

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

OTIMIZAÇÃO HIDROTÉRMICA DIÁRIA CONSIDERANDO USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS

**CAMILA CAPOBIANGO MARTINS(1); MIRIAN ADELAIDE RENNO RIBEIRO COSTA PINTO(2)
ELETROBRAS(1); HEDAIDI ENGENHARIA(2)**

RESUMO

Mudanças energéticas e comerciais provocam relevantes alterações estruturais na operação e planejamento eletroenergético. Estudos de novas opções de serviços para aumentar a eficiência e assegurar o suprimento são fundamentais e orientam definições regulatórias para a modernização. Logo, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis – UHR destacam-se em versatilidade operacional e na formação de preços. Contudo, os estudos desenvolvidos não comprovam a viabilidade desse investimento e seus benefícios deixam de ser aproveitados. A proposta desse trabalho é apresentar estudo de caso de modelo de despacho hidrotérmico simplificado, com a participação das UHRs. Os resultados são satisfatórios e sinalizam a redução do custo da operação.

PALAVRAS-CHAVE: Usinas Hidrelétricas Reversíveis; Despacho Hidrotérmico Aprimorado; Formação de Preço; Armazenamento; Planejamento Energético; Serviços Ancilares; Regulação; Transição Energética; SIN; Intermitentes.

1.0 INTRODUÇÃO

O Setor Elétrico Brasileiro está passando por um momento de modernização, assim como vem acontecendo no mundo, sendo necessária uma transição regulatória e ruptura de paradigmas num contexto de novidade para modelo de mercado e oferta de produtos. Entender e conhecer os insumos disponíveis e o potencial torna-se fundamental para que isto ocorra de forma consistente. A busca de novas soluções exige um plano de ações e diretrizes governamentais para orientar a implantação das mesmas. Várias são as discussões iniciadas desde as Consultas Públicas 21/2016 e 33/2017, que movimentam a tentativa de remodelar o setor. O desafio de melhorar a qualidade do suprimento e aumentar a oferta dos serviços de eletricidade é complexo. É necessário estabelecer condições de menor custo operacional para o Sistema Interligado Nacional (SIN) e melhor aproveitamento da disponibilidade energética da matriz brasileira. Para tanto quesitos como sustentabilidade e inovação regulatória são pilares dessa transformação de mercado.

Outro problema recorrente e, atualmente, em evidência é a escassez hídrica existente no sistema brasileiro, fator que exacerba a necessidade de adaptações estruturais no planejamento e na operação do sistema. E neste cenário, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) se destacam como uma possível solução para as deficiências do despacho de agregação da geração variável e a manutenção da segurança operativa dos reservatórios. Destaca-se aqui a importância da realização de estudos de foro comercial, regulatório e dinâmico concatenados, para que a evolução dessa transformação seja em condição constante, consistente com a sustentabilidade da expansão da geração e da transmissão do SIN. Contudo, para que os investimentos necessários aconteçam é preciso atratividade. Condição que somente será estabelecida na medida em que houver previsibilidade e eficiência na alocação de custos e riscos associados aos negócios de eletricidade.

O estado da arte da busca da evolução do marco legal do Setor Elétrico permeia a multidisciplinaridade de assuntos, que se inter-relacionam e devem ser tratados de forma integrada para identificar as lacunas nos horizontes de curto, médio e longo prazos na formação de preços, financiabilidade de investimentos, modelos de contratação dos serviços e uso do SIN, transição da matriz elétrica, operação e planejamento eletroenergético do SIN, perfil da demanda, entre outros. A experiência internacional é válida para o aprimoramento regulatório brasileiro, mas não determinante no entendimento das novas oportunidades de melhoria para o Setor Elétrico do Brasil.

Portanto, a motivação deste trabalho advém da possibilidade de inserir a UHR como um elemento operativo adicional ao critério de decisão de despacho da geração de energia elétrica para trazer flexibilidade à operação e reduzir os custos associados à operação do SIN. O modelo matemático utilizado é simplificado, mas guarda os conceitos gerais do despacho hidrotérmico clássico. A montagem do caso base passou por estudos de perfil de operação de países europeus que possuem UHRs em operação. O desenvolvimento está alinhado ao documento (1). Este trabalho é

dividido em seções sequenciais de exposição de informações e conceitos técnicos gerais tidos como referência dos desenvolvimentos realizados, e a descrição do estudo de caso elaborado.

2.0 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A inovação é primordial, tal como relatado em (1), para um futuro de energia renovável de soluções integradas que resguardem a segurança da operação dos sistemas de suprimento de energia elétrica e garantam o impulso à criação de melhores modelos de negócio inseridos na cadeia produtiva da eletricidade. Neste contexto instituições como a IRENA e IHA realizam estudos que permitem ter uma visão geral das novas formas de proporcionar maior flexibilidade e integração aos diversos sistemas elétricos e seus agentes constituintes.

Apesar da tecnologia da UHR ser conhecida, o modelo regulatório que a habilite como negócio ainda não está estabelecido no Brasil, assim, sua forma de operação fica indefinida para investimentos. A inovação do uso da UHR está atrelada a possível complementaridade a outras tecnologias de geração por possibilitar oportunidades de integração local ou sistêmica, como demonstram as experiências internacionais, destacando a inflexibilidade das variações na produção das fontes eólicas e solares. Na matriz energética mundial as UHRs representam mais de 10% da capacidade hidrelétrica total em todo o mundo e a condição de armazenar energia em larga escala (1) 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 dinâmico e economicamente, sendo de grande relevância para o Setor Elétrico Brasileiro.

Diferentemente de outros países, o Brasil possui características peculiares devido à estrutura centralizada do despacho de grandes montantes de geração em um Sistema de Transmissão gigante, coordenado pelo ONS. Assim, não existe propriamente um mercado de energia (2). O ONS é o órgão que gerencia os critérios e metodologia de alocação dos custos de operação e o gerador é passivo na sua decisão de produção ou prestação de suporte ancilar. O planejamento da operação é realizado em etapas marcadas por horizontes temporais: curto, médio e longo prazo, onde não apenas fatores econômicos influenciam a formação do custo da operação, mas também fatores como sazonalidade da climatologia, inflexibilidade dos tipos de usinas (renováveis e não renováveis), restrições de transmissão também contribuem nesta questão.

A possibilidade de proporcionar opções diversificadas de armazenamento e suporte firme de potência de curto prazo torna a UHR potencialmente benéfica à operação do SIN. A conjuntura atual requer a sustentabilidade dos empreendimentos existentes e o uso mais inteligente dos grandes reservatórios, devido à dificuldade de regularização, seja por problemas climatológicos ou por questões relacionadas ao aproveitamento das águas para usos diversos, como o agronegócio. Outro ponto, interessante e relevante é a tendência de redução das emissões de CO₂ que favorece a escolha de soluções limpas. As informações do PNE 2019 (3), as fontes variáveis na matriz brasileira somavam 10% em 2018. Segundo dados disponibilizados pelo ONS em novembro de 2021 (4), o percentual de participação das fontes eólica e solar equivale a 13,8% da total geração do SIN, enquanto a participação das hidrelétricas marca 63,2%. O SIN aumentou sua capacidade instalada de 2018 em relação a 2012 em, aproximadamente, 6,4%. Até 2025, em termos de capacidade instalada, a previsão é de uma queda de 5,1% da fonte hídrica enquanto eólica e solar crescerão, respectivamente, 2,7% e 1,9%, sendo que estes números não agregam os montantes associados à geração distribuída instalada fora da Rede Básica.

Vale ressaltar outra fragilidade no atual sistema energético brasileiro: a centralização da capacidade de armazenamento na região Sudeste, especialmente nos Rios Paranaíba e Grande que juntos representam 45% da capacidade de armazenamento do país (5). Então, induz-se o raciocínio de que o Brasil deverá investir no planejamento da expansão do SIN prospectando soluções para aumentar a capacidade do suprimento e armazenamento, assim como, suporte ancilar para assegurar a despachabilidade do SIN com segurança e confiabilidade. A Figura 1 resume a estimativa de geração por tipo de fonte até 2029.

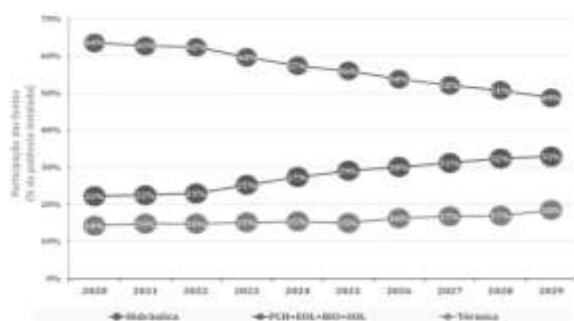


Figura 1 - Expansão da capacidade instalada por tipo de usina com despacho centralizado (10).

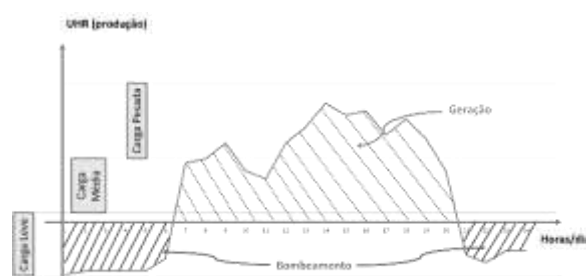


Figura 2 – Esquema Genérico de uma UHR

É neste ponto, armazenamento, que a inserção das UHRs favorece a operação do SIN através da sua versatilidade operativa. Em alguns momentos este tipo de usina gera e em outros consome energia para bombear a água

reversamente, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Contudo, ainda não se sabe como as UHRs poderão ser inseridas na operação do SIN. Por isso, observa-se a necessidade de desenvolver estudos para avaliar as interferências e evidenciar os benefícios dinâmicos e econômicos tão comentados na literatura e observados na prática de despacho de países que possuem UHRs em seus sistemas elétricos.

O balanço energético dessas usinas é sempre negativo, porque geram menos que consomem, dessa forma, provar a viabilidade de um empreendimento desse tipo é difícil. De fato, isto é um entrave regulatório, entretanto um sistema elétrico precisa de recursos eletrodinâmicos para estabelecer uma condição de operação segura com qualidade e confiabilidade para o suprimento da demanda. Assim, diversidade de fontes para sustentabilidade, reforço de potência e controle de reativos são necessários para o equilíbrio sistêmico.

3.0 USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL – ASPECTOS GERAIS E EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

A evolução dos mercados fez crescer os sistemas elétricos, diversificou as matrizes elétricas e inseriu novos desafios quanto ao gerenciamento da escassez de fontes de energia e metas de redução de emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Desta forma, o armazenamento da energia assume um papel muito importante, e as UHRs são consideradas a forma mais eficaz de armazenamento de energia em grande escala do mundo. Disseminadas no mundo entre as décadas de 1960 e 1980, principalmente no Japão, Estados Unidos, e mais recentemente na China as UHRs vêm sendo largamente empregadas como tecnologia de armazenamento de energia, sendo responsáveis por, aproximadamente, 95% (6) do estoque total de energia armazenada a nível global.



Figura 3 – Capacidade Instalada de UHR no Mundo (GW) (Gráfico de confecção própria elaborado a partir (7))

Dados disponibilizados em (8) apontam que, em 2014, 99% do armazenamento de energia elétrica no mundo advinha de UHRs. Na Figura 3 é possível verificar a situação real da existência de UHRs no mundo. No continente europeu as UHRs encontram-se localizadas em regiões montanhosas, geograficamente favoráveis à sua inserção e em países com geração termelétrica na base. Um país que vem se destacando no uso de UHRs é Portugal. Segundo a EDP, o maior plano de investimento de geração da Europa fora realizado no país entre 2007 e 2017, com 11 UHRs em operação. A estimativa de crescimento da hidroeletricidade reversível mundial é de 86,33% até 2030 e de 100% até 2050, em relação aos 161GW de capacidade de armazenamento global instalada em 2018 (9).

Curiosamente, no Brasil foi instalada a primeira turbina reversível do mundo, para transposição de águas na Usina Elevatória de Pedreira, em 1939, na cidade de São Paulo. Ao longo dos anos, a construção das UHRs no mundo foi motivada de acordo com o paradigma de operação das matrizes energéticas, o que não ocorreu no Brasil, onde desde a década de 1970, o modelo de planejamento e expansão deu destaque às grandes UHEs, fazendo com que o conceito de UHR caísse no esquecimento.

4.0 ASPECTOS REGULATÓRIOS NO BRASIL E NO MUNDO

A viabilização de uma usina reversível envolve diversos fatores, como questões ambientais e regulatórios. Como uma UHR é uma consumidora líquida, estruturar um modelo de negócio torna-se bem complicado e representa, talvez, o maior entrave. Inclui-se, também, a questão do armazenamento ainda não regulamentado no Brasil e em discussão na Tomada de Subsídio (TS 11/2020) da ANEEL.

As definições regulatórias necessárias ao estabelecimento das UHRs são complexas e abordam de forma simultânea temas significativos no Brasil que englobam: Valorar a energia “não” gerada ou armazenada; Separar lastro de potência de energia; Definir o mercado de serviços ancilares (remuneração adequada e tipos de produtos); Revisão dos regimes de outorgas/ contratações; Tipo de leilão para UHR (arbitragem, oferta de produtos, investimento, receita); Locais ideais aos projetos; Tempo de construção; Possibilidades de *revamp* das UHEs convencionais; PLD horário. Em geral, este tipo de usina apresenta dificuldade de inserção nos marcos regulatórios setoriais liberalizados, já que não pode ser considerada um novo tipo de fonte de geração pura e sua aplicação envolve o fornecimento de serviços de armazenamento energético e a geração de benefícios eletrodinâmicos sistêmicos. Portanto, conforme a literatura existente a maioria das UHRs foram construídas em condições de monopólio de propriedade pública, em períodos anteriores às reformas liberalizantes, e menos de 5% foram comissionadas em mercados liberalizados (12). Todos os casos de UHRs construídas em mercados liberalizados ocorreram na Europa e, dentre estes, alguns

se desdobraram em episódios de prejuízos financeiros, diante das dificuldades de remuneração e retorno dos investimentos. Nesta evolução dos mercados de energia relacionados às UHRs, percebe-se três principais modelos regulatórios: (a) Mercados não liberalizados ou com pouca separação entre os segmentos: a UHR é remunerada frequentemente pelo custo do serviço como os demais projetos e investimentos, sem um esquema de remuneração específico para essas usinas; (b) Mercados em estágio inicial de liberalização: as UHRs integram os ativos de um produtor independente de geração, sem um mecanismo de remuneração específico; (c) Mercados liberalizados: a UHR passa a ser categorizada como uma unidade econômica autônoma competindo com os demais geradores e consumidores em um mercado físico de energia, com uma dinâmica determinada pela oferta de preços dos agentes.

Quanto aos modelos regulatórios internacionais que podem auxiliar nas definições para o SIN, não se identifica nos mercados liberalizados padrão de enquadramento regulatório às políticas de incentivo de investimento e às estratégias operacionais ótimas. Na maioria dos países não existem regras e normatizações específicas para as UHRs, sendo estas incluídas nas diretrizes dos ativos de geração hidrelétricos. A arbitragem de preços não favorece investimentos neste tipo de usina. Percebe-se um grande potencial para uma diretriz com adoção de novos desenhos de mercados e mecanismos de remuneração adequados para as UHRs, principalmente com relação à prestação de serviços ancilares e auxílio para redução do custo da operação. O motivo para viabilização dessas usinas em outros países deve-se aos aspectos regulatórios adotados. Três formas de remuneração são feitas para esse tipo de empreendimento em diferentes países: remuneração por capacidade instalada, adotada por países como Irlanda, Espanha e Itália, remuneração por serviços ancilares, que são serviços auxiliares prestados pela geradora, e remuneração através da variação de preços entre os horários quando a demanda está alta e quando a demanda está baixa (9).

No Brasil, a adoção do preço horário em 2021 somado à necessidade de complementação de armazenamento energético apontada em (10) e (11), pode ser um incentivo para implantação de usinas reversíveis no parque gerador, mas antes disso é necessário estudos que verifiquem se realmente há um retorno financeiro para os geradores.

5.0 ASPECTOS DO DESPACHO HIDROTÉRMICO COM UHRs

5.1 Despacho Hidrotérmico com UHR

A inclusão da UHR no despacho não descaracteriza o despacho hidrotérmico clássico, pois somente mais um elemento adicional passa a ser considerado na decisão da modulação da carga e geração do SIN. Entretanto, em (12), é encontrada a definição da técnica chamada *Enhanced-Pumped-Storage*, que em português pode ser chamada de “Armazenamento Aprimorado”. Logo, pode-se nomear o despacho hidrotérmico com UHR de Despacho Hidrotérmico Aprimorado (DHA). Este modo de despacho combina a operação em larga escala de UHR em cascata, que armazena através de bombeamento reverso de água a montante dessa cascata. Apesar disso, nada impede a consideração da UHR de forma isolada, onde o armazenamento passa a ser utilizado em momentos eventuais para complementar a necessidade eletroenergética sistêmica ou em momentos de estratégia econômica para a formação de preços. O bombeamento, inclusive, pode ser acionado para evitar restrições de geração advindas do excesso de produção das fontes intermitentes. Assim, neste caso, a melhor forma de representação para os efeitos imediatos no despacho com UHRs é o horizonte de curto prazo, mesmo que existam efeitos benéficos a médio e longo prazos. Estudos apresentados em (5) demonstram que UHRs com eficiência média de 75% em combinação operativa com hidrelétricas convencionais em cascata pode aumentar a eficiência de armazenamento total para até 90% e triplicar a capacidade de armazenamento de uma bacia hidrográfica. Isto traz a possível constatação de que se a capacidade de armazenamento aumenta, o lastro de potência da instalação hidrelétrica, também, aumenta e permite maior flexibilidade para prestação de serviços ancilares.

5.2 Fontes Intermitentes no Despacho Hidrotérmico

Principalmente, dada a alta penetração das fontes eólica e solar, desafios técnicos operacionais e, consequentemente, econômicos são impostos à operação dos sistemas elétricos (13). Algumas características dessas fontes causam impactos relevantes ao custo da operação sistêmica, tais como: variabilidade da produção, flutuações do despacho (deslocamentos energéticos ou geração não-programada); concentração locacional no SIN; entre outros. A influência das fontes renováveis pode ocasionar problemas severos de controle de tensão e sincronismo, mas isso não restringe sua difusão. Para tanto faz-se necessário adequar o sistema para que este ganhe robustez e maior capacidade de transmitir os fluxos de energia em momentos de maior e menor abundância, através de serviços ancilares. Nas premissas do despacho hidrotérmico, assim como a geração hidrelétrica, a geração “intermitente” tem custo fixo, portanto, não são modelos no mérito como a geração termelétrica. A energia é utilizada à medida que é produzida e não incorre custos diretos variáveis, representando não um parâmetro de decisão no despacho e, sim, de restrição.

5.3 A Influência do PLDh no Despacho

Em janeiro de 2021, o preço da liquidação das diferenças (PLD) em base horária se tornou realidade, conforme Portaria MME nº 301/2019 (resultado das Consultas Públicas MME 71 e 74/2019), e ainda, não se sabe o diagnóstico desta modificação. A Resolução Normativa ANEEL nº 858/2019 estabelece uma Avaliação de Resultado Regulatório

(ARR) a partir de janeiro de 2024. A expectativa é de que o PLDh seja benéfico em diversos aspectos, inclusive na viabilização de empreendimentos como as UHRs, pois representa o custo de oportunidade da energia elétrica no curto prazo. Este custo, em aspectos regulatórios e de política energética, é uma oportunidade de modular a formação de preços. A determinação do PLDh está atrelada à hidrologia afluente no longo prazo e às condições instantâneas da despachabilidade, inflexibilidades e demanda, auxiliando a controlar a volatilidade sazonal do preço da energia e podendo ser útil na regularização de grandes reservatórios estruturantes do SIN.

6.0 ESTUDO DE CASO – MODELAGEM E ANÁLISES

Todas essas considerações anteriores incitaram a adoção da metodologia de programação linear para a modelagem matemática da condição ótima de despacho deste estudo de caso. A base teórica descrita tem a intenção de dar clareza ao entendimento das premissas adotadas na modelagem do caso base e modelo de despacho hidrotérmico proposto. Sendo assim, o conteúdo desta seção se concentra na modelagem definida para este estudo de caso considerando a inclusão das UHRs no despacho hidrotérmico. Serão apresentadas as características adotadas na modelagem e os resultados das simulações, assim como as limitações do modelo escolhido. Vale dar destaque, que a inspiração para a modelagem do sistema partiu da obtenção de dados reais do despacho de geração europeu, obtidos na ENTSO-E Transparency Platform(14)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde existem várias usinas hidrelétricas reversíveis em operação.

6.1 Descrição do Sistema Estudado

A estrutura do sistema elétrico considerado nas análises é apresentada na

. O modelo é um sistema simplificado caracterizado por usinas que representam a geração equivalente por tipo de fonte, assim foi estruturado um sistema fictício coerente ao propósito, com a intenção de evidenciar as diferentes opções de geração disponíveis para o despacho diário. Os efeitos da rede de transmissão não foram considerados. As condições de tensão e frequências foram consideradas estáveis dentro dos padrões normais de operação, e não afetam na decisão de despacho. Na condição de despacho horário, as afluições das usinas hidrelétricas convencional e reversível não demonstram variabilidade de vazão que possa influenciar na condição de despacho e, portanto, pode ser considerada constante, não sendo necessário esta representação como restrição de operação no modelo, conforme modelo em **Erro! Fonte de referência não encontrada.** As usinas foram estabelecidas por equivalentes de geração por tipo de fonte, com o objetivo de evidenciar a complementariedade e funcionalidade da opção de acionamento do bombeamento reverso e geração oriunda da UHR.

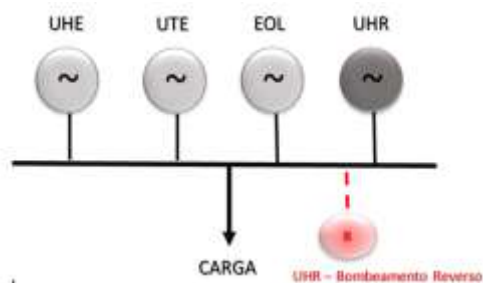


Figura 4 - Esquemático do sistema elétrico modelado.

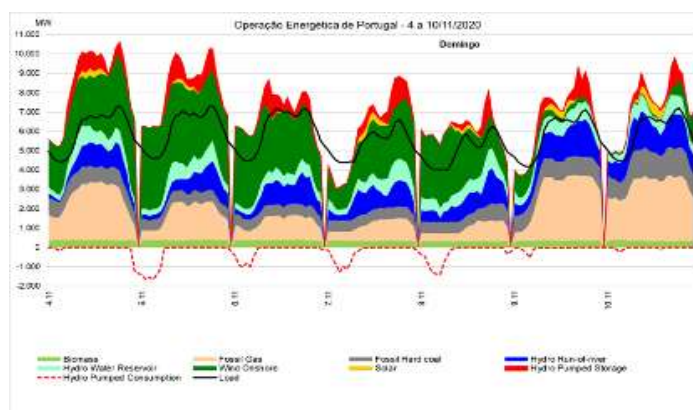


Figura 5 - Despacho Energético semanal por tipo de fonte – Portugal – confecção própria a partir de dados de (14)

O modelo simplificado se caracteriza por um modelo linearizado de produtividade energética considerando apenas os limites de geração de cada usina e a carga geral (demanda), sem tratamento de intercâmbios de potência com outros subsistemas e restrições eletromecânicas. Os limites de geração das usinas hidrelétricas (UHE), térmicas (UTE), UHR e do bombeamento reverso (UHR – B) são fixos e constantes. A geração eólica (EOL) foi escolhida para representação da presença de fonte intermitente de geração. O critério desta decisão baseou-se na condição de maior participação desta frente a geração fotovoltaicos na matriz energética brasileira.

6.2 Dados de Referência

Os dados utilizados como referência para a elaboração do estudo de caso foram definidos conforme dados obtidos em (14)**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a partir de informações de despacho diário das usinas dos países: Alemanha, Áustria, França, Itália e Portugal. Os dados são referentes a semana de 04 a 10 de novembro de 2020, indo de uma quarta-feira até uma terça. Países, tais como França e Itália, que embora a matriz energética seja

predominantemente composta por usinas térmicas (convencionais e nucleares), percebe-se a influência da inflexibilidade das fontes eólicas e solar em confronto ao perfil de demanda. Na avaliação destes dados, notou-se que o bombeamento é uma opção para o controle do despacho que evita a restrição de geração, auxiliando na modulação de carga quando o consumo local/interno e intercâmbios, não absorveria a produção energética total. Uma análise mais concisa e aprimorada do comportamento da operação e despacho das usinas reversíveis europeias pode ser elaborado se houver mais informações sobre as condições de intercâmbios de potência e variação do preço da energia comercializada no intervalo de tempo. Isto se faz necessário para entender a dinâmica de decisão do acionamento do bombeamento e geração advinda das UHRs. Esta afirmativa é válida pois em alguns casos, nota-se que, possivelmente, a influência de critério econômico no acionamento do bombeamento e atuação da geração da UHR, que pode ser gerencialmente autônomo por parte do agente ou uma decisão sistêmica, relacionada à operação sistêmica segura. O perfil de despacho de Portugal (Figura 5) foi eleito como a referência principal na definição dos dados do caso base deste trabalho, por ser um perfil similar à situação esperada para o Brasil.

6.3 Modelo Matemático do Problema

O modelo da Eq. 1 tem sua função objetivo definida para minimizar o custo total da operação hidrotérmica para o despacho econômico da energia básica e sem reservas operativas para atendimento da demanda, com as simplificações já explicadas, seguindo o esquema da Figura 4. A estrutura do modelo é baseada na condição de otimalidade horária do despacho, conforme a aplicação da teoria de Programação Linear. Uma rotina computacional foi implementada em MATLAB®. O custo diário total foi a soma dos custos ótimos para cada hora do dia.

$$\text{Custo}_{\text{diário}} = \sum_{h=1}^{24} \text{Min} (G_{\text{UTE}_h} \cdot \text{TAR}_{\text{UTE}}) \quad \text{Eq. 1}$$

s.a.

$$\begin{aligned} G_{\text{UHE}_h} + G_{\text{UTE}_h} + G_{\text{EOL}_h} + G_{\text{UHR}_h} - B_{\text{UHR}_h} &\leq L_h \\ G_{\text{UTE}}^{\min} &\leq G_{\text{UTE}_h} \leq G_{\text{UTE}}^{\max} \\ G_{\text{UHR}}^{\min} &\leq G_{\text{UHR}_h} \leq G_{\text{UHR}}^{\max} \\ B_{\text{UHR}}^{\min} &\leq B_{\text{UHR}_h} \leq B_{\text{UHR}}^{\max} \\ G_{\text{EOL}} &= G_{\text{EOL}_h} \\ G_{\text{UHE}} &= G_{\text{UHE}_h} \end{aligned}$$

Sendo:

G_{UHE_h} : geração hidrelétrica despachada por hora (MW)	B_{UHR_h} : potência do bombeamento reverso
G_{UTE_h} : geração termelétrica despachada por hora (MW)	por hora (MW)
G_{EOL_h} : geração eólica registrada por hora (MW)	TAR_{UTE} : Tarifa da geração termelétrica (R\$/MW)
G_{UHR_h} : geração da hidrelétrica reversível por hora (MW)	min: Limite mínimo
L_h : demanda por hora (MW)	max: Limite máximo

O pilar do modelo proposto é o horizonte temporal composto por 24 horas (1 dia completo), que permite a simplificação de não considerar as restrições de nível dos reservatórios, pois a variação dos volumes dos reservatórios ou aflúências médias são muito pequenas que não representam influência na decisão do despacho, efetivamente. Vale ressaltar que a energia eólica e a hidrelétrica têm custos fixos, diferentemente das térmicas. Os limites de potência foram estipulados para as variáveis contempladas. O critério de definição do valor limite máximo de consumo (MW) do bombeamento reverso (1600 MW) adotado foi 15% maior que o limite máximo de potência de geração da UHR (1400 MW). O valor de tarifa da energia térmica despachada foi fixado, baseado na média dos valores limites mínimo e máximo de PLD definidos pela Resolução Homologatória ANEEL nº 2.655/2019.

7.0 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção serão apresentadas as simulações realizadas e os resultados obtidos. O caso base hidrotérmico com presença de geração eólica não possui a UHR como opção de geração ou de manobra operativa para a modulação carga-geração. As simulações contemplam variações do caso base, inclusive, considerando a inserção da UHR ao sistema. Essas simulações têm o objetivo de avaliar o custo da operação de despacho horário ao longo de 24 horas diárias para observar a versatilidade operativa da UHR. Não houve avaliação de nenhum tipo de modelo de remuneração para a UHR.

7.1 Simulações

O caso base define uma condição de despacho sem a UHR, com todas as características definidas como descrição anterior (seção 6.0). Este é a referência para a análise comparativa a fim de identificar a influência da UHR no despacho. Os perfis de geração e carga horária do sistema estudado (

Erro! Fonte de referência não encontrada.), para a situação sem e com UHR, durante um dia, é mostrado na Figura 6. Nesta figura é possível verificar a complementariedade característica do despacho hidrotérmico existente entre a geração da UHE e UTE. Aliás, com a participação da UHR, nota-se outro elemento de participação ativa no despacho: o bombeamento reverso realizado que auxilia a modulação da carga frente à produção de energia

disponível, podendo também ocorrer em simultaneidade à geração da UHR. Isto é destacado no círculo vermelho da Figura 6.

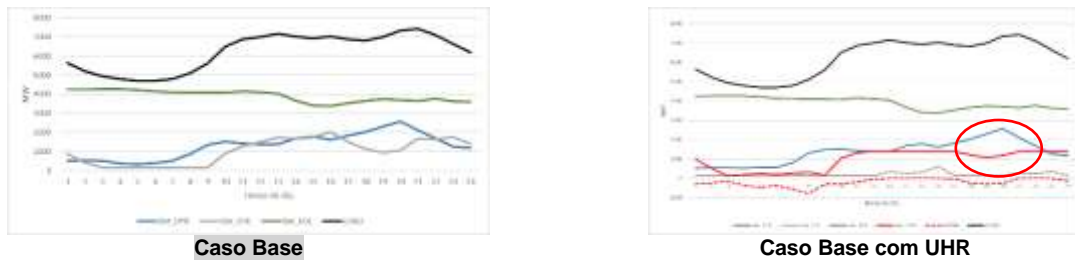


Figura 6 - Despacho e Demanda [MW]

A tarifa da geração térmica adotada é R\$ 194,50/MWh. O custo diário do despacho foi de R\$ 4.728.295,01, no caso base. Para o caso com a UHR, este valor foi R\$ 968.999,00. O custo da operação para o caso com UHR equivale a 20,49% do custo total encontrado para o caso base, sem que houvesse modificação da produção da geração eólica e hidrelétrica, e limites operativos aplicados. A capacidade aumentada do recurso hídrico é benéfica à formação de preço do sistema e pode contribuir para diminuir a requisição de GFOM, ajudando a reduzir o encargo de serviço do sistema – ESS.

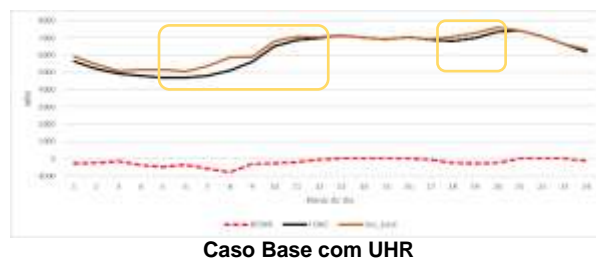


Figura 7 – Modulação Carga/Geração [MW]

Outra importante constatação é ilustrada com o gráfico da Figura 7. Neste gráfico é mostrado que houve momentos (retângulos em amarelo) de excedente de geração ocasionados pela geração eólica, quando a demanda do consumo não foi capaz de absorver. Assim, o bombeamento reverso da UHR é acionado para ajustar a demanda e não haver corte de geração. Neste caso, o sistema teve a necessidade de aumentar a carga. Analogamente, numa situação de operação real, o acionamento do bombeamento pode mitigar a restrição ou deslocamento de geração devido à inflexibilidade das fontes intermitentes.

8.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho é uma análise objetiva, considerando um modelo matemático para o despacho hidrotérmico com a participação das UHRs. Para tanto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para orientar a estrutura de modelagem do problema e a elaboração do caso base. Pouca e quase nenhuma informação sobre o tema em específico foi encontrada. Logo, a estratégia foi procurar situações de despacho real em países que possuem UHRs em operação e material técnico sobre o modelo de despacho hidrotérmico para possibilitar a formação do estudo de caso de forma eficiente. O caso base é bem fundamentado na forma conceitual do modelo matemático linear otimizado para o despacho hidrotérmico clássico. Não se identificou nenhum fator de impedimento à adoção do modelo de despacho hidrotérmico sem restrições de reserva operativa de geração. A ideia central foi tentar identificar possíveis benefícios operativos para a formação de preço com inserção da UHR, como opção de geração ou de manobra operativa para a modulação carga-geração. A adaptação do modelo clássico de despacho hidrotérmico estrutura-se em restrições fixas relacionadas a limites de geração para os geradores, com sistema tipo barra infinita, sem considerar o sistema de transmissão (intercâmbios e nível de escoamento) e as características eletromecânicas envolvidas no despacho dos equivalentes de geração. Buscou-se definir um caso base equilibrado às condições reais de produção e programação da geração por fonte, adequadamente à técnica de otimização linear.

O foco temporal das análises e modelagem foi a base horária de um dia inteiro de operação do sistema estudado, dentro de uma abordagem econômica, que demonstrou o caráter mandatório do despacho termelétrico no custo da operação e a benéfica contribuição da UHR para a diminuição do mesmo. O sistema europeu se demonstrou uma boa referência para este estudo de caso devido a algumas características do seu despacho diário, que poderiam ser adaptadas ao caso do despacho brasileiro e facilitam o entendimento da operação das UHRs, principalmente nas análises econômicas do custo da operação sistêmica hidrotérmica.

Além disso, a UHR se demonstrou uma boa ferramenta para modulação da carga, quando o bombeamento auxilia a evitar a não restrição da geração eólica, numa situação de excesso de geração onde constata-se a versatilidade para o tratamento das inflexibilidades das diversas fontes de geração e resposta da demanda. Este último fato pode sinalizar uma boa oportunidade de solução para o tratamento dos impactos negativos da geração eólica ou solar nos

sistemas elétricos. A inflexibilidade das fontes renováveis intermitentes requer a adaptação do modelo geral de despacho e este tipo de geração deve ser incorporado de forma mais integrada à operação do SIN.

De forma geral, o maior entrave observado é o entrave regulatório devido à falta de um modelo econômico que atraia os investimentos num contexto de mercado privado, e até mesmo regulado. Várias são as vantagens da inserção das UHRs na despachabilidade dos sistemas elétricos no Brasil e no mundo, trazendo benefícios sistêmicos de alívio na modulação da carga e gerenciamento das inflexibilidades. Muita novidade para o Brasil, onde os serviços ancilares são compulsórios, sem remuneração, ou remunerados pelo investimento da adequação da instalação para este tipo de serviço.

O prognóstico do uso das UHRs no Brasil é favorável, na medida em que os desafios regulatórios forem vencidos, já que a tecnologia de usinas hidrelétricas é dominada. As UHRs podem vir a oferecer ao SIN: reforços de capacidade e energia ao SIN; alívio para a transmissão; sustentabilidade das usinas hidrelétricas existentes, oportunidades de modicidade tarifária, redução do PLDh, e serviços ancilares que asseguram a confiabilidade do sistema, principalmente em relação à interferência instantânea das fontes eólicas e solares em amplo crescimento na Rede Básica e como geração distribuída na Rede de Distribuição.

Por fim, o estudo de caso montado e simulado mostrou-se satisfatório para as análises e, pode ser referência para estudos mais aprofundados e mais elaborados no futuro, incorporando maior complexidade ao modelo e tornando-o mais completo.

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Innovation landscape brief: Innovative operation of pumped hydropower storage", IRENA, Abu Dhabi, 2020;
- (2) CASTRO, N.; BRANDÃO, R.; HUBNER, N.; DANTAS, G.; ROSENTAL, RUBENS. A Formação do preço da energia elétrica: Experiências internacionais e o modelo brasileiro. Texto de Discussão do Setor Elétrico - TDSE nº 62, GESEL/IE-UFRJ, Rio de Janeiro, Novembro de 2014.
- (3) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Plano de Operação Energética 2019-2023, 1ª Edição, Publicação da Gerência Executiva de Relacionamento Institucional e Comunicação do ONS, Julho de 2019.
- (4) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Disponível em <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em 05/11/2021.
- (5) HUNT, J. D.; FREITAS, M. A. V.; JUNIOR, A. O. P.. Aumentando a Capacidade de Armazenamento Energético do Brasil. Anais do IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético CBPE - Políticas Energéticas para a Sustentabilidade, Florianópolis, Agosto de 2014.
- (6) CASTRO, N.; BRANDÃO, R.; CHAVES, A. C.; VIEIRA, C.; HUNT, J.. Os Modelos Regulatórios Internacionais de Usinas Hidrelétricas Reversíveis. Agência Canal Energia. Rio de Janeiro, 14 de agosto de 2020.
- (7) INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. 2020 Hydropower Status Report - Sector trends and insights. 2020, Disponível em: <https://www.hydropower.org/publications/2020-hydropower-status-report>. Acesso 01/11/2021.
- (8) INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2014, IEA Report, 2014. Disponível em: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2014>. Acesso 15/11/2020;
- (9) INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Global Energy Transformation: The Remap transition pathway, Background report to 2019 edition, Abu Dhabi, 2019.
- (10) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2029. MME, Brasília, 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/destaques-da-home/pde-2029https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>. Acesso em 16/11/2020.
- (11) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2030. MME, Brasília, 2021. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/destaques-da-home/pde-2029https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>. Acesso em 03/03/2021.
- (12) HUNT, J. D.; FREITAS, M. A. V.; JUNIOR, A. O. P. Enhanced-Pumped-Storage: Combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil. Elsevier, October, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.038>. Acesso: 10/10/2020.
- (13) INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. Prioridades para a integração das fontes renováveis variáveis no sistema elétrico; IEMA, Novembro de 2016. Disponível em: http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/01/NT_integracao_final.pdf. Acesso em 08/12/2020.
- (14) ENTSO-E. <https://www.entsoe.eu/>. Acesso em 11/11/2020.

- (15) LESCANO, G. M. A. Um modelo de despacho econômico para reservas operativas. Dissertação de Mestrado, Depto. de Engenharia de Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, Campinas, Agosto de 2004.

DADOS BIOGRÁFICOS



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.



(2) MIRIAN ADELAIDE RENNO RIBEIRO COSTA PINTO

Graduada em engenharia mecânica, em 1978 e pós-graduada em Máquinas de Fluxo, pela UNIFEI. Foi professora na UNESP/Ilha Solteira de 1981 a 1985. Atuou na CESP de 1986 a 2000 e, de 2001 a 2007, integrou a área de programação diária/mensal do SIN do ONS. Entre 2008 e 2018, foi especialista em planejamento energético da CESP e EMAE, e desde 2011 desenvolve projetos de P&D em parceria com USP, UNIFEI, UNICAMP e UFRJ. Desde 2001 é diretora da HEDAIDI ENGENHARIA, consultoria e projetos de Pesquisa e Desenvolvimento para o setor elétrico.