



## Grupo de Estudo de Planejamento de Sistemas Elétricos-GPL

### USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS NO CONTEXTO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

**CAMILA VIEIRA COLOMBARI(1); MURILO CARDOSO DE MIRANDA(2); GABRIEL MALTA CASTRO(3);  
ROBERTO DE CARVALHO BRANDÃO(4); NIVALDE DE CASTRO(5);  
GESEL/UFRJ(1);GESEL/UFRJ(2);GESEL/UFRJ(3);GESEL/UFRJ(4);GESEL/UFRJ(5);**

#### RESUMO

A mudança no paradigma no setor elétrico tem trazido preocupações no âmbito da confiabilidade energética. O receio com a falta de suprimento tem levado a busca de novas formas de armazenamento de energia, destacando-se as Usinas Hidroelétricas Reversíveis. O presente trabalho busca analisar os papéis estratégicos de UHR sazonais conectadas ao Sistema Interligado Nacional e verificar os possíveis ganhos atribuídos ao sistema. Foram realizadas simulações computacionais utilizando o programa *Plexos*. As simulações mostraram que essa tecnologia se torna interessante, pois funciona também como elemento de modulação dos recursos hídricos capaz de melhorar o desempenho do sistema como um todo.

#### PALAVRAS-CHAVE

Usinas Hidroelétricas Reversíveis, Armazenamento de Energia, Serviço Ancilar de Energia Elétrica, Modulação de recursos hídricos.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

O mundo está passando por um período de transição energética e as mudanças no setor elétrico têm sido cada vez mais presentes. Destaca-se a forte tendência da “descarbonização”, ou seja, a utilização de fontes alternativas de energia que não utilizam combustíveis fósseis, como a energia eólica e a solar. Outra mudança aparece na modernização dos equipamentos elétricos que estão cada vez mais automatizados, criando um estado de digitalização do setor elétrico, mais comumente conhecido como *smart grids*. Além disso, outro paradigma vem sendo rompido com a utilização de unidades de geração distribuída, criando um fenômeno de descentralização das fontes de energia estando elas cada vez mais próximas dos centros de carga.

No Brasil essa mudança está acontecendo cada vez mais rápido. O sistema eletro energético brasileiro é caracterizado pelo seu grande potencial hidroelétrico. Por muito tempo a presença de usinas com grandes reservatórios de água garantiram a confiabilidade e a segurança no suprimento de energia para o país. Entretanto, as grandes usinas geralmente se encontram afastadas da região sudeste, aonde está localizada a maior parcela da carga do sistema. Isso exige extensas linhas de transmissão para ligar as fontes e os consumidores.

Usinas hidroelétricas com grandes reservatórios de armazenamento causam um significativo impacto socioambiental, seguindo a tendência mundial por empregar fontes de energia que causem menos danos ao meio ambiente, houve uma diminuição na construção desse tipo de usina. Com isso, os projetos de construção de usinas hidroelétricas a fio-d'água, que causam um impacto socioambiental menor, se tornaram cada vez mais comuns, como são os exemplos das usinas dos rios Madeira, Teles Pires e Xingu.

Usinas hidroelétricas a fio d'água possuem pequenos reservatórios, com capacidade de armazenamento de energia de poucos dias, apresentam um ciclo de operação sazonal, tendo uma capacidade de geração maior no período úmido e menor em épocas de seca, o que diminui a confiabilidade energética do país. Concomitantemente a isso, o sistema elétrico nacional apresenta um aumento exponencial de fontes intermitentes de energia como a solar e a eólica, devido principalmente a diminuição do custo de implementação

dessas fontes e seu elevado potencial energético no país. Essas fontes de energia diminuem a confiabilidade e a segurança no suprimento de energia pois é muito difícil prever e garantir a quantidade de energia que será gerada no curto prazo.

Toda essa problemática enfrentada pelo sistema elétrico dificulta o planejamento da operação pelos órgãos responsáveis (ONS, Operador Nacional do Sistema) e cada vez mais tem sido necessário o acionamento de termoeletricas para atender a demanda de ponta do sistema, quando está baixo o nível de afluência dos rios e devido ao aumento da presença das fontes intermitentes como a energia eólica.

Devido a essa mudança de paradigma do setor elétrico brasileiro busca-se soluções para garantir a continuidade do suprimento de energia no país para compensar o aumento das fontes intermitentes. A EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas) mostrou essa preocupação adicionando no plano decenal de expansão de energia (PDE 2027) a previsão de 13GW de tecnologias de armazenamento ou termoeletricas de ciclo aberto. Dentre estas alternativas, o presente estudo pretende aprofundar no tema do armazenamento, especificamente, no armazenamento feito por usinas hidroelétricas reversíveis (UHR).[1]

A utilização de UHRs no SIN pode aumentar a confiabilidade e segurança energética do país com um reduzido custo de operação já que essas usinas têm partida rápida e podem suprir energia em momentos de alta demanda. Além disso, esse tipo de usina pode ser empregado na regulação de frequência, ou seja, além de ser uma forma econômica de produção de energia, ela provê também serviços auxiliares à rede.[2]

Recentemente a EPE mostrou interesse na utilização dessa nova tecnologia de armazenamento elaborando um estudo de inventário com possíveis pontos para a construção de UHR no estado do Rio de Janeiro. Foi mapeado no total cerca de 15 sítios viáveis para a construção dessas usinas no estado com capacidade instalada de geração de cerca de 21GW.[3]

As UHRs são fontes hidroelétricas de energia que permitem armazenar água em horários com pouca demanda e produzir energia em horários de ponta. Para isso ela apresenta dois reservatórios, um superior e um inferior. A água é turbinada do reservatório superior para o inferior para produzir energia e bombeada do reservatório inferior para o superior para armazenar energia.[2]

Acredita-se que as UHRs são a melhor forma de armazenamento de energia em grande escala no mundo, permitindo uma segurança energética em horários ou períodos de maior demanda [2]. No entanto, elas podem ser consideradas também como consumidoras líquidas de energia, isso porque há um consumo de energia para fazer o bombeamento da água do reservatório inferior para o superior, que é maior do que a energia produzida quando esse volume de água é turbinado.

O consumo de energia gerado pelas UHRs é justificado pelos ganhos energéticos sistêmicos e operacionais proporcionados ao sistema, de forma que ela não pode ser analisada de uma forma isolada, mas como uma parte integrada do sistema. Logo, os benefícios sistêmicos gerados por essa tecnologia podem ser superiores ao seu custo propriamente dito, viabilizando a inserção dessas usinas no sistema elétrico.

Essas usinas podem ser classificadas de acordo com o seu ciclo de operação como plurianual, sazonal, semanal/mensal e diário. Nos ciclos mais curtos, semanal/mensal e diário, a água é armazenada nos períodos de menor demanda de energia na rede elétrica e turbinada em períodos de ponta, quando o sistema está sobrecarregado. Já as UHRs plurianuais e sazonais possuem ciclos longos, armazenando água durante o período do ano com estações úmidas e turbinando em estações secas.[4]

No Brasil, os recentes eventos climatológicos que culminaram na crise hidrológica evidenciaram a fragilidade da matriz energética em relação a escassez do recurso hídrico. A predominância da expansão por usinas à fio d'água reduziu a capacidade de armazenamento, tornando o sistema vulnerável à forte sazonalidade das chuvas no país. Nesse sentido, as UHRs, sobretudo, as de ciclo sazonal, surgem como uma importante alternativa tecnológica para aumentar a segurança de suprimento energético no Brasil.

A consequência disso é a utilização de outras fontes de energia consideradas mais caras para suprir a demanda durante os períodos secos, como por exemplo as termoeletricas. Portanto, é importante destacar que a utilização de UHRs durante esses períodos de estiagem pode contribuir economicamente na redução do custo de operação do sistema, uma vez que seu custo de operação é inferior ao das termoeletricas. Para esta prática são indicadas as UHR sazonais e plurianuais, as quais possibilitam armazenar energia mesmo ao longo do período seco.

Neste contexto, o objetivo do trabalho é analisar o papel estratégico das usinas hidroelétricas reversíveis, com base no potencial de contribuição desta tecnologia para o sistema elétrico brasileiro. Além disso, o estudo pretende mapear os desafios e apontar possíveis direcionamentos para inserção destas usinas no país.

## 2.0 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

### 2.1 - Metodologia

A metodologia do trabalho consiste na simulação do sistema elétrico brasileiro com e sem a implementação de uma UHR. Como referência da análise, o estudo considerou como estrutura básica a configuração do SIN estabelecida no Plano Decenal de Energia 2022, elaborado pela EPE [5]. Para a simulação do sistema, optou-se pelo software Plexos® *Energy Model*.

O Plexos é um modelo de planejamento energético integrado destinado à otimização do mercado de energia elétrica com simulação integrada aos sistemas de gás natural e água, desenvolvido pela Energy Exemplar, sediada na cidade de Adelaide, Austrália. A modelagem utiliza programação linear ou inteira mista, estocástica ou determinística e os módulos de simulação permitem executar análises de longo, médio e curto prazos [6].

A escolha por utilizar o Plexos ocorre devido sua capacidade de fornecer resultados para o planejamento em diferentes horizontes temporais, possibilitando o cálculo de despacho ótimo com resolução horária e, ao mesmo tempo, considerando as restrições de atendimento no médio/longo prazo. Além disso, os resultados podem ser obtidos por região, a simulação considera a estocasticidade das fontes de energia e representação dos elementos da rede, como usinas, é feita de forma individualizada [7]. Dito isso, a avaliação final detalha o comportamento de todos os elementos do sistema, o que possibilita analisar o desempenho individual da UHR a ser implementada, bem como o benefício sistêmico que ela pode oferecer.

Por conseguinte, a modelagem proposta por este trabalho consiste na simulação de Médio e Curto Prazo do mercado de energia brasileiro em 2022. Ou seja, o modelo executa a modelagem de Médio Prazo olhando para o horizonte de final do ano de 2022, no intuito de minimizar os custos totais, sujeito a restrições temporais ao longo do ano. Com isso, são estabelecidos os parâmetros necessários para iniciar a modelagem de Curto Prazo de todos os dias de 2022, de forma cronológica e garantindo que ao longo do percurso os parâmetros definidos pelo Médio Prazo sejam atendidos.

Estes parâmetros definidos pela simulação de Médio Prazo informam o aproveitamento ótimo da água nos reservatórios de acumulação do SIN. Para efetuar este cálculo, são necessárias algumas simplificações. Por exemplo, para este estudo, adotou-se uma curva de carga representada por 6 patamares de carga por semana, com estágios da simulação definidos por ano. Assim, eventuais complexidades operativas não são capturadas pelo modelo, mas não o impedem de alcançar uma aproximação válida.

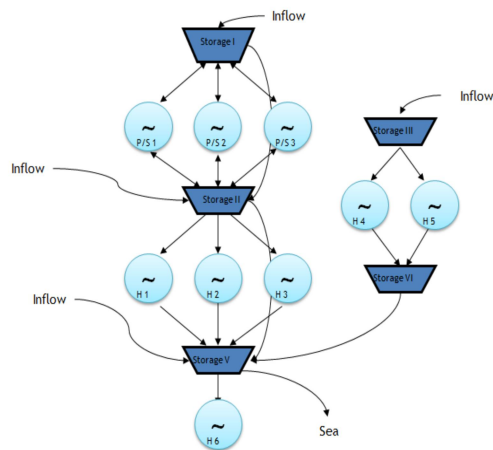
Entretanto esta aproximação permite definir uma política operativa que é repassada à simulação de Curto Prazo, através do valor da água ou através de metas de nível de armazenamento, com penalidades no caso de não atingimento da meta. A partir disso, o modelo de Curto Prazo realiza a simulação cronológica, considerando restrições mais detalhadas da operação do sistema [8].

Para este estudo foi considerada uma discretização de intervalos de 3 horas de resolução, sendo executado de forma a considerar o comportamento do sistema 6 dias a frente. Importante mencionar que nesta etapa da modelagem, são consideradas as restrições de inflexibilidade operativa, de volume dos reservatórios, de tempo de viagem da água entre os reservatórios. Portanto, na próxima subseção é detalhada como foi realizada a representação completa do SIN e da UHR propostas

### 2.2 Representação do SIN e da UHR proposta

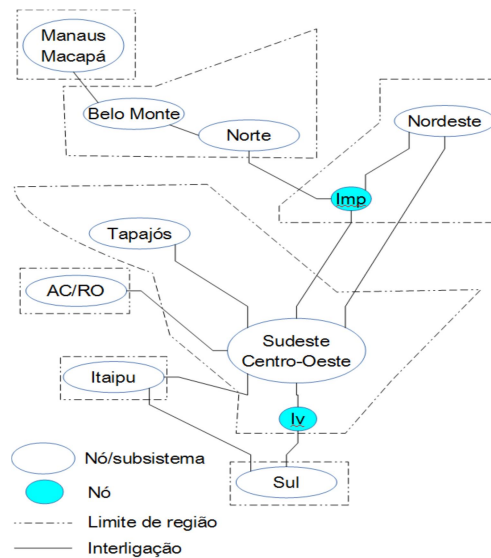
A modelagem do SIN utilizada para este estudo baseia-se no trabalho desenvolvido por Castro (2015). [9] Neste trabalho o autor, realiza o estudo de viabilidade da implantação de usinas heliotérmicas no Brasil. Para isso, foram utilizados dados do PDE2022, dados de entrada do Newave e o registro de informações das usinas no ONS, entre outras informações, para simular o sistema brasileiro.

A forma de representação do sistema no Plexos consiste na inserção dos elementos e as informações por meio das configurações de *Objects*, *Memberships* e *Properties*. *Objects* define os objetos ou elementos presentes na rede, *Memberships* define os relacionamentos existentes entre os objetos e *Properties* são as informações e parâmetros relativos a cada objeto [10]. A Figura 1 apresenta o esquema de representação dos componentes no Plexos, note que cada UHE pode ser representada por objetos geradores relacionando-se com objetos reservatórios e objetos canais de água, desta forma, constrói-se a cascata do sistema considerando o tempo de viagem de água entre uma usina e outra. Os dados hidrológicos foram inseridos considerando o histórico de aflúncias de 82 anos (1931 a 2012), os quais foram agregados em oito cenários hidrológicos de séries sintetizadas no Plexos.



**Figura 1: Representação da modelagem hídrica no Plexos. Fonte: [11]**

A Figura2 apresenta o esquema utilizado para representação do SIN. Castro (2015) definiu a Transmissão em 14 linhas conectadas a 11 nós em 7 regiões. As restrições de capacidade de intercâmbio entre os nós foram obtidas do PDE e o autor destaca a necessidade de representar as usinas de Itaipu, Belo Monte e Tapajós separadamente por conta da forte característica sazonal inerente a geração de energia destas usinas. Por fim, optou-se por considerar a geração eólica como determinística e reduzida em 5 sub-regiões representativas, uma vez que a incorporação da estocasticidade desta fonte exigiria um esforço de levantamento de dados e de cálculo computacional que não estão no escopo deste trabalho.



**Figura 2: Representação do SIN. Fonte: [9]**

Após concluir a reprodução do sistema elétrico brasileiro, é realizada a inserção dos elementos relativos a implementação da UHR no sistema modelado. Para a UHR, o Plexos formula um problema de otimização para decidir quando liberar e bombear a água, a partir da definição das *Properties* de bombeamento para um *Object* gerador que esteja relacionado (*Membership*) a um *Object* reservatório superior e um *Object* reservatório inferior. A Figura3 apresenta o esquema de relacionamento entre os objetos que configuram este elemento no Plexos, destacando a perda de eficiência da usina em função do bombeamento.

Para este trabalho, foi dimensionada uma UHR com os seguintes dados: Volume máximo de 81018 CMD, Queda máxima de 460m, Queda mínima de 340m, Potência máxima de 6.670MW e Eficiência de bombeamento de 80%. O local de instalação desta usina é descrito na definição dos cenários analisados, realizada na próxima seção.

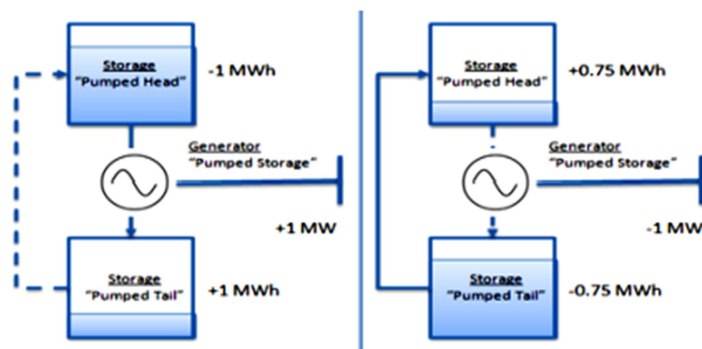


Figura 3: Esquema de uma UHR no Plexos. Fonte: [11]

### 3.0. RESULTADOS

Com base na metodologia apresentada, foram estabelecidos 3 cenários para avaliar os resultados do modelo. Conforme mencionado, o horizonte de estudo considera a configuração do sistema elétrico brasileiro descrita no PDE2022. Com isso, o cenário base de referência para o estudo consiste na execução dos modelos de Médio e Curto Prazo (MT e ST) do Plexos buscando reproduzir a operação do sistema nesta estrutura planejada, na qual não há nenhuma UHR implementada.

A partir do cenário base, os cenários seguintes consideram a mesma configuração, porém incluindo a existência de uma UHR no sistema. O segundo cenário, denominado “com UHR”, supõe a implantação de uma UHR sazonal de ciclo fechado, conectada ao nó Sudeste do sistema. Por sua vez, o terceiro cenário, denominado “UHR em cascata”, supõe a implantação da UHR associada ao reservatório da Usina Hidrelétrica de São Salvador, localizada na região Sudeste.

Portanto, o que diferencia estes dois últimos cenários é a forma de implementação da UHR no sistema. Enquanto no cenário com UHR a usina opera apenas contribuindo para o armazenamento e o despacho de energia, no cenário UHR em Cascata, a usina ainda contribui na regularização das vazões no rio ao qual ela está implementada. No primeiro caso, é indiferente a localização da UHR pois ela não irá afetar a cascata de nenhum rio, já no segundo caso, o relacionamento da usina com o reservatório de São Salvador é estabelecido por meio de um canal com vazão máxima de 1450 m³/s e tempo de viagem de 0,1 horas.

Os resultados mostram que a tecnologia de usinas reversíveis se torna interessante para sistemas de base hídrica porque ela funciona não só como uma tecnologia de armazenamento de energia, mas também como elemento de modulação dos recursos hídricos capaz de melhorar o desempenho do sistema como um todo. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as simulações de Médio Prazo nos três cenários. Os resultados mostram os valores de geração, exportação e preço da energia para cada região do país e o valor total destes indicadores para o sistema. De maneira geral, nota-se que os efeitos não foram muito significativos entre os cenários, porém sendo possível notar uma redução nos preços em todas as regiões.

Tabela 1: Resultados do Médio Prazo para todos os cenários

Região	Médio Prazo - Referência			Médio Prazo – Com UHR			Médio Prazo – UHR Cascata		
	Geração	Exportação	Preço	Geração	Exportação	Preço	Geração	Exportação	Preço
	(TWh)	(TWh)	(R\$/MWh)	(TWh)	(TWh)	(R\$/MWh)	(TWh)	(TWh)	(R\$/MWh)
Acre	41,46	34,67	120,53	41,46	34,67	119,14	41,46	34,67	117,16
Itaipu	72,1	58,96	119,88	72,1	58,97	118,61	72,1	58,97	116,66
Manaus	16,34	0,1	113,33	16,34	0,1	111,69	16,34	0,1	109,88
Nordeste	107,39	-14,47	112,09	107,14	-14,72	110,54	106,99	-14,87	108,78
Norte	106,9	56,29	112,21	106,9	56,29	110,65	107,57	56,96	108,89
Sudeste	358,6	-115,79	120,27	359,33	-115,38	118,93	359,17	-115,45	116,97
Sul	109,64	-19,76	120,05	109,47	-19,93	118,75	109,02	-20,38	116,8

<b>Sistema</b>	812,43	0	118,37	812,74	0	116,98	812,65	0	115,06
----------------	--------	---	--------	--------	---	--------	--------	---	--------

Fonte: Elaboração própria

Este efeito pouco significativo no Médio Prazo já era esperado, uma vez que nesta modelagem são consideradas diversas simplificações que impedem o modelo capturar o real impacto na operação por conta da presença da UHR no sistema. Por exemplo, a simplificação temporal da curva de carga em 6 patamares semanais impossibilita quantificar a contribuição da UHR no atendimento a carga instantânea. Com isso, o Médio Prazo serve apenas como referência para os cálculos do Curto Prazo, os quais de fato mostram esta atuação da UHR.

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 2, primeiramente, nota-se que o fato da simulação de Curto Prazo realizar uma modelagem mais detalhada do sistema acarreta em um maior custo para a operação do sistema em todos os cenários. Em outras palavras, ao considerar mais particularidades da operação do sistema, o modelo passa a operar com mais restrições e revela uma maior complexidade a ser precificada no custo total, a qual não é observada na simulação de Médio Prazo.

Em virtude deste maior detalhamento, os resultados do Curto Prazo permitem realizar uma análise da real contribuição da UHR no sistema. Nota-se que a redução de custo entre os cenários é ainda mais acentuada. Em média, a redução de preço no Curto Prazo entre os cenários 1 e 3 é de cerca de 6%, enquanto que no Médio Prazo foi entorno 3%. Adicionalmente, é importante destacar o aumento de geração observado nas regiões Sudeste, Norte e Itaipu, o que indica que a UHR favoreceu a absorção da sazonalidade de geração destas regiões caracterizadas pela forte presença de usinas à fio d'água.

Tabela 2: Resultados do Curto Prazo para todos os cenários

Região	Curto Prazo - Referência			Curto Prazo – Com UHR			Curto Prazo – UHR Cascata		
	Geração	Exportação	Preço	Geração	Exportação	Preço	Geração	Exportação	Preço
	(TWh)	(TWh)	(R\$/MWh)	(TWh)	(TWh)	(R\$/MWh)	(TWh)	(TWh)	(R\$/MWh)
<b>Acre</b>	40,63	33,95	214,16	40,67	33,99	203,8	40,67	33,99	199,98
<b>Itaipu</b>	61,25	48,35	219,1	61,55	48,65	209,4	61,98	49,08	204,82
<b>Manaus</b>	16,6	0,63	193,03	16,61	0,64	183,88	16,6	0,63	180,8
<b>Nordeste</b>	116,51	-3,32	191,15	116	-3,83	183,1	115,81	-4,02	180,39
<b>Norte</b>	102,18	52,39	186,58	102,08	52,29	177,56	102,76	52,97	174,63
<b>Sudeste</b>	345,5	-121,33	212,34	350,46	-120,72	202,04	349,62	-121,38	198,25
<b>Sul</b>	116,63	-10,67	213,7	116,28	-11,02	203,67	116,02	-11,28	199,34
<b>Sistema</b>	799,3	0	207,52	803,65	0	197,71	803,47	0	194,05

Fonte: Elaboração própria

Para entender como se dá esta redução de custos em função da implementação da UHR, as

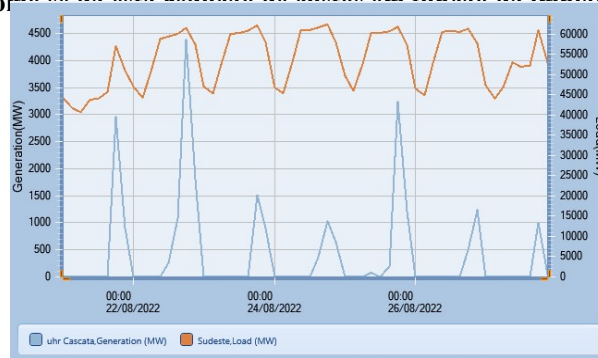
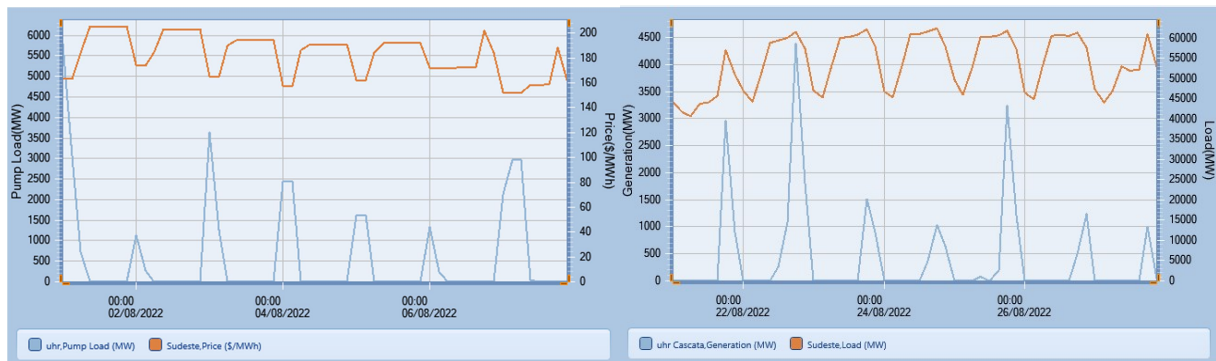
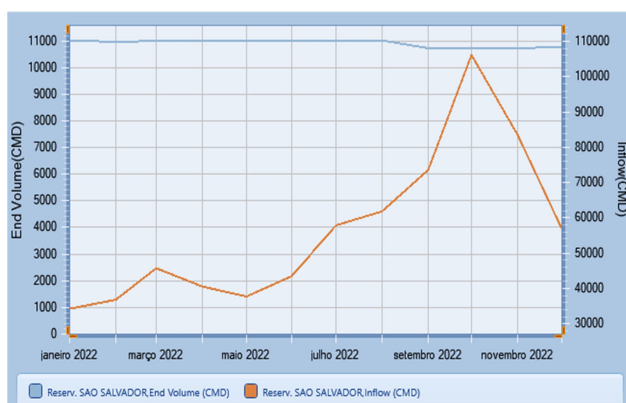


Figura4 apresenta a operação da UHR simulada no Plexos em uma semana típica do ano. O nível de detalhamento semanal permite observar o funcionamento da UHR, acionando o bombeamento exatamente nas horas de menor preço da energia no sistema. Por sua vez, a geração da UHR ocorre para o atendimento de ponta da curva de carga, ou seja, no momento de maior demanda e conseqüentemente maior preço da energia.



**Figura 4: Operação e Geração da UHR. Fonte: Elaboração própria**

Portanto, no momento de maior demanda do sistema, a UHR opera gerando energia mais barata em substituição à fonte mais caras, e com isso minimizando o custo da operação. Além disso, conforme mencionado, a operação em cascata da UHR permite otimizar os recursos hídricos das usinas associadas ao mesmo rio. Com isso, o impacto da sazonalidade hidrológica nestas usinas é menor e é possível gerar mais energia hídrica para o sistema.

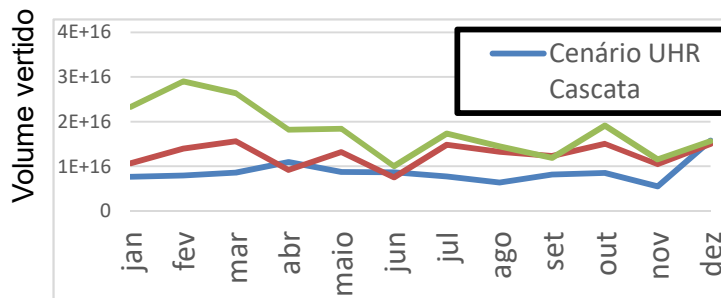


As Figura 5 revela como a UHR consegue garantir esta contribuição a estas usinas. Ao possibilitar a regularização da vazão na cascata, o Cenário UHR em Cascata aumenta a afluência de vazões no reservatório da UHE São Salvador, além de melhorar a operação do reservatório em termos de volume. Através das figuras, fica evidente como a curva referente ao volume do reservatório (linha azul) percorre de forma suave ao longo do ano em comparação à curva do cenário base.



**Figura 5: Volume e vazão afluente no reservatório de São Salvador caso base (esquerda) e caso com a UHR em cascata (direita). Fonte: Elaboração própria.**

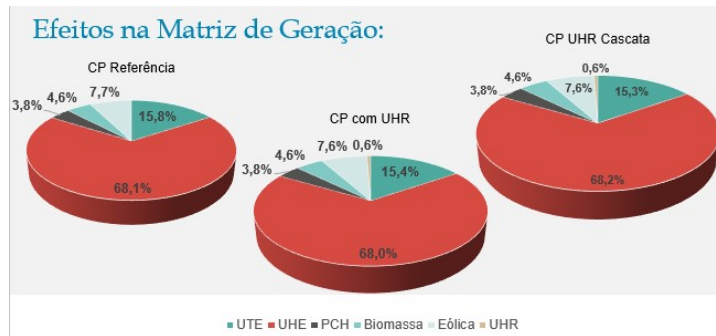
Por conta deste papel estratégico da UHR para a operação das usinas em cascata, os resultados mostram que este cenário tende a reduzir o vertimento total de água do sistema ao longo do ano. Esta redução é demonstrada na Figura 6, na qual o cenário sem a UHR aparece com o maior volume vertido em todos os meses do ano.



**Figura 6: Vertimento das UHE nos três cenários. Fonte: Elaboração própria**

Em consequência deste efeito, este trabalho encerra a apresentação dos resultados demonstrando o impacto da implantação da UHR na matriz de geração de energia por fonte de cada cenário. Por meio da Figura 7, nota-se a partir do segundo cenário a inclusão da participação de 0,6% na geração referente a UHR implementada no estudo. Este percentual é majoritariamente retirado da geração térmica, ou seja, a UHR atua no sistema em substituição a geração de fontes mais caras e poluentes.





**Figura 7: Matriz de geração por fonte para cada cenário. Fonte: Elaboração própria**

Vale ressaltar também, que, além das térmicas, no segundo cenário a geração da UHR assume uma pequena parte da geração hidrelétrica. No entanto, quando esta UHR é implementada em cascata, caso do terceiro cenário, o efeito sobre a geração hidrelétrica é oposto. Ou seja, ao invés de retirar uma participação da geração hidrelétrica por ocupar um espaço deste tipo de geração na operação, a UHR tende a potencializar a geração das hidrelétricas e aumentar a participação desta fonte na matriz.

#### 4.0 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, fica evidenciado o benefício sistêmico das UHRs implementadas com a operação em cascata no SIN. Este benefício é demonstrado no trabalho por conta da melhora na operação das usinas da cascata, do aumento da geração hidrelétrica, pela substituição da geração térmica e, conseqüentemente, pela redução do custo operacional do sistema. Apesar de não estar contemplado no escopo de análise do estudo, vale mencionar que, além das vantagens energéticas, as UHRs podem trazer outros benefícios, como postergação de investimentos em geração e/ou transmissão, reserva girante, serviços ancilares.

Portanto, as UHRs surgem como uma alternativa interessante para lidar com os desafios da mudança de paradigma do setor elétrico brasileiro, sobretudo por ser uma opção com maior flexibilidade na escolha de locais para implementação do que as UHE. Com isso, possibilita-se contornar os entraves associados à problemática ambiental deste tipo de empreendimentos de geração de energia e promover uma alternativa com menos impacto ao meio ambiente.

Entretanto, os desafios relativos a escolha desta alternativa tecnológica ainda são bastante restritivos, a começar pela forma de planejamento de expansão do setor. O empreendimento de uma UHR trata-se de um investimento alto que precisa ser amortizado a longo prazo. No entanto, a modelagem do planejamento de longo prazo não consegue capturar o real benefício desta usinas na operação de curto prazo.

Além disso, não há uma valoração de todos os serviços que a UHR pode contribuir ao sistema e a configuração da regulação impede o desenvolvimento de modelos de negócio vantajosos para este empreendimento. Em consequência disso, torna-se fundamental o desenvolvimento de inovações regulatórias e políticas de incentivo que contemplem a solução dos impasses a entrada desta tecnologia no Brasil.

#### 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EPE, "Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2027," Rio de Janeiro - RJ, 2018.
- [2] F. A. Canales, A. Beluco, and C. A. B. Mendes, "Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas," *Rev. Eletrônica em Gestão, Educ. e Tecnol. Ambient. - Rev. do Cent. Ciências Nat. e Exatas – UFSM*, vol. 19, no. 2, pp. 1230–1249, 2015.
- [3] EPE, "Estudos de Inventários de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)," Rio de Janeiro - RJ, 2019.
- [4] N. DE CASTRO, R. BRANDÃO, J. D. HUNT, and A. C. CATOLICO, "Características e Funcionalidades das Usinas Hidrelétricas Reversíveis," 2018. .
- [5] M. M. de M. e Energia, "Plano decenal de expansão de energia 2022," 2013.
- [6] F. A. Diuana, "Estudo do Impacto da Penetração Eólica no Subsistema Sul do Brasil," UFRJ, 2017.
- [7] G. de A. Cavados, "ANÁLISE DO IMPACTO DA INTRODUÇÃO DAS FONTES INTERMITENTES NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: ESTUDO DE CASO DA REGIÃO NORDESTE," UFRJ, 2015.
- [8] P. WIKI, "Base de informações da empresa sobre o Plexos," 2016. .
- [9] G. M. Castro, "AVALIAÇÃO DO VALOR DA ENERGIA PROVENIENTE DE USINAS HELIOTÉRMICAS COM ARMAZENAMENTO NO ÂMBITO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL," UFRJ, 2015.

- [10] B. Wright, "PLEXOS Training Material - Reference and Exercises." Energy Exemplar, 2015.  
[11] F. VALBENEDITO, "Hydro Optimization in PLEXOS." Energy Exemplar, 2015.

## DADOS BIOGRÁFICOS



### CAMILA VIEIRA COLOMBARI

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP) 2017 com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) 2014. Tem experiência em Estimação de estado em Sistemas Elétricos de Potência. Atualmente atua como pesquisadora vinculada ao GESEL na área de planejamento energético.

### MURILO DE MIRANDA

Mestre em Planejamento Energético e Ambiental pela COPPE/UFRJ 2018, possui formação em Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente, pela Universidade Federal Fluminense, e especialização no exterior em Energias Renováveis, pela Universidad de Jaén, na Espanha. Possui formação técnica em Administração, pelo CEFET-RJ. Autor de artigos publicados em congressos da área de Energia e Meio Ambiente. Ao longo da carreira, atuou em diversos projetos de extensão e grupos de pesquisa científica, sempre com o foco nos temas de planejamento energético, sustentabilidade ambiental, fontes alternativas e eficiência energética.

### GABRIEL DE MALTA CASTRO

Possui graduação em Engenharia elétrica pela Universidade de Brasília (2005) e mestrado em Planejamento Energético pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2015). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica e Planejamento Energético.

### ROBERTO BRANDÃO

Coordenador da área de Geração e Mercados do GESEL. Formado em Filosofia pela PUC - Rio e Economia pela UFRJ, é mestre em Filosofia pela PUC e de Economia pela Unicamp-SP e MBA em Finanças pelo Ibmecc. Tem realizado pesquisas na área de financiamento da expansão do setor elétrico, estratégias empresariais, Project Finance no Brasil e na Europa e avaliação de investimentos de geração e transmissão de energia elétrica

### NIVALDE J. DE CASTRO

Coordenador geral do Grupo de Estudos do Setor Elétrico - GESEL. Professor Doutor do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro -UFRJ desde 1975. Leciona disciplinas na graduação e pós-graduação sobre o setor elétrico. Autor de inúmeros artigos sobre o setor, publicados em revistas e portais especializados, periódicos mais acadêmicos e no IFE, publicação do próprio GESEL. Desde 1998 publica o livro anuário Séries das empresas do setor elétrico. Em 2008 publicou em co-autoria livro sobre Bioeletricidade. Mantém intercâmbio acadêmico com Universidade do Porto, Corunha, e ISEG- Portugal. É orientador de monografias relacionadas com o setor e é orientador de professores e pesquisadores em Pós Doutorado.