

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

TEMPO DE RETORNO EM APROVEITAMENTOS PERTENCENTES A SISTEMAS INDEPENDENTES PARA PREVENÇÃO DE CHEIAS

Angela de O. Ghirardi^{1a}; Paulo Vitor M. Melo^{1b}; Pedro de Souza Garrido Neto^{1c} & Simone Borim da Silva^{1d}

Abstract: The review of flood control storage for reservoirs of hydroelectric power plants that are part of the Brazilian Interconnected Power System (BIPS), conducted by the Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (Brazilian Power System Operator), assumes that the hydroelectric plant is located in river basins with more than one reservoir with storage capacity, using the return period adopted during the planning stage as a reference. However, in cases where there is only one reservoir in the river basin—either because its rainy season differs from that of other reservoirs in the basin or because the systems are independent—the return period associated with the plant's storage volume is unknown. This paper proposes a method for verifying the return period associated with a given storage volume in situations where the current methodology does not allow for such an assessment.

Keywords – Review of waiting volumes. Storage. Return period.

Resumo: A revisão dos volumes de espera para os aproveitamentos do Sistema Interligado Nacional (SIN) realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) considera que o aproveitamento esteja localizado em bacias com mais de um reservatório com capacidade de acumulação e traz como referência o tempo de retorno adotado na etapa de planejamento. Porém, em casos em que há apenas um reservatório localizado na bacia, seja porque o período chuvoso do reservatório é superior aos demais reservatórios desta bacia ou porque se tratam de sistemas independentes, não se tem conhecimento do tempo de retorno associado ao volume armazenado no aproveitamento. Este artigo traz uma proposta de verificação do tempo de retorno associado a um dado armazenamento nos casos em que o uso da metodologia atual não permite esta averiguação.

Palavras-Chave – Revisão de volumes de espera. Armazenamento. Tempo de retorno.

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

INTRODUÇÃO

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) dentre as atividades que desempenha na área de planejamento, programação da operação e coordenação da operação em tempo real elabora, anualmente, para o período chuvoso seguinte, estudos de prevenção de cheias para bacias hidrográficas nas quais há usinas hidroelétricas (UHEs) que integram o Sistema Interligado Nacional (SIN).

Conforme estabelecido no submódulo 3.7 dos Procedimentos de Rede² do ONS (ONS, 2020a e ONS, 2020b), esses estudos são realizados com a participação dos agentes de geração hidráulica, em duas etapas: de planejamento e de operação.

Na etapa de planejamento, realizada antes do início da estação chuvosa, é determinada a necessidade de alocação de recursos físicos para o controle de cheias. Esses recursos físicos, representados por espaços vazios deixados nos aproveitamentos e destinados ao amortecimento de cheias, são denominados de volumes de espera.

A alocação de volumes de espera deve ser feita de forma criteriosa a fim de mitigar os reflexos causados por cheias em locais a jusante dos reservatórios, ao mesmo tempo em que o menor espaço vazio deve ser mantido no reservatório, de modo buscar seu máximo enchimento ao final do período chuvoso, visando o uso desses recursos ao longo do período seco para a manutenção da segurança do atendimento eletroenergético do SIN e para os requisitos socioambientais.

Os sistemas de controle de cheias podem ser classificados em interdependentes e independentes. Sistemas interdependentes são caracterizados pela presença de dois ou mais reservatórios atuando de forma coordenada para a proteção de um mesmo ponto de controle, que são os trechos de rio onde há restrições de vazões máximas. Por outro lado, nos sistemas independentes, cada ponto de controle é protegido individualmente por um único reservatório.

Os volumes de espera são calculados para as semanas operativas definidas no setor elétrico, tendo início num sábado e término na sexta-feira seguinte, e atualmente para sete bacias do SIN, a saber: Paraná (composta de sistema interdependentes e independentes), Paraíba do Sul, Iguaçu, Jacuí, São Francisco, Parnaíba e Jequitinhonha. Para tal, são necessários além das séries históricas de vazões diárias de cada ponto de controle, os valores de restrição de vazão máxima e o tempo de retorno associado.

² Os Procedimentos de Rede são as regras propostas pelo ONS para as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica integrantes SIN, de acordo com a atribuição dada pela Lei nº 9.648, de 17 de maio de 1998, cuja estrutura foi aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através da Resolução Normativa nº 903, de 8 de dezembro de 2020. O Submódulo 3.7 trata do “Planejamento anual de prevenção de cheias”.

Para efetuar esses cálculos, o ONS utiliza a metodologia denominada Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias (SPEC) desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Energia de Elétrica (CEPEL), e adotada no setor elétrico há mais de 20 anos (Damázio *et al.*, 1999 e CEPEL, 2021).

Os volumes de espera obtidos são disponibilizados pelo ONS no Plano Anual de Prevenção de Cheias (PAPC), que é publicado até o 1º dia útil de setembro de cada ano no Portal SINtegre do ONS, por meio do produto “Plano Anual de Prevenção de Cheias”³.

Posteriormente é iniciada a etapa de operação, na qual são realizados estudos para a definição das regras de operação de controle de cheias, em que são estabelecidas as medidas a serem tomadas durante a ocorrência de cheias. Esta etapa leva em consideração os volumes de espera determinados na etapa de planejamento e tem início com a divulgação por parte do Operador no SINtegre dos produtos “Relatórios de Regras para Operação de Controle de Cheias” para cada uma das bacias mencionadas, como o “Relatório de Regras para Operação de Controle de Cheias – Bacia do rio Paraná até Porto São José”⁴.

Ainda na etapa de operação é possível a realização de revisão dos volumes de espera que foram definidos na etapa de planejamento. Essa revisão, para as bacias dos rios Paraná (até Porto São José), Paranapanema (UHEs Jurumirim e Chavantes) e São Francisco (Sobradinho e Itaparica) é realizada, atualmente, utilizando o programa de Avaliação de Risco (ARISCO). Nessas bacias, há pelo menos dois reservatórios para a proteção de pontos de controle. Este trabalho busca apresentar aplicação do programa ARISCO para a UHE Barra Bonita, considerando assim, uma configuração em que apenas um reservatório irá proteger a restrição de vazão máxima do ponto de controle associado ao seu próprio aproveitamento.

METODOLOGIA

Cálculo dos volumes de espera

A definição dos volumes de espera é feita no período que antecede o período chuvoso, sendo utilizado o sistema SPEC para a determinação de volumes de espera para os aproveitamentos do SIN (Costa *et al.*, 1999). No sistema SPEC inicialmente há uma etapa de geração de séries sintéticas de vazões a partir das séries históricas de vazões naturais incrementais diárias para cada aproveitamento, totalizando 12.000 séries, que são geradas pelo modelo DIANA (Kelman *et al.*, 1983). Essas séries

³ Disponível em: <https://encr.pw/Ng9TW>, acesso em junho de 2025

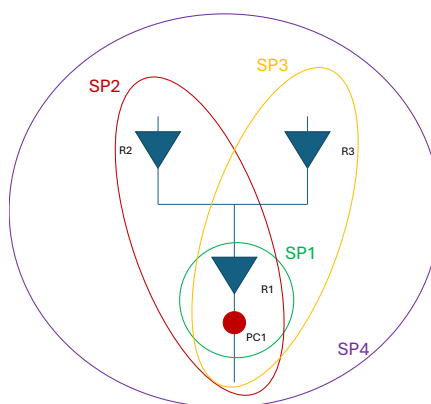
⁴ Disponível em: <https://encr.pw/ZhZHL>, acesso em junho de 2025.

sintéticas geradas reproduzem algumas estatísticas presentes na série histórica, como a média e desvio padrão de vazão diária.

O cálculo dos volumes de espera é um problema complexo temporalmente e espacialmente devido à interdependência entre os reservatórios. A partir das séries sintéticas geradas, no cálculo dos volumes de espera é empregado o método das trajetórias críticas, que utiliza um algoritmo recursivo em que é considerado no final do período chuvoso alocação nula de volume de espera. Ou seja, o método considera que no final da estação chuvosa não há volume de espera e, a partir dessa consideração, o método calcula para cada aproveitamento o volume de espera diário até o início do período chuvoso deste aproveitamento. São determinadas curvas, denominadas envoltórias, com os volumes de espera diários tantas quantas forem o número de séries sintéticas e, essas envoltórias evitam que haja violação da vazão máxima de restrição para o risco associado.

Importante ressaltar que o cálculo das envoltórias não é feito por aproveitamento. O sistema de reservatórios é decomposto em sistemas parciais. Sistemas parciais são os conjuntos de reservatórios que dispõem de apenas um exutório, ou seja, só um ponto de saída, onde está localizado o ponto de controle para o qual está associada a vazão máxima de restrição. Cada sistema parcial é representado por um sistema equivalente e para cada reservatório equivalente é calculada a curva de volume de espera. O cálculo da curva de volume de espera é feito através do modelo CAEV (Cálculo de Volumes de Espera por Sistemas Parciais). A Figura 1 exemplifica em uma bacia com três aproveitamentos e uma vazão máxima de restrição, com a indicação do número de sistemas parciais, que são quatro.

Figura 1 – Sistemas parciais (SP) em bacia com três aproveitamentos (R) e um ponto de controle (PC).



A envoltória resultante, caso fossem consideradas todas as envoltórias de 12.000 séries geradas, poderia demandar um volume de espera significativamente elevado, não sendo factível o

cálculo para proteção de todas. Por isso é definido, através do tempo de retorno (TR) informado pelo agente de geração, o número de séries que não serão protegidas e, quais séries serão protegidas, de maneira a conciliar o controle de cheias com o armazenamento do reservatório, tendo em vista a importância de regularização das vazões no período seco, tanto para o atendimento eletroenergético do SIN, quanto dos demais usos múltiplos da bacia. Além do descarte das séries não protegidas, essa metodologia permite também que reservatórios e sistemas parciais possam ter limitação de volume levando em consideração restrições de níveis.

Como a necessidade de alocação dos volumes de espera é por reservatório e não por sistemas parciais, distribui-se espacialmente os valores calculados dos volumes de espera para cada reservatório que compõem determinada bacia. Essa distribuição é feita pelo Modelo VESPOT (Desagregação Espacial dos Volumes de Espera pelos Reservatórios).

Revisão de volumes de espera

Os volumes de espera calculados na etapa de planejamento podem, a depender da bacia onde se encontra o aproveitamento, serem revistos.

Uma das possibilidades para revisão, em sistemas interdependentes, é realizada por meio do programa ARISCO, que considera em sua execução, volumes de espera determinados para diferentes riscos de cheias, ou seja, para diferentes tempos de retorno. Esse espectro de tempos de retorno inclui não só o tempo de retorno utilizado para a definição dos volumes de espera na etapa de planejamento, conhecido como tempo de retorno recomendado, bem como valores superiores e inferiores, permitindo assim uma avaliação mais criteriosa de composições de alocação dos espaços vazios nos reservatórios.

O programa ARISCO permite a análise de um retrato pontual dos volumes e tempos de retorno associados aos armazenamentos em uma cascata de reservatórios, indicando os valores de tempos de retorno para uma determinada condição de alocação de volumes de espera, sempre comparando com o recomendado.

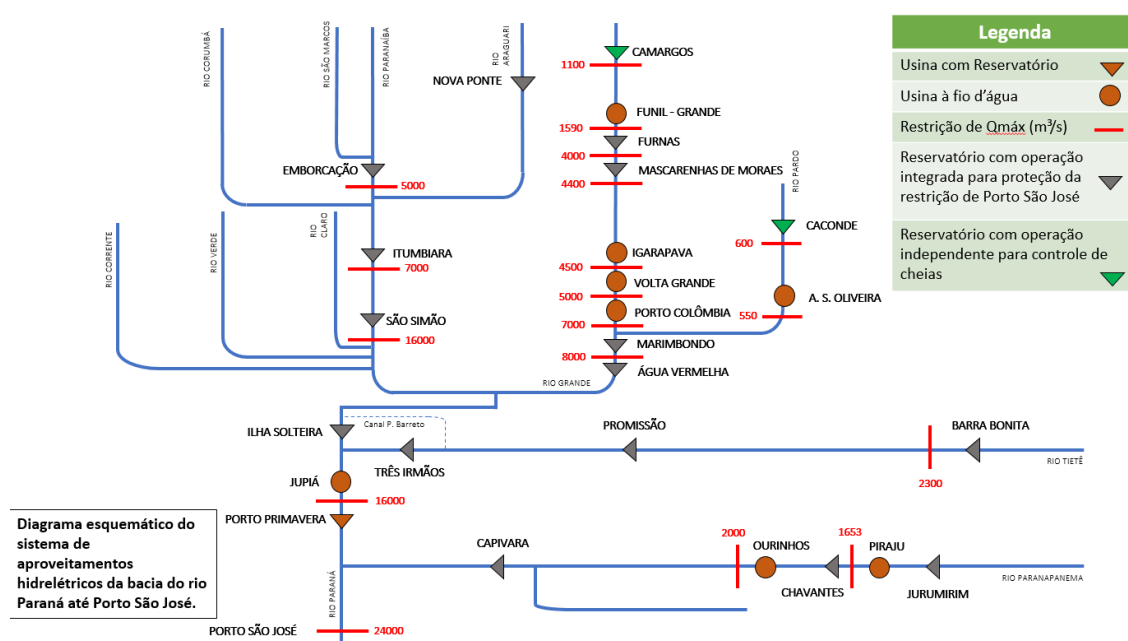
Caso um determinado aproveitamento esteja ocupando o volume de espera calculado na etapa de planejamento, é avaliado se com os armazenamentos dos demais aproveitamentos que compõem o sistema, a associação desses armazenamentos, resulta em aumento do risco de rompimento de restrição de vazão máxima em um ponto de controle.

A revisão de volumes de espera utilizando-se o ARISCO é feita, atualmente, para as bacias do rio Paraná até o posto fluviométrico Porto São José, cujo período úmido está compreendido entre

os meses de novembro a abril; do rio Paranapanema, UHEs Jurumirim e Chavantes, cujo período chuvoso não é caracterizado; do rio São Francisco, UHEs Sobradinho e Itaparica, cujo período chuvoso está entre os meses de novembro e maio.

A bacia do rio Paraná até Porto São José possui 19 reservatórios e 11 valores de restrições de vazões máximas, conforme diagrama esquemático apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama esquemático da bacia do rio Paraná até Porto São José.



A Figura 3 apresenta os resultados do programa ARISCO para a bacia do rio Paraná até Porto São José. Observa-se que, caso algum reservatório apresente uma violação do tempo de retorno recomendado (TR meta) devido à ocupação de volumes de espera na bacia, um novo valor de tempo de retorno (TR) é apresentado e a operação futura pode ser reavaliada a partir desta informação.

Figura 3 – Resultados do programa ARISCO para a bacia do rio Paraná até Porto São José.

Sistema: PAR1 Classe ENSO: 2 Normal						
Período a avaliar: 22/02/2025-28/02/2025						
Reservatório	Volume km3	Informado %V.Util	T.Retorno anos	Risco %	TR meta	TR < TR meta
Furnas	16.253	94.40	30.00	3.33	30.00	
MMoraes	2.116	84.64	45.00	2.22	30.00	
Igarapava	0.000		34.00	2.94	30.00	
VGrande	0.000		35.00	2.86	30.00	
PColombia	0.000		39.00	2.56	30.00	
Marimondo	4.298	81.71	100.00	1.00	30.00	
AVermelha	4.627	89.51				
Emborcacao	12.759	97.73	100.00	1.00	30.00	
NPonte	10.177	98.04				
Itumbiara	11.805	94.79	53.22	1.88	30.00	
SSimao	4.907	88.57	100.00	1.00	30.00	
BBonita	2.442	95.17			20.00	
Promissao	1.951	91.68				
ISolteira-Eq	7.172	80.00				
Dupia	0.000		19.74	5.06	20.00	Sim
Tecle ENTER...						
Jurumirim	3.007	95.01			50.00	
Xavantes	2.889	95.00			50.00	
Capivara	5.724	100.00				
P.S.Jose	0.000		33.50	2.98	30.00	

Em todas as bacias em que é utilizado o ARISCO para a revisão de volumes de espera, há pelo menos dois reservatórios e são consideradas as restrições de vazão máxima de mais de um ponto de controle.

USO DO ARISCO PARA APENAS UM APROVEITAMENTO: CASO DE ESTUDO DA UHE BARRA BONITA

A UHE Barra Bonita encontra-se em operação comercial desde 1963 (AUREN, 2025) e está localizado no rio Tietê na bacia do rio Paraná.

Consta declarado pelo agente de geração hidráulica responsável por operar a UHE Barra Bonita ao ONS, através do Formulário de Solicitação de Atualização de Restrições Hidráulicas – FSAR-H n° 77/2018, o valor de 2.300 m³/s como sendo a restrição de vazão máxima. Ademais, foi definido o tempo de retorno de 20 anos a ser adotado nos estudos de controle de cheias também pelo agente de geração hidráulica.

Trata-se de um aproveitamento que faz parte, para fins de estudos de prevenção de cheias realizados pelo ONS, da bacia do rio Paraná, que é uma complexa bacia, composta por diversos reservatórios e pontos de controle.

Neste ponto, cumpre destacar que quando são calculados os volumes de espera para a bacia do rio Paraná até o posto fluviométrico Porto São José, não são consideradas as restrições de vazão máxima dos pontos de controle associados aos reservatórios da UHE Barra Bonita, no rio Tietê; e das UHEs Jurumirim e Chavantes, no rio Paranapanema. Isso ocorre porque há diferenças entre os

períodos chuvosos que são considerados para cada uma dessas bacias: o período chuvoso para a bacia do rio Paraná é de novembro a abril; para a UHE Barra Bonita, de novembro a junho; e para as UHEs Jurumirim e Chavantes, de novembro a outubro (sem caracterização de período chuvoso definido).

Especificamente para os casos das UHEs Jurumirim e Chavantes, os cálculos dos volumes de espera são feitos de forma separada, levando-se em consideração a alocação de volume de espera durante todo o ano; e, no período comum com o período chuvoso da bacia do rio Paraná, são combinados de forma a obter o resultado do estudo. Destaca-se que, no caso desses dois aproveitamentos, a revisão de volumes de espera pode ser feita através do programa ARISCO e, nesse caso, as restrições de vazão máximas próprias são consideradas.

Já para a UHE Barra Bonita há incertezas quanto à verificação do risco associado à vazão de restrição do ponto de controle associado a essa usina, para um dado nível de armazenamento, especialmente em situações de ocupação do volume de espera.

Com o objetivo de aplicar o ARISCO apenas para um aproveitamento protegendo seu próprio ponto de controle, foi elaborado o estudo para o aproveitamento de Barra Bonita, que tem como objetivo avaliar, a partir do volume armazenado no reservatório dessa usina, qual seria o valor do tempo de retorno associado a este armazenamento e se este tempo de retorno é inferior ao recomendado no PAPC. Para esta avaliação, foram adotadas as premissas utilizadas no PAPC Ciclo 2024-2025 (ONS, 2024).

Para a elaboração deste caso, foram realizadas 20 execuções de cálculos de volumes de espera com o sistema SPEC e a mesma geração de séries sintéticas que no PAPC. Porém, em vez de serem calculados os volumes de espera apenas para o tempo de retorno recomendado, foram executados mais 19 casos, abrangendo uma gama de tempos de retorno, tanto inferiores como superiores ao tempo de retorno definido.

Nas figuras 4 e 5 são apresentados os resultados da execução do programa ARISCO desenvolvido para o sistema independente de Barra Bonita para uma mesma semana operativa (de 22 a 28/02/2025). Na Figura 4 é apresentado o valor do tempo de retorno utilizando o valor do volume de espera definido no PAPC Ciclo 2024-2025, valor de 95.7% VU (ONS, 2024), enquanto na Figura 5 é apresentado um valor de armazenamento superior ao volume de espera definido no PAPC.

Figura 4 – Resultados do programa ARISCO para a bacia independente de Barra Bonita utilizando o volume de espera determinado no PAPC.

Sistema: BBON Classe ENSO: 2 Normal						
Período a avaliar: 22/02/2025-28/02/2025						
Reservatório	Volume Informado km ³	%V.Util	T.Retorno anos	Risco %	TR meta	TR < TR meta
BarraBonita	2.456	95.70	21.15	4.73	20.00	

Figura 5 – Resultados do programa ARISCO para a bacia independente de Barra Bonita utilizando o volume de espera superior ao determinado no PAPC.

Sistema: BBON Classe ENSO: 2 Normal						
Período a avaliar: 22/02/2025-28/02/2025						
Reservatório	Volume Informado km ³	%V.Util	T.Retorno anos	Risco %	TR meta	TR < TR meta
BarraBonita	2.476	96.50	16.67	6.00	20.00	Sim

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo apresenta uma possibilidade de verificação do tempo de retorno de um reservatório localizado em um sistema independente, ou quando apesar de estar em um sistema interdependente, seu período chuvoso é diferente ao do sistema onde o reservatório está localizado.

Utilizou-se para tal verificação o programa ARISCO, atualmente utilizado para revisão de volumes de espera em sistemas interdependentes (bacias com dois ou mais reservatórios e mais de um ponto de controle) e com uma estação chuvosa comum entre todos os reservatórios pertencentes a esta bacia.

O estudo apresentado foi realizado para o reservatório da usina de Barra Bonita, localizado no rio Tietê, na bacia do rio Paraná. Destaca-se ainda que, outra melhoria para operacionalização do SPEC para a bacia do Paraná seria a inclusão da restrição da UHE Barra Bonita e, com isso, não haveria a necessidade de avaliação dessa restrição de forma independente.

A avaliação do tempo de retorno para determinado volume armazenado é facilmente realizada, visto que a execução do programa ARISCO é significativamente rápida, além de ser de fácil entendimento pelo usuário.

Novas possibilidades são apresentadas utilizando-se a metodologia empregada em Barra Bonita, como por exemplo, nos aproveitamentos dos demais sistemas independentes.

REFERÊNCIAS

AUREN ENERGIA. Plano de Ação de Emergência – PAE da UHE Barra Bonita: Versão Externa R1. São Paulo: Auren Energia, jan. 2025. Disponível em: https://www.aurenenergia.com.br/wp-content/uploads/2025/01/PAE-UHE-Barra-Bonita-Versao-Externa-R1_Assinado.pdf. Acesso em: 5 jun. 2025.

CEPEL. CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema SPEC – Sistema de Prevenção de Cheias – DIANA 6.0, SIMRESC 1.0.1, CAEV 4.0, VESPO 5.0, AUXARISCO 1.0.2, DECA 1.0 e ANTECIPA 1.0 – Manual de Metodologia. CEPEL. Rio de Janeiro-RJ. 2021.

COSTA, F. D.; DAMÁZIO, J. M.; NEVES, F. P. (1999). “Sistema SPEC - Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias em Sistemas Hidroelétricos”. In Anais XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Belo Horizonte, MG

DAMÁZIO, JORGE M.; NEVES, FERNANDO P.; GHIRARDI, ANGELA O.; ROCHA, VINÍCIUS 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.

KELMAN, J.; DAMÁZIO, J. M.; COSTA, J. P. (1983). “Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias - Modelo Diana”. Revista Brasileira de Engenharia, 1, pp. 5-22.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. RT-ONS DOP 0377/2024: Plano Anual de Prevenção de Cheias - Ciclo 2024/2025. 2024. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sintegre.ons.org.br/sites/9/40/Produtos/264/PlanoAnualDePreven%C3%A7%C3%A3oDeCheias-Ciclo2024-2025.pdf>. Acesso em: 16/05/2025.

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://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://proxyportais.ons.org.br/ons.portalempregado.proxy/garapi/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://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://proxyportais.ons.org.br/ons.portalempregado.proxy/garapi/api/processo/retornarpdf?url=/sites/soumaisons/portalar/ecmpdf/Subm%C3%B3dulo%203.7-RS_2020.12.pdf>. Acesso em 16/05/2025.