

Estado, Mercado e as suas interações no Desenvolvimento

Proposta metodológica para análise econômico-regulatória da inserção de um novo agente institucional de armazenamento de energia no sistema elétrico brasileiro¹

Methodological proposal for economic-regulatory analysis of the insertion of a new institutional energy storage agent in the brazilian electrical system

Diego Dorneles Goulart , Mauricio Sperandio 

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

RESUMO

Este trabalho objetiva apresentar uma proposta metodológica para realizar uma análise econômico-regulatória da inserção de um novo agente institucional no setor elétrico brasileiro (SEB), o agente de armazenamento de energia. Com novos paradigmas tecnológicos e novos arranjos econômico-regulatórios futuros decorrentes da aplicação de sistemas de armazenamento de energia (SAE) no SEB, os agentes de geração (G), de transmissão (T) e de distribuição (D) de energia elétrica serão modelados no Sistema Elétrico de Potência (SEP), em específico com aplicações de SAE a partir de sistemas eletroquímicos de baterias, para as simulações de modelagem baseada em agentes (ABM), com variáveis técnico-operacionais e econômico-regulatórias, em: a) cenário futuro 1, com gestão individualizada dos agentes GTD sobre os resultados com SAE segmentados no SEP; b) cenário futuro 2, com a inserção de um novo agente de armazenamento de energia elétrica (A) para a prestação de serviços com SAE, com gestão centralizada no SEP, em nova relação contratual com os demais agentes do SEB.

Palavras-chave: Análise econômica e regulatória; Novo agente institucional de armazenamento de energia; Modelagem baseada em agentes

1 O presente trabalho resulta do Exame de Qualificação de Doutorado em Engenharia Elétrica, defendido pelo autor principal e aprovado por banca de professores examinadores junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal de Santa Maria (UFMS). E foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001, e do INCT-GD (através do CNPq sob o processo número 465640/2014-1, da CAPES sob o processo número 23038.000776/2017-54 e da FAPERGS sob o processo número 17/2551-0000517-1).

ABSTRACT

This work presents a methodological proposal to carry out an economic-regulatory analysis of the insertion of a new institutional agent in the Brazilian Electricity Sector (SEB), the energy storage agent. With new technological paradigms and new future economic-regulatory arrangements resulting from the application of Energy Storage Systems (ESS) in the SEB. The agents of generation (G), transmission (T) and distribution (D) of electricity will be modeled in the electric power system, specifically with ESS applications from electrochemical battery systems, for agent-based modeling (ABM) simulations with technical-operational and economic-regulatory variables. The future scenarios includes: a) individualized management of GTD agents on the results with ESS segmented in the power system; b) the insertion of a new electric energy storage agent to provide services with ESS, with centralized management in the power system, in a new contractual relationship with the other agents of the SEB.

Keywords: Economic and regulatory analysis; New institutional energy storage agent; Agent-based modeling

1 INTRODUÇÃO

A mudança de paradigma, em curso, no setor elétrico mundial decorre de três principais tendências de transformação que são chamadas de 3D's, ou seja, a Descarbonização, a Descentralização e a Digitalização. E observa-se que este processo de disruptura tecnológica e energética possibilitará que o sistema elétrico de potência (SEP) avance para um patamar mais complexo e de fluxo multidirecional, visto a inclusão de fontes renováveis intermitentes (solar e eólica); com a aplicação de diversas tecnologias, inclusive de sistemas de armazenamento de energia (SAE) e também resultando em clientes mais empoderados, os chamados prosumidores (integração de produtores e consumidores de energia elétrica). E estes fatores representam, simultaneamente, desafios e oportunidades para o setor elétrico brasileiro (SEB) (MORENO, 2015; CASTRO, 2017; EPE, 2018).

As tecnologias de sistemas de armazenamento de energia são consideradas como um dos processos inovativo e propulsores deste novo paradigma disruptivo econômico e regulatório para o setor de energia elétrica, devido principalmente ao potencial para a redução das emissões dos gases do efeito estufa; para compensar a intermitência das fontes de geração renovável; para redução de demanda por geração de energia no pico, para a redução ou substituição do investimento em geração, transmissão ou distribuição

de energia elétrica, e para o incremento da confiabilidade na operação do sistema elétrico, visto que os SAE aumentam a segurança e a disponibilidade do suprimento energético para os clientes (livres e regulados) (CASTRO, 2017).

E neste contexto torna-se estratégico e oportuno a realização de um estudo sobre a inserção de um novo agente de sistemas armazenamento de energia, em específico com aplicações de SAE a partir de sistemas eletroquímicos de baterias, considerando-se novos arranjos tecnológicos disruptivos e seus impactos econômicos e regulatórios para o setor elétrico de energia elétrica, no Brasil, que está em processo de transição.

2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA RECENTE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Há muito tempo se discute no Brasil propostas de aprimoramento do marco legal e regulatório do setor elétrico. Após a reforma liberalizante dos anos 1990 e a reestruturação dos anos 2000, remendados por forças conjunturais se sucederam sem repensar a estrutura como um todo ou perseguir novos e explícitos objetivos (CASTRO, 2017; FGV, 2018; ROMEIRO, 2020).

Em um resgate histórico recente, tem-se que Governo Federal lançou as bases de um novo modelo institucional para o setor elétrico brasileiro, sustentadas pela Lei Federal nº 10.847 e 10.848, de 15 de março de 2004 e pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Contudo, percebeu-se a necessidade de transformações deste novo modelo do setor elétrico brasileiro, quando os resultados deste longo processo histórico de discontinuidades apontaram para um SEB com crises cíclicas de instabilidade e insegurança. Faltando comprometimento com a confiabilidade, a estabilidade e a segurança no sistema elétrico brasileiro, tem-se a necessidade de consolidação de um modelo institucional contemporâneo, que assegure governança ao SEB (QUEIROZ, 2013; WALVIS e GONÇALVES, 2014; CASTRO e ROSENTAL, 2016).

E com o passar do tempo, após a intervenção da Medida Provisória nº 579/2012 e os seus desdobramentos, tornou-se claro o esgotamento do atual modelo e a necessidade de rearranjos estruturais. E de acordo com o Ministério de Minas e

Energia, o desenho de mercado do setor elétrico brasileiro vigente é permeado por ineficiências e falta de mecanismos de mercado, convivendo com volumes elevados de encargos e perdas técnicas e não técnicas, além de uma estrutura tributária que produz incentivos indesejáveis (MME, 2019).

Observou-se que este cenário não conferiria ao setor o dinamismo necessário para convergir para a modernização já vivenciada em mercados elétricos internacionais, onde se têm o empoderamento dos consumidores, a inserção de sistemas de geração de energia renovável (solar fotovoltaica e eólica) e a necessidade de introdução de novas soluções tecnológicas, visto que essas questões são extremamente relevantes em um momento no qual políticas ambientais alteram a arquitetura do setor, destacam com relevância o aumento participação de fontes intermitentes (solar e eólica) e de recursos distribuídos (resposta da demanda; eficiência, veículos elétricos; e armazenamento de energia) (CASTRO e OLIVEIRA, 2019; CASTRO et al., 2019a; ROMEIRO, 2020).

Neste sentido, em 2016 a Aneel lançou a Chamada Estratégica 21, que buscava empresas interessadas em desenvolver projetos de pesquisa relacionada ao uso de sistemas de armazenamento. Foram apresentados projetos de diversas tecnologias, com 23 aprovados à época, sendo que alguns já estão em operação e já existem, também, diversas empresas oferecendo equipamentos e soluções de armazenamento de pequeno, médio e grande porte no Brasil. Apesar disso, ainda não existe uma regulação específica para o uso de baterias conectadas à rede. Instituições do setor elétrico buscam desenvolvê-las de modo a reduzir os riscos do uso desses sistemas (CASTRO e OLIVEIRA, 2019; CASTRO et al., 2019a; GREENER, 2021).

Ademais, o modelo regulatório adotado enfrenta mudanças em âmbito internacional, com impacto local e mudanças de estratégia dos investidores e prestadores de serviço tradicionais, em resposta às inovações tecnológicas, que afetam modelos de negócios e, potencialmente, poderão conferir papel de maior destaque aos consumidores. Não há caminho de modernização sem inovação e

reconhecimento da centralidade do consumidor na nova arquitetura da indústria de energia elétrica (CASTRO, 2017; FGV, 2018; ROMEIRO, 2020).

No Brasil o processo de reestruturação do setor elétrico envolve caminhos sinuosos e governança complexa. E a tendência para mitigar as incertezas do marco legal e regulatório, inerentes aos processos de transformação, passará pelo diálogo entre todos os agentes envolvidos no setor, com realização de consultas públicas prévias e periódicas. Contudo, estas ações não garantirão coesão e coerências necessárias às reformas que estão em andamento no país (BICALHO, 2020; ROMEIRO, 2020).

Desta forma, o estabelecimento de modelo bem definido para a modernização do setor elétrico brasileiro, com objetivos claros, prioridades e etapas graduais podem acelerar este processo e traçar trajetórias exitosas, mitigando a fragmentação da agenda e evitando a captura por múltiplos e conflitantes interesses, pois os novos paradigmas exigirão novos modelos de negócios para o complexo setor elétrico brasileiro (CASTRO, 2017, BICALHO, 2020; ROMEIRO, 2020).

3 REFERENCIAL TEÓRICO: ECONOMIA DA COMPLEXIDADE E O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

De acordo com Tesfatsion (2006), tem-se que o setor elétrico apresenta-se como um objeto de estudo caracterizado como um sistema adaptativo complexo², por ser composto de múltiplas interações de agentes diversos através de redes e evolução ao longo do tempo. Assim, a Economia da Complexidade, também chamada de Teoria da Complexidade, apresenta-se como referencial teórico para embasar a realização deste trabalho, visto que ela faz parte de um quadro teórico alternativo (heterodoxo), representando um novo paradigma para análises econômicas de sistemas adaptativos complexos (TESFATSION, 2006; COSTA, 2020).

²Um sistema adaptativo complexo apresenta-se com características de ser um conjunto de partes ou subsistemas com processamentos internos singulares, conectadas entre si, configurando uma unidade coletiva com uma dinâmica própria e com propriedades emergentes, ou seja, componentes e regras de interação não lineares (TESFATSION, 2006).

Desta forma, a Economia da Complexidade apresenta-se como conjunto de ferramentas para modelar sistemas complexos, utilizada em várias e em diferentes áreas de conhecimento na ciência e para analisar o funcionamento de sistemas altamente organizados e descentralizados, compostos por diversos elementos heterogêneos, e que exhibe características comuns para componentes e como regra de interação a não linearidade (COSTA, 2019; COSTA, 2020).

Neste contexto da Economia da Complexidade, observa-se o Setor Elétrico Brasileiro (SEB) como sistema adaptativo complexo, composto de múltiplos agentes com diversas motivações, comportamento emergente imprevisível, a adaptabilidade com o passar do tempo, cuja interação nas redes dá origem a estruturas emergentes, como por exemplo, novas empresas e novos mercados, e pode-se incluir o SEB como um objeto de estudo neste referencial teórico, pois o SEB pode ser visto como um sistema adaptativo complexo e que poderá ser examinado através de uma abordagem metodológica emergente, através da simulação de Modelagem Baseada em Agentes (ABM, do inglês *Agent-Based Modeling*) (TESFATSION, 2006; COSTA, 2020).

4 REFERENCIAL TECNOLÓGICO, ECONÔMICO, REGULATÓRIO E SOCIOAMBIENTAL: PERCEPÇÕES SOBRE DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Quanto às percepções sobre aspectos tecnológicos de SAE, destaca-se que as tecnologias de armazenamento de energia permitirão uma maior eficiência operativa dos sistemas elétricos, com maior acesso à energia (suporte à maior produção de energia onde é consumida), com maior confiabilidade, estabilidade, flexibilidade, confiabilidade, resiliência e qualidade no fornecimento da energia elétrica, com maior integração de fontes renováveis intermitentes, com aumento do nível de cogeração (produção de eletricidade e calor), e deverão desempenhar um papel importante na descarbonização do

sistema energético por meio de melhor eficiência do uso dos recursos do sistema elétrico, da viabilização da geração distribuída e do consumidor *off-grid* (CGEE, 2017).

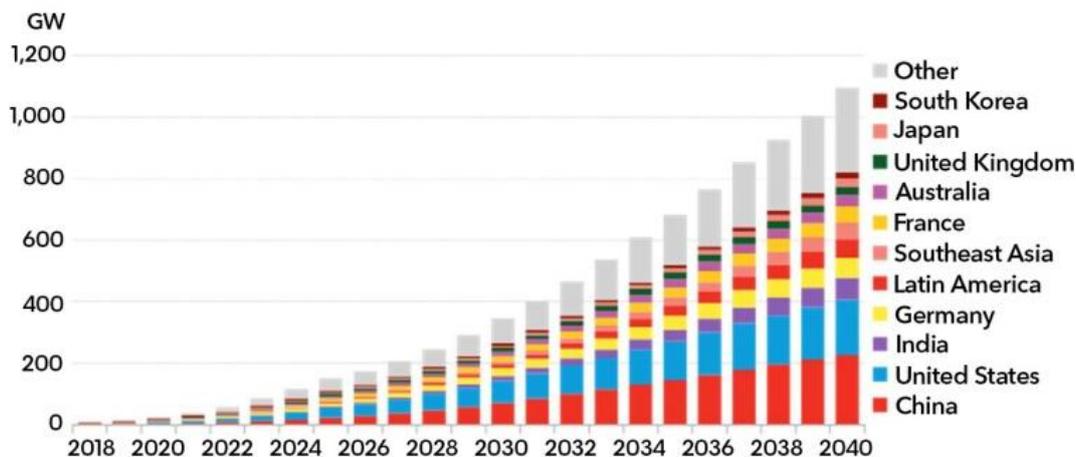
E descrevem-se as principais tecnologias de armazenamento e energia (ABAQUE, 2016; EPE, 2018), como segue:

- **Sistemas Elétricos:** Podem ser destacados os capacitores de dupla-camada (DLC – *Double-Layer Capacitors*) que estão no mercado há 60 anos e os supercondutores magnéticos (SMES – *Superconducting Magnetic Energy Storage*), que funcionam pelo princípio eletrodinâmico.
- **Sistemas Mecânicos:** Os mais utilizados são as bombas de armazenamento hidráulico (PHS – *Pumped Hydro Storage*), armazenamento de ar comprimido (CAES – *Compressed Air Energy Storage*) e o armazenamento de energia em cilindro rotativo (FES – *Flywheel Energy Storage*).
- **Sistema Térmico:** A capacidade de armazenamento de energia é definida pelo calor específico e a massa do fluxo.
- **Sistemas Químicos:** Os sistemas químicos se baseiam na conversão da energia elétrica gerada a partir de uma fonte de energia renovável (por exemplo: biomassa, eólica ou solar) em gás combustível como o hidrogênio (H₂) e o gás natural sintético (SNG – *Synthetic Natural Gas*), também chamada de tecnologia *Power to Gas* (P2G).
- **Sistemas Eletroquímicos:** Em sistemas eletroquímicos têm-se muitos tipos de baterias, sendo as mais comuns as de chumbo-ácido (Pb), íons de lítio (Li-íon), níquel-cádmio (NiCd), níquel-metal-hidreto (NiMH), cloreto de níquel e sódio (NaNiCl₂), sódio e enxofre (NaS), baterias de fluxo (que podem empregar diferentes elementos químicos), e outras, que na maioria são tecnologias maduras no mercado. E também se têm as baterias secundárias convencionais de fluxo recarregável, onde a energia armazenada é dissolvida em um líquido eletrolítico.

A redução de custos para armazenamento de energia (especialmente para as baterias) está associada com possibilidade de aprimoramento no uso de energias renováveis (da energia eólica e solar), onde essas tecnologias possam ajudar a

atender a demanda conectando-se ao sistema elétrico, e dado a sua previsão de crescimento para o mercado de armazenamento em nível mundial (Figura 1), observa-se que as aplicações de sistemas de armazenamento de energia tende a tornar-se realidade em muitos países (BNEF, 2020).

Figura 1 - Crescimento do mercado de armazenamento de energia em nível mundial



Fonte: BNEF (2020). Nota: a) Excluindo-se o armazenamento com hidrelétrica reversível

Desta forma, as capacidades de armazenamento de energia dessas tecnologias associadas aos seus respectivos custos de investimento e custos operacionais possibilitarão à realização de comparação das principais características para as análises e as escolhas corretas de uma determinada tecnologia, visando à inserção adequada destes dispositivos no sistema elétrico, de modo que se permita a realização de receitas possíveis (em suas diferentes aplicações) (GAILANI et al., 2020; WOODBANK, 2020).

Neste sentido, quanto aos aspectos econômicos e regulatórios, entende-se que os sistemas de armazenamento deverão ser aplicados de acordo com a disponibilidade de recursos econômicos e legislações regulatórias, e também com a aplicabilidade técnica e a especificidade tecnológica para cada segmento do setor elétrico (GOUVÊA, 2009; GREENER, 2021).

Conforme os trabalhos de DAZA (2018) e DAZA e SPERANDIO, (2019) apresenta-se uma descrição dos principais serviços com aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) no Sistema Elétrico de Potência (SEP) (Tabela 1), que são:

Tabela 1 - Descrição de Serviços de SAE no SEP

Serviços de SAE no SEP (G/T/D/A) ^a	G	T	D	A
Carregamento do Sistema: Serviço para reduzir picos de carga no sistema de distribuição e/ou transmissão		X	X	X
Expansão do Sistema: Serviço para postergar investimentos na ampliação do SEP	X	X	X	X
Reativos do Sistema: Serviço para absorção ou injeção de reativos no sistema	X	X	X	X
Perdas: Serviço para redução de perdas nos sistemas de distribuição e/ou transmissão	X	X	X	X
Disponibilidade com Penalidades: A possibilidade de aplicar algum nível de penalidade pela indisponibilidade de SAE	X	X	X	X
Imprevisibilidade de Geração ou Regulação de Frequência: Serviço para geradores (acordos bilaterais) quando sua geração prevista e negociada no mercado for inferior ao que de fato for gerado	X			X
Suporte ao Sistema: Serviço para suprimento de carga ao sistema	X	X	X	X
Mercado de Energia Primário: Arbitragem de preços no mercado de energia	X			X

Fonte: Compilação própria adaptado de DAZA (2018) e DAZA e SPERANDIO (2019)

Nota: a) Com relação às abreviaturas dos nomes dos Agentes do Setor Elétrico integrantes do Sistema Elétrico de Potência (SEP) têm-se o seguinte: G = Geração, T = Transmissão, D = Distribuição e A = Armazenamento

Em termos de percepções sobre aspectos econômicos e regulatórios de SAE, destacam-se, como pontos de atenção, três situações para melhoria do SEP (GREENER, 2021), como seguem:

• **Usinas Híbridas (Geração e Armazenamento):** Facilitariam o despacho de fontes altamente competitivas e limpas, visto que a falta de capacidade de escoamento é um dos principais desafios para novos projetos solares e eólicos de grande porte. Sinais econômicos mais adequados poderiam acelerar o desenvolvimento destas usinas híbridas.

• **Concessionárias de Transmissão e Distribuição:** Não possuem incentivos para adotar armazenamento como medida de otimização. Requerendo iniciativa regulatória específica. Estudos para os segmentos de transmissão e distribuição de energia brasileiros indicam que SAE podem ser benéficos, para otimizar investimentos em subestações e instalações do sistema.

• **Serviços Ancilares:** Também requerem iniciativas regulatórias específicas. Comparado com outros países, o Brasil tem elevados índices de interrupções e oscilações de rede. No entanto, atual marco regulatório não remunera o uso de SAE para a prestação de serviços ancilares.

Sobre aspectos socioambientais de SAE, destaca-se que eles são essenciais para alcançar as metas do Acordo de Paris, de 2016, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU). E desta forma, os sistemas de armazenamento de energia, e em especial as baterias, e podem criar novas oportunidades de geração de empregos e fomentar o desenvolvimento com os pilares da sustentabilidade (WEF, 2019).

Para o Brasil, afirma-se que o uso de baterias encontra-se em estágio inicial de utilização, embora tenha o potencial de auxiliar na superação de vários desafios do setor elétrico deve-se ter um cuidado com o aspecto socioambiental. Nesse, sentido necessidade de identificar nesta cadeia produtiva (produção, uso, reuso, reciclagem e disposição final de SAE) os diferentes impactos e riscos socioambientais (positivos e negativos) decorrentes do uso desta tecnologia, de modo que a sua utilização seja responsável, segura e sustentável (EPE, 2019).

5 REFERENCIAL METODOLÓGICO: SIMULAÇÃO DE MODELAGEM BASEADA EM AGENTES (ABM) PARA O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

A Modelagem Baseada em Agentes (ABM) é uma das metodologias (ou técnicas) emergentes para construção de modelos complexos, e sua utilização para simulação destes modelos está se expandindo rapidamente em diversos campos da ciência, de forma a contemplar amplamente conceitos de diferentes campos da ciência, da física à biologia, à computação e engenharias e às ciências sociais (NORTH e MACAL, 2007; FURTADO e SAKOWSKI, 2014).

Não há modo específico para aplicar a ABM, uma vez que podem ser utilizados muitos sistemas com cenários diferentes. Entretanto eles podem ser estudados em vários níveis, como indivíduos, populações, organizações, entre outros; topologia de interações regulares ou redes complexas; ambiente em que a interação acontece e regras de aprendizagem (FUENTES, 2015).

Assim, destacam-se algumas razões que levam à expansão do uso da ABM estão relacionadas com: a) os sistemas que precisamos analisar e modelar, que estão se tornando cada vez mais complexos em termos de suas interdependências; b) alguns sistemas sempre foram extremamente complexos para serem modelados, e tem-se com ela esta oportunidade; c) a possibilidade de organizar bases de dados em um nível fino de granularidade, o que permite realizar micro simulações; e d) o poder computacional que avança rapidamente (LIMA et al., 2009).

Desta forma, o trabalho de pesquisa, em desenvolvimento, ampara-se, metodologicamente, na utilização de simulação através da modelagem baseada em agentes (ABM), buscando-se descobrir novas interações e possibilidades de arranjos de mercado para os agentes do sistema elétrico de potência relacionando-os com aplicações de sistemas de armazenamento de energia e o novo agente armazenador de energia (PALOMINO, 2009; GENTILE et al., 2015).

A seguir, descrevem-se as características dos principais de agentes do setor elétrico brasileiro (Tabela 2), apresentando seus atributos, objetivos e

comportamentos básicos para análise, visto suas interações com os diferentes arranjos elaborados para a simulação ABM (MACAL et al., 2014; ANEKE e WANG, 2016; CGEE, 2017).

Tabela 2 - Características Básicas dos Agentes do Setor Elétrico Brasileiro

Agente de Geração de Energia Elétrica (G)

Atributos: Relacionados com: o tipo de combustível usado para geração de energia elétrica; a potência máxima de saída [MW]; a curva de eficiência do gerador em função da geração tecnologia e nível de produção; a constante de custo de rampa do gerador [\$/MW]; as emissões [ton/MWh]; a capacidade técnica de rampa [MW/h];

Objetivo: Obter lucros com a venda de energia elétrica a preços iguais ou superiores a seus custos marginais de produção, ou seja, maximizar os seus lucros; e

Comportamentos: Associado à estratégia de despacho, isto é, decidir como e quando operar o gerador.

Agente de Transmissão de Energia Elétrica (T)

Atributos: Relacionados com a propriedade ativos de transmissão de energia elétrica;

Objetivo: Fornecer energia elétrica pela rede de transmissão para atender aos requisitos do centro de carga (distribuição), minimizando seu o custo; e

Comportamento: Associado à transmissão de energia elétrica dos pontos de geração às redes de distribuição.

Agente de Distribuição de Energia Elétrica (D)

Atributos: Relacionados com a propriedade dos ativos de distribuição;

Objetivo: Distribuir energia elétrica para atender aos clientes, minimizando seu o custo; e

Comportamentos: Associado à distribuição de energia elétrica garantindo tecnicamente no âmbito da qualidade de energia elétrica e da continuidade de serviço que exista uma capacidade adequada na subestação (capacidade do transformador) e de alimentação (capacidade da rede de distribuição) para conseguir satisfazer aos clientes.

Agente de Armazenamento de Energia Elétrica (A)

Atributos: Relacionados com o gerenciamento de aspectos técnicos, econômicos, regulatórios e socioambientais de SAE: Densidade de Energia (kWh/m); Investimento (\$/kWh instalado); Custo de Armazenamento (\$/kWh armazenado); Disponibilidade (h ou %); Eficiência/Perdas (%);

Objetivo: Satisfazer as necessidades de uso final de energia, maximizando o lucro, com ações que minimizem os custos e que maximizem a receita; e

Comportamento: Associado estabelecer carga de eletricidade em resposta às necessidades de atendimento ao cliente e preços de energia elétrica.

Fonte: Adaptado de MACAL et al. (2014), ANEKE e WANG (2016) e CGEE (2017)

Na descrição da modelagem matemática para análise econômica e regulatória do setor elétrico brasileiro, que se refere à mensuração de lucros possíveis sobre os serviços prestados pelo SAE ao sistema elétrico ou com ganhos no mercado de energia, consideraram-se as formulações para definição das receitas possíveis de SAE em sistemas elétricos de potência, com base no trabalho de DAZA (2018), e as formulações para determinação dos custos estimados de SAE, com base no trabalho de IRENA (2017), respectivamente.

Adaptando-se a formulação de DAZA (2018), pode-se definir que a receita total de um determinado SAE aplicado em um determinado segmento do sistema elétrico de potência, pode ser representada por (1):

$$R_{SAE(x)} = [(\mu_{Car}R_{Car}) + (\mu_{Exp}R_{Exp}) + (\mu_{Perd}R_{Perd}) + (\mu_{Reat}R_{Reat}) - (\mu_{Pen}C_{Pen})] + [(\mu_{SGer}R_{SGer}) + (\mu_{SSit}R_{SSist}) + (\mu_{Merc}R_{Merc})] \quad (1)$$

onde:

$R_{SAE(x)}$: representa a receita do serviço de armazenamento de energia elétrica em um determinado segmento do sistema elétrico de potência, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

R_{Car} : receita pelo serviço de redução do carregamento do sistema; μ_{car} = norma regulatória para serviço de redução do carregamento do sistema, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

R_{Exp} : receita pelo serviço de postergação de investimentos de expansão do sistema, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

R_{Perd} : receita pelo serviço de redução das perdas do sistema, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

R_{Reat} : receita pelo serviço de compensação (injeção ou absorção) de reativos no sistema, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

C_{Pen} : custo por penalização pela indisponibilidade do serviço de SAE no sistema, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

R_{SGer} : receita sobre serviço de suporte geração de energia, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

R_{Sist} : receita sobre serviço de suporte ao sistema, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

R_{Merc} = receita de arbitragem (compra e venda) de energia do SAE no mercado horário de energia, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

μ (parâmetro regulatório), em cada parcela da equação de receitas, sendo o valor igual a 1 onde há a norma regulatória para remuneração da receita do SAE e 0 quando não há a norma prevista.

Adaptando-se a formulação de IRENA (2017), pode-se definir que o custo total para análise dos custos dos serviços prestados ao sistema e sua atuação no mercado de energia, pode ser calculado através de (2), para o custo do fornecimento de armazenamento de energia, ou de (3), para o custo do fornecimento de armazenamento de potência:

$$C_{SAE \text{ Energia } (x)} = \frac{C_{CAPEX \text{ SAE}} + C_{OPEX \text{ SAE}}}{P_{\text{aplicação}} * \left(\frac{E}{P_{\text{ratio}}}\right) * \text{Ciclos por dia} * 365} \quad (2)$$

$$C_{SAE \text{ Potência } (x)} = \frac{C_{CAPEX \text{ SAE}} + C_{OPEX \text{ SAE}}}{P_{\text{aplicação}}} \quad (3)$$

Onde:

$C_{SAE \text{ Energia } (x)}$: Custo do serviço de armazenamento de energia elétrica em um determinado segmento do sistema elétrico de potência, por energia [\$/kWh];

$C_{CAPEX \text{ SAE}}$: Soma das anuidades dos custos relacionados ao investimento [\$/a];

$C_{OPEX \text{ SAE}}$: Soma das anuidades dos custos relacionados à operação [\$/a];

$P_{\text{aplicação}}$: Demanda de potência de determinada aplicação [kW];

E/P_{ratio} : Relação entre as capacidades de energia e de potência na aplicação dada [kWh/kW];

Ciclos por dia: Ciclos completos equivalentes médios da unidade de armazenamento de energia na aplicação dada.

$C_{SAE \text{ Potência } (x)}$: Custo do serviço de armazenamento de energia elétrica em um determinado segmento do sistema elétrico de potência, por potência [\$/kW];

Desta forma, com as formulações de receitas possíveis para SAE, elaboradas por DAZA (2018), e de custos estimados de SAE, apresentados por IRENA (2017), pode-se definir que o lucro total pode ser representado por (4), para análise de cada serviço prestado ao sistema e de sua atuação no mercado de energia e cujo objetivo é maximizar o lucro:

$$L_{SAE (x)} = \sum_{n=1}^N ((\mu_{SAE(x)} R_{SAE(x)}) - (C_{SAE (x)})) \quad (4)$$

onde:

$L_{SAE (x)}$: Lucro total do serviço SAE em um determinado segmento do sistema elétrico de potência, por energia [\$/kWh] ou por potência [\$/kW];

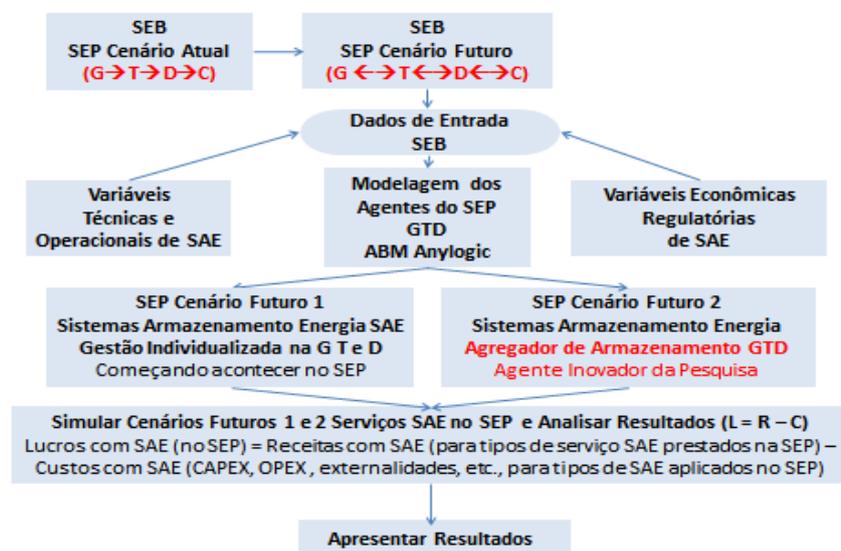
$\mu_{SAE (x)}$: Parâmetro regulatório, sendo o valor igual a 1 onde há a norma regulatória para remuneração da receita do SAE e 0 quando não há a norma prevista.

$R_{SAE (x)}$: Receita total do serviço de armazenamento de energia elétrica em um determinado o segmento do sistema elétrico de potência, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW];

$C_{SAE (x)}$: Custo total do serviço de armazenamento de energia elétrica em um determinado agente do sistema elétrico, em energia [\$/kWh] ou em potência [\$/kW].

Na sequência, descrevem-se os cenários futuros e apresenta-se um fluxograma a ser utilizado para estruturar para as simulações ABM (Figura 2), que visam possibilitar a análise sobre lucros resultantes com a aplicação de diferentes serviços prestados pelos diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia, e que serão modelados nos diferentes segmentos do sistema elétrico de potência, usando-se variáveis técnico-operacionais e econômico-regulatórias.

Figura 2 - Fluxograma da Metodologia de Simulação ABM. Fonte: Elaboração própria.



Fonte: Elaboração própria dos autores

E a partir do Fluxograma da Metodologia de Simulação ABM tem-se a descrição básica dos cenários a serem modelados:

- **Cenário Futuro 1:** Envolverá a gestão individualizada de cada um dos agentes (G/T/D) sobre os resultados obtidos nas simulações envolvendo os SAE, com suas diferentes possibilidades de aplicação nos diferentes segmentos do SEP;

- **Cenário Futuro 2:** Envolverá um novo agente de armazenamento de energia inserido no SEB para realizar a prestação de serviços de SAE, com uma gestão centralizada sobre os resultados obtidos nas simulações envolvendo a agregação de SAE, com suas diferentes possibilidades de aplicação no SEP, criando-se uma nova relação contratual com os demais agentes do setor elétrico brasileiro.

Ao adotar-se o *software* AnyLogic nesta pesquisa, em sua versão PLE (Personal Learning Edition), busca-se realizar o desenvolvimento das simulações ABM, envolvendo os principais agentes do setor elétrico brasileiro, os cenários futuros modelados, usando-se variáveis técnico-operacionais e econômico-regulatórias destes agentes, resultados obtidos serão analisados para comprovar-se ou não a viabilidade de inserção de um novo agente institucional de armazenamento de energia no sistema elétrico brasileiro.

6 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Muitos trabalhos acadêmicos tratam de aspectos técnicos (estáticos e isolados), dos SAE, como por exemplo, a sua alocação e dimensionamento, tendo poucos trabalhos acadêmicos preocupando-se com aspectos econômicos e regulatórios (dinâmicos e integrados) desta aplicação no SEP.

Considerando-se, em termos mundiais, as possibilidades de novos arranjos tecnológicos disruptivos e seus impactos econômicos e regulatórios e destacando-se a relevância de sistemas de armazenamento de energia, torna-se estratégica e oportuna a realização deste estudo para o setor de elétrico brasileiro, que também está em transição.

Desta forma, como contribuição inovativa deste trabalho tem-se a apresentação de uma metodologia de simulação de modelagem baseada em agentes (ABM) para analisar sob a ótica da complexidade aspectos econômicos e regulatórios, a partir da inserção de um novo agente institucional para gerir SAE em um novo paradigma para mercado elétrico brasileiro.

Assim, tem-se nesta proposta metodológica exploratória uma interação inovativa amparando-se na ABM, a ser desenvolvida com o *software* AnyLogic de modo a balizar a análise dos resultados obtidos a partir de variáveis técnico-operacionais e econômico-regulatórias referentes à inserção de sistemas de armazenamento de energia, durante as simulações de cenários futuros no setor elétrico brasileiro.

E como um dos principais resultados esperados com este estudo, a partir dos diferentes cenários futuros propostos, e relacionando-os com as novas tendências tecnológicas para o armazenamento de energia, vislumbra-se desvendar, de forma inédita, as interrelações econômicas e regulatórias emergentes para um desenho inovador para o setor de energia elétrica no Brasil.

Além disso, preliminarmente, percebe-se que em setores elétricos mais estruturados existem uma maior quantidade de serviços amparados por normas

regulatórias, possibilitando, por exemplo, a atuação de um agente armazenador de energia, atendendo as expectativas de todas as partes interessadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ARMAZENAMENTO E QUALIDADE DE ENERGIA (ABAQUE). **Armazenamento de Energia: Uma Agenda**. Workshop Internacional de Armazenamento de Energia da ANEEL. DF: Brasília. 2016.

ANEKE, M.; WANG, M. **Energy Storage Technologies and Real Life Applications: A State of the Art Review**. *Applied Energy*, v.237, p. 720–732, 2016. Disponível em: http://scholar.google.com.br/scholar?q=10.1016/j.apenergy.2016.06.097&hl=pt-BR&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart. Acesso em: set. 2020.

BLOOMBERG NEF (BNEF). **New Energy Outlook (NEO): Executive Summary**. 2020. Disponível em: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#toc-download>. Acesso em: dez. 2020.

BICALHO, Ronaldo. **A Modernização do Setor Elétrico Brasileiro**. 2020. Disponível em: <https://www.ilumina.org.br/a-modernizacao-do-setor-eletrico-brasileiro-2>. Acesso em: dez. 2020.

CASTRO, Nivalde de. **Novos Paradigmas Exigem Novos Modelos de Negócios**. Workshop FIESP Infraestrutura (19 de julho de 2017). 2017. Disponível em: <https://sitefiespstorage.blob.core.windows.net/uploads/2017/07/nivalde-de-castro-.pdf>. Acesso em nov. 2020.

CASTRO, Nivalde de; GOUVÊA, Adriana; CASTRO, Bianca de; CÂMARA, Lorraine; GUERRA, Matheus. **Tecnologias Exponenciais Quebram Paradigmas do Setor Elétrico**. Agência Canal Energia. RJ: Rio de Janeiro. (11 de julho de 2019). 2019. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/09_castro218.pdf. Acesso em: nov. 2020.

CASTRO, Nivalde de; OLIVEIRA, Carlos. **A Energia Eólica no Brasil e no Mundo: Desafios e perspectivas**. Agência Canal Energia. RJ: Rio de Janeiro. (14 de junho de 2019). 2019. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/55_castro_2019_06_17.pdf. Acesso em: nov. 2020.

CASTRO, Nivalde de; ROSENAL, Rubens. **O Estado e o Setor Elétrico Brasileiro**. *Jornal dos Economistas*. (01/09/2016). 2016. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/55_castro165b.pdf. Acesso em: dez. 2020.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica: Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia**. DF: Brasília, 2017. 398p.

COSTA, Fernando Nogueira da. **Estado da Arte da Economia**: Atualidades Teóricas e Decisões Práticas. Campinas. Blog Cultura & Cidadania, 2019. 261p.

COSTA, Fernando Nogueira da. **Pensamento Sistêmico da Complexidade**. Campinas: Blog Cultura & Cidadania, 2020. 256p.

DAZA, Eric Fernando Boeck. **Determinação de Arranjos Regulatórios e Econômicos para Viabilizar Investimentos em Sistemas de Armazenamento de Energia em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, 2018.

DAZA, Eric Fernando Boeck; SPERANDIO, Mauricio. **The Insertion of Energy Storage Systems in Power Systems**: A regulatory and economic analysis. IEEE Latin America Transactions. v.17, n.5, may, 2019. Disponível em: <https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/view/482>. Acesso em: fev. 2021.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO (EPE). **Recursos Energéticos Distribuídos**: Impactos no Planejamento Energético. Nota de Discussão da EPE. 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: jan. 2020.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. **Sistemas de Armazenamento em Baterias**: Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: dez. 2020.

FUENTES, Miguel Angel. Métodos e Metodologias em Sistemas Complexos. In: **Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas**. FURTADO, Bernardo Alves; SAKOWSKI, Patrícia A. M.; TÓVOLLI, Marina H.. (editores). Brasília: IPEA, 2015. 436 p.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Regulação e Infraestrutura**: Em Busca de uma Nova Arquitetura. Centro de Estudos de Regulação e Infraestrutura (CERI). 2018. 168p.

FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M. **Complexidade**: Uma Revisão dos Clássicos. (Texto para Discussão). Brasília: IPEA, 2014

GAILANI, Ahmed; CROSBIE, Tracey; AL-GREER, Maher; SHORT, Michael; DAWOOD, Nashwan. **On the Role of Regulatory Policy on the Business Case for Energy Storage in Both EU and UK Energy Systems**: Barriers and Enablers. Article in Energies. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1080>. Acesso em: out. 2020.

GENTILE, James E.; GLAZNER, Chris; KOEHLER, Matthew. Modelos de Simulação para Políticas Públicas. In: **Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas**. FURTADO, Bernardo Alves; SAKOWSKI, Patrícia A. M.; TÓVOLLI, Marina H. (editores). Brasília: IPEA, 2015. 436p.

GOUVÊA, Adriana Ribeiro. **Uma Visão Estratégica do Setor de Distribuição de Energia Elétrica Frente aos Desafios da Expansão de Recursos Energéticos Distribuídos no Brasil**.

2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, 2009.

GREENER Consultoria (GREENER). **Mercado de Armazenamento de Energia no Brasil 2021: Aplicações, Tecnologias e Análises Financeiras**. 2021. Disponível em: <https://greener.greener.com.br/estudo-de-armazenamento-energia-2021>. Acesso em: fev. 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030**. Abu Dhabi. 2017. Disponível em: www.irena.org. Acesso: jan. 2021.

LIMA, Tiago França Melo de; FARIA, Sérgio Donizete; SOARES FILHO, Britaldo Silveira; CARNEIRO, Tiago Garcia de Senna. **Modelagem de Sistemas Baseada em Agentes: Alguns Conceitos e Ferramentas**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 5279-5286, 2009.

MACAL, Charles; THIMMAPURAM, Prakash; KORITAROV, Vladimir; CONZELMANN, Guenter; VESELKA, Thomas; NORTH, Michael; MAHALIK, Matthew; BOTTERUD, Audun; CIRILLO, Richard. **Agent-Based Modeling of Electric Power Markets**. Conferência de Simulação de Inverno (WSC2014). 2014. Disponível em: <https://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/025.pdf>. Acesso: dez. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Relatório do Grupo Temático Inserção de Novas Tecnologias (1º Relatório – Diagnóstico)**. GT Modernização do Setor Elétrico. Brasília (Portaria nº 187/2019). Brasília, DF. Julho de 2019.

MORENO, Natália de Almeida. **Smart Grids e a Modelagem Regulatória de Infraestruturas**. Rio de Janeiro. Synergia Editora, 2015. 365 p.

NORTH, M. J.; MACAL, C. M. **Managing Business Complexity: Discovering**

Strategic Solutions with Agent-Based Modeling e Simulation. New York: Oxford. University Press, 2007.

PALOMINO, J. M. G. **Formação de Preço de Energia Elétrica Gerada por Biomassa no Ambiente de Contratação Livre Brasileiro: Uma Abordagem Computacional Baseada em Agentes**. 2009. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Universidade de São Paulo (USP), Ribeirão Preto, SP, 2009; 118p.

QUEIROZ, Renato. (2013). **Setor Elétrico Brasileiro: Uma História de Reformas**. Disponível em: <https://infopetro.wordpress.com/2013/09/09/setor-eletrico-brasileiro-uma-historia-de-reformas>. Acesso em: dez. 2020.

ROMEIRO, Diogo Lisboa. Labirintos da Modernização do Setor Elétrico Brasileiro. **Ensaio Energético**, 28 de setembro, 2020.

TESFATSION, Leigh. Economia Computacional Baseada em Agente: Uma Abordagem Construtiva da Teoria Econômica. In: Leigh Tesfatsion e Kenneth L. Judd (Eds.), **Handbook of Computational Economics**, vol. 2: Economia Computacional Baseada em Agentes (Sumário e Resumos), Handbooks in Economics Series, Holanda, Amsterdã: Elsevier. 2006, 904p.

WALVIS, Alida; GONÇALVES, Edson Daniel Lopes. **Avaliação das Reformas Recentes no Setor Elétrico Brasileiro e sua Relação com o Desenvolvimento do Mercado Livre de Energia**. 2014. Disponível em: https://ceri.fgv.br/sites/default/files/publicacoes/2018-10/17_avaliao_das_reformas_recentes_no_setor_eletrico_brasileiro.pdf. Acesso em: dez. 2020.

WORLD ECONOMIC FORUM (WEF). **A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030**. Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation. 2019. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf. Acesso em: dez. 2020.

WOODBANK COMMUNICATIONS (WOODBANK). **Battery and Energy**: Technologies Grid Scale Energy Storage Systems. (Electropaedia). 2020. Disponível em: https://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm. Acesso em: dez. 2020.

Contribuição de autoria

1 – Diego Dorneles Goulart

Universidade Federal de Santa Maria, Engenheiro Elétrico, Doutorando em Engenharia Elétrica
<https://orcid.org/0000-0002-5635-5092> - diego.goulart@prof.santamaria.rs.gov.br
Contribuição: Conceituação, Escrita – primeira redação

2 – Mauricio Sperandio

Universidade Federal de Santa Maria, Professor Associado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Doutor em Engenharia Elétrica
<https://orcid.org/0000-0003-4507-8437> - mauricio.sperandio@ufsm.br
Contribuição: Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

GOULART, D. D.; SPERANDIO, M. Proposta metodológica para análise econômico-regulatória da inserção de um novo agente institucional de armazenamento de energia no sistema elétrico brasileiro. **Econ. e Desenv.**, Santa Maria, v. 33, e6, 2021. DOI 10.5902/1414650966932. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1414650966932>. Acesso em: XX/XX/XXXX.