



GRUPO DE ESTUDO DE COMERCIALIZAÇÃO, ECONOMIA E REGULAÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCR

SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO E MERCADOS DE FLEXIBILIDADE NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

**LEONARDO PINHO MAGALHÃES; CAMILA CAPOBIANGO MARTINS; GEORGE CAMARGO DOS SANTOS
CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. - ELETROBRAS**

RESUMO

A oferta de novos mecanismos de flexibilidade operativa é relevante ao SIN e os sistemas de armazenamento de energia elétrica (SAE) destacam-se pela sua multifuncionalidade, facilitando a integração das fontes renováveis variáveis. Aprimoramentos técnicos e regulatórios são necessários para implementar novos serviços e produtos com atributos que dinamizem o planejamento da expansão e a operação em tempo real. A versatilidade dos SAE possibilita estes benefícios. Portanto, este trabalho apresenta um panorama do tema na atual conjuntura de modernização setorial visando o aprimoramento das regras dos serviços ancilares para benefício da operação em tempo real, identificando barreiras e oportunidades para o aumento da flexibilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Armazenamento; Flexibilidade; Serviços Ancilares; Regulação; Transição Energética.

1.0 INTRODUÇÃO

Os países signatários do Acordo de Paris, de 2015, firmaram medidas para a redução nas emissões mundiais de carbono, estabelecendo metas para anular suas emissões líquidas até 2050 (1). Esses compromissos impulsionaram o uso de fontes limpas, visando reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ao meio ambiente. Para o setor elétrico, isso resultou em nova tendência na expansão dos parques geradores, agora liderada pelas fontes eólica e solar, que em 2020 representaram cerca de 70% do total da capacidade que entrou em operação no mundo (2), firmando-se como opção concreta para o atendimento da crescente demanda por energia elétrica e para a redução nas emissões.

As usinas hidrelétricas e termelétricas, que ainda representam a maior parte da potência global instalada, passaram a enfrentar maiores restrições ambientais, legais ou geográficas para novas construções (3). Essas fontes convencionais, agregam flexibilidade operativa ao sistema, em grande parte associada ao armazenamento de seus insumos energéticos primários (4). Todavia, as denominadas fontes renováveis variáveis (FRV), representadas pelos geradores eólicos e solares, possuem a característica marcante da intermitência na disponibilidade de suas fontes primárias, sem opções de armazenamento ainda competitivas, e acrescentam incertezas à operação (5).

A redução das emissões de carbono, a expansão da geração guiada pelas FRV e a busca por menores impactos ambientais participam do processo de transição energética atual em escala mundial e abrange o setor energético como um todo. Importa ressaltar que no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) a transição energética e o avanço das FRV se apresentam em contexto diferente dos mercados da Europa e EUA (6). Enquanto no Brasil temos 82% da capacidade instalada para geração de eletricidade provenientes de fontes renováveis, sendo 60% de hidrelétricas (7), nos EUA a energia elétrica proveniente de fontes renováveis corresponde a cerca de 14% e na Europa é planejado ultrapassar os 30% dessas fontes por volta de 2030.

O principal desafio para o setor energético no Brasil será estar preparado para uma matriz energética com grande percentual de FRV, de acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 (8). Há de se estabelecer uma estratégia para disponibilizar recursos que tragam flexibilidade à operação do sistema, manter a matriz de geração predominantemente renovável e integrar as novas tecnologias, tal como os sistemas de armazenamento de energia (SAE), que são uma promessa para facilitar essa integração (9).

O aprimoramento de mecanismos existentes pode ser uma solução para o Sistema Interligado Nacional (SIN), cujos instrumentos de oferta de serviços ancilares, capacidade e reposta da demanda poderão servir de base para regulamentar e aumentar a oferta de flexibilidade via sistemas de armazenamento. Com base em pesquisa bibliográfica, análise comparativa da documentação regulatória e avaliação das práticas operacionais nacional e internacional para o uso das diversas tecnologias empregadas em sistemas de armazenamento de energia nos

sistemas elétricos, este artigo tem como objetivo caracterizar os SAE no contexto brasileiro, apontar incentivos regulatórios e políticas de fomento para a oferta de serviços de flexibilidade operacional no SIN. Além disso, o mercado de hidrogênio no Brasil é apresentado como possível vetor de indução à integração entre os setores de gás e energia elétrica. Para evolução da discussão do tema de forma clara e objetiva, o artigo apresenta três seções de desenvolvimento, uma conclusão e referências bibliográficas.

2.0 PANORAMA DO ARMAZENAMENTO NO BRASIL

No Brasil, a regulamentação não restringe ou impede a instalação dos SAE, seja no SIN ou em associação a unidades geradoras. O conceito e aplicação do armazenamento de energia não é novidade, mas a sua viabilidade econômica e a carência de estudos de impacto na confiabilidade sistêmica do SIN são empecilhos ao seu amplo estabelecimento nas diversas formas comercializáveis, ficando ainda restrito a aplicações específicas e localizadas, sem interferência significativa no SIN. Pode-se dizer que seu risco e custo ainda são fatores de cautela para investidores e órgãos reguladores (10).

Os SAE passaram a configurar, no âmbito do planejamento do setor elétrico, alternativas para a expansão da transmissão e geração, gerenciamento do despacho no curto prazo, aprimoramento da formação de preços e otimização no uso dos recursos energéticos nos médio e longo prazos. E pode melhorar na conservação dos recursos hídricos e minimizar o uso das usinas térmicas, dando tratamento à inflexibilidade da geração eólica e solar (11).

Para manter a confiabilidade e segurança do sistema na transição energética, o caminho deve passar pela legislação baseada em estudos técnicos. É necessário o comando do Poder Concedente a partir de instrumento legal que defina os SAE e seus serviços para que a regulamentação infralegal possa ser estruturada e atender aos agentes interessados. A efetiva regulamentação pode auxiliar a oferta de serviços e a estruturação de mercados, como para serviços ancilares, definindo os serviços de flexibilidade de forma objetiva. Por exemplo, nas Diretivas da União Europeia de 2019 encontra-se a definição para Provedor de Balanço Sistêmico (*Balancing Service Provider*) (12) e Serviços Ancilares (*Ancillary Services*) (13).

Conforme apresentado na Figura 1, enquanto a estrutura do SIN tem setores bem definidos, como Transmissão, Geração e Consumo, o armazenamento permeia a todos, atendendo-os em seus respectivos interesses, sejam técnicos ou comerciais. Parte da flexibilidade ofertada pelos SAE advém dessa característica, de poderem ser provedores ou consumidores de energia. Enquanto consumidores, podem oferecer o serviço de equalizar a carga em momentos de excesso de geração. Enquanto provedores, alguns serviços que serão apresentados em seguida. Assim, os SAE precisariam de um tratamento específico, pois são facilitadores da transição energética (14).

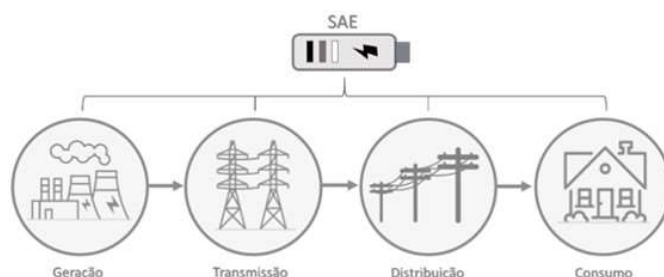


Figura 1 - Cadeia da Eletricidade - adaptada de (15).

Quanto à tributação vigente no Brasil, os impostos são cobrados de geradores e consumidores diferentemente. Logo, os SAE devem ser regulados de forma específica, por produto e/ou funcionalidade. O tratamento regulatório infralegal poderia referir-se ao tipo de serviço prestado, principalmente, ao analisar a classificação dos pontos de conexão definidos nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (ONS), onde existem apenas classificações de pontos de consumo e geração. Caberia avaliar a adoção de classificações de pontos de conexão SAE, Consumo-SAE e Geração-SAE.

As FRV estão cada vez mais competitivas, segundo a IRENA (16). De 2019 para 2020, a queda de preços foi em média 11,25%. O ONS prepara-se para um aumento expressivo na participação das FRV até 2025, com eólica e solar representando cerca de 15% da matriz de geração, sendo que atualmente o Brasil possui 18 GW de capacidade instalada, representando 10,3% da matriz (17). A energia fotovoltaica hoje representa com 8 GW, dos quais 3 GW são de geração centralizada (18). Associadas a SAE, estas usinas auxiliariam na redução do deslocamento hidrelétrico e parte do vertimento em reservatórios.

Outro ponto é a exploração do potencial de produção do gás hidrogênio (H₂) e suas diversas possibilidades de comercialização, a fim de desenvolver os mercados interno e de exportação. Oportunidade vantajosa ao Brasil, sob

aspectos conjunturais globais recentes, como o lançamento de planos de recuperação econômica, impactos da pandemia e o investimento em tecnologias ambientalmente mais adequadas, na esteira das discussões e implementações referentes à Modernização do Setor Elétrico (19).

2.1 Formas de armazenamento e tecnologias associadas

O armazenamento de energia utiliza tecnologias que guardam energia na forma química, elétrica, mecânica e outras, sendo possível adequá-las às oportunidades de serviço (20), tal como controle de variação de tensão e sobrecargas em linhas de transmissão, estabilizar o suprimento da demanda de um sistema de elétrico e armazenar os excessos de geração das FRV, dinamizando o aproveitamento da produção dessas plantas. São exemplos de tecnologias: baterias de fluxo ou de estado sólido, volantes inerciais (*flywheels*), reservatórios de água, ar comprimido e temperatura. É importante notar que nem todas as tecnologias de armazenamento prestam os mesmos serviços com a mesma qualidade, devendo-se avaliar a gama de serviços e tecnologias disponíveis (20). A Figura 2 apresenta um resumo dos principais serviços que podem ser prestados pelas principais tecnologias de armazenamento disponíveis, segundo seu atual estágio de desenvolvimento.

Tecnologias x Serviços		Balanco de Geração (spot e futuro)	Congestionamento de rede	Variações expressivas na carga líquida (rampa)	Reserva Girante	Controle Primário	Controle Secundário	Controle Terciário	Reserva de longo prazo	Suporte de reativos
Energia Mecânica	Usinas reversíveis									
	Ar comprimido									
Energia Eletroquímica	Baterias de Chumbo-ácido									
	Baterias de Níquel									
	Baterias de Lítio									
	Baterias de Sódio									
	Baterias de de Fluxo									
Resposta da Demanda	Resposta da Demanda									
Energia Química	Eletrolise P2G (carregamento)									
	Eletrolise P2G (descarga)									
	Combustíveis elétricos P2G-P2L									
Energia Elétrica	Capacitor de dupla camada									
	Armazenamento em bobinas									

■ Atende muito bem
 ■ Atende bem
 ■ Em aprimoramento
 ■ Não atende / não é possível

Figura 2 - Adequação dos sistemas de armazenamento às funções de sistema - adaptada de (20).

Na matriz energética mundial as usinas reversíveis (UHR) representam mais de 10% da capacidade hidrelétrica total em todo o mundo e 94% da capacidade global instalada de armazenamento de energia (21). A condição de armazenar energia em larga escala possibilita o uso desse tipo de usina na manutenção do equilíbrio da rede, já que consegue absorver ativamente a energia excedente, tornando o critério de despacho mais flexível dinâmica e economicamente, o que é relevante para o SEB. Conceitualmente, esta é uma das funcionalidades dos SAE.

3.0 A FLEXIBILIDADE NOS SISTEMAS ELÉTRICOS

A flexibilidade de um sistema elétrico, detalhada em (22), pode ser definida como sua capacidade de responder a mudanças na carga líquida instantânea desse sistema (parcela da carga não alimentada por FRV), com o uso dos recursos e mecanismos operativos disponíveis ao operador do sistema. Notadamente, isto é suprido por fontes controláveis como hidrelétricas e termelétricas. Rápidas variações na carga líquida tem sido um fenômeno de grande preocupação, no sentido haver adequada flexibilidade para responder às variações de carga e geração de forma suficientemente rápida para manter a frequência do sistema dentro de limites seguros. Algumas características dos sistemas atuais tornam a flexibilidade mais necessária: (i) o percentual de FRV instalado; (ii) a correlação entre a produção das FRV e a carga do sistema; e (iii) a taxa de indisponibilidade da geração convencional.

A geração convencional constitui o principal fornecedor de flexibilidade para um sistema, mas pode ser complementada por outros meios. Para permitir o avanço do nível de penetração das FRV, mais de uma medida pode ser utilizada. Assim, é benéfico buscar a coordenação otimizada da operação de eólicas, hidrelétricas, termelétricas, sistemas de armazenamento e resposta da demanda para aumentar a flexibilidade. A implementação de mecanismos de resposta da demanda associada a sistemas de armazenamento nas unidades consumidoras de grande porte pode tornar o mecanismo mais atraente aos consumidores, consolidando-o como ferramenta para o operador do sistema no gerenciamento do balanço entre carga e geração. Consumidores de menor porte também poderão se interessar, seja via implantação de tarifa binômica ou agregadores de resposta da demanda.

3.1 A flexibilidade no Sistema Elétrico Brasileiro

O SEB possui uma matriz elétrica predominantemente limpa e renovável, com cerca de 20% de termelétricas que operam com combustíveis fósseis. Assim, a transição energética no Brasil não tem como motivação principal a redução no uso de combustíveis fósseis, mas dar tratamento a dois fatores: (i) sucessivos períodos de escassez hídricas; e (ii) restrições ambientais na expansão do parque gerador para novas usinas hidrelétricas, em potência instalada e volumes dos reservatórios (7, 8).

Uma maior participação das usinas termelétricas se deu quando o SEB percebeu a necessidade de diversificar sua matriz de geração durante a crise hídrica de 2001 e foram construídas cerca de 20 usinas por meio do Programa Prioritário de Termelétricas (PPT) (23), reduzindo os efeitos do risco hidrológico na confiabilidade na produção de eletricidade. Naquele momento não houve perda sensível de controle operacional da geração pelo ONS, já que termelétricas possuem atributos operacionais de controle, flexibilidade e previsibilidade equivalentes aos das hidrelétricas, devidos principalmente à capacidade de armazenamento de água e combustível.

A partir de 2014, o SIN começa a perceber com mais intensidade o aumento do nível de penetração das FRV, que ao mesmo tempo em que agregam parcela energética indispensável ao SIN, ocasiona perda de flexibilidade e previsibilidade devido à intermitência e imprevisibilidade. Essa nova composição da matriz de geração define um dos principais desafios da transição energética no setor elétrico: adaptar-se às novas condições de variabilidade e incerteza nas previsões de geração, enquanto a rede elétrica e o consumo crescem em complexidade (14). Hoje, a integração de novas tecnologias e aprimoramentos no mercado de energia brasileiro podem renovar o conceito e as aplicações do armazenamento de energia na expansão e operação dos sistemas elétricos. O SEB se encontra em meio às ações de Modernização do Setor Elétrico Brasileiro, definidas a partir de um diagnóstico setorial composto por relatórios elaborados sob coordenação do MME, que tratam de temas como separação de lastro e energia, inserção de novas tecnologias, sistemática de leilões e outros (19).

3.2 Produtos e serviços de flexibilidade no SIN

Os produtos que agregam flexibilidade ao sistema precisam estar disponíveis como ferramentas para o planejamento da expansão e como opções na operação em tempo real. Há alguns produtos regulados atualmente para atendimento ao SIN. Vale lembrar que é recomendado possuir um “leque de opções”, de forma a permitir uma coordenação e otimização dos meios disponíveis, sendo que as unidades geradoras das usinas despacháveis são a principal fonte de flexibilidade aos sistemas elétricos, destacando-se a resposta rápida das hidrelétricas e térmicas a gás.

Algumas medidas emergenciais também têm sido utilizadas: disponibilizadas por meio de portarias normativas do Ministério de Minas e Energia (MME) n.º 504/2018, n.º 128/2020 e n.º 5/2021, com vigência de um ano cada, estas medidas visam contratação complementar de termelétricas durante períodos úmidos com recomposição insuficiente dos níveis dos reservatórios. A julgar pelo caráter temporário, mas também pela recorrência, tais medidas poderiam ser objeto de estudos aprofundados e regulação emitida pela ANEEL, visando uma inserção harmônica aos demais mecanismos de expansão, operação e comercialização vigentes, contribuindo para a previsibilidade e estabilidade regulatórias. No entanto, é possível os leilões de capacidade, fruto de discussões no âmbito da Modernização do Setor Elétrico, a Lei n.º 14.120/2021 estabeleceu no SIN os leilões de reserva de capacidade, com a realização do 1.º certame em dezembro de 2021, visando o suprimento de carga de ponta, em conformidade com a necessidade sinalizada nos últimos Planos Decenais (7). Este leilão de capacidade poderá agregar mais ou menos flexibilidade ao SIN, dependendo de como sejam estabelecidas as condições de despacho e, sobretudo, das tecnologias que se sagrarem vencedoras no que diz respeito a tempos de rampa e tempo mínimo exigido entre despachos.

No planejamento de longo prazo, estudos da EPE sobre usinas reversíveis (24) e sistemas de armazenamento (25) subsidiaram a ANEEL na abertura da Tomada de Subsídios nº 11/2020, com objetivo de coletar percepções dos agentes do setor quanto às adequações regulatórias necessárias à inserção de sistemas de armazenamento e usinas reversíveis no SIN. Além disso, o PNE 2050 (7) confirmou que as baterias e usinas reversíveis são consideradas como parte da solução no planejamento, e o PDE 2030 (8) sinaliza que ambas carecem de instrumentos legais e normativos para contratação, modelos de negócios e a remuneração.

4.0 OFERTA DE FLEXIBILIDADE E PERSPECTIVAS PARA OS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO NO SIN

A fim de estabelecer um panorama da oferta de flexibilidade no SIN, é apresentada a Tabela 1, que busca evidenciar possíveis nichos de mercado para a flexibilidade provida pelos SAE. Primeiro é apresentada uma descrição dos campos da tabela:

- Classificação: processo ao qual está relacionado o serviço.
- Ação: refere-se à forma em que o serviço de flexibilidade é entregue, podendo ser Direta, Indireta ou Mista.

- Implementação: refere-se à situação de implantação dos serviços dentro dos procedimentos do SIN, podendo ser Regulado, Emergencial, Piloto e Futuro (a ser regulamentado).
- Ato: refere-se ao ato legal, normativo ou instrução técnica para a realização e contratação do serviço.

Sobre o campo Ação, cabem dois pontos de esclarecimento: 1) uma ação é indireta quando a realização desse serviço não provê flexibilidade propriamente, mas potencializa as condições para que outro serviço assim o faça; 2) uma ação é mista quando o mecanismo depende de fatores secundários para indicar o nível de flexibilidade agregado, por exemplo, resultado do mix de fontes em um leilão.

Tabela 1 – Mapeamento da oferta de flexibilidade no SIN

Serviço	Tipo	Ação	Implementação	Ato
Despacho Técnico para Manutenção de Reserva de Potência Operativa	Serviço Ancilar	Indireta	Regulado	REN 822/2019
Controle Automático de Geração	Serviço Ancilar	Direta	Regulado	REN 697/2015
Reserva de Capacidade	Planejamento (longo prazo)	Mista	Em regulação	Lei 14.120/2021
Piloto ANEEL Resposta da Demanda	Resposta da Demanda	Direta	Piloto	NT ANEEL 54/2019
Redução Voluntária de Demanda	Resposta da Demanda	Direta	Emergencial	PRT MME 5/2021
Despacho de Usinas Merchant	Oferta adicional (curto prazo)	Mista	Emergencial	PRT MME 22/2021
Baterias	Serviço Ancilar	Direta	Futuro	TS ANEEL 06/2020
Usinas Reversíveis	Serviço Ancilar	Direta	Futuro	TS ANEEL 06/2021
Usinas Híbridas	Oferta adicional (curto prazo) e Serviço Ancilar	Mista	Futuro	CP ANEEL 61/2020

Legenda: REN - Resolução Normativa ANEEL; PRT - Portaria; CP - Consulta Pública; TS - Tomada de Subsídios.

Portanto, a Tabela 1 fornece uma visão geral de como a flexibilidade está inserida no SIN, abrangendo atividades de planejamento, operação, regulação e projetos piloto, que podem estar associados a projetos de P&D. A partir deste panorama, esta seção apresenta reflexões sobre desafios do planejamento, operação e aprimoramentos regulatórios sob a perspectiva da implementação de sistemas de armazenamento no SIN. É importante destacar e esclarecer que os serviços de flexibilidade ora analisados, apresentados na Tabela 1, são complementares à flexibilidade inerente ao despacho de potência ativa de unidades geradoras. Isto é, são serviços oferecidos adicionalmente ao serviço de geração de energia.

4.1 Os principais recursos de flexibilidade no SIN

O principal recurso de flexibilidade de um sistema elétrico são suas unidades geradoras, com suas características de velocidade de resposta, de acordo com a tecnologia de cada máquina. Em meio à transição energética, estes recursos tendem a proporções cada vez menores, haja vista que os atributos de flexibilidade, previsibilidade e despachabilidade, disponíveis em abundância em uma matriz hidrotérmica, não podem ser agregados com a mesma facilidade em um processo de expansão do parque gerador baseado em FRV. Dentre os serviços de flexibilidade que o SIN hoje dispõe para a operação do sistema, os serviços ancilares tem um papel de destaque. Vale ressaltar que, dos nove serviços apresentados na Tabela 1, apenas dois representam atividade com ato regulatório já estabelecido: (i) despacho de usina térmica para manutenção da reserva operativa das usinas hidrelétricas; e (ii) o controle automático de geração (CAG) das usinas hidrelétricas, limitado às hidrelétricas. Ambos são tratados como serviços ancilares no SIN.

O despacho de usina térmica para manutenção da reserva operativa das usinas hidrelétricas foi classificado como um meio indireto de garantir a flexibilidade do sistema, dado que nestes casos o despacho não representa a expressão da flexibilidade do sistema em si decorrente das variações na carga líquida do sistema. Na verdade, este despacho assegura que um percentual adequado de reserva de potência das hidrelétricas esteja disponível em um momento futuro, para contrapor variações de carga líquida devido a reduções repentinas na parcela de geração de FRV. Ou seja, está sendo preservada uma reserva operativa para que uma hidrelétrica exerça a flexibilidade.

Na classificação “em regulação” estão os Leilões de Reserva de Capacidade, com sua primeira edição prevista para dezembro de 2021 e entrega de produtos a partir de 2026. Trata-se, portanto, de ferramenta para o planejamento da expansão. Sua ação foi classificada como “mista” devido ao provável direcionamento dos produtos para atendimento à carga de ponta, mas que, a depender da tecnologia de geração, poderá agregar mais ou menos flexibilidade, devido às características de *unit commitment* da usina.

Sobre os mecanismos estabelecidos em caráter emergencial: a contratação temporária das usinas *merchant* para atendimento à carga do SIN desde 2018 (Portarias Normativas MME n.º 504/2018, 128/2020 e 5/2021), dentro ou

fora da ordem de mérito de custo, está relacionada à preservação da água dos reservatórios das usinas hidrelétricas em períodos de maior escassez e demonstra a perda da flexibilidade do sistema em situações mais críticas. Chama a atenção neste caso, independentemente do seu caráter emergencial, que um tratamento temporário que vem sendo usado de forma praticamente rotineira, devendo ser avaliado o estabelecimento de uma solução definitiva, a ser avaliada e aprimorada periodicamente segundo os procedimentos da ANEEL. Por outro lado, o programa de Redução Voluntária da Demanda (RVD) evidencia benefícios e aprendizados obtidos no projeto piloto de resposta da demanda e a importância de projetos piloto na implementação de políticas, produtos e regulamentações.

E por fim, há perspectivas de implementação de sistemas de armazenamento no SIN, com base no conceito de neutralidade tecnológica e ampla concorrência entre fontes e tecnologias nos diversos serviços. A EPE sinaliza que as usinas reversíveis sejam regulamentadas no SIN a partir de 2026 (7). Deve-se salientar que se trata de uma tecnologia madura e beneficiada por aprimoramentos tecnológicos recentes. Já para os sistemas de armazenamento por baterias, a EPE prevê que ganhem competitividade frente às tecnologias de geração mais para o longo prazo, esperando que uma maior representatividade seja percebida inicialmente no segmento de baixa tensão.

4.2 A manutenção da flexibilidade no SIN em níveis adequados

As características dos geradores hidráulicos, ainda predominantes no SIN, garantem ao operador flexibilidade, inércia e resposta rápida às variações. Mudanças qualitativas nessas características começaram a ocorrer a partir da crise hídrica de 2001, quando foi implementado o PPT. Mais tarde, cerca de dez anos depois, o aumento da competitividade das fontes eólica e solar transformaram-nas, com destaque para a eólica, nas protagonistas na expansão do parque gerador do SIN. Com a alteração na composição das tecnologias de geração, é natural que haja alteração na composição dos atributos disponíveis ao operador.

Conforme as avaliações que têm sido feitas pelo planejamento do SIN, o nível de penetração de fontes intermitentes avança e a flexibilidade requerida para a operação segura e confiável do sistema se dará por meio da oferta de novos produtos e tecnologias. Nesse sentido, medidas como o incentivo ao modelo de geração híbrida, busca atenuar a intermitência das plantas de geração baseadas em FRV, mas até o momento sem regulamentar parâmetros de armazenamento, não aproveitando esse potencial de benefícios em flexibilidade do despacho. Vale ressaltar a pertinência do tema flexibilidade no SIN com a prestação de serviços ancilares, cujo aprimoramento e desenvolvimento desses serviços está no escopo da Modernização do Setor Elétrico, onde os serviços ancilares aparecem como possível componente na modelagem de separação de lastro e energia.

Portanto, estamos deixando um processo de expansão que tradicionalmente vinha entregando todos os atributos necessários à operação, dadas as características inerentes às fontes hidrelétrica e termelétrica. Hoje o SIN dispõe principalmente de atributos que foram agregados à operação em uma época que eram mais abundantes. Assim, o processo de planejamento precisa de novos parâmetros e ferramentas para lidar com a complexidade e a incerteza adicionais, de forma a dispor de meios que agreguem flexibilidade ao sistema, em complemento aos mecanismos de contratação de energia hoje existentes.

4.3 Atendimento às necessidades do operador do sistema

O despacho energético do Brasil é centralizado e visa otimizar seus recursos energéticos nos curto e médio prazos. Inclui aspectos estocásticos, com custos e incertezas da geração disponível no futuro. Com o advento das FVR, aliado à diversidade dos novos agentes e serviços contratados, além da ampliação do mercado livre (ACL) frente ao tradicional mercado regulado (ACR), a dinâmica de despacho vem evoluindo, sendo necessários constantes ajustes para a manutenção da segurança e confiabilidade do SIN. Para garantir um ambiente de mercado competitivo e aberto às diversas fontes primárias de geração, o SIN precisa de reservas suficientes para estabilizar a operação e estimular a ampliação das opções de investimentos que viabilizem a comercialização dessa eletricidade. Diferentemente das usinas hidrelétricas e térmicas de partida rápida, as FRV não fornecem energia firme. Porém, se associadas a sistemas de armazenamento podem contribuir em capacidade e para o descongestionamento da transmissão. A reserva de capacidade de potência é o lastro físico do sistema que aumenta o grau de confiabilidade e afasta a ocorrência condições operativas críticas.

Portanto, capacidade também é serviço ancilar, não devendo ser tratada como cita o PDE 2029. Porém, no modelo proposto pelo MME em sua Consulta Pública n.º 115/2021, há aspectos de descentralização do despacho sem plena clareza nos aspectos conceituais, pois não considera sinais locais nem o planejamento da transmissão, exclui as usinas hidrelétricas e estabelece um limite máximo de 30% de inflexibilidade para as usinas térmicas. É necessário considerar os pontos do sistema carentes de capacidade, bem como o momento adequado para o início do suprimento deste lastro de potência. Os serviços ancilares tem constado na Agenda Regulatória da ANEEL como tema prioritário nos últimos anos. A Resolução Normativa ANEEL n.º 822/2019, que modificou a Resolução Normativa ANEEL n.º 697/2015, estabeleceu o serviço de despacho termelétrico para manutenção de reserva operativa das usinas hidrelétricas, de forma a garantir a flexibilidade operativa, segurança e confiabilidade do sistema. Os ancilares também foram tema da Tomada de Subsídios ANEEL nº 06/2019, mostrando a disposição da ANEEL em atender a

demandas de agentes setoriais. É importante ressaltar que o ONS tem sinalizado a necessidade de novos compensadores síncronos no SIN para acompanhar a entrada de fontes intermitentes e novos elos de corrente contínua. Ainda que as unidades geradoras não injetem potência ativa enquanto operam como síncronos, a necessidade adicional deste recurso advém do crescimento do nível de penetração de FRV, que, em última forma, é uma das principais causas da necessidade de flexibilidade adicional à operação do sistema.

4.4 Integração dos sistemas de armazenamento ao setor elétrico

De uma forma geral, pode-se dizer que a grande maioria das tecnologias SAE não se encontra ainda em plenas condições técnicas e comerciais de competir com as fontes de geração hoje existentes. Mas algumas tecnologias despontam como promissoras de armazenamento de energia que poderão ser implementadas no setor elétrico, sendo que algumas são mais indicadas para determinadas aplicações, conforme apresentado na Figura 2. As baterias eletroquímicas, de uma forma geral, com especial menção às baterias de íon de lítio, que avançaram em densidade energética e competitividade na última década, encontram em condições técnicas de se integrar aos sistemas elétricos. Cabe fazer destaque às usinas reversíveis (UHR) (26). No caso brasileiro, projetos de P&D tem se dedicado a avaliar o potencial de implementação da solução no SIN (27), na esteira do desenvolvimento recente que tem ocorrido em nível mundial. Vale destacar que é o sistema de armazenamento apontado como o tecnologicamente mais maduro, confiável e competitivo. Apesar de ser conhecida, sua forma de operação deve ser inovada. A complementaridade da UHR com outras tecnologias de geração oferece muitas oportunidades para a integração com FRV e armazenamento de recursos hídricos. Com a concentração dos reservatórios nas bacias dos rios Paranaíba e Grande, com 45% da capacidade do SIN, o Brasil precisará focar em soluções para aumentar a capacidade de suprimento e armazenamento, além de suporte de serviços ancilares.

Como promessa de desenvolvimento, temos a produção de hidrogênio verde. A predominância de renováveis em suma matriz energética coloca o Brasil como naturalmente apto para a produção do H₂ verde, sendo também uma possível solução para redução vertimentos turbináveis de usinas hidrelétricas, contribuindo para um menor custo futuro da energia elétrica. A regulamentação ainda é incipiente e não há diretrizes governamentais fortes para substituir combustíveis fósseis. Além disso, pouca efetividade na implementação dos *hubs* concentrados no Nordeste, notadamente no Ceará, instituídos por memorandos de entendimento para logística do H₂ verde até 2030. A inércia observada no Brasil na difusão da produção deste insumo é consequência da abundância renovável disponível para a geração de energia. Entretanto, deixa-se de buscar formas de independência energética do Brasil no sentido socioeconômico mais amplo e utilização deste novo insumo para o armazenamento de energia elétrica. Existem várias instituições e laboratórios de pesquisa, como o Parque Tecnológico de Itaipu (PTI) e Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que com resultados que podem aprimorar a regulamentação e viabilidade de modelos de negócios com o H₂ e facilitar a integração dos setores de gás e energia elétrica.

4.5 Sistemas de armazenamento e mercados de flexibilidade no SIN

Atualmente, o atributo de flexibilidade no SIN encontra-se presente nos serviços apresentados na Tabela 1. Iniciando pelos serviços ancilares, considerando a possibilidade de que sejam prestados por SAE, é preciso considerar também a premissa de isonomia entre as diferentes tecnologias que prestem um mesmo serviço, isto é, que atenda ao sistema da mesma forma. Assim, com base nos em critérios e especificações dos produtos, deve-se incentivar a livre concorrência de serviços prestados por diferentes tecnologias, colocados à disposição do sistema segundo a eficiência com que esses serviços são prestados, resultando assim no menor preço para o sistema e para o consumidor. Esse seria o caminho para que as tecnologias mais adequadas a cada finalidade ou função no sistema elétrico sejam utilizadas de forma otimizada. Porém, os serviços equivalentes que hoje já são prestados com baixa remuneração (controle secundário de frequência, compensação síncrona, *blackstart*, serviços especiais de proteção) ou que passaram a ser prestados sem ter remuneração (modulação de carga e rampa fornecidos por usinas hidrelétricas) devem ter o reconhecimento e a remuneração pelo serviço prestado.

A ANEEL propôs na Tomada de Subsídios ANEEL nº 11/2020 questões no sentido de incorporar os SAE à prestação de serviços ancilares. Dados os tipos de serviço de sistema apontados na Figura 2 e respectivas vias tecnológicas, o caminho demonstra-se viável, e pode ser realizado por meio do desenvolvimento de um mercado de serviços ancilares. No entanto, não é razoável esperar um salto a partir do que se dispõe hoje, mas tratar o desenvolvimento desse mercado com segurança, baseando-se no aprendizado de mercados mais maduros, como os *Balancing Services* do mercado inglês. Com relação ao H₂, é preciso criar oportunidades de inserção em nichos de consumo e utilidade, como o setor de transporte pesado, ônibus urbanos, indústria, além do armazenamento sazonal de energia elétrica, apoiado por leilões de usinas híbridas com opção de armazenamento.

5.0 CONCLUSÕES

O SIN possui mecanismos regulados para operar o despacho com flexibilidade. Contudo, o aumento da participação das FRV traz impactos, que devem ser contornados para que seja mantida a qualidade do suprimento da demanda. A conclusão principal é que os SAE podem ajudar a minimizar esses efeitos. A regulamentação setorial não impede

a instalação dos SAE, mas também não dá clareza ao investidor. A Tabela 1 demonstrou que boa parte dos produtos e serviços disponíveis no Brasil ainda ensejam aprimoramentos ou normativos que atraiam os investidores. Novos estudos e os projetos pilotos poderão ajudar no entendimento do papel do armazenamento no Brasil, identificando formas de viabilidade técnica e financeira. Por outro lado, não se deve esperar SAE competitivos para operação com alta energia e alta potência no curto prazo, especialmente os compostos por baterias. No entanto, as usinas reversíveis, pela maturidade e características do SIN são uma opção a entrar no rol de produtos de flexibilidade.

As tecnologias SAE ideais à flexibilidade do SIN têm ainda um certo percurso, mais de longo prazo, a fim de atingirem maturidade técnica e comercial. Por isso, de forma mais imediata, é importante focar nas soluções já existentes apresentadas, como os leilões de capacidade e o aprimoramento dos serviços ancilares, devidamente regulamentados. Apesar de não haver previsão para um mercado específico de flexibilidade no SIN, observa-se que este atributo será importante durante a transição energética e o surgimento de novas tecnologias podem fazer parte de um Mercado de Serviços Ancilares. Portanto, é importante que a oferta de flexibilidade esteja disponível, bem definida e regulada, em prol da economicidade, previsibilidade e estabilidade do SIN, viabilizando a atratividade dos serviços necessários a custos que garantam o melhor retorno financeiro e benefício a todos os agentes da cadeia da indústria da eletricidade no Brasil, principalmente, para os consumidores.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VAN SOEST, H.L.; DEN ELZEN, M.G.J.; VAN VUUREN, D.P. Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nature communications*, v. 12, n. 1, p. 1-9, 2021.
- (2) INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi, 2021.
- (3) INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Tracking Clean Energy: Energy Technology Perspectives*. June 2017.
- (4) DEGEFA, M.Z.; SPERSTAD, I.B.; SÆLE, H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources, *Electric Power Systems Research*, Volume 194, 2021.
- (5) SHARIFZADEH, M.; LUBIANO-WALOCHIK, H.; SHAH, N. Integrated renewable electricity generation considering uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 72, 2017.
- (6) DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. *Transforming the Nation's Electricity System: The Second Installment of the QER* January 2017.
- (7) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2030*. MME, 2020.
- (8) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Nacional de Energia - PNE 2050*. MME, 2020.
- (9) JOHNSON, S.C., PAPAGEORGIOU, D.J., HARPER, M.R. The economic and reliability impacts of grid-scale storage in a high penetration renewable energy system, *Advances in Applied Energy*, Volume 3, 2021.
- (10) ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES. *Energy Storage: Electricity storage Technologies - IVA's Electricity Crossroads Project*, 2016.
- (11) GIMENES, A.L.V.; UDAETA, M.E.M.; DI SANTO, S.G.; DI SANTO, K.G. *Armazenamento de energia Abordagens Sistemáticas Referentes Aos Sistemas Elétricos De Potência*. 1.ª ed., Paco Editorial, 2020.
- (12) EUROPEAN UNION. Directive 2019/944. Disponível: <https://www.legislation.gov.uk/eur/2019/943> Acesso: 16/09/2021.
- (13) POLLIT, M.; GIULIETTI, M.; ANAYA, K. Optimal Regulation for European DSOs to 2025 and beyond. Copyright 2021, Centre on Regulation in Europe (CERRE). Disponível em: <https://cerre.eu> Acesso em: 16/09/2021.
- (14) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Nota Técnica nº 094/2020-SRG/ANEEL: inserção de sistemas de armazenamento, incluindo usinas reversíveis, no Sistema Interligado Nacional – SIN*. Brasília, 2020.
- (15) ENERGY POLICY WA. Disponível: <https://www.wa.gov.au/organisation/energy-policy-wa/energy-transformation-strategy>. Acesso: 16/09/2021.
- (16) INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Renewable Power Generation Costs in 2020*, Abu Dhabi.
- (17) ASSOC. BRAS. ENERGIA EÓLICA. *Boletim Anual 2020*. Disponível: <http://abeeolica.org.br/> Acesso: 16/09/2021.
- (18) ASSOC. BRAS. DE ENERGIA SOLAR. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/> Acesso: 16/09/2021.
- (19) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Modernização do Setor Elétrico*. Disponível: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-executiva/modernizacao-do-setor-eletrico> Acesso: 16/09/2021.

- (20) STERNER, M.; STADLER, I. Handbook of Energy Storage: Demand, Technologies, Integration. Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- (21) INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. The world's water battery: Pumped hydropower storage and the clean energy transition. www.hydropower.org/publications/the-world's-water-battery-pumped-hydropower-storage-and-the-clean-energy-transition. 2018
- (22) MOREIRA, F.M.M. Caracterização da Variabilidade da Produção Renovável e da Flexibilidade da Produção Convencional. Dissertação de Mestrado – Universidade do Porto, Portugal, 2014.
- (23) KELMAN, J. Relatório da Comissão de Análise do Sistema Hidrotérmico de Energia Elétrica, MME, 2001.
- (24) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Estudo de Inventário de Usinas Hidrelétricas Reversíveis. Nota Técnica EPE-DEE-NT-06/2019-r0. Ministério de Minas e Energia, 2019.
- (25) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Sistemas de Armazenamento em Baterias Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento. Nota Técnica EPE-DEE-NT-098/2019-r0. Ministério de Minas e Energia, 2019.
- (26) INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. The world's water battery: Pumped hydropower storage and the clean energy transition. www.hydropower.org/publications/the-world's-water-battery-pumped-hydropower-storage-and-the-clean-energy-transition. 2018
- (27) HUNT, J. D.; FREITAS, M. A.V.; JUNIOR, A.O.P. Aumentando a Capacidade de Armazenamento Energético do Brasil. IX CBPE - Políticas Energéticas para a Sustentabilidade, Florianópolis, 2014.

DADOS BIOGRÁFICOS



LEONARDO PINHO MAGALHÃES

Graduou-se em engenharia elétrica pela UFRJ em 2001. Especialista em Uso Racional de Energia pela UNIFEI (2010), obteve o título de mestre em ciências em Engenharia de Energia também pela UNIFEI em 2014. Atualmente é doutorando em engenharia elétrica pelo PEE-COPPE/UFRJ e atua na Assessoria de Regulação de Geração da Eletrobras.

(2) CAMILA CAPOBIANGO MARTINS

Graduada em engenharia elétrica pela UFJF desde 2001. Mestre em Ciências pelo PEE-COPPE/UFRJ pelo Programa desde 2004. É especialista, desde 2009, em Negócios Financeiros pelo IBMEC-RJ. Doutoranda em engenharia elétrica pelo PEE-COPPE/UFRJ e analista técnica da Assessoria de Regulação de Geração da Eletrobras.

(3) GEORGE CAMARGO DOS SANTOS

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRJ (2002). Obteve o título de especialista em Uso Racional de Energia pela UNIFEI (2010). É mestre em Engenharia Elétrica pelo PEE-COPPE/UFRJ (2006) e mestre em Engenharia de Energia pela UNIFEI (2016). Atualmente, é doutorando em Engenharia Elétrica pelo PEE-COPPE/UFRJ. É engenheiro eletricitista do Programa Nacional de Conservação de Energia e Eficiência Energética da Eletrobras.