

# Proposta de um Novo Agente Institucional de Armazenamento de Energia

**Diego Dorneles Goulart**

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE)  
Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP)  
Santa Maria - RS, Brasil  
[diego.goulart@prof.santamaria.rs.gov.br](mailto:diego.goulart@prof.santamaria.rs.gov.br)

**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 arranjos econômico-regulatório futuros com sistemas de armazenamento de energia (SAEs) no SEB, os agentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica serão modelados para as simulações de modelagem baseada em agentes (ABM), com variáveis técnico-operacionais e econômico-regulatórias, em: a) cenário futuro 1, com gestão individualizada sobre os resultados com SAEs segmentados; b) cenário futuro 2, com a inserção de um novo agente de armazenamento de energia elétrica para a prestação de serviços com SAEs, com gestão centralizada, em nova relação contratual com os demais agentes do SEB.

**Palavras-chave**— *Análise Econômica e Regulatória; Armazenamento de Energia; Modelagem Baseada em Agentes.*

## I. INTRODUÇÃO

A mudança de paradigma, em curso, no setor elétrico mundial decorre de três principais tendências de transformação que são chamadas de 3Ds, ou seja, a Descarbonização, a Descentralização e a Digitalização. E observa-se que este processo de ruptura 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 prossumidores. E estes fatores representam, simultaneamente, desafios e oportunidades para o setor elétrico brasileiro (SEB) [1]-[3].

As tecnologias de sistemas de armazenamento de energia são as propulsoras deste novo paradigma disruptivo econômico e regulatório para o mercado 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 SAEs aumentam a segurança e a disponibilidade do suprimento energético para os clientes (livres e regulados) [2].

Com isso, torna-se estratégico e oportuno estudos sobre a inserção de um novo agente de sistemas armazenamento de energia, considerando-se novos arranjos tecnológicos

**Maurício Sperandio**

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE)  
Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP)  
Santa Maria - RS, Brasil  
[mauricio.sperandio@ufsm.br](mailto:mauricio.sperandio@ufsm.br)

disruptivos e seus impactos econômicos e regulatórios para um novo mercado de energia elétrica, que está em transição.

## II. DESENVOLVIMENTO

### A. Referencial Teórico: Economia da Complexidade e o Setor Elétrico Brasileiro

A Teoria da Complexidade também chamada de Economia da Complexidade apresenta-se como: conjunto de ferramentas para modelar sistemas complexos, utilizada em várias áreas diferentes na ciência e para analisar o funcionamento de sistemas altamente organizados e descentralizados, compostos por diversos elementos heterogêneos, apresentam como característica comum de componentes e de regras de interação a não linearidade [4].

Ademais, a Economia da Complexidade faz parte de um quadro teórico alternativo (heterodoxo), representando um novo paradigma para análise de fenômenos, onde a economia é vista como um 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 empresas e mercados [5].

Desta forma, pode-se incluir o Setor Elétrico Brasileiro (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 da abordagem metodológica de Modelagem Baseada em Agentes (ABM, do inglês *Agent-Based Modeling*) [6].

### B. Referencial Histórico: Evolução Histórica Recente do SEB

O 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 descontinuidades 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 [7]-[9].

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 [10].

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) [11]-[13].

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. E 21 projetos ainda estão em andamento, 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 buscam desenvolvê-las de modo a reduzir os riscos do uso desses sistemas [11]-[12] [14].

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. 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 [2], [13] e [15].

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 [13] [16].

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 setor elétrico brasileiro [2], [13] e [16].

### C. Referencial Tecnológico, Econômico, Regulatório e Socioambiental: Percepções sobre Sistemas de Armazenamento de Energia

Quanto às percepções sobre aspectos tecnológicos de SAEs, 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, integração de fontes renováveis intermitentes, 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, viabilização da geração distribuída e do consumidor *off-grid* [17].

E descrevem-se as principais tecnologias de armazenamento e energia [3] e [18], como segue:

- Sistemas Elétricos: podem ser destacados os capacitores de dupla-camada (DLC) que estão no mercado há 60 anos e os supercondutores magnéticos (SMES), que funcionam pelo princípio eletrodinâmico.
- Sistemas Mecânicos: são os mais utilizados são as bombas de armazenamento hidráulico (PHS), armazenamento de ar comprimido (CAES) e o armazenamento de energia em cilindro rotativo (FES – *Flywheel Energy Storage*).
- Sistemas Eletroquímicos e Químicos: podem ser também agrupados, mas são descritos pelas diferentes tecnologias. Nos sistemas eletroquímicos têm-se tipos de baterias como Li-íon, NaS, NaNiCl, e outras, que na maioria são tecnologias maduras no mercado. Além das baterias secundárias convencionais de fluxo recarregável, onde a energia armazenada é dissolvida em um líquido eletrolítico. Já nos sistemas químicos, tem-se que se baseia 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 (H<sub>2</sub>) e o gás natural sintético (SNG), também chamada de tecnologia *Power to Gas* (P2G).
- Sistema Térmico: a capacidade de armazenamento de energia é definida pelo calor específico e a massa do fluxo.

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 (Fig. 1), observa-se que as aplicações de sistemas de armazenamento de energia tendem a tornarem-se realidade em muitos países [19].

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) [20]-[21].

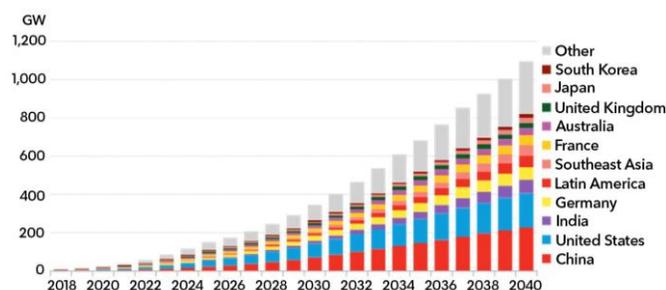


Fig. 1. Crescimento do mercado de armazenamento de energia em nível mundial [19]. Nota: Excluindo-se o armazenamento com hidrelétrica reversível.

Neste sentido, entende-se que os sistemas de armazenamento deverão ser aplicados de acordo com a disponibilidade econômica e regulatória, a aplicabilidade técnica e a especificidade tecnológica para cada segmento do setor elétrico [14] [22].

E conforme os trabalhos de [23]-[24] apresenta-se uma descrição dos principais serviços com aplicações de SAE em SEP (Tabela 1), que são:

TABLE I. RELAÇÃO DE SERVIÇOS DE SAEs EM SEP

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

Fonte: Compilação própria adaptada de [23]-[24]. Nota: a) Com relação às abreviaturas dos nomes dos agentes do setor elétrico têm-se o seguinte: G = Geração, T = Transmissão, D = Distribuição e A = Armazenamento.

Em termos de percepções sobre aspectos econômicos e regulatórios de SAEs, destacam-se como pontos de atenção três situações para melhoria [14], como segue:

- Usinas Híbridas (Geração + 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 T&D brasileiros indicam que SAEs 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 SAEs, 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 [25].

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 SAEs) 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 [26].

#### D. Referencial Metodológico: Simulação de Modelagem Baseada em Agentes (ABM)

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 a amplamente conceitos de diferentes campos da ciência, da física à biologia, à computação e engenharias e às ciências sociais [27]-[28].

Não há receita específica 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 [29].

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. [30]

### III. PROPOSTA METODOLÓGICA DE SIMULAÇÃO PARA MODELAGEM BASEADA EM AGENTES NO SEB

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 [31]-[32].

#### A. Agentes do Setor Elétrico Brasileiro

A seguir, descrevem-se as características dos principais de agentes do setor elétrico brasileiro (Tabela II), apresentando seus atributos, objetivos e comportamentos básicos para análise, visto suas interações com os diferentes arranjos elaborados para a simulação ABM [17], [33] e [34].

TABLE II. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DOS AGENTES

Agente de Geração de Energia Elétrica (G)
<b>Atributos:</b> 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]; <b>Objetivo:</b> 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 <b>Comportamentos:</b> Associado à estratégia de despacho, isto é, decidir como e quando operar o gerador.
Agente de Transmissão de Energia Elétrica (T)
<b>Atributos:</b> Relacionados com a propriedade ativos de transmissão de energia elétrica; <b>Objetivo:</b> Fornecer energia elétrica pela rede de transmissão para atender aos requisitos do centro de carga (distribuição), minimizando seu o custo; e <b>Comportamento:</b> Associado à transmissão de energia elétrica dos pontos de geração às redes de distribuição.
Agente de Distribuição de Energia Elétrica (D)
<b>Atributos:</b> Relacionados com a propriedade dos ativos de distribuição; <b>Objetivo:</b> Distribuir energia elétrica para atender aos clientes, minimizando seu o custo; e <b>Comportamentos:</b> 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)
<b>Atributos:</b> Relacionados com o gerenciamento de aspectos técnicos, econômicos, regulatórios e socioambientais de SAEs: Densidade de Energia (kWh/m); Investimento (\$/kWh instalado); Custo de Armazenamento (\$/kWh armazenado); Disponibilidade (h ou %); Eficiência/Perdas (%); <b>Objetivo:</b> Satisfazer as necessidades de uso final de energia, maximizando o lucro, com ações que minimizem os custos e que maximizem a receita; e <b>Comportamento:</b> Associado estabelecer carga de eletricidade em resposta às necessidades de atendimento ao cliente e preços de energia elétrica.

Fonte: [17], [33] e [34].

#### B. Modelagem Matemática para Análise Econômica e Regulatória do Setor Elétrico Brasileiro

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 SAEs em sistemas elétricos de potência, com base no trabalho de [23], e as formulações para determinação dos custos estimados de SAEs, com base no trabalho de [35], respectivamente.

Adaptando-se a formulação de [23], 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):

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

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;  $u_{Car}$  = norma regulatória para serviço de redução do carregamento do sistema;

$R_{Exp}$  = receita pelo serviço de postergação de investimentos de expansão do sistema;

$R_{Perd}$  = receita pelo serviço de redução das perdas do sistema;

$R_{Reat}$  = receita pelo serviço de compensação (injeção ou absorção) de reativos no sistema;

$C_{Pen}$  = custo por penalização pela indisponibilidade do serviço de SAE no sistema;

$R_{SGer}$  = receita sobre serviço de suporte geração de energia;

$R_{SSist}$  = receita sobre serviço de suporte ao sistema;

$R_{Merc}$  = receita de arbitragem (compra e venda) de energia do SAE no mercado horário de energia;

$\mu$  (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 [35], 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:

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

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

Onde:

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

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

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

$P_{Aplicação}$ : 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.

$C_{SAE\ Potência(x)}$ : 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 [23], e de custos estimados de SAE, apresentados por [35], pode-se definir que o lucro total pode ser representada 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;

$R_{SAE(x)}$  = Receita total do serviço de armazenamento de energia elétrica em um em 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].

### C. Elaboração de Cenários Futuros do Setor Elétrico Brasileiro para Simulação ABM

Na sequência, descrevem-se os cenários futuros e apresenta-se um fluxograma a ser utilizado para estruturar para as simulações ABM (Fig. 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.

- Cenário Futuro 1: Envolverá a gestão individualizada de cada um dos agentes (G/T/D) sobre os resultados obtidos nas simulações envolvendo os SAEs, 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 SAEs, com suas diferentes possibilidades de aplicação no SEP,

criando-se uma nova relação contratual com os demais agentes do setor elétrico brasileiro.

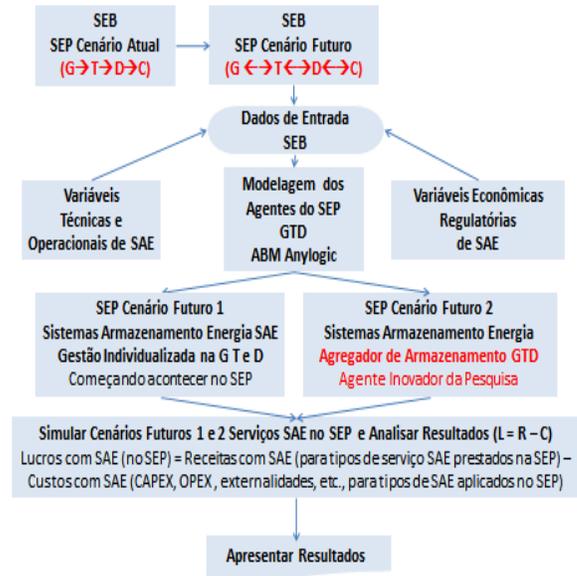


Fig. 2. Fluxograma da Metodologia de Simulação ABM. Fonte: Elaboração própria.

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.

## IV. 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 SAEs 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 os 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 interações econômicas e regulatórias emergentes, de 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.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001, e do INCT-GD (CNPq processo número 465640/2014-1, CAPES processo número 23038.000776/2017-54 e FAPERGS processo número 17/2551-0000517-1).

#### REFERÊNCIAS

- [1] N. de A. Moreno, "Smart Grids e a Modelagem Regulatória de Infraestruturas". Rio de Janeiro. Synergia Editora, 2015. 365 p.
- [2] N. de Castro. "Novos Paradigmas exigem Novos Modelos de Negócios". Workshop FIESP Infraestrutura (19 de julho de 2017). 2017.
- [3] EPE, "Recursos Energéticos Distribuídos: Impactos no Planejamento Energético". Nota de Discussão da EPE. 2018.
- [4] F. N. da Costa, "Pensamento Sistêmico da Complexidade". Campinas: Blog Cultura & Cidadania, 2020. 256p.
- [5] F. N. da Costa, "Estado da Arte da Economia: Atualidades Teóricas e Decisões Práticas". Campinas. Blog Cultura & Cidadania, 2019. 261p.
- [6] L. Tesfatsion, "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.
- [7] R. Queiroz, (2013). "Setor elétrico brasileiro: uma história de reformas".
- [8] N. de Castro e R. Rosental, "O Estado e o Setor Elétrico Brasileiro". Jornal dos Economistas. (01/09/2016). 2016.
- [9] A. Walvis e E. D. L. Gonçalves, "Avaliação das reformas recentes no setor elétrico brasileiro e sua relação com o desenvolvimento do mercado livre de energia". 2014.
- [10] 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.
- [11] N. de Castro, C. Oliveira, "A energia eólica no Brasil e no mundo: desafios e perspectivas". Agência Canal Energia. RJ: Rio de Janeiro. (14 de junho de 2019). 2019.
- [12] N. de Castro, A. Gouvêa, B de Castro, I. Câmara e m. Guerra, "Tecnologias exponenciais quebram paradigmas do Setor Elétrico". Agência CanalEnergia. RJ: Rio de Janeiro. (11 de julho de 2019). 2019a.
- [13] D. L. Romeiro, "Labirinto da Modernização do Setor Elétrico Brasileiro". Ensaio Energético, 28 de setembro, 2020.
- [14] Greener, "Mercado de Armazenamento de Energia no Brasil 2021: Aplicações, Tecnologias e Análises Financeiras". 2021.
- [15] FGV, "Regulação e Infraestrutura: Em busca de uma nova arquitetura". Centro de Estudos de Regulação e Infraestrutura (CERI). 2018. 168p.
- [16] R. Bicalho. "A modernização do setor elétrico brasileiro". 2020.
- [17] 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.
- [18] ABAQUE, "Armazenamento de Energia: Uma Agenda". Workshop Internacional de Armazenamento de Energia da ANEEL. DF: Brasília. 2016.
- [19] BNEF, "New Energy Outlook (NEO): Executive Summary. 2020".
- [20] A. Gailani, T. Crosbie, M. Al-Greer, M. Short, N. Dawood, "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.
- [21] Woodbank, "Battery and Energy: Technologies Grid Scale Energy Storage Systems". (Electropaedia). 2020.
- [22] A. R. Gouvêa, "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.
- [23] E. F. B. Daza, "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.
- [24] E. F. B. Daza, M. Sperandio, "The insertion of energy storage systems in power systems: a regulatory and economic analysis". IEEE Latin America Transactions. v.17, n.5, may, 2019.
- [25] WEF, "A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030. Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation". 2019.
- [26] EPE, "Sistemas de Armazenamento em Baterias: Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento". 2019.
- [27] M. J. North, C. M. Macal, "Managing business complexity: discovering strategic solutions with agent-based modeling e simulation". New York: Oxford. University Press, 2007.
- [28] B. A. Furtado, P. A. M. Sakowski, "Complexidade: uma revisão dos clássicos". (Texto para Discussão). Brasília: IPEA, 2014
- [29] M. A. Fuentes, "Métodos e Metodologias em Sistemas Complexos" in Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas. FURTADO, Bernardo Alves; SAKOWSKI, Patrícia A. M.; TÓVOLI, Marina H.. (editores). Brasília: IPEA, 2015. 436 p.
- [30] T. F. M. de Lima, S. D. Faria, B. S. Soares Filho, T. G. de S. Carneiro, "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.
- [31] J. M. G. Palomino, "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.
- [32] J. E. Gentile, C. Glazner, M. Koehler, "Modelos de Simulação para Políticas Públicas" in Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas. Furtado, Bernardo Alves; Sakowski, Patrícia A. M.; Tóvoli, Marina H. (editores). Brasília: IPEA, 2015. 436p.
- [33] C. Macal, P. Thimmapuram, V. Koritarov, G. Conzelmann, T. Veselka, M. North, M. Mahalik, A. Botterud, R. Cirillo, "Agent-based modeling of electric power markets". Conferência de Simulação de Inverno (WSC2014). 2014.
- [34] M. Aneke, M. Wang, "Energy storage technologies and real life applications: a state of the art review". Applied Energy, v.237, p. 720–732, 2016.
- [35] IRENA, "Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030". Abu Dhabi. 2017.