

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

OPERAÇÃO ESPECIAL DE USINA HIDRELÉTRICA DURANTE SECA NO RIO MADEIRA NOS ANOS DE 2023 E 2024

Pedro de Souza Garrido Neto^{1a}; Christiane Osório Machado^{1b}; Maria de Jesus Delmiro Rocha^{1c}; Leonardo Tristão Chargel^{1d}; Simone Borim da Silva^{1e} & Rafael Barros de Castro Pereira Pinto^{1f}

Abstract: The Madeira River Basin, spanning Bolivia, Brazil, and Peru, hosts two major Brazilian run-of-river hydropower plants: Santo Antônio and Jirau. Both are key to the National Interconnected System (SIN). Between 2023 and 2024, the basin experienced an extreme drought event, intensified by climate anomalies and the El Niño pattern, leading to significantly below-average rainfall. As a result, record low streamflows were observed, requiring exceptional measures from the National Electric System Operator (ONS) to ensure energy supply, especially for the states of Acre and Rondônia. Actions included operational flexibility, new generation configurations, and adjustments in plant operation. The case highlights the influence of extreme events on the electricity sector and the need for resilient operational strategies in the face of adverse scenarios.

Keywords: Drought. Hydroelectric operation. Energy management.

Resumo: A bacia hidrográfica do rio Madeira, que se estende pela Bolívia, Brasil e Peru, abriga duas importantes usinas hidrelétricas brasileiras: Santo Antônio e Jirau. Ambas operam a fio d'água e são fundamentais para o atendimento eletroenergético do Sistema Interligado Nacional (SIN). Entre 2023 e 2024, a bacia enfrentou um evento extremo de seca, intensificado por anomalias climáticas e pela configuração do fenômeno El Niño, resultando em precipitação significativamente abaixo da média. Como consequência, foram registradas as menores vazões históricas nas usinas, exigindo do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) medidas excepcionais para manter a segurança do atendimento eletroenergético do SIN, especialmente dos estados do Acre e Rondônia. As ações incluíram a flexibilização de níveis d'água mínimos e de critérios operativos, o uso de configurações inéditas de geração e transmissão, além de adaptações nas operações das usinas. O caso destaca a influência dos eventos extremos no setor elétrico e a necessidade de estratégias operacionais resilientes frente a cenários adversos.

Palavras-Chave – Seca. Operação hidrelétrica. Gestão energética.

1) Afiliação: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Rua Júlio do Carmo, 251 – Centro, Rio de Janeiro, RJ.
E-mails: (a) pedro.garrido@ons.org.br; (b) cosorio@ons.org.br; (c) maria.delmiro@ons.org.br; (d) leonardo.tristao@ons.org.br; (e) simone.bs@ons.org.br; (f) rafael.pinto@ons.org.br.

INTRODUÇÃO

A bacia do rio Madeira é uma bacia transfronteiriça que se estende por três países da América do Sul: Bolívia, Brasil e Peru. Com uma área de drenagem de aproximadamente 1.420.000 km², é uma das maiores sub-bacias (23%) da bacia Amazônica, localizada na margem direita do rio Amazonas. A maior parte da bacia encontra-se em território boliviano e brasileiro, e em menor extensão no Peru, representando 51%, 42% e 7% da área total da bacia, respectivamente. A bacia apresenta gradientes topográficos consideráveis, desde cerca de 25 m em sua planície próxima à confluência com o rio Amazonas até mais de 4.000 m na Cordilheira dos Andes (Laureanti et al., 2024).

No rio Madeira, em seu trecho brasileiro no estado de Rondônia, encontram-se em operação as Usinas Hidroelétricas (UHEs) de Jirau e Santo Antônio que, juntas, apresentam potência instalada superior a 7.300 MW, o que corresponde a quase cerca de 7% da capacidade instalada² relacionada a hidroelétricas que integram o Sistema Interligado Nacional (SIN). Portanto, trata-se de aproveitamentos hidroelétricos importantes para o atendimento eletroenergético do SIN, notadamente nos períodos de vazões altas do rio Madeira, que ocorrem, em média, de janeiro a maio de cada ano. Além disso, a geração dessas usinas é de extrema importância para o atendimento da carga dos estados do Acre e de Rondônia.

Nos dois últimos anos (2023 e 2024), a bacia do rio Madeira experimentou condições hidrometeorológicas bastante desfavoráveis, que requereram do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável por coordenar de forma centralizada os despachos das usinas hidroelétricas que integram o SIN, a adoção de uma série de medidas que tiveram como objetivo manter a garantia do atendimento eletroenergético do SIN e, em especial, para os estados do Acre e de Rondônia.

Destaca-se, nesse contexto, que a ocorrência de eventos extremos e suas consequências em rios situados em bacias que estão na Região Amazônica são relatadas em diversos estudos, conforme apresentado por Guimbertau et al. (2013). Especificamente para a bacia do rio Madeira, constam registrados exemplos de eventos extremos relacionados à ocorrência de cheias nos anos de 1994, 2001, 2008 e 2014 (Gomes et al., 2019); e à ocorrência de secas, nos anos de 2005 (Marengo et al., 2008), 2010 (Marengo et al., 2011) e 2023 (Laureanti et al., 2024).

Este trabalho tem como objetivo relatar o evento de seca ocorrido na bacia do rio Madeira nos anos de 2023 e 2024 e as ações que foram tomadas pelo ONS e setor elétrico que contribuíram para manter o atendimento eletroenergético do SIN, em especial dos estados do Acre e Rondônia.

² Capacidade instalada de hidrelétricas em 2025 (conforme PMO de Maio/2025: 108.182 MW. Fonte: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>, acesso em maio de 2025.

METODOLOGIA

Área de estudo

O rio Madeira é um dos principais rios do Brasil e o mais longo e importante afluente do rio Amazonas³, recebendo esse nome após a confluência dos rios Beni e Mamoré. Possui dois aproveitamentos hidroelétricos importantes integrantes do SIN: as UHEs Jirau e Santo Antônio, com potências instaladas de 3.750 MW e 3.568 MW, respectivamente. Essas usinas e a bacia hidrográfica do rio Madeira, conforme Figura 1, constituem a área de estudo deste trabalho.

Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Madeira, trecho a montante da UHE Santo Antônio. Fonte: Elaborado pelo ONS.



Características das usinas hidroelétricas de Jirau e Santo Antônio

A UHE Jirau possui 50 Unidades Geradoras (UGs), sendo 28 localizadas na margem direita e 22 na margem esquerda da usina (Figura 2a). O reservatório pode operar entre as cotas máxima 90m e mínima 82,39m. Todavia, historicamente, tem sido considerada a cota mínima operativa de 82,50m, relacionada ao valor mínimo da curva-guia que constava na outorga do empreendimento (Resolução nº 269/2009) que se encontrava válida até outubro de 2024. Destaca-se que nova outorga (nº 2.735/2024) foi emitida para o aproveitamento em 23/10/2024, com destaque para a remoção dessa curva-guia e a manutenção da vazão mínima remanescente que estava estabelecida no regramento anterior, de 3.240m³/s. Além dessas restrições hidráulicas, a usina possui também limitação relacionada à queda bruta.

A UHE Santo Antônio possui 50 UGs, sendo 24 UGs de 4 pás e 26 UGs de 5 pás, distribuídas em 5 Grupos Geradores (GGs) ao longo do leito do rio Madeira (Figura 2b). De acordo com a Resolução nº 1.607/2016, o reservatório da UHE Santo Antônio pode operar entre as cotas mínima, de 70,5m; e máxima, de 71,30m, devendo manter vazão mínima remanescente de 3.293m³/s. Para essa usina, destacam-se as limitações que há em relação às quedas brutas máxima e mínima.

³ <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/rio-madeira/saiba-mais>, acesso em 03/12/2024.

Figura 2 – Configuração das UGs nas UHEs Jirau e Santo Antônio. Fonte: elaborado pelo ONS.

(a) Jirau



(b) Santo Antônio



Caracterização hidroclimática da bacia

A bacia do rio Madeira apresenta um ciclo anual de precipitação bem definido, caracterizado por um período chuvoso e outro seco, como as demais bacias da Amazônia. O período chuvoso tem duração de aproximadamente seis meses (de outubro a março), e o máximo de precipitação observado no trimestre janeiro-fevereiro-março (verão) está relacionado à configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Reboita et al., 2010). Por outro lado, os meses de inverno (junho, julho, agosto) correspondem aos meses mais secos.

As anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Oceano Pacífico e do Atlântico influenciam na variabilidade da precipitação na bacia Amazônica. Segundo Uvo e Graham (1998), cerca de 53% das anomalias observadas no regime de precipitação (superior ou inferior à média histórica) são decorrentes das anomalias de temperatura da superfície desses oceanos. Os mecanismos internos ou externos à região, que dão origem ao percentual remanescente, ainda não são bem conhecidos. No que diz respeito à configuração do El Niño Southern Oscillation (ENSO), El Niño (fase quente) e La Niña (fase fria) se apresentam de forma distinta nas sub-bacias da região Amazônica.

Coutinho et al. (2018) ao avaliarem os eventos extremos de precipitação associados ao El Niño e La Niña na bacia Amazônica dentro do território brasileiro, identificaram que a bacia apresenta maior frequência de anomalia negativa de precipitação em anos de El Niño. Nos episódios de La Niña, a tendência é de valores próximos à média. No caso da bacia do rio Madeira no território boliviano, não há um sinal claro.

Método

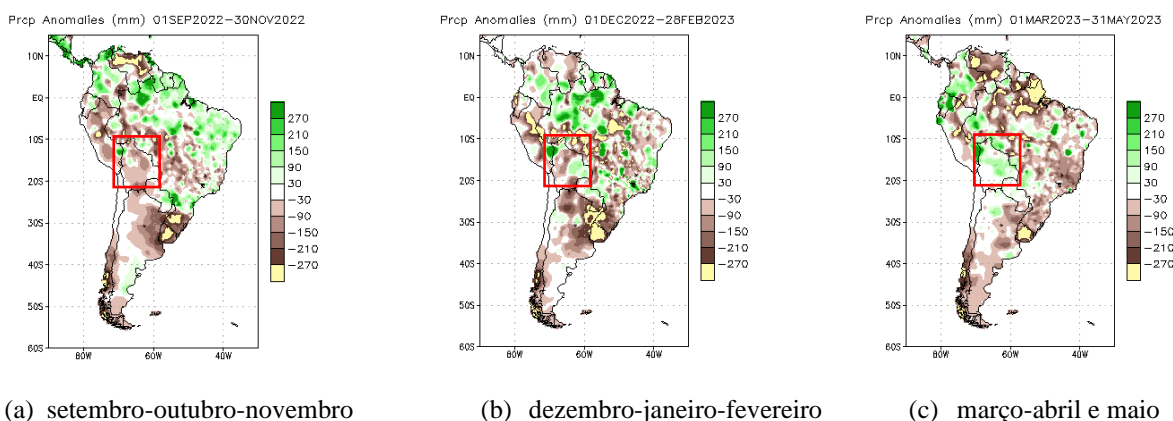
Trata-se de um estudo descritivo, a partir do qual serão apresentadas as condições hidroclimatológicas verificadas na bacia do rio Madeira nos anos de 2023 e 2024, de modo a caracterizar a condição desfavorável verificada nesses anos; e as ações realizadas pelo ONS que tiveram como objetivo garantir a manutenção do atendimento eletroenergético do SIN.

CONDIÇÕES HIDROCLIMATOLÓGICAS VERIFICADAS EM 2023 E 2024

Período chuvoso 2023-2024

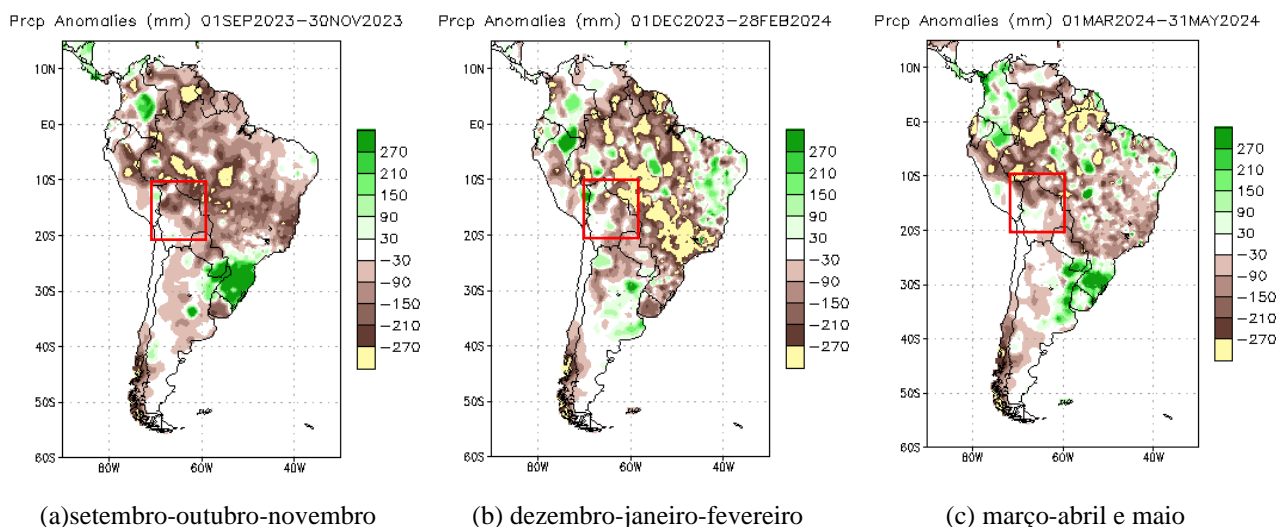
Grande parte do período chuvoso 2022-2023 foi marcado pela atuação da La Niña, que apresentou sinais de enfraquecimento a partir de dezembro de 2022, e desconfiguração em março de 2023. No trecho boliviano da bacia, onde se encontra a maior área de drenagem, a precipitação foi inferior à média nos meses de outubro e novembro de 2022. Nos meses de dezembro a fevereiro, a distribuição da precipitação foi irregular, alternando nesse trecho da bacia totais inferiores a próximo da média histórica (Figura 3). O total de precipitação observado nos meses de março a maio de 2023, embora acima da média histórica, não superou o déficit acumulado de precipitação dos meses anteriores.

Figura 3 - Anomalia de precipitação (mm), período chuvoso 2022-2023. Fonte: National Weather Service -NWS



A configuração do fenômeno El Niño em junho de 2023 e a ocorrência de anomalia negativa de precipitação de outubro de 2023 a março de 2024 agravou o déficit pluviométrico da bacia, conforme apresentado na Figura 4.

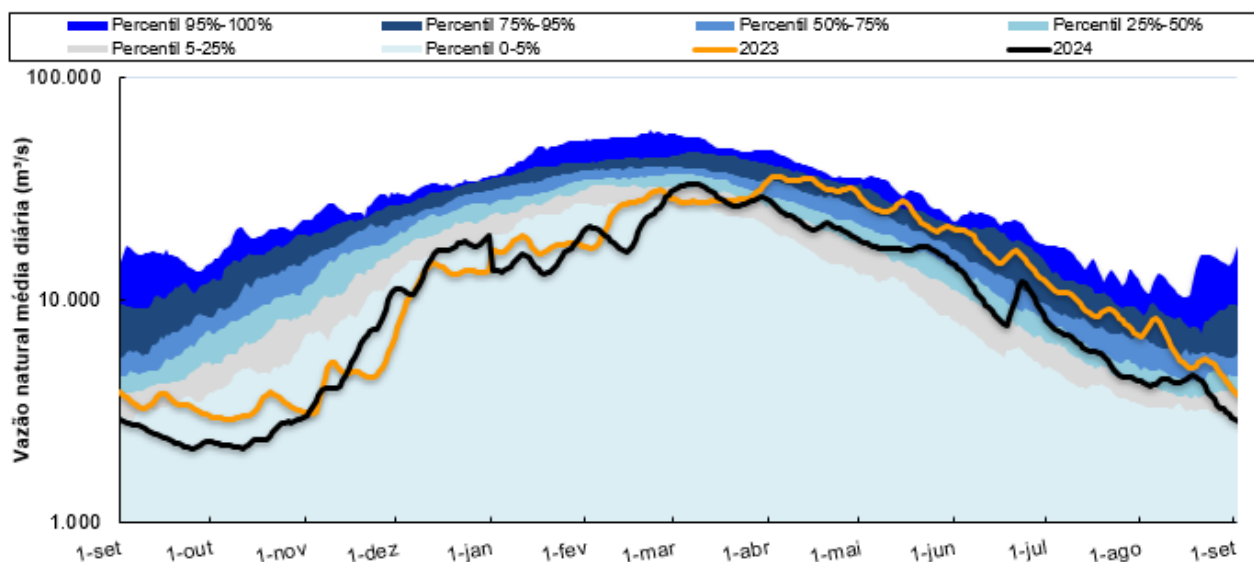
Figura 4 - Anomalia de precipitação (mm), período chuvoso 2023-2024. Fonte: National Weather Service -NWS



Aspectos hidrológicos

O reflexo hidrológico, a partir das condições meteorológicas verificadas, pode ser identificado nas vazões naturais médias diárias verificadas no rio Madeira, em seu trecho onde está a UHE Santo Antônio, apresentadas no gráfico da Figura 5, com destaque para os anos de 2023 e 2024 frente aos intervalos percentílicos de todo o histórico de dados disponível. Observa-se que no período de setembro a novembro esses anos apresentaram vazões sempre no intervalo até o 5º percentil dos dados e com o ano de 2024 em condição de vazão ainda mais crítica do que o ano de 2023. Especificamente nos meses de setembro e outubro de 2024 foram verificadas as menores vazões para esses meses em todo o histórico em ambas as usinas.

Figura 5 – Vazão natural média diária verificada na UHE Santo Antônio nos anos de 2023 e 2024 frente aos intervalos percentílicos do histórico de dados desde 1967.



Em 2024, foi verificada a menor vazão natural média diária do histórico, que conta com dados desde 1967 e, em 2023, a 5ª menor. Destaca-se, ainda que nesses anos a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) declarou para essa bacia, situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos, por meio das Resoluções ANA nº 164/2023⁴ e nº 202/2024⁵.

AÇÕES REALIZADAS PELO ONS PARA O ENFRENTAMENTO DA SITUAÇÃO DE ESCASSEZ HÍDRICA

Em sua atividade de acompanhamento das condições hidrometeorológicas das bacias que integram o SIN, o ONS identificou a situação adversa na qual se encontrava a bacia do rio Madeira no ano de 2023 e, conhecendo as restrições de operação que poderiam ser enfrentadas com a degradação das vazões, notadamente nos níveis d'água a jusante da UHE Santo Antônio e sua influência na queda bruta máxima, solicitou, em setembro de 2023, que o agente de geração hidráulica responsável pela usina apresentasse estratégias para operação da usina ao longo do período seco de 2023. Após apresentação das medidas propostas por esse agente, trabalho articulado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), ANA e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

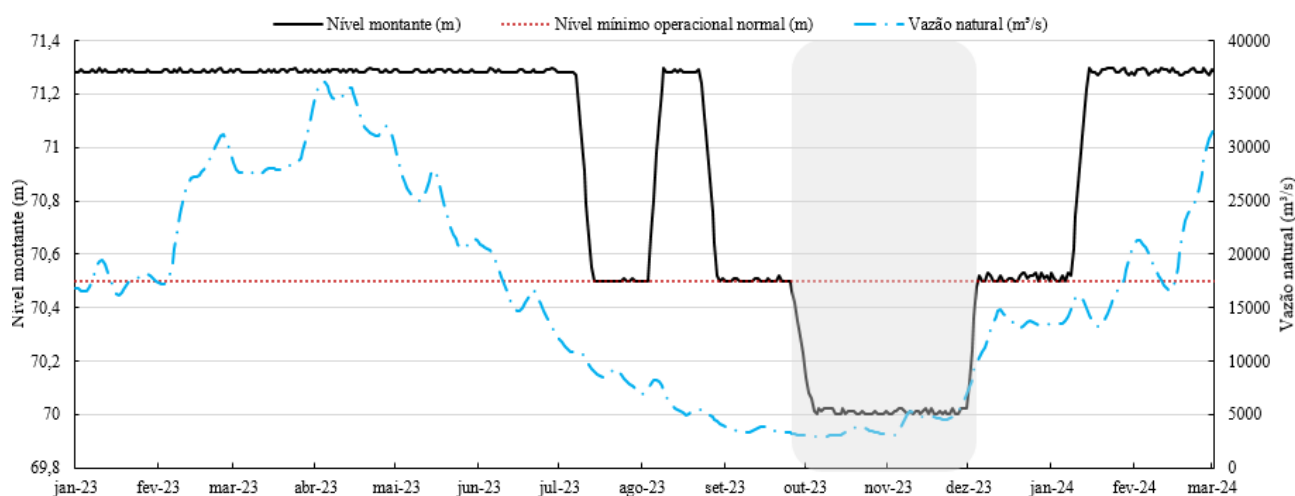
⁴ Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2023/164>, acesso em maio de 2025.

⁵ Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-ana-n-202-de-30-de-julho-de-2024-575310626>, acesso em maio de 2025.

Renováveis (Ibama) viabilizou operação excepcional na UHE Santo Antônio, notadamente o rebaixamento do reservatório dessa usina até a cota 70m, em caráter excepcional e temporário, de modo a buscar evitar a paralisação dessa usina devido ao atingimento da cota mínima de jusante ou da queda bruta mínima. Destaca-se que, no período mais crítico da seca de 2023, o reservatório da UHE Jirau, em atendimento à curva-guia de sua outorga, encontrava-se operando na cota mínima 82,50m, não podendo, portanto, proporcionar nenhum tipo de regularização rio abaixo.

Após as devidas autorizações da ANA (Despacho Conjunto Nº 6/2020/SER/SFI/SOE) e Ibama (Ofício Nº 388/2023/COHID/CGTEF/DILIC), o reservatório da UHE Santo Antônio foi rebaixado da cota 70,50m até a cota 70m, conforme ilustrado na Figura 6, do período de 26/09/2023 até 05/12/2023.

Figura 6 – Evolução das vazões naturais e do nível de montante na UHE Santo Antonio.



Mesmo com o deplecionamento do reservatório da UHE Santo Antônio, em 2023, a condição crítica de baixa vazão foi alcançada com valores próximos a 3.100 m³/s, levando ao desligamento total da UHE Santo Antônio na primeira quinzena de outubro. Com isso, o ONS precisou escoar geração remanescente da UHE Jirau através do transformador 500/230 kV da subestação (SE) Coletora Porto Velho, de forma síncrona para atender à carga dos estados do Acre e Rondônia. Além disso, o critério de confiabilidade para a importação a partir do Mato Grosso foi flexibilizado, para que fosse possível atender à carga em determinados períodos do dia.

Em 2024, com a experiência acumulada em 2023, o ONS solicitou estudos adicionais aos agentes de geração hidráulica responsáveis pela operação das UHEs Jirau e Santo Antônio, buscando maior confiabilidade no atendimento e a manutenção de sua garantia, como no ano anterior. Um desses estudos permitiu a operação do *back-to-back* com a UHE Jirau em modo *stand-alone*, uma configuração até então não permitida. Para isso, foi informado por Jirau a necessidade de se manter sincronizadas 8 unidades geradoras (UGs) na usina, com requisito de vazão mínima estimado pelo ONS e pelo agente de cerca de 1.800 m³/s.

Para a UHE Santo Antônio, o agente informou a possibilidade de flexibilizar a queda máxima para as UGs de 5 pás. Assim, o ONS estimou que o requisito de vazão mínima para sustentar a geração nas UGs do 230 kV reduziria de 3.100 m³/s para 2.650 m³/s. Adicionalmente, considerando um efeito de sobrelevação do nível d'água no canal de fuga da margem direita (GG1), caso as vazões fossem mais críticas que 2.650 m³/s, o ONS estimou, em conjunto com o agente, que seria possível manter a geração no GG1 da UHE Santo Antônio com vazões superiores a 1.800 m³/s, o que permitiu a adoção

de outra configuração, combinando máquinas de Santo Antônio conectadas através do transformador 500/230 kV da SE Coletora Porto Velho com a geração no *back-to-back*.

CONCLUSÕES

As baixas vazões naturais verificadas nos anos de 2023 e 2024 na bacia do rio Madeira evidenciaram a relevância do monitoramento contínuo das condições hidrometeorológicas e da antecipação de cenários críticos para a tomada de decisão no setor elétrico.

A atuação coordenada entre o ONS, agentes de geração hidráulica e outros atores possibilitou a adoção de estratégias operativas específicas, que viabilizaram a operação das usinas durante esses eventos de escassez hídrica para garantir a manutenção do suprimento eletroenergético. A experiência adquirida durante esse período destaca a importância da resiliência operacional para garantir a segurança energética em contextos hidrológicos adversos.

REFERÊNCIAS

Coutinho, E.C.; Rocha, E.P; Lima, A.M; Ribeiro, H. M; Variabilidade climática da precipitação na bacia Amazônica brasileira entre 1982 e 2012. *Revista Brasileira de Climatologia*, Ano 14, v. 22, p. 476-500, jan/jun 2018.

Gomes, D.; Lima, A.M.M.; Ferreira, N.S.; Serrão, E.A.O. Variabilidade espaço-temporal da precipitação: Bacia Hidrográfica do Rio Madeira. *Rev. Geográfica Acadêmica* 2019, 13, 90–104. Disponível em: <https://revista.ufrb.br/rga/article/view/5514> (acesso em maio de 2025).

Guimberteau, M.; Ronchail, J.; Espinoza, J.C.; Lengaigne, M.; Sultan, B.; Polcher, J.; Ciais, P. Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basins. *Environ. Res. Lett.* **2013**, 8 (1), 014035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014035>

Laureanti, N.C.; Tavares, P.d.S.; Tavares, M.; Rodrigues, D.C.; Gomes, J.L.; Chou, S.C.; Correia, F.W.S. Extreme Seasonal Droughts and Floods in the Madeira River Basin, Brazil: Diagnosis, Causes, and Trends. *Climate* **2024**, 12, 111. <https://doi.org/10.3390/cli12080111>

Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Tomasella, J.; Oyama, M.D.; Sampaio de Oliveira, G.; de Oliveira, R.; Camargo, H.; Alves, L.M.; Brown, I.F. The drought of Amazonia in 2005. *Am. Meteorol. Soc.* **2008**, 21, 495–516. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1600.1>

Marengo, J.A.; Tomasella, J.; Alves, L.M.; Soares, W.R.; Rodriguez, D.A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* **2011**, 38, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>

Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R. P., Ambrizzi, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, .2, p.185-204, 2010.

Uvo, C. B.; Graham, N.E. The relationship between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly precipitation. *Journal of Climate*, v.11, p.551-563, abr.1998.