

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ATUALIZAÇÃO DE SÉRIE DE VAZÃO NATURAL PARA O CONTROLE DE CHEIAS EM BACIA DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

*Maria de Jesus Delmiro Rocha^{1a}; Ana Costa Marques Machado^{1b}; Angela de Oliveira Ghirard^{1c};
Pedro de Souza Garrido Neto^{1d} & Simone Borim da Silva^{1e}*

Abstract: This paper presents the methodology for updating historical series of natural flow used to calculate empty volumes in reservoirs of hydroelectric plants of the National Interconnected System (SIN). The calculation of these volumes is part of the Annual Flood Prevention Plan (PAPC), prepared by the ONS, which guides the hydraulic operation of reservoirs aiming to mitigate flood risks. Historical series of natural flow are an essential input for calculating empty volumes, and are updated annually with verified data. The methodology used in this study, System for Flood Prevention Studies (SPEC), was applied for exemplification in the Paranaíba River basin with a focus on the Theodomiro Carneiro Santiago (Emborcação), Itumbiara and São Simão plants, and the results of the analysis were discussed considering the methodological and evaluative criteria of the process. The qualitative and quantitative analysis of these series, which considers comparison with historical statistics, typical seasonality and the occurrence of extreme events, demonstrated that the updated hydrographs remained within historical standards, with no records of significant anomalies.

Keywords: Natural Flow. Flood Control. National Interconnected System – SIN.

Resumo: Este trabalho apresenta a metodologia de atualização das séries históricas de vazão natural utilizadas para o cálculo dos volumes de espera em usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN). O cálculo de volumes de espera integra o Plano Anual de Prevenção de Cheias (PAPC), elaborado pelo ONS, que orienta a operação hidráulica dos reservatórios visando mitigar riscos de inundações. As séries históricas de vazão natural são insumos essenciais para o cálculo de volumes de espera, e são anualmente atualizadas com os dados verificados. A metodologia usada neste estudo, Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias (SPEC), foi aplicada na bacia do rio Paranaíba com foco nas usinas de Theodomiro Carneiro Santiago (Emborcação), Itumbiara e São Simão, e os resultados foram analisados considerando os critérios metodológicos e avaliativos do processo. A análise quali-quantitativa dessas séries, que considera a comparação com estatísticas históricas, a sazonalidade típica e a ocorrência de eventos extremos, demonstrou que os hidrogramas atualizados mantiveram-se dentro dos padrões históricos, sem registros de anomalias significativas.

Palavras-Chave – Vazão Natural. Controle de Cheias. Sistema Interligado Nacional - SIN.

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

INTRODUÇÃO

O Plano Anual de Prevenção de Cheias (PAPC) é um produto elaborado anualmente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em conjunto com os agentes de geração hidráulica, que apresenta os resultados dos estudos de planejamento da operação hidráulica dos reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHEs) integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN) relativos à prevenção de cheias conforme descrito no submódulo 3.7 dos procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2020a; ONS, 2020b; ONS, 2025a). No PAPC é estabelecido, antes do início de cada período chuvoso, os volumes de espera a serem alocados em cada reservatório, ou seja, a parcela do volume útil do reservatório que deve ser deixado vazio, destinado ao amortecimento de cheias (Junqueira e Chan, 2013). Este processo promove a articulação entre a geração de energia e a proteção socioambiental de áreas vulneráveis, buscando assegurar que a operação dos reservatórios contemple não apenas a otimização energética, mas também a redução dos impactos associados a eventos extremos de cheia (Rocha et al., 2023).

Como insumos para a elaboração do PAPC são utilizadas as séries históricas de vazão natural diárias, os tempos de recorrência e as restrições de vazão máxima a jusante de reservatórios ou pontos de controle, sendo os dois últimos insumos declarados ao ONS pelos agentes de geração hidráulica que compõem cada bacia. As séries históricas constituem a vazão natural total ou incremental obtida em pontos de interesse específicos, abrangendo longos períodos de observação hidrológica e permitem a representação estatística das condições naturais afluentes aos reservatórios (ONS, 2011), sendo utilizadas para a geração de séries sintéticas de vazões, geradas a partir do modelo DIANA (Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias) (Damázio et al., 1999).

Essas séries sintéticas representam a variabilidade hidrológica e são utilizadas para a execução dos modelos CAEV (Cálculo de Volumes de Espera por Sistemas Parciais) e VESPOT (Desagregação Espacial dos Volumes de Espera pelos Reservatórios), sendo este último o responsável por obter os volumes de espera que serão necessários em cada reservatório ao longo do período chuvoso. Todos esses modelos compõem o sistema SPEC (Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e utilizado no PAPC (Damázio et al., 1999).

A atualização das séries de vazões naturais para o processo de prevenção de cheias em algumas bacias hidrográficas que compõem o SIN é uma atividade de relevância primária, realizada anualmente pelo ONS para elaboração do PAPC. Os pontos de controle considerados nesse documento, para os quais são necessárias as séries de vazões naturais diárias, já possuem dados

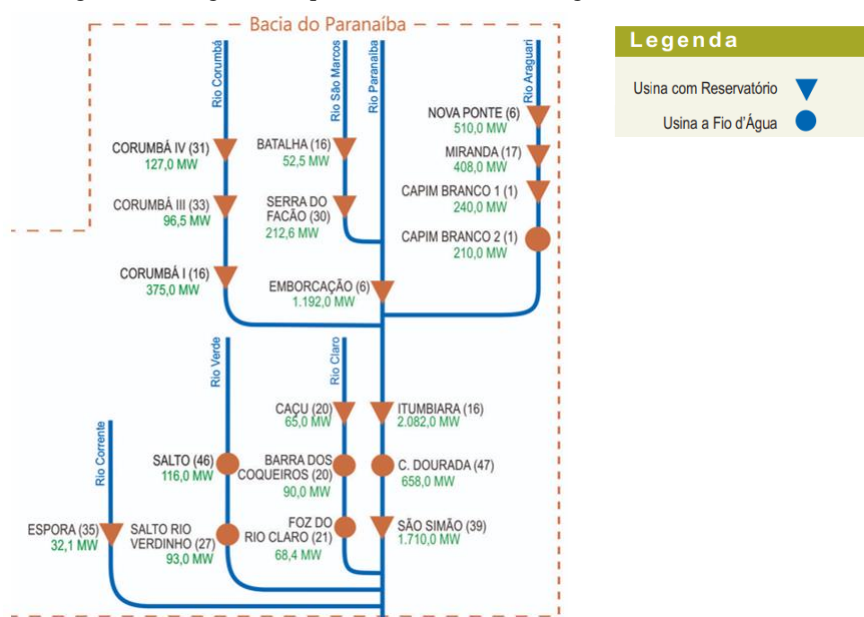
diários históricos, mas que precisam ser complementadas anualmente com os dados atualizados do último ano consolidado. A obtenção das vazões naturais totais ou incrementais diárias nesses pontos de controle para os aproveitamentos hidrelétricos é realizada a partir de um processo de consistência, modulação e propagação de vazões. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar as características metodológicas e avaliativas do processo de atualização das séries de vazão natural diárias utilizadas para o cálculo dos volumes de espera de usinas hidrelétricas do SIN que compõem o PAPC.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia do rio Paranaíba, localizada na região Centro-Oeste do Brasil, é uma bacia relevante para o setor elétrico nacional, compondo a cabeceira do rio Paraná e abrigando um expressivo conjunto de aproveitamentos hidrelétricos com 19 usinas hidrelétricas. Destacam-se, nesse contexto, as UHEs Theodomiro Carneiro Santiago (Emborcação), Itumbiara e São Simão, as quais possuem reservatórios que totalizam 31.050 hm³ somados em volume útil, tendo relevante papel na regularização de vazões e na prevenção de cheias ao longo do rio Paranaíba e na calha principal do rio Paraná (até o posto fluviométrico Porto São José). Ademais, essas usinas também operam para controle de cheias, com restrições hidráulicas associadas à proteção de infraestruturas a jusante de seus respectivos barramentos. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático da bacia, seus principais rios e usinas hidrelétricas.

Figura 1 – Diagrama esquemático da bacia hidrográfica e usinas avaliadas.



Metodologia e cálculo de vazão natural total

O setor elétrico tem adotado o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte. Em uma seção de um rio cuja bacia contribuinte está sujeita ao efeito de ações antrópicas, a vazão natural é obtida por meio de um processo de reconstituição, que considera a vazão observada no local e as informações relativas às ações antrópicas na bacia. Essa reconstituição da vazão natural em um determinado ponto de interesse, neste caso, as UHEs, tem como objetivo a homogeneização das séries de vazões no histórico, a fim de se ter um acompanhamento hidroenergéticos adequado do SIN, assim como a utilização dessas séries nos modelos de previsão de vazões, no planejamento e programação da operação do SIN e na definição dos volumes de espera (ONS, 2023). A Tabela 1 apresenta a síntese dos métodos para cálculo da vazão natural segundo ONS (2011).

Tabela 1 – Metodologias de cálculo de vazão natural.

Descrição	Equação	Detalhamento das variáveis
Vazão natural em período anterior à existência de reservatório	$Q_{Nat} = Q_{Obs} + Q_{Ucons}$	Q Nat é a vazão natural no local do aproveitamento (m ³ /s); Q Obs é a vazão observada em estação fluviométrica no local do aproveitamento ou estimada a partir de correlação (m ³ /s); e Q Ucons é a vazão de usos consuntivos (m ³ /s).
Vazão afluente de cabeceira em período posterior à existência de reservatório. Insumo de cálculo da vazão incremental.	$Q_{Afl} = Q_{Def} + Q_{Der} + \frac{Dvol}{0,0864}$	Q Afl é a vazão afluente diária ao reservatório (m ³ /s); Q Def é a vazão defluente diária total do reservatório (m ³ /s); Q Der é a vazão derivada diária no reservatório, por meio de canal, túnel, estação de bombeamento etc. (m ³ /s); D vol é a variação diária do volume acumulado no reservatório, obtida a partir da tabela Cota x Volume do reservatório (hm ³); e 0,0864 é a constante de transformação de hm ³ /dia em m ³ /s.
Vazões naturais incrementais brutas, referentes à bacia situada entre o aproveitamento em questão e o(s) aproveitamento(s) situado(s) a montante	$Q_{Inc} = Q_{Afl} - Q_{Defmp} + Q_{Ucons} + Q_{Evp} + Q_{Deb}$	Q Inc é a vazão natural incremental diária bruta entre o aproveitamento e o(s) aproveitamento(s) de montante (m ³ /s); Q Afl é a vazão afluente diária ao reservatório (m ³ /s); Q Defmp é a vazão defluente diária do(s) reservatório(s) de montante, devidamente propagada em condição de reservatório (m ³ /s); Q Ucons é a vazão relativa aos usos consuntivos da bacia incremental (m ³ /s); Q Evp é a vazão diária relativa à evaporação do reservatório Q Deb é a vazão derivada diária na bacia incremental, por meio de canal, túnel, estação de bombeamento etc. (m ³ /s).
Vazão natural de usina em trecho intermediário ao longo da cascata de reservatórios	$Q_{Nat} = Q_{Nat\ mon} + Q_{Inc\ con}$	Q Nat é a vazão natural diária no local do aproveitamento (m ³ /s); Q Nat mon é a vazão natural diária do(s) reservatório(s) de montante, devidamente propagada(s) em condição natural (m ³ /s) e Q Inc con é vazão natural incremental diária entre o aproveitamento e o(s) aproveitamento(s) de montante, consistida após aplicação de um método de tratamento

Fonte: ONS (2011).

Um aspecto importante a ser destacado na reconstituição de vazões naturais é o processo de propagação de vazões, que consiste na estimativa das vazões naturais a jusante de um sistema

hidrológico, e ocorre a partir das vazões observadas a montante, levando em consideração o tempo de viagem da água entre os pontos, evaporação líquida e vazões incrementais do trecho analisado. Esse procedimento é fundamental para modelar o comportamento hidrológico em cascatas de reservatórios, permitindo a atualização das séries históricas de vazão nas usinas hidrelétricas respeitando a homogeneidade da série. No contexto do SIN, a propagação é realizada com base em metodologias consolidadas, respeitando os tempos de deslocamento oficialmente estabelecidos, garantindo maior precisão no cálculo dos volumes de espera para controle de cheias e na gestão da operação hidráulica.

Atualização e análise da série de vazão

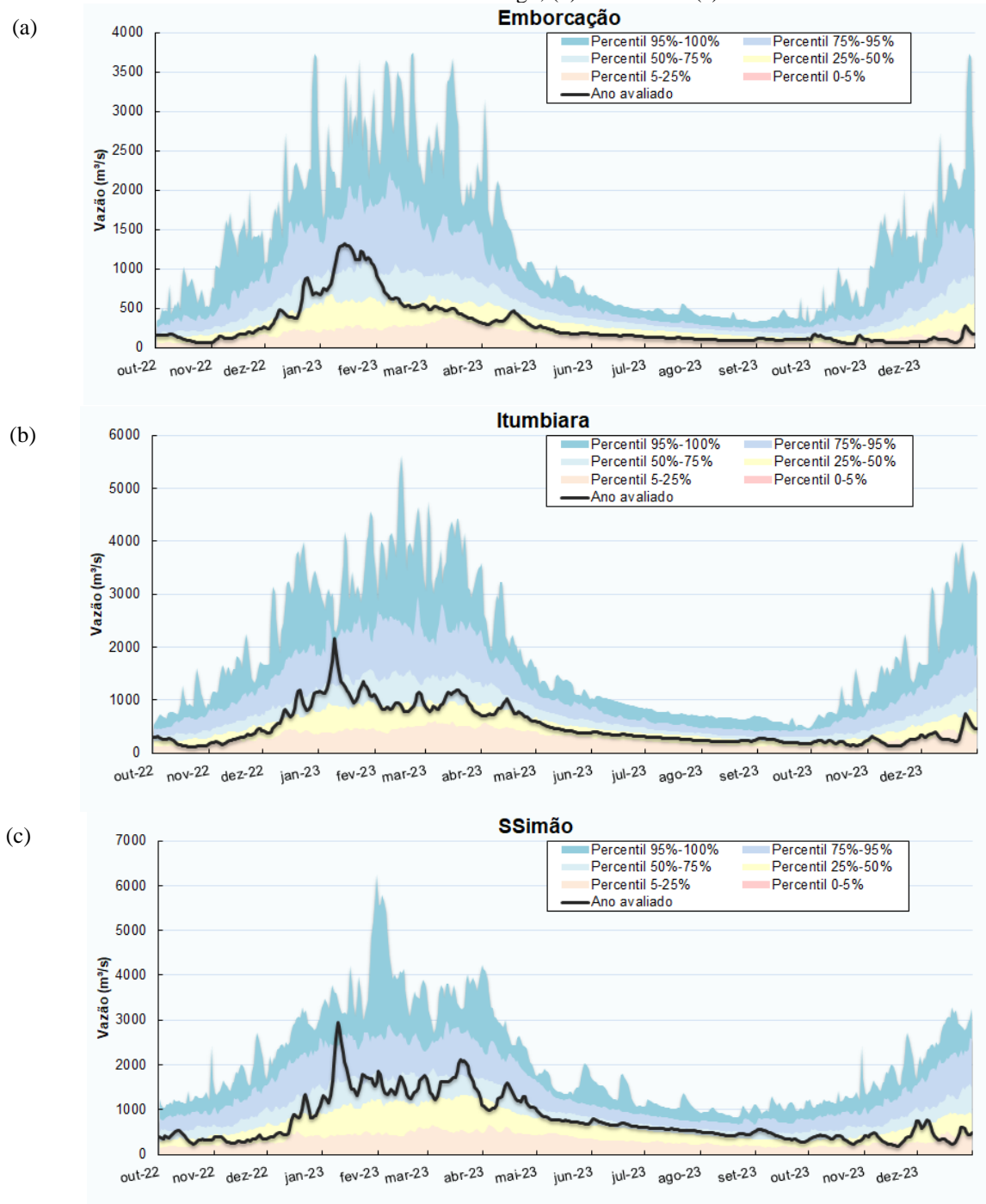
As séries históricas de vazões naturais totais e incrementais diárias utilizadas para os estudos de prevenção de cheias de bacias que integram o SIN são atualizadas anualmente sendo acrescidas mais um ano de dados à série. É importante ressaltar que são acrescidas às séries de vazão natural históricas oficiais, para todas as usinas que integram o SIN, os resultados do processo de consolidação anual de vazões realizadas pelo ONS e disponibilizado publicamente (ONS, 2025b).. Este processo também é realizado para as séries a serem utilizadas no processo de cálculo dos volumes de espera para controle de cheias, sendo as informações também publicadas anualmente pelo ONS (ONS, 2025).

No processo de atualização das séries, é feita uma análise quali-quantitativa dos hidrogramas resultantes das séries, que serão utilizados para a geração das séries sintéticas do processo de controle de cheias. Nessa análise, são considerados aspectos como: i) comparação com as estatísticas da série histórica, principalmente com relação a picos e vales; ii) avaliação da forma do hidrograma com relação à sazonalidade característica da bacia; e iii) ocorrência de eventos extremos que justifiquem aspectos atípicos do hidrograma.

RESULTADOS

A Figura 2 apresenta as séries de vazões naturais incrementais diárias para as UHEs Theodomiro Carneiro Santiago, Itumbiara e São Simão, no rio Paranaíba, com destaque ao ano de 2023, a ser incorporado na série existente para o PAPC do ciclo 2025/2026. Na figura também são apresentadas as envoltórias estatísticas representando os percentis obtidos a partir de todo o histórico da série.

Figura 2 – Avaliação histórica dos hidrogramas resultantes de vazão natural incremental para as UHEs de (a) Theodomiro Carneiro Santiago, (b) Itumbiara e (c) São Simão.



A avaliação das séries de vazões naturais diárias nas usinas hidrelétricas de Theodomiro Carneiro Santiago, Itumbiara e São Simão revela um comportamento coerente com a sazonalidade típica evidenciada pelos percentis. Em todos os gráficos se observa um padrão de aumento das vazões durante o período chuvoso, que se estende de novembro a abril (ONS, 2025a), seguido de uma redução gradual ao longo da estação seca. Esse comportamento sazonal é claramente representado pela amplitude dos intervalos estatísticos dos percentis históricos, destacando os períodos de maior e menor variabilidade das vazões.

Ao comparar a série de vazões a ser incorporada com os intervalos percentílicos nota-se que, de modo geral, os valores de vazão permaneceram dentro dos intervalos históricos. Nas UHEs Theodomiro Carneiro Santiago e Itumbiara, a série observada seguiu no período chuvoso variando nas faixas dos percentis 25% e 95%. Observa-se que nos meses chuvosos as vazões se aproximaram ou ultrapassaram o percentil 75%, mas não atingiram extremos históricos superiores, situando-se abaixo do percentil 95%. Para o período seco, as variações foram menores, mais próximas da faixa do percentil 5% a 50%, indicando condições típicas ou ligeiramente abaixo da média. Na UHE São Simão, os picos de vazão observados em janeiro e fevereiro se destacaram, variando entre as faixas de 50% a 100%, mas não ultrapassaram as faixas superiores históricas, demonstrando um comportamento dentro da normalidade estatística para o período analisado. Nos meses do período seco as vazões desta usina ficaram por mais meses na faixa do percentil 50% a 75% do que das outras duas UHEs analisadas. No entanto, no final do período seco também observamos vazões variando nos percentis 5% a 50%.

Essas avaliações quali-quantitativas, o conhecimento da sazonalidade típica da região, incluindo informações da ocorrência ou não de eventos extremos na região, possibilita mais segurança no processo de atualização da série histórica por meio do entendimento das características da série hidrológica que está sendo adicionada ao histórico vigente e, conseqüentemente, no resultado final dos volumes de espera calculados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atualizações anuais das séries históricas de vazão natural diárias para o processo de cálculo de volume de espera para o controle de cheias em algumas bacias do SIN apresentam etapas sistemáticas e criteriosas de análise de dados e caracterização hidrológica das bacias avaliadas. A utilização das séries sintéticas geradas a partir dessas séries assegura o cálculo de volumes de espera pelo SPEC, promovendo uma operação dos reservatórios que concilia otimização energética e segurança socioambiental. Para a bacia do rio Paranaíba, objeto deste trabalho, foi avaliada a atualização da série de vazão natural diária nos pontos de controle relacionados às UHEs Theodomiro Carneiro Santiago, Itumbiara e São Simão. Observou-se que a análise quali-quantitativa realizada sobre as séries atualizadas reforçou a coerência com a sazonalidade histórica das vazões naturais diárias observadas nas usinas, validando os dados e exemplificando a confiabilidade do processo.

De maneira geral, a comparação entre as séries observadas e as faixas estatísticas históricas evidencia que o comportamento das vazões no último ano consolidado manteve-se dentro dos limites esperados, sem a ocorrência de eventos extremos que levassem as séries a apresentarem valores fora dos limites máximo e mínimo de vazões já verificadas. Os resultados apresentados neste trabalho exemplificam a metodologia aplicada pelo ONS. Assim, este processo anual de atualização e validação das séries de vazão natural consolida-se como um instrumento fundamental que subsidia a elaboração do PAPC, produto relevante para a operação das usinas hidrelétricas do SIN.

REFERÊNCIAS

Damázio, Jorge M.; Neves, Fernando P.; Ghirardi, Angela O.; Rocha, Vinicius F.; Costa, Fernanda da S. 1999. Sistema SPEC – Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias em Sistemas Hidrelétricos. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999, Belo Horizonte. Anais [...]. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/149/ABRH258.pdf>. Acesso em: 31 maio 2025.

Junqueira, Felipe Augusto Ribeiro; Chan, Priscilla Dafne Shu. 2013. PAVES – ferramenta para acompanhamento da utilização dos volumes de espera dos reservatórios das usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional para controle de cheias. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/10823>. Acesso em: 25 maio 2025.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. RT-ONS DOP 0377/2024: Plano Anual de Prevenção de Cheias - Ciclo 2024/2025. 2024. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/sites/9/40/paginas/servicos/historico-de-produtos.aspx?produto=Plano%20Anual%20de%20Preven%C3%A7%C3%A3o%20de%20Cheias>>. Acesso em: [29 maio 2025].

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Revisão das séries de vazões naturais em bacias do sistema interligado nacional. Rio de Janeiro: ONS, 2011. Disponível em:

https://www.ons.org.br/sites/multimedia/Documentos%20Compartilhados/vazoes_naturais/2011/7-1.html. Acesso em: 31 maio 2025.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 3.7 – Planejamento anual de prevenção de cheias. Procedimentos de Rede, versão vigente. 2025a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Acompanhamento e Previsão Hidrológica - Séries Históricas de Vazões Naturais. 2025b. Disponível em: <https://sintegro.ons.org.br/sites/9/13/84//paginas/servicos/historico-de-produtos.aspx?produto=S%C3%A9ries%20Hist%C3%B3ricas%20de%20Vaz%C3%B5es%20Naturais>

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Revisão das séries de vazões naturais das Principais Bacias Hidrográficas Brasileiras: Premissas e Perspectivas. In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023, Recife. Anais. Recife: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2023. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/191/XXV-SBRH0826-1-0-20230731-225637.pdf>. Acesso em: 03 junho 2025.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Procedimentos de Rede. Submódulo 3.7 – Planejamento anual de prevenção de cheias (Operacional). Versão de 08/12/2020. 2020a. Disponível em <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://proxyportais.ons.org.br/ons.portalempregado.proxy/ga/rapi/api/processo/retornarpdf?url=/sites/soumaisons/portalar/ecmpdf/Subm%C3%B3dulo%203.7-OP_2020.12.pdf>. Acesso em 16/05/2025.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Procedimentos de Rede. Submódulo 3.7 – Planejamento anual de prevenção de cheias (Responsabilidades). Versão de 08/12/2020. 2020b. Disponível em <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://proxyportais.ons.org.br/ons.portalempregado.proxy/ga/rapi/api/processo/retornarpdf?url=/sites/soumaisons/portalar/ecmpdf/Subm%C3%B3dulo%203.7-RS_2020.12.pdf>. Acesso em 16/05/2025.

Rocha, Maria J. D.; Garrido Neto, Pedro de S.; Rossi, Carlo L. C. U.; Paiva, Luana F. G.; Dutra, Eduardo M. G.; Silva, Simone Borim da; Soares, Caroline de S. 2023. Operação de controle de cheia na bacia do rio São Francisco no período chuvoso 2021/2022: parte 2. In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023, Belo Horizonte. Anais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2023.