



## **GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS EMPRESARIAIS E DE GESTÃO CORPORATIVA E DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO E DE REGULAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO - GEC**

### **DESAFIOS REGULATÓRIOS PARA INSERÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS NO BRASIL**

**GUILHERME VIEIRA COSENTINO (1); RODRIGO FLORA CALILI (2); RAFAEL KELMAN (3); LUIZ RODOLPHO SAURET CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE (4); TARCISIO LUIZ COELHO DE CASTRO (5).**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO (PUC-RIO) (1); PSR SOLUCOES E CONSULTORIA EM ENERGIA LTDA (2).**

#### **RESUMO**

##### **DESAFIOS REGULATÓRIOS PARA INSERÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS NO BRASIL**

A energia hidráulica representou em 2019, cerca de 64,1% da capacidade instalada de energia elétrica no Brasil (EPE, 2020), tal percentual se torna motivador para a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. O objetivo deste trabalho é apresentar propostas de alternativas regulatórias que viabilizem a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, a partir de um estudo da estrutura do mercado de energia no Brasil e no mundo. Para tal estudo, foi realizada uma revisão da literatura internacional e nacional, além de uma análise documental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Armazenamento de energia, usinas reversíveis; mercado de capacidade; serviços ancilares; modelos regulatórios.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O conceito de armazenamento de energia elétrica compreende tecnologias diversas cujo objetivo é inicialmente armazenar energia e posteriormente liberá-la na forma de eletricidade. A maior parte da capacidade de armazenamento de energia no mundo é composta por usinas hidrelétricas reversíveis, as quais, devido às suas economias de escala (adequado tempo de resposta; rápido tempo de transição entre os modos bombeamento/geração) e capacidade de geração em grande escala, tradicionalmente fornecem uma série de serviços de balanceamento de sistema (Gissey et al., 2018). As tecnologias de armazenamento de energia elétrica possuem a capacidade de armazenar esse excesso de energia e utilizá-lo para atender estes picos, proporcionando estabilidade e aumentando a robustez dos sistemas elétricos de baixo carbono (Strbac et al., 2012).

Em vários países, seus respectivos governos estão considerando opções para aumentar a implementação de armazenamento de energia por meio de mudanças regulatórias. As principais barreiras ao investimento em novas tecnologias de armazenamento de energia, segundo Gissey et al. (2018), são: ausência de qualquer forma de incentivo direto para sistemas de armazenamento; impossibilidade de remuneração adequada pelos serviços ancilares; exigência de um processo de licenciamento ambiental complexo; diferenças regulatórias entre os mercados de energia; ausência de uma política efetiva de análise custo-benefício.

Para superar algumas das barreiras ao investimento em armazenamento de energia, em especial, usinas hidrelétricas reversíveis, têm-se por objetivo apresentar propostas de algumas alternativas regulatórias baseadas no estudo da estrutura de mercado de energia no Brasil e no mundo. Para subsidiar a elaboração de tais propostas, foram estudados artigos de revisão da literatura relativos ao cenário internacional e no caso do Brasil, foram analisados documentos publicados por agentes do setor elétrico. Tais documentos são baseados em propostas de modernização do setor elétrico brasileiro, relacionadas aos seguintes temas: mercado de capacidade; leilão multiatributo; separação entre lastro e energia; análise de impacto regulatório; análise custo-benefício.

Na seção 2 será realizada a apresentação do referencial teórico que fundamentou a criação das propostas regulatórias para inserção de usinas reversíveis no Brasil. A seção 3 trata da descrição e da apresentação da metodologia utilizada no presente trabalho. Na seção 4 serão apresentadas estas propostas regulatórias. As conclusões do trabalho estão na seção 5.

## 2.0 - REFERENCIAL TEÓRICO PARA PROPOSTA DE INSTRUMENTOS REGULATÓRIOS PARA INSERÇÃO DAS USINAS REVERSÍVEIS NO BRASIL

Nesta seção, será feita, de forma sucinta, uma análise do estado da arte de alguns temas que tenham alguma relevância para viabilizar as usinas hidrelétricas reversíveis no mercado de energia no país. Estes grandes temas são: mercado de capacidade; serviços ancilares; leilão multiatributos; e análise de impacto regulatório.

### 2.1 - Participantes, classificação dos mecanismos de remuneração de capacidade, remuneração e implementação do mercado de capacidade

Segundo Cramton et al. (2013), o objetivo fundamental de um mercado de capacidade é fornecer a quantidade de capacidade que minimize a duração dos apagões. O mercado de capacidade, segundo Hall e Stringfellow (2018) pode fornecer um pagamento anual regular para formas confiáveis de geração fornecidas durante eventos de estresse do sistema e a indisponibilidade deste volume de capacidade pode provocar penalidades, em um cenário com tais eventos. Os pagamentos de capacidade em muitos mercados são determinados geralmente por meio de leilões competitivos para períodos de 1 a 4 anos (Martin e Miles, 2021). O CEP (*Clean Energy for all Europeans Package*) define os mecanismos de remuneração da capacidade como uma medida temporária para segurança do fornecimento (European Commission, 2019), salvo a reserva de capacidade para serviços ancilares. De acordo com Pugl-Pichler et al. (2020), embora não exista uma categorização padrão geralmente aceita, a Comissão Europeia forneceu uma classificação sobre mecanismos de capacidade. Há a diferenciação entre os mecanismos direcionados e os aqueles de mercado. Neste bloco de países, a remuneração ocorrida para a reserva estratégica é baseada no preço de desequilíbrio (European Commission, 2017). As instalações participantes podem continuar participando dos mercados de energia comum (European Commission, 2019). A ativação das usinas ocorre por meio de compensação no mercado atacadista de energia, mercado *spot*, ou por ativação durante o balanceamento.

As discussões sobre remuneração por capacidade podem ser mais complexas se outros produtos, como serviços ancilares, forem levados em conta, como acontece no Reino Unido (Martins e Miles, 2021). Em um estudo realizado por Martins e Miles (2021), os serviços ancilares de Reserva Rápida de Potência e Resposta de Frequência Firme Dinâmica apresentaram tendência a competitividade nos próximos anos, devido aos seus baixos requisitos de capacidade.

Há uma certa controvérsia sobre mercado de capacidade entre os especialistas de em mercado de energia no mundo, conforme pesquisa realizada por Bhagwat et al. (2017). O *Clean Energy for all Europeans Package* (CEP), por exemplo, considera que os mecanismos de remuneração de capacidade devem ser utilizados como 'último recurso' para garantir a segurança do fornecimento e excepcionalmente, para a adequação de recursos (European Commission, 2019). Além disso, a implementação de um mercado de capacidade deve ser acompanhada por um plano, tentando evitar distorções regulatórias nos mercados atacadistas de energia e de balanceamento (European Commission, 2019).

### 2.2 - Interrelações entre as configurações eletromecânicas de usinas reversíveis e os possíveis serviços entregues na rede elétrica

Com vistas a verificar de forma estratégica quais os serviços ancilares podem ser remunerados no Brasil (ANEEL, 2019), caso estes produtos fossem aventados como uma alternativa para remuneração de tecnologias de armazenamento (inclusive usinas hidrelétricas reversíveis) em um eventual mercado de capacidade no Brasil, no Quadro 1, foi proposta uma relação entre as possíveis configurações eletromecânicas de usinas reversíveis e os possíveis serviços ancilares considerando o cenários atual destes serviços no Brasil (ANEEL, 2019). As configurações eletromecânicas de usinas reversíveis podem ser classificadas em sistemas binários, ternários e quaternários com velocidade fixa ou variável, conforme proposto por Argonne National Laboratory, (2014). Foi desenvolvido, a partir do levantamento da experiência internacional, um quadro que relacionasse as configurações eletromecânicas de usinas reversíveis mais prováveis de serem usadas no mercado brasileiro com os possíveis serviços ancilares e/ou da rede elétrica. Este quadro é propositivo e a entrega ou não dos serviços ancilares que foram indicados pelos tags 'sim' e 'não' deve ser discutida em fóruns sobre usinas reversíveis com os agentes do setor elétrico brasileiro.

TABELA 1 - Relação entre as possíveis configurações eletromecânicas de usinas reversíveis e os possíveis serviços ancilares ou futuros serviços da rede elétrica brasileira.

Possíveis serviços na rede elétrica e suas causas e efeitos	Sistema binário com máquina síncrona de velocidade fixa	Sistema binário com máquina de velocidade ajustável e circuito DFIM	Sistema binário com máquina de velocidade ajustável e circuito CFSM ("back to back")	Sistema ternário convencional com velocidade fixa	Sistema ternário com <i>by-pass</i> e máquinas síncronas de velocidade fixa

Tipo de configuração usual para os dois modos de operação	Francis (mais usual)		Francis (mais usual)		Francis (mais usual)		Francis/ Pelton (mais usuais)		Francis/ Pelton (mais usuais)	
	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento	Modo geração	Modo bombeamento
Capacidade usual da unidade (MW)	25 - >400		31,5 - > 400		31,5 - >400		25 - >400		25 - >400	
<u>Serviços ancilares definidos conforme o submódulo 21.9 da ONS</u>										
Controle primário de frequência	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Controle secundário de frequência	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Suporte de reativos	Médio	Baixo	Médio-Alto	Médio	Médio-Alto	Médio-Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Despacho complementar para manutenção da reserva de potência operativa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Auto reestabelecimento parcial ( <i>black start</i> )	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não
Auto reestabelecimento integral ( <i>black start</i> )	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não
Sistemas especiais de proteção (SEP)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaboração própria, a partir de Argonne National Laboratory, ago. 2014, p.40-61; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - Nota técnica (NT) - 132/2019, p.1-20.

### 2.3 - Aspectos regulatórios do mercado de capacidade no Brasil: mercado cativo para os sistemas interligado e isolado e mercado livre com separação entre lastro e energia

Tendo em conta que as questões regulatórias relativas ao mercado de capacidade são importantes para impulsionar o desenvolvimento de um mercado de energia que remunere de forma adequada as tecnologias de armazenamento, foi feito o estudo regulatório de temas relevantes no país que possam contribuir de alguma maneira para a construção de uma política que considere a inserção destas tecnologias na matriz energética. Assim, este estudo foi realizado foram agrupadas considerando o mercado cativo, no caso os leilões regulados, e o mercado livre.

No caso do mercado cativo, este estudo teve dois focos: Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistema Isolado (SI). Já no mercado livre as discussões foram pautadas na separação entre lastro e energia. Como o objetivo da contratação da reserva de capacidade é proporcionar o atendimento à necessidade de potência requerida pelo Sistema Interligado Nacional, tal contratação pode ser feita por meio de leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), direta ou indiretamente (Governo Federal, Decreto nº 10.707, 2021).

No caso dos Sistemas Isolados, o principal requisito para suprimento energético consiste na condição deste possuir solução de suprimento de energia para todas as localidades, 24 horas por dia, sete dias por semana, condição denominada de disponibilidade 24/7 com reserva de combustível (EPE-DEE-NT-065/2020-r1).

A separação entre lastro e energia vem sendo discutida há anos no Brasil e está relacionada à contratação de parâmetros de confiabilidade do sistema, sendo esta, separada da gestão do risco comercial de cada agente (EPE, 2019), sendo direcionada principalmente ao mercado livre.

### 2.4 - Leilões multiatributos

No atual cenário em que fontes de geração de energia elétrica tem a possibilidade de entregar novos serviços, o leilão multiatributo se torna um importante mecanismo a ser considerado em mercados mais modernos. Este mecanismo pode viabilizar a competição em um mecanismo único de leilão, diversas fontes de geração, renováveis ou, além de possibilitar que recursos de armazenamento de energia sejam ofertados neste mesmo mercado. Além disso, sistemas híbridos energia, inclusive com armazenamento, podem se tornar atrativos em um leilão deste tipo. Cada fonte participante pode contribuir na entrega de um importante atributo para o sistema elétrico e sociedade, com o objetivo de garantir segurança e confiabilidade no planejamento e na operação deste sistema (Leite e Calili, 2021). A partir de estudos desenvolvidos por Celestino (2017) PSR e LACTEC (2014), Leite e Calili (2021), foram definidos os atributos mais propícios a participarem de leilões de energia no Brasil. Tais atributos são: Atendimento à ponta do sistema elétrico; Despachabilidade; Custos de transmissão; Localização; Tempo de implementação; Impacto Ambiental e Impacto Social.

Na seção seguinte, será descrito o referencial teórico sobre análise de impacto regulatório

## 2.5 - Conceito de análise de impacto regulatório

Segundo um documento da Casa Civil de 2018 que será usado como base para elaboração desta seção, a Análise de Impacto Regulatório (AIR) consiste em um processo sistemático de análise determinado a partir de evidências, as quais, buscam avaliar, a partir da definição de um problema regulatório, os possíveis impactos das alternativas de ação disponíveis para o alcance dos objetivos pretendidos. O objetivo do mecanismo definido como AIR é orientar e subsidiar a tomada de decisão e, em última análise, contribuir para eficiência e eficácia das ações regulatórias (Ministério da Casa Civil, 2018). O ciclo regulatório envolvido em uma AIR, bem como suas etapas, podem ser em consultados em Ministério da Casa Civil (2018). Tal documento também define as metodologias utilizadas em uma análise de impacto regulatório, as quais são: (i) Análise multicritério; (ii) Análise de custo; (iii) Análise de custo-efetividade ou custo-benefício; (iv) Análise de risco; e (v) Análise de risco-risco.

Para mais detalhes de cada uma das metodologias descrita anteriormente, consultar Ministério da Casa Civil (2018). Neste artigo, será dado um foco na metodologia da relação custo-benefício (RCB), que consiste em um método quantitativo e sistemático de avaliação de projetos, programas e políticas governamentais sob a perspectiva do bem-estar social. A aplicação desta metodologia permite que a apreciação de um projeto seja feita, sob a visão sistemática, contemplando todos os principais impactos diretos e indiretos ao longo do seu ciclo de vida (Ministério da Economia, 2021).

## 3.0 - METODOLOGIA

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os desafios regulatórios para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Para a superação de tais desafios serão apresentadas na seção 4, propostas regulatórias. A concepção de tais propostas foi baseada na revisão da literatura e na análise documental relacionadas aos seguintes temas: mercado de capacidade; leilões multiatributos análise de impacto regulatório e análise de custo-benefício. A metodologia foi elaborada a partir da análise do estudo publicado por Sousa et al. (2021). Todas as etapas da metodologia aplicada na concepção deste artigo estão descritas na figura a seguir.

Estágio de Planejamento da Pesquisa
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estudo de artigos da literatura internacional e nacional referente aos seguintes temas: “mercado de capacidade”; “leilões multiatributos”; “análise de impacto regulatório” e “análise de custo-benefício”.</li> <li>✓ Estudo documental sobre mercado de capacidade; leilões multiatributos; análise de impacto regulatório e análise de custo-benefício.</li> <li>✓ Seleção dos artigos e/ou documentos mais relevantes a fim de elaborar propostas regulatórias voltadas à superação de desafios regulatórios relacionados com a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.</li> </ul>
Estágio de Condução da Pesquisa
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pesquisa de artigos realizada na base de dados (SCOPUS), com as seguintes combinações de palavras-chave: “capacity market AND “storage”; “capacity market and “auction”; “multiattribute energy”.</li> <li>✓ Restrição dos resultados para revisão da literatura sobre os temas pesquisados;</li> <li>✓ Pesquisa documental realizada nos sites dos seguintes agentes do setor elétrico: ONS, EPE e Ministério de Minas e Energia. “Fazer pesquisas dos mesmos termos” mencionados no primeiro tópico deste estágio.</li> <li>✓ Pesquisa documental realizada nos sites do Ministério da Casa Civil e do Ministério da Economia sobre análise de impacto regulatório e análise de custo-benefício.</li> </ul>
Estágio de Divulgação da Pesquisa
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Apresentação e discussão dos achados sobre artigos de revisão da literatura e documentos.</li> <li>✓ Elaboração de propostas regulatórias para inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.</li> <li>✓ Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.</li> </ul>

FIGURA 1 - Metodologia utilizada no presente trabalho.  
Fonte: Adaptado de Souza et al. (2021, p.4).

## 4.0 - PROPOSTAS DE POLÍTICAS REGULATÓRIAS

Neste capítulo, serão apresentadas três propostas com o propósito de tentar viabilizar tecnologias de armazenamento, em especial hidrelétricas reversíveis dado seu potencial e necessidade de grandes volumes de investimentos. Duas destas propostas serão feitas para serem realizadas nos leilões do mercado regulado de energia e uma delas, para o mercado livre. Há a possibilidade de que futuramente, com a abertura do mercado de eletricidade (mercado varejista), estas propostas se unam em um mecanismo único, o que tornaria este mercado de energia muito mais simples e dinâmico, com maior competitividade, possibilitando a entrega de volumes de energia a preços mais módicos.

A ideia das propostas consideradas nesta seção é trazer novos insights para os órgãos competentes. Não serão debatidos, os ciclos regulatórios envolvidos em uma Análise de Impacto Relatório (AIR), embora esta tenha importância já que pode trazer maior segurança jurídica e financeira aos possíveis investidores em projetos de armazenamento de energia.

Na sequência serão apresentadas três alternativas propostas para viabilizar as fontes de armazenamento de energia, em especial, as hidrelétricas reversíveis, no mercado cativo: a Proposta 1 será sobre um Leilão de Capacidade e a Proposta 2 será relativa a um Leilão Multiatributo. Por fim, para o mercado livre, haverá a apresentação da Proposta 3 de um Mercado de Capacidade.

#### **4.1 - Mercado cativo**

Levando em conta que o mercado brasileiro abriu, desde a Consulta Pública 033/2017, as discussões sobre sua modernização, é imprescindível que as tecnologias de armazenamento ganhem destaque para assegurar maior segurança e confiabilidade ao sistema, bem como a fim de garantir a disponibilidade de energia elétrica a preços módicos. Para garantir a segurança do suprimento e atendimento a ponta do sistema, no mercado cativo, através de leilões regulados, talvez seja mais interessante um mercado baseado em quantidade inicialmente, com preços mais elevados de reserva de potência e quando o mercado estiver mais maduro, este poderia ser baseado no preço.

Outra opção seria estabelecer um mercado de capacidade com comprador centralizado, se situando em uma abordagem ampla e baseada no volume. Todos os participantes do mercado poderiam ser autorizados a participar do certame, com sua capacidade garantida. O volume necessário seria determinado antecipadamente pelo Operador Nacional do Sistema e o preço seria determinado pelo mercado (preço de compensação nos leilões de capacidade). Para fins de cálculo da remuneração, caso a reserva estratégica fosse acionada, esta poderia se basear no preço de desequilíbrio proposto pela European Commission (2017).

Nas subseções a seguir, serão apresentadas, a propostas 1 e 2, relativas ao Leilão de Capacidade e ao Leilão Multiatributo.

##### **4.1.1 - Proposta 1 - leilão de capacidade**

O objetivo fundamental de um mercado de capacidade é fornecer o montante de capacidade que otimize (minimize) a duração dos apagões. Este problema é chamado de problema de adequação, o qual, os mercados de capacidade tentam resolver (Cramton et al., 2013). O cerne deste problema é estabelecer o trade-off entre mais capacidade e mais apagões. Quanto à definição de tal montante demandado, assim, como no leilão de capacidade definido pela Portaria nº 518, 2021, este deve ser determinado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), respeitando os critérios gerais de garantia de suprimento estabelecidos pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

Diferentemente do leilão definido pela Portaria nº 518 (2021) que permite uma receita fixa (RF) para sistemas termelétricos com inflexibilidade operativa de geração anual na faixa entre 10% e 30%, em um leilão com a participação de sistemas de armazenamento, esta inflexibilidade poderia ser ainda mais restritiva, até um limite 10%. Isto faria com que os empreendedores participantes do Leilão de Capacidade tendessem a considerar o armazenamento como uma alternativa de aumentar sua flexibilidade. Assim, haveria uma tendência de implementação de sistemas híbridos, inclusive renováveis intermitentes com baterias e empreendimentos de hidrelétricas reversíveis, que é “híbrida por natureza”.

No futuro, seguindo as premissas estabelecidas no leilão do Sistema Isolado, as premissas de operação devem atender a uma flexibilidade de entrega de potência e energia de 100%, durante 24 horas por dia, sete dias por semana (condição de disponibilidade 24/7). Esta condição exigiria que o sistema possua uma reserva de combustível para paradas de manutenção ou sistemas de armazenamento para garantir esta premissa de operação.

Esta é uma proposta cujas externalidades ainda são consideradas de forma “ad hoc”, que tende a rejeitar a priori soluções alternativas de fornecimento de energia, (Leite e Calili, 2021), apesar de se ter um ganho em relação aos leilões hoje realizados no país. Assim, há a necessidade de se criar um modelo que considere, de forma integrada dentro do leilão, não somente aspectos relativos ao custo de produção da energia e potência, mas também atributos de confiabilidade e outros atributos de projetos (como impactos ambientais e sociais, por exemplo). No sentido de criar uma solução ao tratamento “ad hoc” em leilões de energia, surge o conceito de leilão multiatributos, em que uma proposta para inserção de fontes de armazenamento de energia, inclusive usinas hidrelétricas reversíveis, é considerada. Esta é uma metodologia que tende a considerar a análise custo-benefício para quantificar as vantagens de uma tecnologia ou política por meio de índices de comparação.

Na seção seguinte será apresentada a segunda proposta, considerando a possibilidade de se implementar um Leilão Multiatributo no Brasil.

#### 4.1.2 - Proposta 2 - leilão multiatributo

Antes de qualquer coisa, vale uma ressalva; a proposta aqui apresentada, embora promissora, ainda está num estágio bem inicial de discussão. A ideia é trazer insights para os agentes e os tomadores de decisão com fins de aprimoramento desta proposta. Os atributos considerados nesta proposta têm por base aqueles apresentados na subseção 3.4.

A opção de considerar os serviços ancilares como atributos a serem avaliados em um Leilão Multiatributo se baseia no fato de que, nos estudos prévios sobre serviços remuneráveis para sistemas de armazenamento e usinas hidrelétricas reversíveis, estes tipos de serviços sistêmicos são sempre citados. Para incorporação de tais atributos, foram consideradas as metodologias propostas por PSR e LACTEC (2014) e Leite e Calili (2021), porém, ao invés de se considerar uma parcela adicional ao índice custo-benefício (ICB) calculado, considerou-se um índice benefício-custo, onde todos os atributos são monetizados. A proposta consiste em apresentar uma equação para a valoração financeira de determinados atributos que podem estar envolvidos em leilões de energia multiatributo, a fim de permitir a livre competição entre diversas fontes de energia participantes destes leilões, sem qualquer discriminação.

$$IBC = \frac{\frac{R\$}{Wh} \cdot E_G + \frac{R\$}{W} \cdot L_{cap} + \frac{R\$}{W_{med}} \cdot L_{prod} + \frac{R\$}{Wh} \cdot ResOp + \frac{R\$}{VA_{r/h}} \cdot SupQ}{I + \frac{R\$}{"Conf"} \cdot "Conf" + \frac{R\$}{min} \cdot t_{resp} + \frac{R\$}{t_{CO_2 eq}} \cdot E_{GEE} + \frac{R\$}{ha} \cdot A_{util}} \quad (1)$$

Onde:

$E_G$  - Energia gerada (Wh);

$L_{cap}$  - Lastro de capacidade (W);

$L_{prod}$  - Lastro de produção (Wmed);

"Conf" - Confiabilidade (unidade de "Conf");

$ResOp$  - Reserva operativa (unidade de "ResOp");

$SupQ$  - Suporte de Reativos gerados ("absorção dos reativos");

$I$  - Investimento da planta na data do leilão, considerando os custos de impactos sociais e os custos de O&M;

$t_{resp}$  - Tempo de resposta do *Black Start* (min);

$E_{GEE}$  - Emissão de gases de efeito estufa ( $t_{CO_2 eq}$ );

$A_{util}$  - Área útil (ha).

Todas variáveis acima descritas (atributos), exceto  $I$ , seriam definidas a priori, conforme as características de cada tecnologia e estudos de garantia de entrega daqueles montantes. Para cada uma, deveria haver um processo de mensuração bem definido. Neste modelo, há incentivo para que se tenham investimentos em sistemas híbridos. Por exemplo, uma planta solar que não consegue entregar valor para o atributo confiabilidade, pode inserir no seu projeto, um sistema de armazenamento a fim de aumentar o valor deste atributo. Os valores  $R\$/Wh$ ,  $R\$/W$ ,  $R\$/W_{med}$ ,  $R\$/VA_r$ ,  $R\$/Conf$ ,  $R\$/min$ ,  $R\$/t_{CO_2 eq}$ ,  $R\$/ha$  seriam definidos pelo governo, sendo aqui denominados, "fatores de remuneração". Este é ponto que pode causar muitas discussões, pois cada investidor pode tentar influenciar o governo a remunerar os atributos que trazem maior valor para o seu projeto.

Outra forma de um atributo se tornar mais competitivo no leilão, é reduzir o custo  $I$ , que considera investimento da planta na data do leilão, considerando os custos de impactos sociais e os custos de O&M. A ideia é se ter um proxy do valor social presente líquido (VSPL), proposto pelo Ministério da Economia (2021), mas sem considerar as receitas, as quais, devem estar inseridas aos benefícios (numerador da equação anterior). Sugere-se, a priori, que se considere como Benefícios, apenas os atributos de Energia gerada (Wh), Lastro de capacidade (W) e Lastro de produção (Wmed) e como Custos, apenas os Investimentos na planta na data do leilão, considerando os custos de impactos sociais e os custos de O&M.

Nesta seção foram apresentadas as duas propostas para o mercado cativo. Na próxima seção, será apresentada a proposta para o mercado livre que seria um mercado de capacidade baseado na livre negociação.

## 4.2 - Mercado livre

### 4.2.1 - Proposta 3 - mercado de capacidade

Para o mercado livre seria interessante, que o mercado fosse baseado em preço (European Commission, 2016), inicialmente, considerando que os pagamentos da capacidade almejada para plantas específicas representam um mecanismo direcionado e baseado em preços. Assim, o ONS, juntamente com o ministério ou regulador determinariam o preço da capacidade. Normalmente, apenas um grupo de participantes do mercado, como operadores de uma determinada tecnologia de geração (por exemplo, usinas flexíveis para suprir a demanda de pico) recebem pagamentos de capacidade.

Num cenário futuro, quando o mercado de capacidade estivesse mais maduro, poderia ser proposto um mecanismo de remuneração com obrigações de capacidade descentralizada, em que os fornecedores são obrigados a contratar capacidade suficiente para atender com segurança, ao consumo de seus clientes. Já num cenário ainda mais a frente, quando o mercado estivesse mais aberto no Brasil, poderia ser adotado um mecanismo de remuneração de capacidade com base no mercado, abrangendo todo o mercado e baseado no preço. O preço seria definido por uma autoridade central em um nível que deveria fornecer receita adicional para remunerar os participantes do mercado por seus custos fixos.

Embora o ONS ficasse com a responsabilidade de definir a demanda de mercado, o preço seria definido pelo mercado, por meio da livre concorrência. Neste caso, também há a necessidade de que o contrato possua uma cláusula de abatimento ou ressarcimento da Receita Fixa (RF) por Indisponibilidade e/ou Restrição Operativa.

As plantas que participam de uma reserva estratégica podem ser autorizadas a participarem dos mercados atacadistas de energia ou dos mercados de reserva de equilíbrio, mas estariam sujeitas a penalidades, caso não atendessem a seus contratos. Haveria também a possibilidade de honrar seus contratos através da compra de capacidade de outros participantes do mercado através de um mercado spot. Assim, como proposto pela EPE (2019), pode-se adotar os três mecanismos propostos: (i) Reserva Estratégica, cujo processo de remuneração seria baseado em um pagamento fixado às unidades provedoras de tal reserva; (ii) Obrigação de Capacidade Ex Ante, em que a capacidade requerida pelo sistema é determinada por uma autoridade central, a qual definiria quais distribuidoras e comercializadoras de energia adquiriram tal volume de capacidade por meio de um contrato ex-ante; e (iii) Obrigação de Capacidade Ex Post - a única diferença em relação a (ii) é que o montante a ser contratado é conhecido a posteriori.

Talvez um mercado para serviços ancilares integrado ao mercado de capacidade, como acontece no Reino Unido, trouxesse fontes de receitas importantes que tornassem viáveis, as fontes de armazenamento, inclusive as reversíveis que ainda não possuem um custo efetivo ao sistema elétrico brasileiro. Além disso, outros serviços ancilares poderiam ser considerados, bem como outros produtos, como a resposta a demanda, talvez no médio prazo, pois para a definição da linha base, estudos da dinâmica do mercado de capacidade deveriam ser considerados.

Em relação a caracterização e quantificação da oferta de lastros para cada fonte, a princípio, poderia ser utilizada a mesma premissa estabelecida por EPE e MME (2021), na qual, foram definidos dois produtos que caracterizam a entrega de capacidade: o lastro de capacidade (em MW), que é caracterizado por entrega garantida de potência de curto prazo; e o lastro de produção (em MWmed), que é mensurado através de uma proxy da garantia física dos empreendimentos. Já em relação às fontes consideradas, não deveria haver discriminação, permitindo além das fontes intermitentes (solar e eólica), fontes termelétricas, fontes hidrelétricas (EPE e MME, 2021), tecnologias de armazenamento, inclusive as usinas hidrelétricas reversíveis.

### **4.3 - Considerações sobre as propostas**

As três propostas aqui apresentadas anteriormente devem ser discutidas com os representantes de todos os agentes envolvidos no processo. Além disso, os órgãos de planejamento (EPE e ONS), bem como os órgãos reguladores do mercado de energia (ANEEL e ANP) deveriam ser envolvidos em tal discussão. Vale ressaltar, mais uma vez, que esta é uma proposta preliminar e que carece de maiores discussões e aprofundamentos teóricos, bem como análises de impactos regulatórias.

## **5.0 - CONCLUSÃO**

A inserção de usinas hidrelétricas reversíveis está relacionada além dos fatores políticos, com aspectos tecnológicos e socioeconômicos. Do ponto de vista político, há a necessidade do estabelecimento de um marco regulatório que permita que estas usinas façam parte da matriz energética brasileira, o qual, deve estar respaldado por uma devida análise de impacto regulatório que depende do estabelecimento de boas práticas regulatórias. Dentre os desafios regulatórios a serem superados para a operação de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, além da adequação dos processos de outorga e adequação de usinas hidrelétricas convencionais para a operação no modo reversível, há a necessidade de regulamentação do mercado de capacidade, da incorporação das tecnologias de armazenamento de energia, em especial, as usinas hidrelétricas reversíveis, como atributos a serem considerados em leilões de energia elétrica. Ademais, conforme constatado na literatura internacional, os serviços ancilares são uma tendência para a remuneração de tecnologias de usinas hidrelétricas reversíveis, pois estas usinas podem promover serviços de flexibilidade, reserva operativa, auto reestabelecimento e controle de frequência, os quais podem ser remuneráveis, dentro de uma nova política regulatória no setor elétrico brasileiro. Quanto aos aspectos tecnológicos, há a necessidade de definição da configuração eletromecânica adequada para a usinas hidrelétrica reversível, por meio de uma análise de custo-benefício, buscando definir os benefícios trazidos por estas usinas a sociedade. No aspecto socioeconômico, as usinas hidrelétricas reversíveis podem ser uma importante fonte de benefícios sociais para regiões com demanda de água e energia, propiciando além de necessidades básicas, empregos e melhoria de vida, além de valorização econômica dos locais que receberem plantas hidrelétricas reversíveis. A abundante capacidade hídrica do Brasil e a predominância da geração hidráulica como fonte de energia

renovável são importantes motivadores para a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil. Entretanto, as políticas regulatórias a serem estabelecidas em um futuro cenário do setor elétrico brasileiro, devem considerar as possibilidades de superação dos desafios regulatórios, com vistas a possibilitar a inserção de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer os colegas do projeto de P&D “Proposição de metodologia para seleção de locais para a implantação de usinas hidrelétricas reversíveis” (P&D ANEEL 00678-0120/2020) pelas discussões construtivas. Os autores agradecem também as empresas EDF NORTE FLUMINENSE, CTG BRASIL, ELERA RENOVÁVEIS e LIGHT pelo suporte financeiro via Programa de P&D ANEEL.

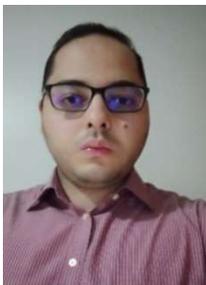
### 6.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota técnica nº 132/2019-SRG/ANEEL. Instauração de Tomada de Subsídios para fomentar abertura de discussão sobre o tema serviços ancilares aplicáveis ao no Sistema Interligado Nacional (SIN), dez. 2019.
- (2) ARGONNE NATIONAL LABORATORY. Modeling and Analysis of Value of Advanced Pumped Storage Hydropower in the United States, ago. 2014.
- (3) BHAGWAT P, C.; DE VRIES L, J.; HOBBS B, F. Expert survey on capacity markets in the US: lessons for the EU. *Utilities Policy*, v.38, p.11-17, 2017.
- (4) CELESTINO, N. Modelo AHP para avaliação e escolha de fontes de geração para a segurança da expansão de energia – análise do caso do Nordeste Brasileiro. Mimeo. 2017.
- (5) CRAMTON, P., OCKENFELS, A., STOFT, S. Capacity market fundamentals. *Economics of Energy and Environmental Policy*, v.2, n.2, p.27-46, 2013.
- (6) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2020 (ano base 2019).
- (7) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). CIM | Lastro & Energia: Avanços metodológicos, mar. 2021.
- (8) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota técnica EPE-DEE-NT-065/2020-r1. Instruções para Elaboração e Apresentação de Propostas de Solução de Suprimento com vistas à participação nos Leilões para suprimento aos Sistemas Isolados de 2021, dez.2020.
- (9) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Relatório de apoio ao Workshop de Lastro e Energia, ago. 2019.
- (10) EUROPEAN COMMISSION. Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 - establishing a guideline on electricity balancing, 2017.
- (11) EUROPEAN COMMISSION. “Final Report on the Sector Inquiry on Capacity Mechanisms”, 2016.
- (12) EUROPEAN COMMISSION. “Regulation 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the Internal Market for Electricity”.
- (13) GISSEY, G.C.; DODDS, P.E.; RADCLIFFE, J. Market and regulatory barriers to electrical energy storage innovation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 781-790, 2018.
- (14) GOVERNO FEDERAL, DECRETO Nº 10.707 de 28 de maio de 2021. Regulamentação da contratação da reserva de capacidade, na forma de potência.
- (15) HALL, D.; STRINGFELLOW, A. Annual Report on the Operation of the Capacity Market in 2017/18, ago. 2018.
- (16) LEITE, D.A.; CALILI, R.F. Uma proposta de leilão de energia por atributos utilizando o Modelo AHP - Análise do caso Brasileiro, 2021 (Mimeo).
- (17) MARTINS, GUILHERME DE ANDRADE.; CALILI, RODRIGO FLORA.; ALMEIDA, MARIA FATIMA LUDOVICO DE. Modelo Fuzzy AHP-TOPSIS para avaliação e seleção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Rio de Janeiro, 2017. 105p. Dissertação de Mestrado - Programa de

Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

- (18) MARTINS, J.; MILES, J. A techno-economic assessment of battery business models in the UK electricity market. *Energy Policy*, vol.148, p.1-16, 2021.
- (19) MINISTÉRIO DA CASA CIVIL, GOVERNO FEDERAL. Diretrizes gerais e guia orientativo para a elaboração de análise de impacto regulatório, jun. 2018.
- (20) MINISTÉRIO DA ECONOMIA, GOVERNO FEDERAL. Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em Infraestrutura, mar. 2021.
- (21) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, GOVERNO FEDERAL. Portaria nº 518 de 28 de maio de 2021. Diretrizes para a realização do Leilão para Contratação de Potência Elétrica e de Energia Associada, a partir de empreendimentos de geração novos e existentes que acrescentem potência elétrica ao Sistema Interligado Nacional (SIN), denominado "Leilão de Reserva de Capacidade de 2021.
- (22) PSR.; LACTEC. Projeto PD-6491-0279/2012 - Aperfeiçoamento do processo de contratação da expansão do parque gerador. Associação dos Produtores Independentes de Energia - APINE. Curitiba, 2014.
- (23) PUGL-PICHLER, C.; TYMA, F.; SUSSENBACHER, W.; BLUME-WERRY, E.; TODEM, C. Capacity remuneration mechanisms on European electricity markets-legal basis and actual implementation status. *Journal of World Energy Law and Business*, v. 13, p. 498-517, 2020.
- (24) SOUZA, M.; ALMEIDA, M.F.; CALILI, R. Multiple Criteria Decision Making for the Achievement of the UN Sustainable Development Goals: A Systematic Literature Review and a Research Agenda. *Sustainability*, v.13, n.4129, p.1-37, 2021.
- (25) STRBAC, G.; AUNEDI, M.; PUDJIANTO, D.; DJAPIC, P.; TENG, F.; STURT, A, et al. Strategic assessment of the role and value of energy storage systems in the UK low carbon energy future. *Energy Futures Lab Report Carbon Trust*, 2012.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



### (1) GUILHERME VIEIRA COSENTINO

Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) no ano de 2017. Atua como mestrando em Metrologia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO) com ênfase em Redes Inteligentes de Energia Elétrica, desde agosto de 2019. Possui experiência profissional nas áreas de manutenção elétrica, energia renovável e eficiência energética. Como pesquisador, atua no grupo de estudo em Redes Inteligentes de Energia Elétrica da PUC-RIO, tendo trabalhado recentemente em parceria com a empresa PSR - Energy Consulting and Analytics, no desenvolvimento de estudos regulatórios sobre inserção de usinas hidrelétricas reversíveis para o projeto de P&D 00678-0120/2020, através deste grupo de trabalho mencionado anteriormente.

### (2) RODRIGO FLORA CALILI

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, desde 2003. Possui mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), Rio de Janeiro, concluídos em 2006 e 2013, respectivamente, tendo cursado parte de seu doutorado na École des Mines em Paris. Tem pós-doutorado em Metrologia pela PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil, em 2016. Desde 2016 é professor assistente do Programa de Pós-Graduação em Metrologia e do Mestrado Profissional de Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-RIO. Doutor Calili já publicou mais de 70 artigos em congressos, periódicos, jornais e revistas.

### (3) RAFAEL KELMAN

Graduado em Engenharia civil pela UFRJ, MSc em Recursos Hídricos e DSc em Engenharia de Sistemas pela COPPE/UFRJ. Foi professor convidado do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Ingressou na PSR em 1997, onde desde 2008 é Diretor-Executivo. Coordena estudos nas áreas de recursos hídricos e energia e o desenvolvimento de modelos computacionais. Ex-diretor técnico da Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

Consultor do Banco Mundial, BID e outras instituições, com experiência em mais de trinta países. Palestrante e instrutor em cursos e seminários e autor de diversos artigos e capítulos de livros.

(4) LUIZ RODOLPHO SAURET CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE

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

(5) TARCISIO LUIZ COELHO DE CASTRO

Graduado em Engenharia Civil pela UFRJ, em 1978, é mestrando em Engenharia Urbana e Ambiental pela PUC-RJ, e professor Assistente do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola de Engenharia da UFRJ desde 1980. Trabalhou como coordenador de projetos e diretor da área de meio ambiente da Engevix por mais de 25 anos, tendo participado de estudos de viabilidade técnica e ambiental de vários projetos de infraestrutura como usinas hidrelétricas, linhas de transmissão, termoeletricas, rodovias, sistemas de irrigação e saneamento básico. Desde 2005 na PSR Soluções e consultoria em energia LTDA desenvolvendo estudos nas áreas de recursos hídricos e meio ambiente, em projetos de desenvolvimento e pesquisa, e avaliações ambientais integradas e due-diligences de empreendimentos do setor elétrico.