos durante a operação;
- Vida útil, nesse caso quanto maior a vida útil, conseqüentemente menores serão os impactos ambientais.

c) Descarte/descomissionamento

- Emissão de GEE, pelas alterações climáticas em curso no caso de descarte;
- Capacidade de reciclagem (neste caso, quanto maior a capacidade de descarte menor o impacto negativo);
- Impactos nos recursos hídricos – qualidade e quantidade, pela possibilidade de contaminação de aquíferos e rios;
- Impactos na saúde humana, pelo descarte inadequado;
- Riscos de contaminação do solo, pela possibilidade de vazamentos no descarte inadequado.

4.0 RESULTADOS / DEMONSTRAÇÃO DE APLICABILIDADE

Inicialmente a aplicação foi iniciada com a emprego do método AHP para a definição dos pesos dos critérios em cada uma das fases do ciclo de vida. Foi feita pelo autor com base nas referências pesquisadas e validada pelos demais autores, e utilizada como premissa inicial para posterior discussão com os interessados, a seguinte ordem de preferência para os critérios e subcritérios pelo método AHP, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Pesos para ponderação dos critérios

| Item | Fase / Critério | Peso | Item | Fase / Critério | Peso | Item | Fase / Critério | Peso |
|------|---------------------------|-------|------|---------------------------|-------|------|------------------------|-------|
| 1 | Extração | 0,2 | 2 | Produção/operação | 0,6 | 3 | Descarte/reciclagem | 0,2 |
| 1.1 | Gases de efeito estufa | 0,068 | 2.1 | Gases de efeito estufa | 0,169 | 3.1 | Gases de efeito estufa | 0,123 |
| 1.2 | Uso dos recursos hídricos | 0,15 | 2.2 | Uso dos recursos hídricos | 0,097 | 3.2 | Reciclagem | 0,227 |
| 1.3 | Saúde | 0,15 | 2.3 | Resíduos líquidos | 0,055 | 3.3 | Saúde | 0,423 |
| 1.4 | Mineração | 0,298 | 2.4 | Saúde | 0,111 | 3.4 | Contaminação dos solos | 0,227 |
| 1.5 | Contaminação dos solos | 0,138 | 2.5 | Risco de explosão | 0,294 | | | |
| 1.6 | Ecossistemas | 0,196 | 2.6 | Contaminação dos solos | 0,138 | | | |
| | | | 2.7 | Vida útil | 0,194 | | | |

Depois de definidos o método de avaliação multicritério e os critérios de avaliação ambiental, buscou-se referências para definir graus (desempenho) para os diversos impactos ambientais para que, na sequência, a aplicação do método TOPSIS pudesse ser realizada. No entanto, alguns poucos artigos conseguem estabelecer os graus de impacto para baterias e até mesmo para empreendimentos de geração de energia. Isto é mais evidente no caso das baterias, pela grande competitividade dos fabricantes, omitindo informações consideradas estratégicas. No que tange a extração do material necessário, por exemplo, não existem quantificações do comprometimento dos recursos hídricos, da contaminação do solo e da saúde da população trabalhadora. Por outro lado, as empresas não são responsáveis em muitos países pelo descarte ou reciclagem das baterias. Em alguns casos, ou a reciclagem é muito complexa ou tem custos muito elevados.

Dessa forma, a graduação dos impactos para aplicação do método TOPSIS foi baseada nos artigos e estudos disponíveis sobre a obtenção de baterias, como os apresentados no Quadro 2 (graus de 1 a 5, quanto maior mais impactante). Os impactos foram classificados em função dos dados disponíveis, por exemplo, níveis de emissão de GEE, capacidade de reciclagem, vida útil, riscos de explosão, dentre outros. Também foram analisados os materiais necessários, relativamente à mineração e ao descarte, considerando seus efeitos negativos.

A Tabela 4 a seguir mostra os resultados do método TOPSIS para avaliação de cinco baterias mais presentes, considerando as 3 dimensões: extração, fabricação/operação e descarte/reciclagem. Essas baterias foram

selecionadas por disporem de mais dados de impactos socioambientais nas referências pesquisadas, e por serem suficientemente maduras.

Tabela 4 – Desempenhos das baterias por impacto ambiental em cada uma das fases do ciclo de vida

| Alternativas de Bateria | Fases | Extração | | | | | | Produção / Operação | | | | | | | Descarte / Reciclagem | | | |
|-------------------------|-----------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------|-----|-----|-----|
| | | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 |
| A1 | Chumbo ácido | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 4.0 | 3.0 | 3.0 | 5.0 | 4.0 | 3.0 |
| A2 | Níquel cádmio | 3.0 | 3.0 | 4.0 | 3.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 2.0 | 4.0 | 3.0 | 3.0 | 2.0 | 4.0 | 3.0 |
| A3 | Níquel metal hidreto | 4.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 2.0 | 3.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 2.0 | 3.0 | 3.0 |
| A4 | Ion lítio | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 2.0 | 4.0 | 4.0 | 2.0 | 3.0 | 3.0 | 2.0 | 4.0 | 3.0 |
| A5 | Sódio Enxofre | 4.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 1.0 | 4.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |

O resultado apresentado na Tabela 5 mostra a ordenação das baterias do ponto de vista ambiental do mais para o menos impactante.

Tabela 5 – Resultado do método AHP/TOPSIS

| Alternativas | | Graduação final | Ordenação |
|----------------------|----|-----------------|-----------|
| Chumbo ácido | A1 | 0,49 | 3 |
| Níquel cádmio | A2 | 0,51 | 2 |
| Níquel metal híbrido | A3 | 0,42 | 4 |
| Ion lítio | A4 | 0,68 | 1 |
| Sódio Enxofre | A5 | 0,28 | 5 |

Os resultados da tabela 5 se mostraram consistentes com alguns trabalhos pesquisados (Quadro 2) sobretudo em relação aos seguintes aspectos:

- As baterias usam metais pesados e contaminantes, como lítio, cobalto, cádmio, níquel, se mostraram mais impactantes, tanto no que tange a fase de extração (como se viu em notícias a respeito de minerações em países subdesenvolvidos na África e América do Sul e mesmo na China), como na fase de operação, por causarem efeitos negativos nos ecossistemas, na água e no solo, além da saúde humana, e com risco de explosão, caso das baterias de Ion-lítio e Níquel cádmio. E o volume dessas baterias hoje no mercado vai exigir maior exploração de minérios, sendo ainda muito pouco recicláveis.
- As baterias menos impactantes foram as de Chumbo-ácido, pela grande facilidade de reciclagem e de Sódio-enxofre.

No entanto, cabe observar que a bateria de níquel metal hidreto terminou por ser classificada como de baixo impacto pelo fato de não ter sido encontradas nas referências muitas informações sobre seus efeitos negativos, mesmo do ponto de vista qualitativo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método híbrido AHP – TOPSIS se mostrou adequado para uma compreensão de todo o processo construtivo da análise, é de fácil manipulação e compreensão, o que facilitará as negociações com os diversos interlocutores, e a obtenção de um consenso. Ao final dessa análise multicritério foi possível comparar as alternativas de SAE (baterias) sob o ponto de vista socioambiental para auxiliar na escolha da melhor solução, tal como proposto nos objetivos, demonstrando a importância desse tipo de análise multicritério e dos atributos socioambientais.

A análise não deve ser feita considerando apenas esses critérios, mas também os aspectos técnicos e econômicos. Assim, é importante citar alguns desdobramentos dessa avaliação para que possa definir a melhor solução para atender aos sistemas de transmissão/distribuição de energia elétrica.

- Há necessidade de se investigar melhor os efeitos negativos das baterias em todo o seu ciclo de vida.. É preciso que se aumente a competição para definir a tecnologia mais sustentável (com os selos “verdes”).
- Boa parte da literatura disponível se refere a países desenvolvidos e a matrizes elétricas muito diferentes da brasileira, o que mostra outra lacuna na avaliação de impactos. Esses impactos, como emissões de GEE,

se referem a matrizes elétricas de outros países, servindo apenas como referências comparativas para a avaliação.

- Os fabricantes normalmente se responsabilizam apenas pela fase de fabricação dos SAE, mas não há qualquer compromisso com outros impactos que se localizam longe de suas instalações, como a mineração e o descarte, que podem se dar até mesmo em regiões distintas ou em países diferentes. Há um espaço muito grande para propostas que tornem os SAE mais sustentáveis ambientalmente.
- A análise não pode considerar apenas os efeitos negativos ambientais, pois as baterias podem trazer grandes benefícios para o sistema elétrico, inclusive considerando a entrada de fontes renováveis.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcamo, J, “Chapter Six the SAS Approach: Combining Qualitative and Quantitative Knowledge in Environmental Scenarios,” in *Developments in Integrated Environmental Assessment*, vol. 2, Elsevier, 2008, pp. 123–150.

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

Cinelli M, Coles SR, Kirwan K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecol Indic* 2014; 46:138–48.

Dehghani-Sanija, A.R. et al - Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries - <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>

Deng X., Tao Lv, Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models, *Journal of Cleaner Production* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118962>

Feng, C. et al - Explosion mechanism and prevention of lithium-ion batteries - School of Automation, Beijing Information Science and Technology University Beijing, China – 2018.

Hwang C-L, Yoon K. Multiple attribute decision making methods and applications; a state-of-the-art-survey. Berlin: Springer; 1981.

Instituto Escolhas/PSR – Quais os reais custos da geração elétrica no Brasil – 2018

Kumar A, et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renew Sustain Energy Rev* 2017; 69:596–609.

Lepecki, J. Armazenamento de energia: situação atual, perspectivas e recomendações – 2018

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

Oliveira L, M. Messagie, J. Mertens, H. Laget, T. Coosemans, J. Van Mierlo - Environmental performance of electricity storage systems for grid applications, a life cycle approach - *Energy Conversion and Management* – 101, 2015.

Pohekar SD, Ramachandran M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2004;8(4):365–81.

Ren J. Sustainability prioritization of energy storage technologies for promoting the development of renewable energy: a novel intuitionistic fuzzy combinative distance-based assessment approach. *Renew Energy* 2018; 121:666–76.

Saaty T.L. et al - The possibility of group choice: pairwise comparisons and merging functions - *Social Choice and Welfare*, Vol. 38, No. 3 (March 2012), pp. 481–496

Sadok W, et al. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agron Sustain Dev* 2008;28(1):163–74.

Salles R, M, Borges, P, Santos, Ivan - *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v.5, n.3, p.267-277, 2016

Wei, L et al - Evaluation of grid energy storage system based on AHP-PROMETHEE-GAIA. 2016. PP. 9787–9792.

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

Zavadskas EK, Govindan K, Antucheviciene J, Turskis Z. Hybrid multiple criteria decision-making methods: a review of applications for sustainability issues. *Econ Res-Ekon Istraživanja* 2016;29(1):857–87.

DADOS BIOGRÁFICOS



Tarcisio Luiz Coelho de Castro - Engenheiro Civil UFRJ (1978) com pós-graduação pela COPPE-UFRJ. Professor Assistente do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola de Engenharia da UFRJ desde 1980. Atualmente gerente de projetos na área de recursos hídricos e meio ambiente na PSR Ltda onde está desde 2005. Foi coordenador de projetos e diretor técnico na área de meio ambiente da Engevix por mais de 25 anos tendo participado de projetos de geração de energia, usinas hidrelétricas, usinas termoelétricas, e linhas de transmissão, além de inúmeros projetos de infraestrutura, programas ambientais e processos de licenciamento ambiental.

(2) LUIZ RODOLPHO SAURET CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE
 Luiz Rodolpho Albuquerque, graduado cum laude em Engenharia Civil pela UFRJ, em 1996, é mestrando em Engenharia Urbana e Ambiental pela PUC-Rio e tem 22 anos de experiência em projetos hidrelétricos no Brasil e na América Latina. Na PCE Engenharia, a partir de 1998, trabalhou em diversos estudos, inclusive como coordenador. Em 2012, assumiu a chefia adjunta do departamento de inventários e viabilidade. Desde 2015, como consultor da PSR, contribui para desenvolver o módulo de engenharia do HERA - ferramenta computacional para planejamento hidrelétrico de bacias hidrográficas. Atualmente, faz parte da equipe de um projeto de P&D sobre usinas reversíveis.

(3) RODRIGO FLORA CALILI
 Rodrigo Flora Calili atualmente é professor adjunto do Programa de Pós-Graduação em Metrologia e do Mestrado Profissional de Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Tem Pós-doutorado em Metrologia pela PUC-Rio (2016) e é Doutor em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2013) com ênfase em Sistemas de Energia, tendo feito um ano de doutorado sanduíche na França na École de Mines de Paris (2012), mestre em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2006) com ênfase Métodos e Apoio à Decisão e graduado em Engenharia Elétrica pela UFJF (2003). Trabalhou e trabalha como consultor e pesquisador em diversos projetos de empresas setor elétrico.