

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NICOLAS NATHAN FERRAZ DOMINGUES

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA  
HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL COM A ASSOCIAÇÃO A PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

CURITIBA

2025

NICOLAS NATHAN FERRAZ DOMINGUES

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA  
HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL COM A ASSOCIAÇÃO A PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Tonso Fabiani

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Domingues, Nicolas Nathan Ferraz

Estudo de viabilidade para implantação de uma usina hidrelétrica reversível com a associação a painéis fotovoltaicos flutuantes / Nicolas Nathan Ferraz Domingues. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: André Luiz Tonso Fabiani

Coorientador: Daniel Henrique Marco Detzel

1. Usinas hidrelétricas. 2. Sistemas fotovoltaicos flutuantes. 3. Energia elétrica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Fabiani, André Luiz Tonso. IV. Detzel, Daniel Henrique Marco. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NICOLAS NATHAN FERRAZ DOMINGUES**, intitulada: **Estudo de Viabilidade para Implantação de uma Usina Hidrelétrica Reversível com a Associação a Painéis Fotovoltaicos Flutuantes**, sob orientação do Prof. Dr. ANDRE LUIZ TONSO FABIANI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Março de 2025.

Assinatura Eletrônica

28/03/2025 14:12:21.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

28/03/2025 16:32:57.0

EMERSON LUÍS ALBERTI

Avaliador Externo (ELEJOR - CENTRAIS ELÉTRICAS DO RIO  
JORDÃO S.A.)

Assinatura Eletrônica

28/03/2025 14:40:16.0

CLAUDIO MARCHAND KRÜGER

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/04/2025 12:08:02.0

ELOY KAVISKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico esta pesquisa a todas as pessoas que contribuem para fazer deste mundo um lugar melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

A missão e os desafios enfrentados para se tornar um mestre em ciências só são transponíveis quando somos rodeados por companhias que nos impulsionam ao longo dessa trajetória.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus que me deu o dom da vida e a missão de poder contribuir com a sociedade através da minha profissão e agora, através desta titulação. O meu desejo é que este trabalho possa de fato pavimentar o caminho do conhecimento científico de futuras pesquisas.

Aos meus pais, Deise Adriana Ferraz e Paulo Sergio Domingues, que antes mesmo de eu iniciar a vida acadêmica, já me incentivavam a ir mais longe através da educação. Nunca vou me esquecer de tudo o que fizeram para me proporcionar o melhor ensino possível, mesmo com os desafios da educação do nosso país. Ao meu único irmão, Wilian Rafael Ferraz Domingues, que sempre ficou ao meu lado em todos os momentos da vida.

À minha esposa, Valéria Beatriz Wille Domingues, que ao longo desta jornada me trouxe suporte emocional e se fez exemplo ao também alcançar conquistas acadêmicas e profissionais, você me inspirou. Prometo retribuir todo o esforço realizado no dia a dia para que eu pudesse desenvolver esta pesquisa.

Aos meus amigos queridos de todas as origens (infância, escola, trabalho, faculdade, etc.) e familiares, que fizeram essa caminhada ser mais leve e descontraída. Em diversos momentos foram eles que suportaram a minha ausência, sendo compreensíveis e resilientes.

Um agradecimento especial a todos os professores que contribuíram com a minha formação acadêmica, foi em homenagem a vocês que transcrevi a famosa frase de Isaac Newton na epígrafe deste trabalho. Particularmente aos meus orientadores, André Luiz Tonso Fabiani e Daniel Henrique Marco Detzel, vocês foram essenciais para que este trabalho fosse desenvolvido da melhor forma possível, oferecendo contribuições relevantes e me auxiliando em todos os aspectos técnicos e científicos.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que tudo isso fosse possível, os meus sinceros sentimentos de gratidão!

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”*

Isaac Newton, 1676 – Adaptado da metáfora dos anões de Bernardo de Chartres.

## RESUMO

A crescente preocupação mundial com a redução da emissão de CO<sub>2</sub>, traz à tona debates e formas de contribuição em diversas áreas com o objetivo de tornar o mundo mais sustentável. Com o setor de energia elétrica isso não foi diferente. No Brasil, a partir do século XXI, as chamadas fontes de energia renovável tiveram um crescimento de potência instalada acentuado, especialmente as fontes eólica e solar. Entretanto, essas fontes renováveis possuem a característica de geração variável e, desse modo, podem não contribuir com a oferta de energia nos períodos de maior demanda. Uma alternativa para aumentar a eficiência dessas fontes é a associação com sistemas de armazenamento, especificamente com Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR), as quais possuem capacidade em grande escala. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de caso implantando-se uma UHR com associação a painéis fotovoltaicos flutuantes (PFF) nas instalações das UHEs Santa Clara e Fundão utilizando duas metodologias para o cálculo da vazão turbinada/bombeada: a sazonalidade das vazões afluentes e o histórico de vazões vertidas. A partir das metodologias supracitadas, obteve-se dois arranjos com potência instalada de bombeamento de 6,8 MW e 18,6 MW, respectivamente, e vazões de 8,41 m<sup>3</sup>/s e 22,54 m<sup>3</sup>/s, nesta ordem. Para atender a demanda de energia no modo bomba, são necessários 37.000 painéis para o primeiro caso e 96.000 para o segundo, fornecendo energia durante 6 horas por dia. A pesquisa concluiu que, para que os arranjos possam ser atrativos economicamente, é necessário que haja uma forma de remuneração específica, de modo que os ativos sejam considerados como uma reserva energética de fato para os ativos de geração variável.

Palavras-chave: Usinas reversíveis, painéis fotovoltaicos flutuantes, viabilidade, análise econômica.

## **ABSTRACT**

The growing global concern about reducing CO<sub>2</sub> emissions has brought about debates and contributions across various sectors with the goal of making the world more sustainable. The electricity sector is no exception. In Brazil, from the 21st century onward, renewable energy sources have seen a significant increase in installed capacity, especially wind and solar power. However, these renewable sources are characterized by variable generation and, therefore, may not contribute to the energy supply during periods of peak demand. One alternative to increase the efficiency of these sources is their association with storage systems, specifically with Pumped Storage Plants (PSP), which have large-scale capacity. In this regard, the objective of this study is to present a case study by implementing a PSP in association with floating photovoltaic panels (FPP) at the Santa Clara and Fundão Hydroelectric Plants, using two methodologies to calculate the turbine/pumping flow: the inflow seasonality and the historical of spilled flows. From the above-mentioned methodologies, two configurations were obtained with pumping installed capacities of 6.8 MW and 18.6 MW, respectively, and flow rates of 8.41 m<sup>3</sup>/s and 22.54 m<sup>3</sup>/s, in that order. To meet the energy demand in pumping mode, 37,000 panels are needed for the first case and 96,000 for the second, providing energy for 6 hours per day. The research concluded that, for the arrangements to be economically attractive, there needs to be a specific remuneration scheme so that the assets are considered as actual energy reserves for variable generation assets.

**Keywords:** Pumped Storage Plants, Floating Photovoltaic Panels, Feasibility, Economic Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro.....                                                                                    | 19 |
| Figura 2 – Comercialização da Energia Elétrica.....                                                                                                     | 23 |
| Figura 3 – Mapa do Sistema Interligado Nacional.....                                                                                                    | 24 |
| Figura 4 – Matriz Energética Brasileira. ....                                                                                                           | 25 |
| Figura 5 – Evolução da capacidade instalada de energia elétrica.....                                                                                    | 26 |
| Figura 6 – Participação das fontes na capacidade instalada na Matriz de Energia Elétrica, conforme o PMO de maio de 2024 referente ao ano de 2023. .... | 27 |
| Figura 7 – Geração mensal referente ao mês de maio de 2024. ....                                                                                        | 28 |
| Figura 8 – Arranjo ilustrativo de uma UHR. ....                                                                                                         | 29 |
| Figura 9 – Capacidade Total Instalada Discretizada por País e Região. ....                                                                              | 31 |
| Figura 10 - UHR Marmora, Canadá. ....                                                                                                                   | 32 |
| Figura 11 – UHR Seneca, EUA. ....                                                                                                                       | 33 |
| Figura 12 – UHR Kanagawa, Japão.....                                                                                                                    | 34 |
| Figura 13 – Tipos de arranjos convencionais. (a) Ciclo aberto (b) Ciclo fechado (c) <i>Pump-back</i> . ....                                             | 34 |
| Figura 14 - Mapa de locais com potencial de UHRs diárias e semanais no Brasil....                                                                       | 41 |
| Figura 15 – Objetivos e resultados esperados pela AIR. ....                                                                                             | 45 |
| Figura 16 – Arranjo típico para a instalação de painéis fotovoltaicos flutuantes. ....                                                                  | 51 |
| Figura 17 – Localização dos aproveitamentos selecionados. ....                                                                                          | 60 |
| Figura 18 – Dimensões do rotor da turbina reversível.....                                                                                               | 69 |
| Figura 19 – Dimensões da caixa espiral da turbina reversível. ....                                                                                      | 70 |
| Figura 20 – Dimensões do tubo de sucção da turbina reversível.....                                                                                      | 71 |
| Figura 21 – Taxa de Sobrevelocidade.....                                                                                                                | 78 |
| Figura 22 – Faixas de regulação em função do tipo de sistema e das relações $TpTe$ e $TSTC$ .....                                                       | 80 |
| Figura 23 – Fluxograma do algoritmo de cálculo do RETscreen versão 4.0. ....                                                                            | 83 |
| Figura 24 – Representação gráfico de um projeto convencional.....                                                                                       | 86 |
| Figura 25 – Estrutura hierárquica do SISOH. ....                                                                                                        | 88 |
| Figura 26 – Histórico de vazões afluentes médias mensais – UHE Santa Clara. ....                                                                        | 89 |
| Figura 27 – Histórico de vazões vertidas diárias – UHE Santa Clara.....                                                                                 | 90 |
| Figura 28 – Modelo tridimensional ilustrativo da turbina reversível dimensionada....                                                                    | 92 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 29 – Traçado esquemático do circuito da UHR.....                                  | 94  |
| Figura 30 – Perfil do terreno do circuito da UHR.....                                    | 95  |
| Figura 31 – Estruturas do circuito hidráulico da UHR.....                                | 96  |
| Figura 32 – Curva de produção de energia solar hipotética em um dia ensolarado.<br>..... | 107 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 – Propostas de soluções normativas.....                                          | 45  |
| Quadro 2 – Propostas de soluções não normativas.....                                      | 46  |
| Quadro 3 – Alternativas escolhidas para as soluções normativas e não-normativas.<br>..... | 47  |
| Quadro 4 – Dimensionamento da turbina reversível. ....                                    | 93  |
| Quadro 5 – Dimensionamento da chaminé de equilíbrio.....                                  | 99  |
| Quadro 6 - Parâmetros de entrada e demanda de energia.....                                | 105 |
| Quadro 7 – Custos das instalações fotovoltaicas flutuantes. ....                          | 109 |
| Quadro 8 – Resultados da avaliação econômica. ....                                        | 110 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Comparação entre três arranjos convencionais de UHR.....                                           | 35  |
| Tabela 2 – Ocasões de operação para os diferentes tipos de ciclos de operação...                              | 38  |
| Tabela 3 – Projetos de Implantação futura de UHR acopladas a tecnologias de fontes renováveis variáveis. .... | 55  |
| Tabela 4 – Características técnicas dos aproveitamentos selecionados. ....                                    | 61  |
| Tabela 5 – Resultados - Sazonalidade.....                                                                     | 90  |
| Tabela 6 – Parâmetros iniciais de cálculo. ....                                                               | 91  |
| Tabela 7 – Pré-dimensionamento da UHR.....                                                                    | 91  |
| Tabela 8 – Dimensionamento da tomada de água para as duas alternativas.....                                   | 96  |
| Tabela 9 – Dimensionamento do túnel adutor para as duas alternativas. ....                                    | 97  |
| Tabela 10 – Verificação quanto à necessidade de implantação.....                                              | 98  |
| Tabela 11 – Dimensionamento do túnel forçado para as duas alternativas. ....                                  | 100 |
| Tabela 12 – Volumes – Casa de Força. ....                                                                     | 101 |
| Tabela 13 – Perdas de carga no circuito.....                                                                  | 102 |
| Tabela 14 – Parâmetros finais.....                                                                            | 102 |
| Tabela 15 – Quantidades gerais de obras civis.....                                                            | 103 |
| Tabela 16 – Localização da estação. ....                                                                      | 104 |
| Tabela 17 – Dados climáticos da estação Guarapuava. ....                                                      | 104 |
| Tabela 18 – Resultado do dimensionamento dos painéis fotovoltaicos. ....                                      | 106 |
| Tabela 19 – Custos de equipamentos. ....                                                                      | 108 |
| Tabela 20 – Resultados da avaliação econômica considerando ICB mínimo. ....                                   | 111 |

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

|         |                                                             |
|---------|-------------------------------------------------------------|
| ABRAPCH | - Associação Brasileira de PCHs e CGHs                      |
| ACL     | - Ambiente de Contratação Livre                             |
| ACR     | - Ambiente de Contratação Regulado                          |
| AIR     | - Análise de Impacto Regulatório                            |
| ANEEL   | - Agência Nacional de Energia Elétrica                      |
| BEN     | - Balanço Energético Nacional                               |
| BI      | - Business Intelligence                                     |
| CCEE    | - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica             |
| CMSE    | - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico                 |
| CNPE    | - Conselho Nacional de Política Energética                  |
| CUST/D  | - Contrato de Uso do Sistema de Transmissão ou Distribuição |
| EPE     | - Empresa de Pesquisa Energética                            |
| FCD     | - Fluxo de Caixa Descontado                                 |
| FRV     | - Fontes Renováveis Variáveis                               |
| GESEL   | - Grupo de Estudos do Setor Elétrico                        |
| GF      | - Garantia Física                                           |
| GW      | - Gigawatt                                                  |
| GWh     | - Gigawatt-hora                                             |
| GWp     | - Gigawatt-pico                                             |
| IGP-DI  | - Índice Geral de Preço – Disponibilidade Interna           |
| kWp     | - kilowatt-pico                                             |
| MME     | - Ministério de Minas e Energia                             |
| MMGD    | - Micro e Minigeração Distribuída                           |
| MRE     | - Mecanismo de Realocação de Energia                        |
| MUST/D  | - Montante de Uso do Sistema de Transmissão ou Distribuição |
| MW      | - Megawatt                                                  |
| MWh     | - Megawatt-hora                                             |
| MWp     | - Megawatt-pico                                             |
| ODS     | - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável                  |
| OPE     | - Orçamento Padrão Eletrobras                               |
| ONS     | - Operador Nacional do Sistema Elétrico                     |
| ONU     | - Organização das Nações Unidas                             |

|        |                                                           |
|--------|-----------------------------------------------------------|
| PCH    | - Pequena Central Hidrelétrica                            |
| PDE    | - Plano Decenal de Expansão de Energia                    |
| PFF    | - Painéis Fotovoltaicos Flutuantes                        |
| PIE    | - Produtor Independente de Energia                        |
| PLD    | - Preço de Liquidação das Diferenças                      |
| PMO    | - Programa Mensal de Operação                             |
| PNE    | - Plano Nacional de Energia                               |
| P&D    | - Pesquisa e Desenvolvimento                              |
| REN    | - Resolução Normativa                                     |
| SAE    | - Sistema de Armazenamento de Energia                     |
| SEB    | - Sistema Elétrico Brasileiro                             |
| SIN    | - Sistema Interligado Nacional                            |
| SISORH | - Sistema de Orçamento de Usinas Hidrelétricas            |
| TIR    | - Taxa Interna de Retorno                                 |
| TUST/D | - Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão ou Distribuição |
| UFF    | - Usina Fotovoltaica Flutuante                            |
| UGH    | - Usina de Geração Híbrida                                |
| UHE    | - Usina Hidrelétrica                                      |
| UHR    | - Usina Hidrelétrica Reversível                           |
| USACE  | - United States Army Corps of Engineers                   |
| VPL    | - Valor Presente Líquido                                  |

## SUMÁRIO

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                         | <b>16</b> |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                                              | <b>19</b> |
| 2.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....                                                | 19        |
| 2.1.1 Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro.....                   | 19        |
| 2.1.2 Ambientes de Comercialização .....                                          | 23        |
| 2.1.3 Sistema Interligado Nacional (SIN) .....                                    | 24        |
| 2.1.4 Matriz Energética e Matriz Elétrica Brasileira .....                        | 25        |
| 2.2 USINAS REVERSÍVEIS (UHR) .....                                                | 29        |
| 2.2.1 Conceito e Concepção .....                                                  | 29        |
| 2.2.2 Histórico das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) .....                  | 30        |
| 2.2.3 Características Técnicas .....                                              | 31        |
| 2.2.3.1 Tipos de Arranjos.....                                                    | 31        |
| 2.2.3.2 Tipos de Máquinas .....                                                   | 35        |
| 2.2.3.3 Características Topográficas e Geológicas .....                           | 36        |
| 2.2.3.4 Características operacionais .....                                        | 37        |
| 2.2.4 Mecanismos de Remuneração.....                                              | 38        |
| 2.2.5 Aplicações .....                                                            | 40        |
| 2.2.6 Desafios para a inserção de Usinas Reversíveis no SIN e Marcos Regulatórios |           |
| 42                                                                                |           |
| 2.3 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES .....                                        | 49        |
| 2.4 USINAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS .....                                            | 54        |
| <b>3 MÉTODOS .....</b>                                                            | <b>59</b> |
| 3.1 ESTUDO DE CASO .....                                                          | 59        |
| 3.2 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA UHR .....                                       | 62        |
| 3.2.1 Sazonalidade das vazões afluentes .....                                     | 62        |
| 3.2.2 Vazões Vertidas .....                                                       | 63        |
| 3.3 CONCEPÇÃO DO ARRANJO DA USINA.....                                            | 72        |
| 3.4 DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES .....                    | 82        |
| 3.5 MÉTODO DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....                                           | 83        |
| 3.5.1 Índice Custo-Benefício (ICB).....                                           | 84        |
| 3.5.2 Valor Presente Líquido (VPL).....                                           | 85        |
| 3.5.3 Taxa Interna de Retorno (TIR) .....                                         | 85        |

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.5.4 Estimativa de Custos.....                                         | 86         |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                   | <b>89</b>  |
| 4.1 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA UHR.....                              | 89         |
| 4.2 CONCEPÇÃO DO ARRANJO.....                                           | 93         |
| 4.2.1 Tomada de água.....                                               | 96         |
| 4.2.2 Túnel adutor.....                                                 | 97         |
| 4.2.3 Chaminé de equilíbrio.....                                        | 98         |
| 4.2.4 Túnel forçado.....                                                | 100        |
| 4.2.5 Casa de Força.....                                                | 100        |
| 4.2.6 Túnel e canal de fuga.....                                        | 101        |
| 4.3 PERDAS DE CARGA.....                                                | 101        |
| 4.4 QUANTITATIVOS DE OBRAS CIVIS.....                                   | 102        |
| 4.5 DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES.....           | 103        |
| 4.6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....                                            | 107        |
| 4.7 DISCUSSÕES.....                                                     | 111        |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....</b>                      | <b>115</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                 | <b>117</b> |
| <b>APÊNDICE 1 – SAZONALIDADE DE VAZÕES AFLUENTES.....</b>               | <b>122</b> |
| <b>APÊNDICE 2 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO</b> | <b>124</b> |
| <b>APÊNDICE 3 – ORÇAMENTO PADRÃO ELETROBRAS.....</b>                    | <b>127</b> |
| <b>ANEXO 1 – DADOS ABERTOS ONS.....</b>                                 | <b>129</b> |
| <b>ANEXO 2 – ÍNDICE GERAL DE PREÇOS – DISPONIBILIDADE INTERNA.....</b>  | <b>139</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira apresenta uma característica específica que a distingue da matriz elétrica mundial: o grande percentual de geração em sua base a partir de fontes hídricas e a complementariedade do atendimento da demanda realizada por demais fontes. Até os anos 2000, os picos de demanda energética eram atendidos pelas hidrelétricas com o auxílio do acionamento de usinas térmicas nos períodos de estiagem. A partir do início do século XXI, houve uma mudança na matriz de geração devido a dois fatores: o baixo potencial para a criação de armazenamento em reservatórios, seja por fatores energéticos ou ambientais; e a inserção de outras fontes de energia, como solar fotovoltaica e, principalmente, eólica. Esta alteração expressiva tornou o sistema que até então era somente de base hidrotérmica para um sistema de base hidro-termo-eólico (DETZEL, 2024).

Essa diversificação traz os benefícios do atendimento do pico da demanda energética por fontes renováveis reduzindo a necessidade de operar usinas térmicas consideradas não renováveis. Em contrapartida, as características de variabilidade e intermitência dessas novas tecnologias tornam o fornecimento de energia imprevisível e, conseqüentemente, não seguro. Neste sentido, as tecnologias de armazenamento se destacam como ferramentas com alto grau de utilidade para o atual contexto energético do país.

A problemática é centrada no Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2019, o qual apresenta como principais desafios para o século XXI a introdução do grande percentual de geração variável não controlável na matriz energética brasileira e mundial:

[...] O Brasil também terá que superar esse desafio, otimizando a operação da sua matriz energética existente, com novos investimentos necessários para garantir a adequabilidade de suprimento. A diversificação da matriz elétrica nacional requererá sistemas de armazenamento de energia, integrados de forma harmônica, para mitigar os efeitos causados pela intermitência das fontes renováveis não despacháveis e para garantir a qualidade do fornecimento de energia elétrica em grandes escalas, de modo seguro, eficiente e econômico. (EPE, 2019, p. 159).

Desse modo, esta pesquisa concentra-se nas tecnologias de armazenamento de energia, mais especificamente na integração dessas tecnologias com as fontes renováveis variáveis. Sob esta perspectiva, questiona-se: como contribuir para a

integração harmoniosa entre os sistemas de armazenamento de energia e as fontes renováveis variáveis de forma segura, eficiente e econômica?

A resposta para esta pergunta pode estar justamente na aplicação de Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR) com alimentação energética proveniente de painéis fotovoltaicos em instalações hidrelétricas existentes, uma vez que essa combinação pode contribuir com a integração harmoniosa entre os sistemas de armazenamento de energia e as Fontes Renováveis Variáveis (FRV). Como consequência, espera-se uma mitigação dos impactos da intermitência na geração, melhorando a eficiência da oferta de energia de maneira segura, confiável e econômica. Adicionalmente, espera-se que os impactos ambientais sejam reduzidos uma vez que é previsto que este sistema reutilize instalações hidrelétricas existentes.

As UHRs são sistemas com capacidade de armazenamento de energia garantindo previsibilidade e diminuindo a variabilidade de geração de energia do sistema devido a inserção de fontes variáveis. Adicionalmente, a alimentação desses sistemas no modo bomba demanda consumo de energia; portanto, integrar um sistema próprio às usinas reversíveis proveniente de uma fonte renovável variável instalada no mesmo local pode ser uma alternativa real para uma geração mais estável, principalmente nos horários de maior demanda energética.

Isso corrobora com o acesso confiável e sustentável de energia elétrica para a sociedade, o que vai de encontro com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 7 da Organização das Nações Unidas (ONU). Ademais, o Brasil precisará se preparar para implantar sistemas de armazenamento de energia e serão necessários profissionais especializados nesse tipo de tecnologia, especialmente sobre UHR.

Neste sentido, a pesquisa tem como objetivo geral a avaliação da viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema reversível acoplado a painéis fotovoltaicos flutuantes em uma usina hidrelétrica existente.

Como objetivos específicos, esta pesquisa se propõe a:

- Selecionar métodos para o cálculo da vazão disponível para o dimensionamento da UHR;
- Dimensionar os arranjos de UHR associada a um sistema fotovoltaico flutuante para o local escolhido;

- Avaliar o benefício econômico ao se implantar às alternativas de UHR híbrida em uma usina hidrelétrica.

Com o intuito de pormenorizar o estado da arte, a estrutura desta pesquisa apresenta a revisão da literatura, iniciando com o setor elétrico brasileiro, desde a sua estrutura institucional até o atual cenário das Matrizes Elétrica e Energética Brasileira. Em seguida, são abordados os conceitos técnicos de uma UHR, o histórico da tecnologia, os desafios e o panorama atual para a aplicação deste sistema em território nacional. Posteriormente, a pesquisa detalha a tecnologia dos painéis fotovoltaicos flutuantes e expõe os conceitos de usinas híbridas ou associadas, os exemplos de aplicações e os estudos desenvolvidos entre UHR e painéis fotovoltaicos.

Na sequência são apresentados os métodos utilizados para o dimensionamento de uma UHR híbrida, o estudo de caso expondo as características técnicas do projeto avaliado e o detalhamento da solução de usina reversível híbrida para o empreendimento, bem como os resultados obtidos com a implantação do sistema e por fim as considerações finais da pesquisa.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo é subdividido em quatro tópicos da seguinte forma:

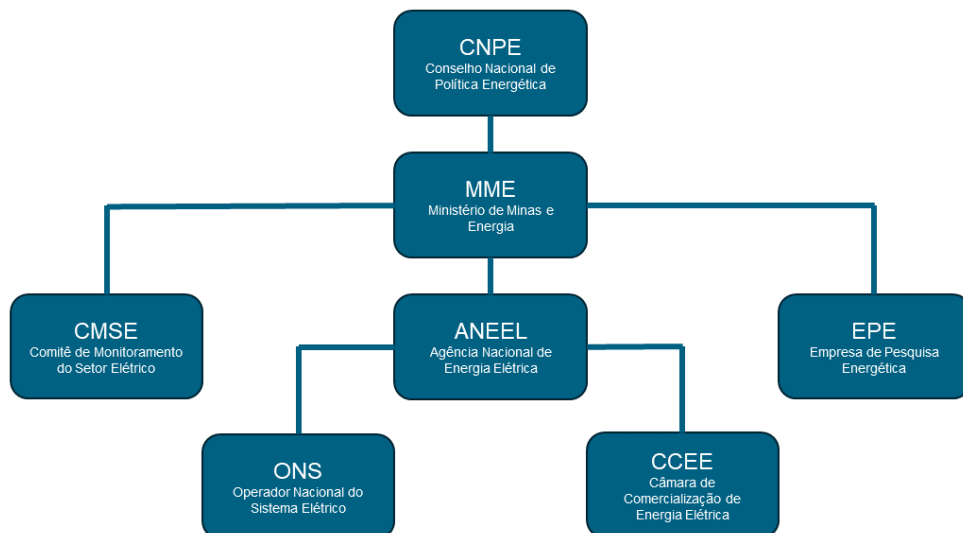
- Setor Elétrico Brasileiro;
- Usinas reversíveis;
- Painéis fotovoltaicos flutuantes;
- Usinas híbridas e associadas.

### 2.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

#### 2.1.1 Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro

A atual estrutura institucional do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) vigente a partir de 2004 e denominada como Novo Modelo, apresenta a configuração mostrada pela Figura 1.

Figura 1 – Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro.



FONTE: Adaptado de CCEE (2024).

As funções e atribuições de cada agente são descritas a seguir:

- Conselho Nacional de Política Energética (CNPE): presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia, é órgão de assessoramento do

Presidente da República para formulação de políticas e diretrizes de energia destinadas a promover o aproveitamento racional dos recursos energéticos do país, assegurando o suprimento de insumos energéticos às áreas mais remotas ou de difícil acesso e revendo periodicamente as matrizes energéticas aplicadas às diversas regiões, considerando as fontes convencionais e alternativas e as tecnologias disponíveis. Adicionalmente, a autarquia estabelece diretrizes para programas específicos, como os de uso do gás natural, do carvão, da energia termonuclear, dos biocombustíveis, da energia solar, da energia eólica e da energia proveniente de outras fontes alternativas (CNPE, 2024).

- Ministério de Minas e Energia (MME): apresenta como competências as políticas nacionais de aproveitamento dos recursos energéticos e integração do sistema elétrico no âmbito nacional (MME, 2024).
- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE): foi criado pela lei 10.848, de 2004, com a função de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional (MME, 2024).
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE): tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME) na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, cobrindo energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados e biocombustíveis. A empresa foi criada por meio de medida provisória convertida em lei pelo Congresso Nacional - Lei 10.847, de 15 de março de 2004. E a efetivação se deu em um decreto de agosto de 2004 (EPE, 2024).
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) e foi criada para regular e fiscalizar o setor elétrico brasileiro, por meio da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997 (ANEEL, 2024).
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS): é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN)

e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da ANEEL. Instituído como uma pessoa jurídica de direito privado, sob a forma de associação civil sem fins lucrativos, o ONS foi criado em 26 de agosto de 1998, pela Lei nº 9.648, com as alterações introduzidas pela Lei nº 10.848/2004 e regulamentado pelo Decreto nº 5.081/2004 (ONS, 2024).

- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE): as principais funções da CCEE são a realização de leilões de comercialização de energia elétrica, o controle das operações de compra e venda de energia e o monitoramento do mercado de energia (CCEE, 2024).

Nacif (2013) em sua dissertação, elencou algumas das implementações realizadas pelos agentes citados desde a criação do Novo Modelo do SEB, as quais podem ser transcritas a seguir:

- Desverticalização das empresas do setor, obrigando as empresas a segregarem seus ativos de geração, transmissão e distribuição em empresas distintas;
- A existência do Produtor Independente de Energia (PIE) e do Consumidor livre;
- A criação de dois ambientes de contratação de energia: O Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL);
- Obrigatoriedade da contratação de toda a energia consumida por parte dos consumidores;
- Despacho centralizado atribuído ao ONS;
- Preço da energia no mercado SPOT fornecido por modelos (*Newave* e *Decomp*);
- Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) criado com a finalidade de mitigar o risco hidrológico ao qual os agentes de geração hidrelétrica são submetidos;
- Um montante contábil de energia, denominado Garantia Física (GF), facultado ao proprietário de ativos de geração e calculado de acordo

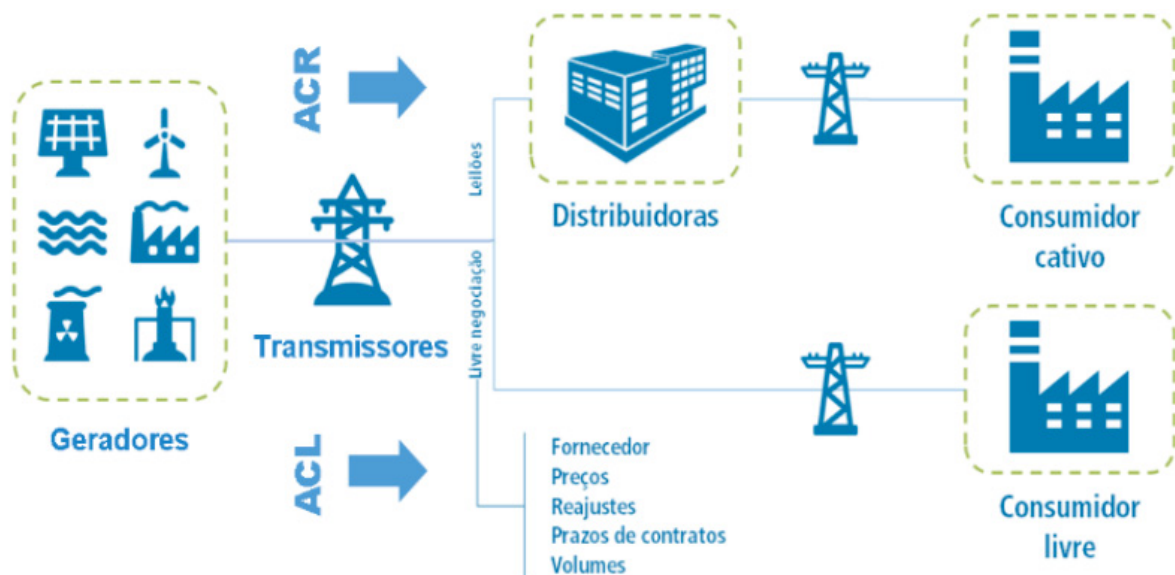
com método específico, que lastreia os contratos de venda efetuados por este proprietário (BLOOT, 2011 apud NACIF, 2013).

### 2.1.2 Ambientes de Comercialização

O mercado brasileiro de energia elétrica possui dois níveis distintos: O Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL) (MENDOÇA; BORNIA, 2019).

O primeiro ambiente é onde a contratação de energia é feita por meio de leilões nos quais os agentes geradores comercializam com os agentes de distribuição. O segundo ambiente se dá por meio de contratos bilaterais entre consumidores livres e geradores ou comercializadores, os quais definem livremente o preço de compra e venda (NACIF, 2013). Nos dois ambientes os contratos são registrados na CCEE (MENDONÇA; BORNIA, 2019). A Figura 2 apresenta esquematicamente o funcionamento da comercialização até a entrega da energia ao consumidor final.

Figura 2 – Comercialização da Energia Elétrica.



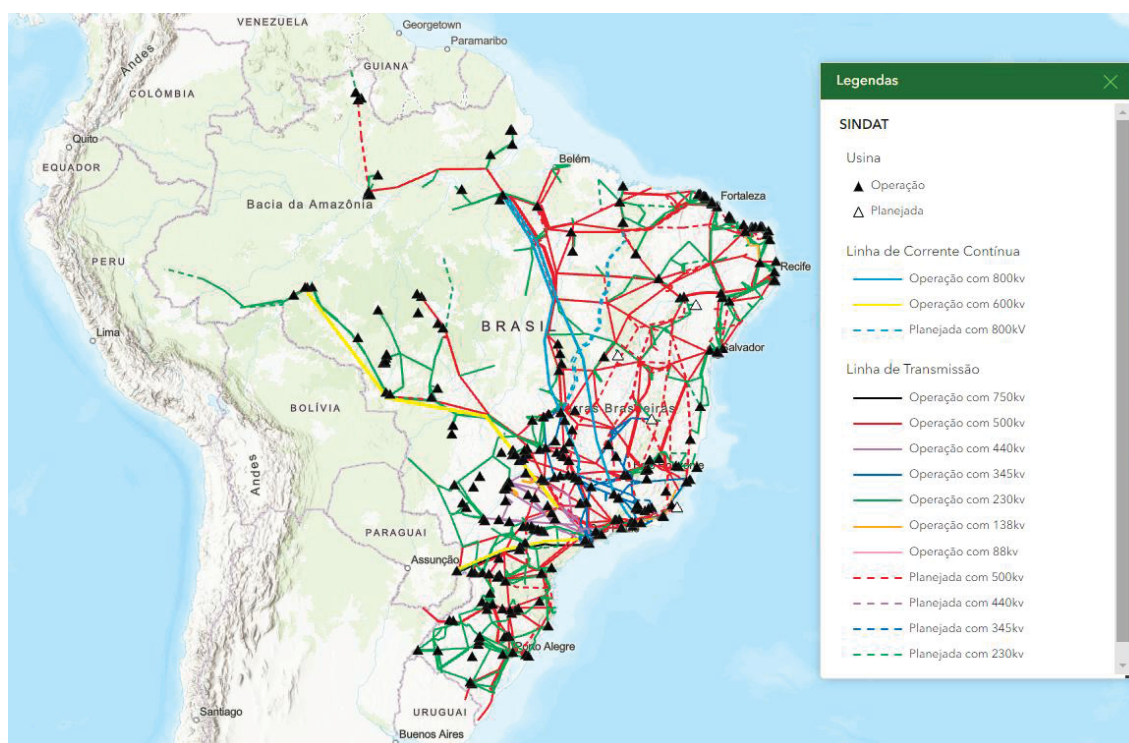
FONTE: Efcens (2016) apud Souza e Takigawa (2016).

### 2.1.3 Sistema Interligado Nacional (SIN)

Segundo o ONS (2024), o Sistema Interligado Nacional (SIN) é o sistema brasileiro de produção e transmissão de energia elétrica de base hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários, constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.

Os sistemas elétricos são conectados através da malha de transmissão que permite a transferência de energia entre os subsistemas. Essa integração torna o SIN único a nível mundial, uma vez que é possível explorar a diversidade geográfica do país a favor da segurança energética. Nesta perspectiva, a capacidade de geração do SIN é composta principalmente por usinas hidrelétricas com diferentes regimes hidrológicos, usinas eólicas que têm se destacado nos últimos anos com um forte crescimento de potência instalada nas regiões Nordeste e Sul e, adicionalmente, usinas térmicas que possuem um papel fundamental e estratégico na manutenção e no atendimento da segurança energética brasileira (ONS, 2024). A Figura 3 apresenta o mapa do SIN.

Figura 3 – Mapa do Sistema Interligado Nacional.

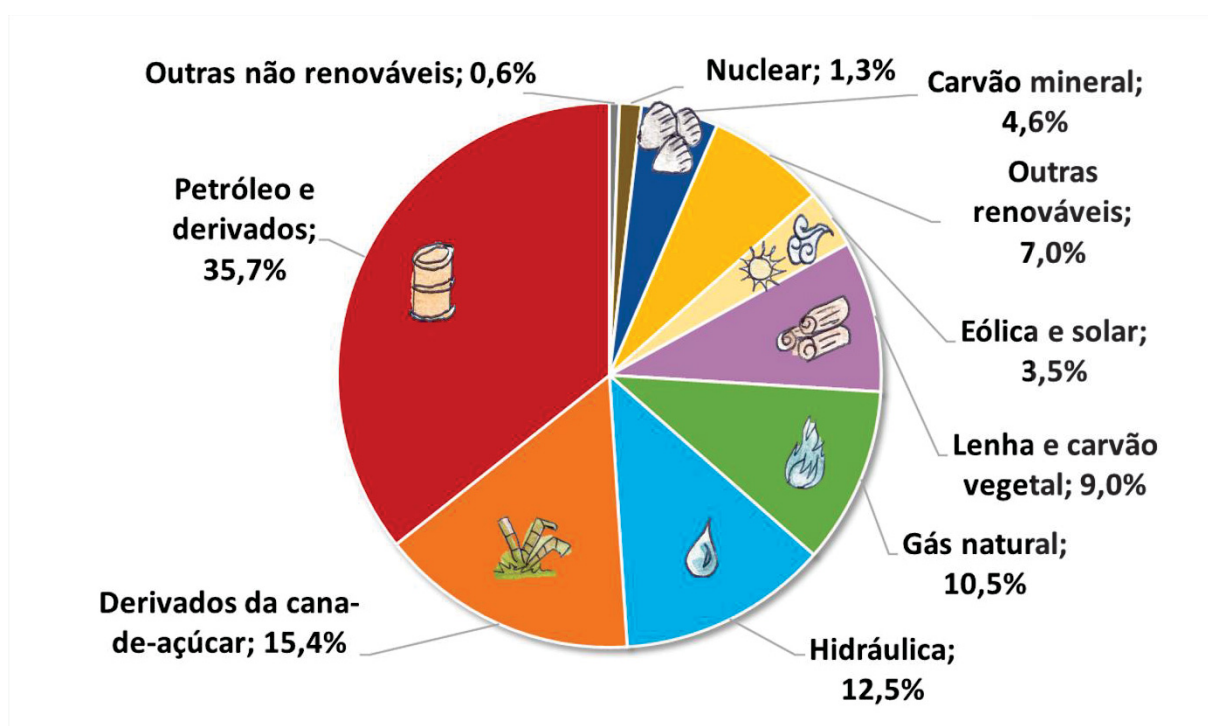


FONTE: SINMAPS – Sistemas de Informações Geográficas Cadastrais do SIN, ONS (2024).

### 2.1.4 Matriz Energética e Matriz Elétrica Brasileira

A matriz energética brasileira – aquela que engloba todos os tipos de fontes de energia, inclusive a elétrica – possui 47,4% composta por fontes renováveis de energia, as quais se pode citar: lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica, solar e outras renováveis, conforme apresentado pela Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023 (EPE, 2023). Apesar de representar menos da metade do setor esse número é muito superior ao restante do mundo, uma vez que as fontes renováveis representam aproximadamente 15% da matriz energética mundial (EPE, 2023). A Matriz Energética Brasileira de 2023 pode ser vista na Figura 04; nela é possível observar a grande participação do setor de transportes, demonstrada por “Petróleo e Derivados” e “Derivados de Cana de açúcar”.

Figura 4 – Matriz Energética Brasileira.

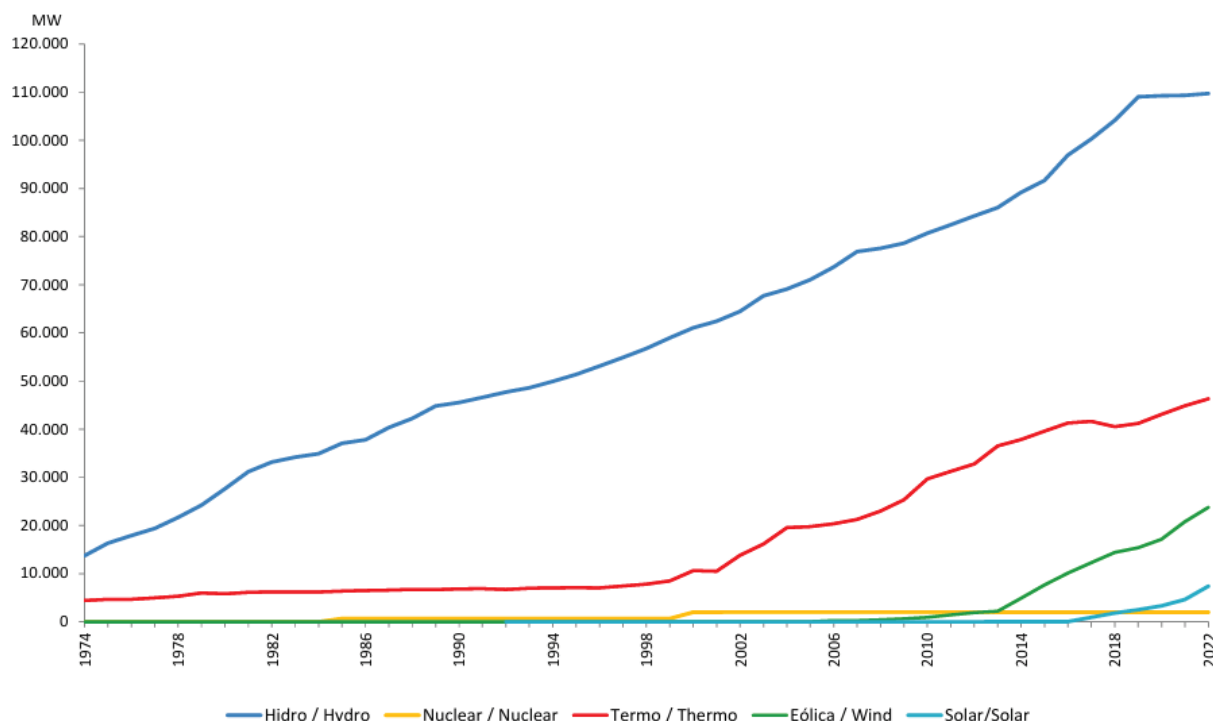


FONTE: EPE (2023).

Dados mais recentes mostram que a matriz energética nacional continua em uma tendência de transformação das suas fontes de energia. Lampis et al. (2022), apontam que o Brasil está passando por um processo de diversificação energética e não necessariamente transição energética, uma vez que há uma crescente adição da

capacidade instalada por outras fontes de energia renovável em vez de uma redução nas emissões de carbono por fontes não renováveis. Isso traz reflexos ainda mais evidentes na matriz elétrica brasileira que historicamente é constituída predominantemente por fontes hídricas. Conforme o BEN (EPE, 2023), o crescimento da capacidade instalada por fontes hídricas especialmente àquelas com armazenamento (reservatórios com depleção) já foram construídas e estão sob utilização do sistema, enquanto as demais fontes, com exceção da nuclear, apresentam um expressivo crescimento (vide Figura 5).

Figura 5 – Evolução da capacidade instalada de energia elétrica.

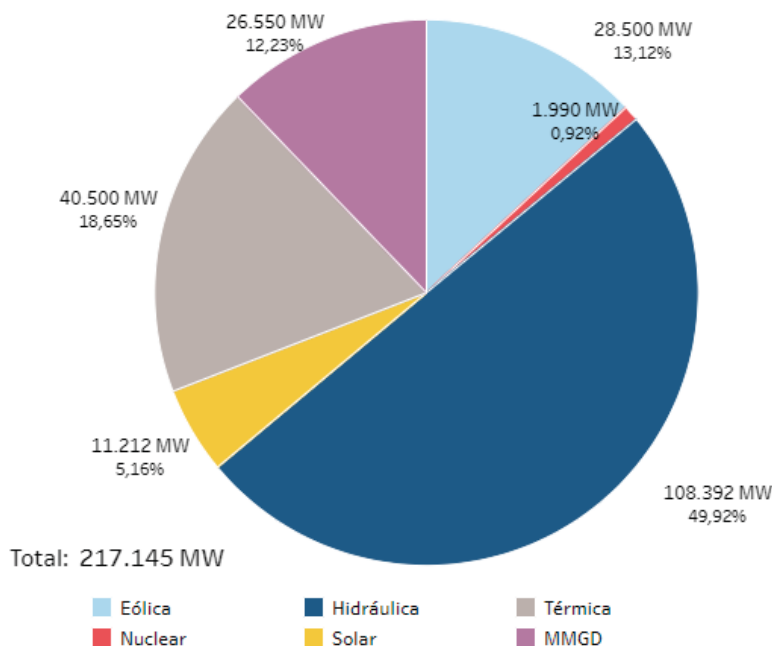


FONTE: EPE (2023).

Segundo as informações divulgadas pelo ONS, através do Programa Mensal de Operação (PMO), de maio de 2024 referente ao ano de 2023 (ONS 2024), a participação das fontes hídricas representou aproximadamente 50% da matriz elétrica nacional. A EPE (2023) destaca o aumento significativo das fontes renováveis variáveis (FRV), em especial as fontes eólica, – com expansão da potência instalada em 14,3% de 2021 para 2022 – solar e a micro e minigeração distribuída (MMGD) (vide Figura 6).

ANEEL (2024) observa que desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada. Ainda é possível fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade, para posterior compensação do consumo de energia verificado. Esse modelo representa a MMGD, na qual é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada com potência instalada inferior a 75 kW para microgeração distribuída e potência acima de 75 kW e menor ou igual a 3 MW (podendo ser até 5 MW em situações específicas) para minigeração distribuída. A MMGD teve seu crescimento incentivado por ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida (EPE, 2023).

Figura 6 – Participação das fontes na capacidade instalada na Matriz de Energia Elétrica, conforme o PMO de maio de 2024 referente ao ano de 2023.

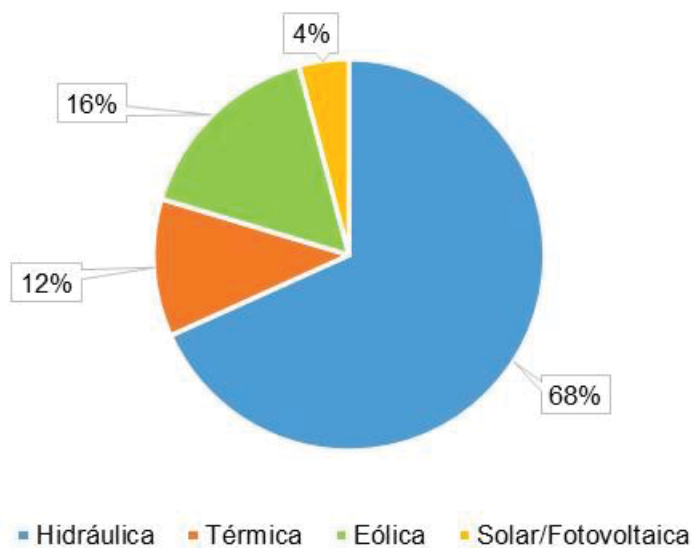


FONTE: ONS (2024).

Ainda segundo a EPE (2023), a energia solar fotovoltaica representou 94,3% da MMGD em 2022, ou seja, sendo a principal fonte responsável pela geração de energia neste modelo. Portanto, ainda que haja diversas fontes de energia dentro da MMGD, o crescimento significativo desse sistema está intrinsecamente atrelado a expansão das fontes solares.

Um ponto importante que merece destaque na análise da matriz elétrica nacional é a oferta de energia de cada fonte, uma vez que a capacidade instalada por si só não garante o atendimento seguro da demanda energética. A Figura 7 apresenta a geração mensal referente ao mês de maio de 2024 na qual é possível observar que quase 70% da oferta de energia é proveniente das usinas hidrelétricas. Isso ocorre devido a característica de geração variável e não controlável das fontes eólica e solar, incluindo a MMGD, que contribuem para a redução da previsibilidade e segurança do fornecimento.

Figura 7 – Geração mensal referente ao mês de maio de 2024.



FONTE: Adaptado de CCEE (2024).

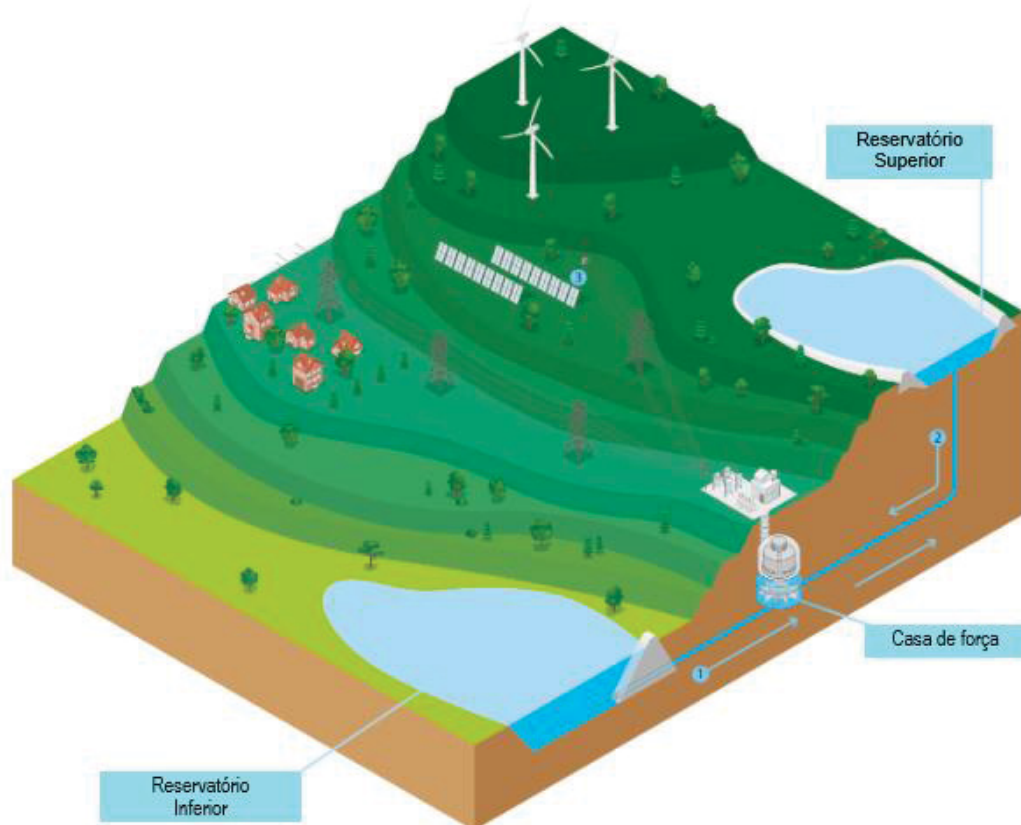
Desse modo, um dos desafios para o planejamento energético é a operação integrada das diferentes fontes por meio de tecnologias de armazenamento, como sistemas de usinas reversíveis (EPE, 2020).

## 2.2 USINAS REVERSÍVEIS (UHR)

### 2.2.1 Conceito e Concepção

As usinas reversíveis consistem no armazenamento da energia potencial de uma massa de água em um reservatório superior, que se conecta a um reservatório inferior através de um conduto ou túnel e uma casa de força. Em um dado momento essa massa de água é liberada por gravidade percorrendo o túnel ou conduto até chegar à casa de força, onde a energia é gerada através de um conjunto turbina-gerador, sendo restituída em um reservatório inferior. Neste mesmo sistema de maneira reversa, a massa de água do reservatório inferior sofre sucção pelo conjunto moto-bomba sendo conduzida para o reservatório superior através do túnel ou conduto (GESEL et al., 2021). A Figura 8 apresenta um exemplo de arranjo de uma usina reversível.

Figura 8 – Arranjo ilustrativo de uma UHR.



FONTE: Adaptado de IHA, 2018.

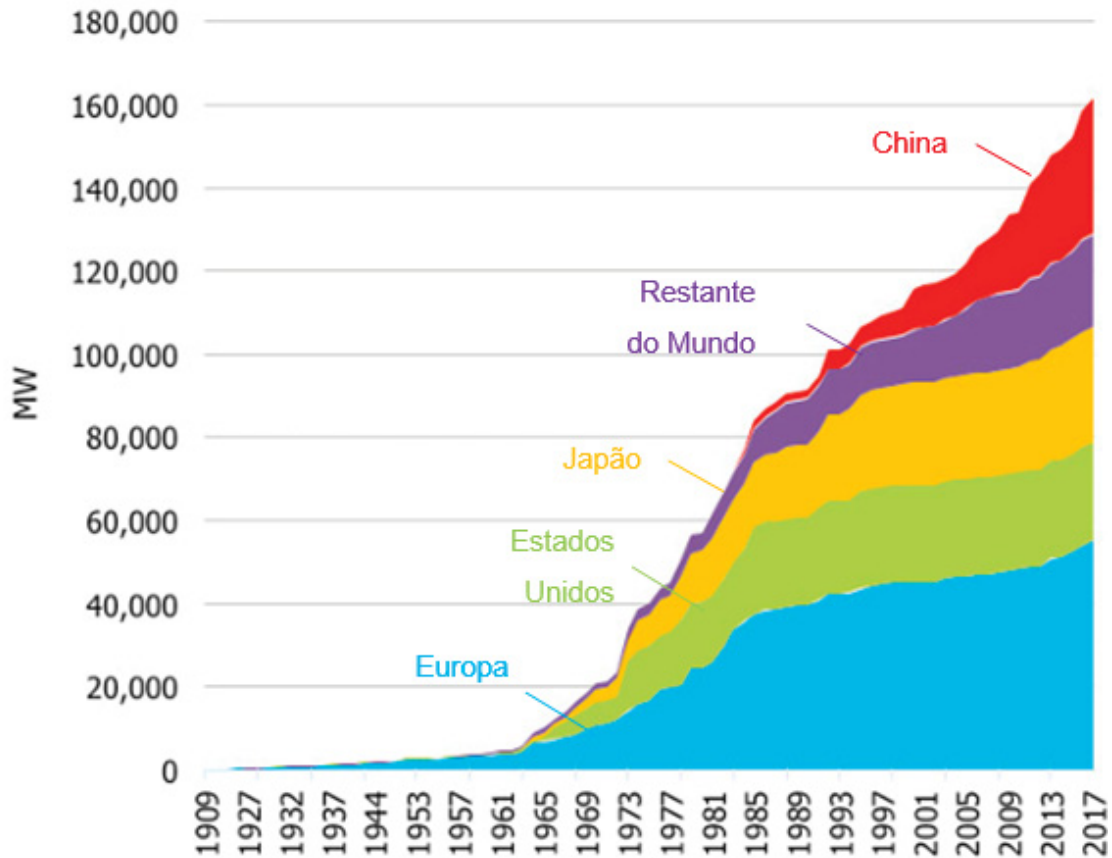
### 2.2.2 Histórico das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)

A tecnologia das UHR foi idealizada no início do século XX. Entretanto, o estímulo para o planejamento e construção desses empreendimentos se deu a partir do final da Segunda Guerra Mundial, com o aumento rápido e expressivo da população global que consequentemente aumentou o pico da demanda energética ao redor do mundo. Inicialmente a base energética mundial era tipicamente por geradores térmicos que ficavam ligados constantemente. Como os equipamentos desses geradores eram submetidos a altas temperaturas sob altas pressões, não havia espaço para melhorias na eficiência da produção energética. A partir disso, as UHR começaram a ser desenvolvidas com o objetivo de armazenar a energia excedente dos geradores térmicos para gerar no pico da demanda. Esse período foi a primeira fase de desenvolvimento dos projetos de UHR (IHA, 2020).

A segunda fase de desenvolvimento dos projetos de UHR se deu entre as décadas de 60 e 80 impulsionada pelo rápido aumento da demanda energética do pós-guerra, pela crise do petróleo na década de 70 e pelo desenvolvimento da energia nuclear que, principalmente no Japão, foi utilizada de maneira integrada com as UHR. Na década de 90, poucos projetos foram desenvolvidos devido à desregulamentação do mercado de energia e pelo baixo desenvolvimento da energia nuclear (IHA, 2020).

A partir do século XXI, com o crescimento de fontes de energias renováveis variáveis em grande escala, a demanda por tecnologias de armazenamento para regularizar o fornecimento energético novamente aqueceu o desenvolvimento de projetos de usinas reversíveis, uma vez que o armazenamento de energia potencial hidráulica é o principal recurso em grande escala para tal fim. Neste período a China apresentou o maior crescimento de projetos de UHR, com capacidade instalada de 15.000 MW entre 2010 a 2017 (IHA, 2020). Segundo a base de dados do IHA (2020), a energia total armazenada em projetos de UHR no mundo está em torno de 9.000 GWh. A Figura 9 apresenta o crescimento da capacidade total instalada de usinas reversíveis no mundo desde a sua origem até o ano de 2017.

Figura 9 – Capacidade Total Instalada Discretizada por País e Região.



FONTE: Adaptado de IHA (2018).

### 2.2.3 Características Técnicas

As características técnicas de uma UHR devem considerar quatro aspectos para a sua implantação: os tipos de arranjos, os tipos de máquinas, as características topográficas e ambientais do local a ser implantado e o tipo de operação.

#### 2.2.3.1 Tipos de Arranjos

Os arranjos convencionais de usinas reversíveis consistem basicamente em três tipos: ciclo fechado, ciclo aberto e *pump-back* (GESEL et al. 2021).

O arranjo de ciclo fechado apresenta como característica principal a instalação fora de uma cascata ou de um curso natural e, portanto, não recebem afluentes. Neste caso, o sistema é alimentado uma única vez com um determinado volume de água. Um exemplo deste sistema no mundo é a UHR Marmora localizada

no Canadá (HATCH, 2023). Na Figura 10 é apresentada uma vista aérea do reservatório superior e inferior da UHR Marmora.

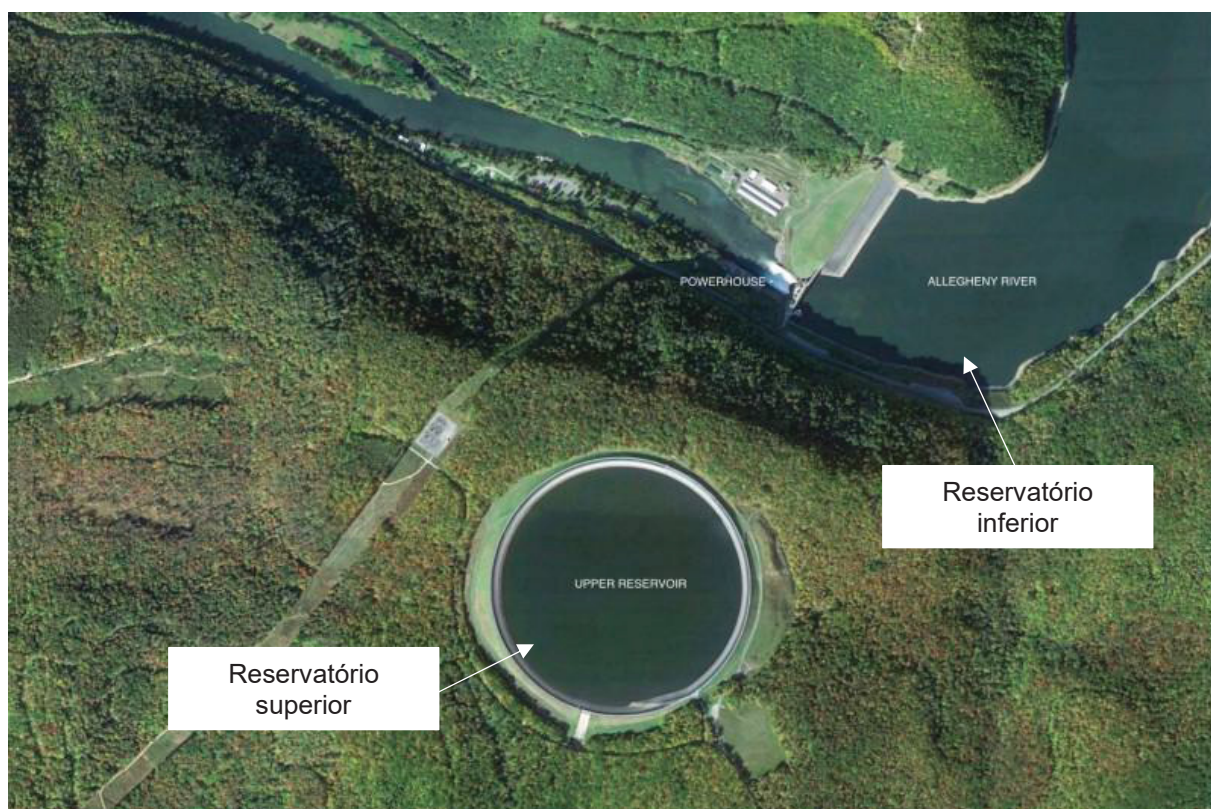
Figura 10 - UHR Marmora, Canadá.



FONTE: Adaptado de HATCH, 2023.

O arranjo de ciclo aberto, caracteriza-se pelo aporte natural de um curso d'água para o reservatório inferior e o armazenamento é feito em um reservatório superior fora do curso natural. Devido ao aporte de fluxo que é retirado da calha do rio, este tipo de arranjo pode gerar impactos ambientais mais expressivos. Como vantagem do arranjo de ciclo aberto pode-se citar o aproveitamento da mesma estrutura de casa de força para os dois reservatórios. Um exemplo deste tipo de arranjo de ciclo aberto é a UHR Seneca (Estados Unidos), conforme é apresentado na Figura 11, na qual é possível observar uma vista aérea do reservatório superior fora do curso d'água e o reservatório inferior instalado no curso natural com a casa de força (FITZGERALD, 1973).

Figura 11 – UHR Seneca, EUA.



FONTE: Adaptado de CLUI (2024).

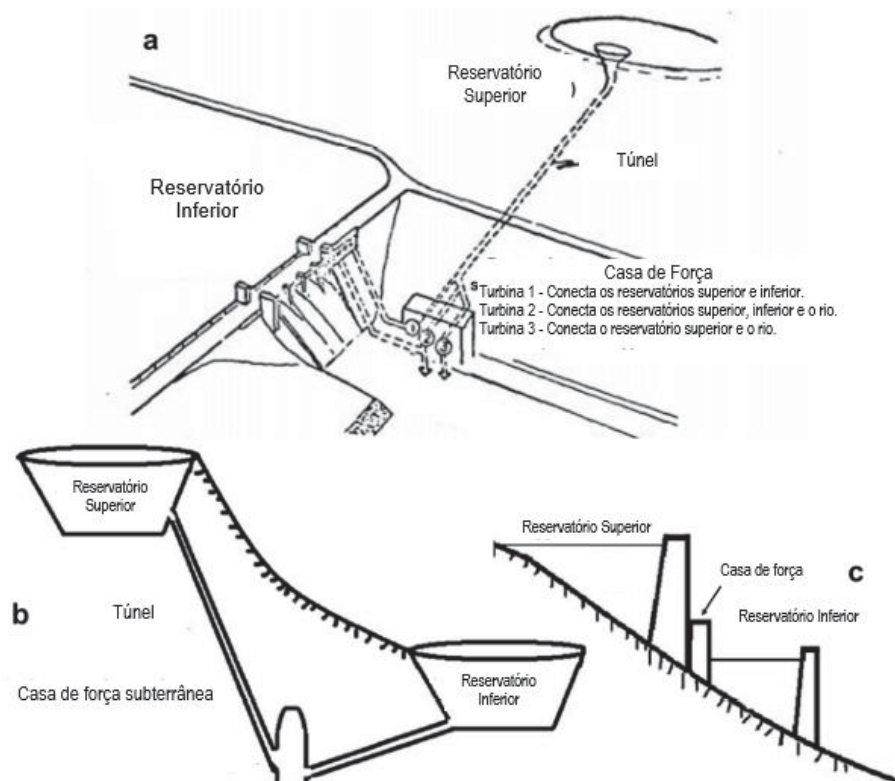
No arranjo do tipo *pump-back* os reservatórios superior e inferior recebem aporte de fluxo natural do mesmo curso d'água, com a casa de força instalada a jusante do reservatório superior permitindo que a operação utilize máquinas do tipo turbina-bomba, ou seja, ora bombeando em períodos de baixa demanda energética, ora gerando energia em períodos de altas demandas energéticas. A UHR Kanagawa no Japão, pode ser considerada um tipo de arranjo *pump-back* (PELTIER, 2006). A Figura 12 apresenta uma vista aérea do arranjo da UHR Kanagawa indicando as posições dos reservatórios e o traçado do circuito hidráulico.

A Figura 13 apresenta de forma esquemática os três tipos de arranjos convencionais citados, enquanto a Tabela 1 apresenta uma comparação de forma resumida.

Figura 12 – UHR Kanagawa, Japão.



FONTE: Adaptado de Power Magazine 2024.

Figura 13 – Tipos de arranjos convencionais. (a) Ciclo aberto (b) Ciclo fechado (c) *Pump-back*.

FONTE: Adaptado de HUNT et al. (2020).

Tabela 1 – Comparação entre três arranjos convencionais de UHR.

| <b>Tipo de Arranjo</b> | <b>Exemplo</b>      | <b>Vantagens</b>                                                                                                                                                               | <b>Desvantagens</b>                                                                                                                                                                                               |
|------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ciclo Fechado          | UHR Marmora, Canadá | A construção das barragens para a formação dos reservatórios não causa a fragmentação do rio                                                                                   | Normalmente, a capacidade de armazenamento deste tipo de barragem é limitada para ciclos diários                                                                                                                  |
| Ciclo Aberto           | UHR Seneca, EUA     | Este arranjo permite que a vazão de um rio seja regulada com o bombeamento para o reservatório superior da UHR. A UHR pode utilizar um reservatório já existente               | A construção da UHR fica limitada a locais próximos a rios, onde a queda normalmente é mais baixa.                                                                                                                |
| <i>Pump-Back</i>       | UHR Kanagawa, Japão | Trata-se de uma boa alternativa para a construção de barragens em cascata, combinando geração hídrica e armazenamento de curto e longo prazo. Maior flexibilidade de operação. | Um novo reservatório no rio principal causa grandes impactos socioambientais e econômicos. Dificuldades em adaptar as barragens existentes a UHRs no Brasil, devido à necessidade de longos túneis e baixa queda. |

FONTE: Adaptado de GESEL et al. (2021).

### 2.2.3.2 Tipos de Máquinas

Os tipos de máquinas usualmente utilizadas compreendem basicamente três conjuntos: quaternário, ternário e binário.

O conjunto quaternário consiste em uma turbina, uma bomba, um gerador e um motor. Quando a usina operar no modo de geração elétrica, a turbina acionará o gerador e, na situação que a usina operar no modo de armazenamento, o motor acionará a bomba. A vantagem neste tipo de arranjo é a possibilidade de operar nos dois modos ao mesmo tempo ou variar o modo de operação de maneira rápida (GESEL et al. 2021).

O conjunto ternário apresenta uma turbina, uma bomba e apenas uma máquina moto-gerador (elétrica) que ora será acionada no modo gerador, ora no modo motor fornecendo energia elétrica para a bomba. Neste conjunto a bomba e a turbina giram no mesmo sentido e são acopladas no mesmo eixo ligadas ao moto-gerador

com rotação síncrona. Essa característica permite a mudança de um modo para o outro de maneira rápida (GESEL et al. 2021).

O conjunto binário consiste apenas em um equipamento hidráulico e um equipamento elétrico que são turbo-bomba e moto-gerador, respectivamente. Este é o tipo de arranjo mais utilizado, uma vez que o seu custo de implantação é menor em relação aos demais arranjos (GESEL et al. 2021).

Os tipos de conjuntos ainda podem apresentar diferenças na velocidade de rotação das máquinas com velocidade fixa, que são as mais comuns, e rotação com velocidade variável (SANTOS et al., 2019).

As unidades de rotação fixa permitem alterar o modo de geração para bombeamento apenas mudando a direção de rotação do motor pois utilizam uma máquina elétrica síncrona. Ou seja, no modo bomba a máquina opera com a capacidade máxima da potência, pois a unidade elétrica está diretamente conectada com a rede e, portanto, a velocidade fixa de rotação é constante (não ajustável). Já no modo de geração, uma turbina reversível pode ser ajustada para operar entorno de 50% a 100% da potência instalada (ANTAL, 2014).

As unidades de velocidade variável são mais modernas e podem fornecer uma melhor eficiência na operação, uma vez que é possível regular a potência de entrada no modo bomba minimizando efeitos de fluxo reverso e cavitação. Já no modo de geração, as unidades de velocidade variável podem operar com até 30% da potência instalada (ANTAL, 2014). Ou seja, com as máquinas de rotação variável é possível obter melhores eficiências energéticas na operação da UHR.

Nota-se que o maior benefício das unidades de rotação variável em relação as de rotação fixa está justamente no bombeamento, sendo possível a operação abaixo da potência instalada. Essa característica torna as bombas ajustáveis uma alternativa mais interessante para associar as UHR com as fontes de energias renováveis, em especial às eólicas e solares, uma vez que a geração é intermitente (ANTAL, 2014).

#### 2.2.3.3 Características Topográficas e Geológicas

Outro aspecto que deve ser levado em consideração para a implantação de uma UHR são as condições topográficas e geológicas da região. Segundo GESEL et al. (2021), a relação altura de queda (H), em metros, por comprimento (L), em

quilômetros, deve ser maior que 40 m/km, ou seja, quanto maior a relação H/L mais favorável é o local para a implantação da usina reversível. Observa-se que os locais que atendem à esta característica são regiões montanhosas que possuem um local plano no cume para a implantação do reservatório superior. Destaca-se que quanto maior o desnível entre os reservatórios, menor é a vazão a ser bombeada para gerar a energia necessária (GESEL et al. 2021).

Ressalta-se que regiões montanhosas favorecem à construção de túneis para o circuito, sendo possível a implantação em forma de *shafts* (verticais) com a casa de força subterrânea. Entretanto, é importante atentar para que as condições geológicas da rocha suportem a pressão necessária em função do desnível (GESEL et al. 2021).

#### 2.2.3.4 Características operacionais

A operação de uma UHR consiste no armazenamento da energia potencial através do bombeamento da água nos períodos de baixa demanda energética, e para isso há o consumo de energia elétrica para alimentar o motor e a bomba. Esse consumo geralmente provém do sistema, enquanto há excesso de energia.

Nos períodos de maior demanda energética, a UHR passa a operar como geradora de energia, consumindo a energia potencial hídrica armazenada no reservatório superior transformando em energia elétrica a partir do conjunto turbina-gerador.

As UHR podem ter os seus ciclos de operação e armazenamento horários, diários, semanais, mensais, sazonais ou plurianuais a depender dos seus aspectos técnicos e capacidade de armazenamento principalmente do reservatório superior (HUNT et al. 2018). A Tabela 2 apresenta os cenários de operação para os diferentes ciclos de operação.

Tabela 2 – Ocasões de operação para os diferentes tipos de ciclos de operação.

| <b>Tipo de usina reversível</b> | <b>Volume de reservatório (km³)</b> | <b>Modo de operação</b> | <b>Ocasões de operação</b>                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Plurianual                      | 5 a 100                             | Bombeamento             | Excedente anual de geração por fontes renováveis variáveis.<br>Demanda anual de eletricidade inferior à média.                                                                              |
|                                 |                                     | Geração                 | Déficit anual de geração por fontes renováveis.<br>Demanda anual de eletricidade superior à média.                                                                                          |
| Sazonal                         | 1 a 30                              | Bombeamento             | Período úmido com alta geração de energia hidrelétrica.<br>Verão com elevada geração solar<br>Período ventoso com elevada geração eólica<br>Período com baixa demanda por eletricidade      |
|                                 |                                     | Geração                 | Período seco com baixa geração de energia hidrelétrica.<br>Inverno com baixa geração solar<br>Período com poucos ventos e baixa geração eólica<br>Período com alta demanda por eletricidade |
| Semanal                         | 0,1 a 1                             | Bombeamento             | Finais de semana quando a demanda por eletricidade reduz<br>Dias ventosos com alta geração eólica<br>Dias ensolarados com alta geração solar                                                |
|                                 |                                     | Geração                 | Dias úteis quando a demanda por eletricidade aumenta<br>Dias pouco ventosos com baixa geração eólica<br>Dias nublados com baixa geração solar                                               |
| Diário                          | 0,001 a 0,1-                        | Bombeamento             | Durante a noite quando a demanda é baixa<br>Durante o dia quando a geração solar é alta                                                                                                     |
|                                 |                                     | Geração                 | Durante o dia quando a demanda é elevada<br>Durante a noite quando não há geração solar                                                                                                     |

FONTE: Adaptado de Hunt et al. (2018).

#### 2.2.4 Mecanismos de Remuneração

Os modelos de negócio e as formas de remuneração podem ser realizadas de três maneiras: através dos custos de serviços, pela participação direta e por trás do medidor. Em determinadas circunstâncias é possível empregar uma mistura desses modelos para otimizar a receita (IHA, 2018).

O modelo de negócio através do custo de serviços é utilizado em mercados monopolistas, em que o custo de investimento é recuperado por uma tarifa fixada pelo regulador. Desse modo há uma previsibilidade na receita o que gera atratividade de investimentos. No Brasil, o segmento de transmissão é remunerado de modo semelhante, no qual existe uma receita máxima. Caso uma UHR possua função de

despacho de controle de fluxo de potência nas linhas de transmissão poderia ser remunerada dessa forma (EPE, 2021).

No modelo de participação direta, as UHR podem competir com outros participantes e as receitas são obtidas de diferentes formas, de acordo com cada mercado. As receitas provenientes da comercialização dos diferentes produtos são normalmente combinadas para tornar o projeto financeiramente viável (EPE, 2021).

No mercado de energia, as receitas podem ser obtidas por arbitragem da energia, por contratos de longo prazo e por serviços ancilares (IHA, 2018):

- Arbitragem diária: é a principal fonte de receita de muitos projetos de UHR que envolvem bombear água durante os períodos de baixa demanda energética e preços fora do pico e gerar quando a demanda energética é alta e os preços estão no pico.
- Os contratos de longo prazo são realizados por contratos de compra e venda de energia entre os fornecedores e os consumidores e podem atuar como um produto de seguro para proteger o consumidor de picos no preço da energia. Como são firmados para um período de longo prazo, garante-se um fluxo de caixa longo favorecendo o financiamento desses projetos.
- Serviços ancilares a energia armazenada ainda pode ser utilizada como serviços ancilares que fornecem controle de frequência para a rede elétrica e reinicialização de sistemas. Esses contratos geralmente são feitos por processos licitatórios. Com o aumento da inserção de FRVs no sistema, esse tipo de serviço tem ganhado cada vez mais importância.

No mecanismo de remuneração “Por trás do medidor” o sistema de armazenamento está localizado junto a um gerador, consumidor ou usuário do sistema elétrico, permitindo modular o perfil de geração ou consumo, conforme variação dos preços do sistema (EPE, 2021).

Este mecanismo ainda pode ser utilizado para aumentar a confiabilidade do fornecimento, evitar picos nos preços de eletricidade e taxas de rede. Um modelo híbrido de geração pode envolver a instalação de uma UHR que poderia ser usado

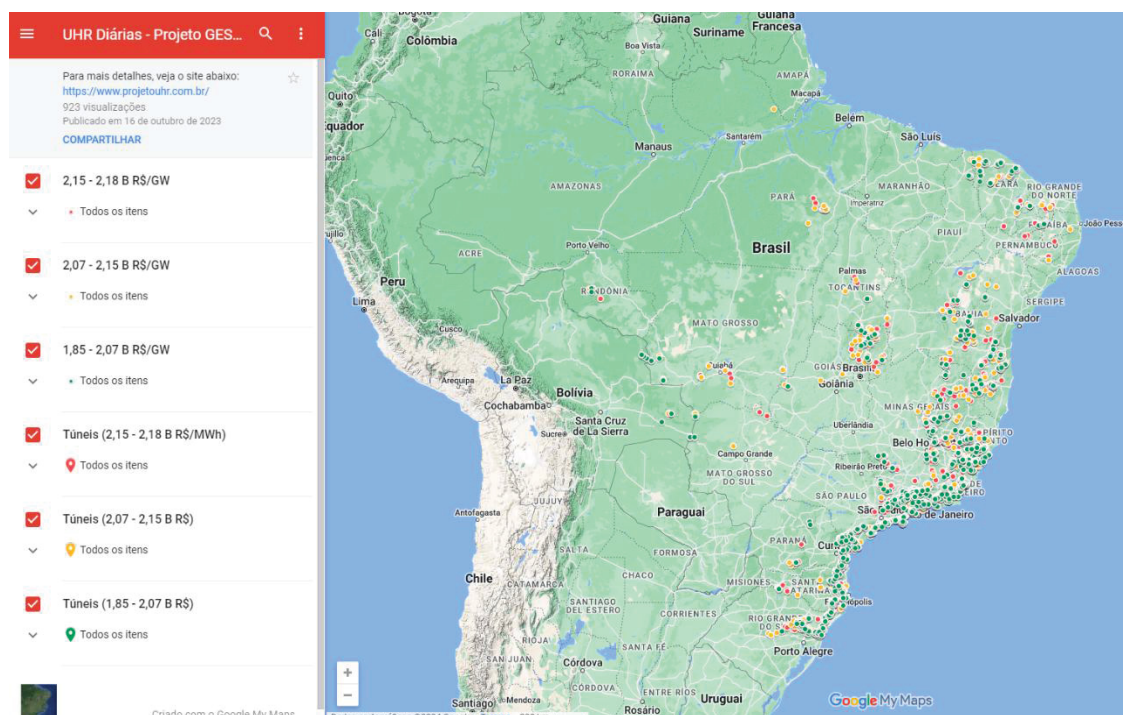
para propósitos internos e, paralelamente, oferecer serviços no mercado de eletricidade para aumentar a viabilidade do empreendimento (IHA, 2018).

#### 2.2.5 Aplicações

As principais aplicações de usinas reversíveis em operação são de experiências internacionais, uma vez que no Brasil devido ao grande potencial hídrico utilizado com reservatórios de regularização, a implantação de sistemas de armazenamento foi postergada, o que não ocorre em países com menor potencial em recursos hídricos para a geração elétrica, como é o caso do continente europeu, por exemplo. A maior usina reversível em operação no mundo é a UHR Bathy Country Storage, localizada nos EUA, com potência instalada de 3,0 GW, entretanto, há um projeto existente na China da UHR Fengning que contará com uma potência instalada de 3,6 GW (IHA, 2018). No Brasil existem 4 usinas consideradas reversíveis: Traição e Pedreira, no rio Pinheiros (bacia do Tietê) e Santa Cecília e Vigário (complexo Light na Transposição do Paraíba do Sul para o rio Guandu). Atualmente estes empreendimentos operam como elevatórias, bombeando água para reservatórios superiores ou realizando transposições, sem grande aproveitamento de outros serviços sistêmicos (Mercurio Partners, 2023).

Segundo o relatório *“Hydropower Status Report”* da IHA (2022), a potência instalada até o ano de 2021 apenas de UHRs ao redor do mundo era de 164.761 MW. No Brasil, um projeto do programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, desenvolvido em parceria com o Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL), apresentou um mapeamento de locais com potenciais para a implantação de UHRs de grande porte no país. Este mapa considera empreendimentos com capacidade instalada de 1 GW (ver Figura 14). Ao todo, estima-se 5.000 projetos com capacidade de armazenamento diárias e semanais para implantação em território nacional.

Figura 14 - Mapa de locais com potencial de UHRs diárias e semanais no Brasil.



FONTE: GESEL, 2019.

Os tipos de aplicações das usinas reversíveis foram elencados pela EPE em 2021, por meio da Nota Técnica EPE-DEE-NT-013-2021 (EPE, 2021). Algumas delas são listadas a seguir:

- Nivelamento de carga e arbitragem de energia: durante os períodos de alta oferta de energia, a UHR consome energia para bombear carga e produz energia nos períodos de alta demanda energética ou em períodos de escassez. Esse tipo de operação aumenta a eficiência econômica do sistema.
- Serviços ancilares: este item abrange funcionalidades como provimento de inércia, controle de tensão, reserva de potência para controle de frequência, acompanhamento de carga, redução dos ciclos de unidades termelétricas, redução de carga mínima do sistema e suporte à expansão da geração inflexível e auto-restabelecimento (*black-start*).
- Usos além do setor elétrico: assim como usinas hidrelétricas convencionais, para algumas UHRs os reservatórios podem ter usos que vão além daqueles relacionados ao setor elétrico, como o

abastecimento de água para o consumo humano, controle de cheias, irrigação, melhoria das condições de navegação e recreação.

- Suporte à expansão das fontes renováveis: com o incremento de fontes renováveis variáveis no sistema elétrico, sistemas de armazenamento se fazem necessários para que a energia gerada por essas fontes intermitentes possa ser utilizada em períodos de maior demanda energética. Portanto, as reversíveis se apresentam como solução eficiente e que proporcionam maior confiabilidade e flexibilidade para o sistema elétrico.

#### 2.2.6 Desafios para a inserção de Usinas Reversíveis no SIN e Marcos Regulatórios

Sob a ótica construtiva, as UHR apresentam, de forma geral, desafios similares aos de hidrelétricas convencionais, com questões técnicas e ambientais. No que diz respeito a questões regulatórias e de remuneração os desafios se mostram mais particulares e dependem do desenho do mercado de energia elétrica (EPE, 2021). A Nota Técnica EPE-DEE-NT-013-2021 divulgada pela EPE em 2021 elenca algumas características e questões relacionadas a atratividade financeira, regulação e desenho de mercado para as UHR às quais são apresentadas resumidamente a seguir:

- Projetos de engenharia: a concepção construtiva, os custos e as características das UHR são fortemente influenciados por condições locais como a topografia, a geologia, a hidrologia, as limitações de operação e o ponto de conexão, havendo ainda diferentes soluções técnicas possíveis para um mesmo local. A qualidade dos estudos tem o potencial de influenciar não somente a viabilidade técnica e econômica do empreendimento, mas também os riscos associados à execução.
- Custos de implantação: as hidrelétricas, incluindo as UHR, têm grande parte do investimento associado às obras civis (tipicamente entre 60% e 70% do custo total de implantação), sendo que características locais, podem influenciar significativamente o arranjo da usina, os custos associados e o tempo de construção. Devido à natureza das obras e dos custos de implantação, as UHR são normalmente

empreendimentos com economia de escala, o que significa uma tendência de maior atratividade econômica para projetos de grande porte.

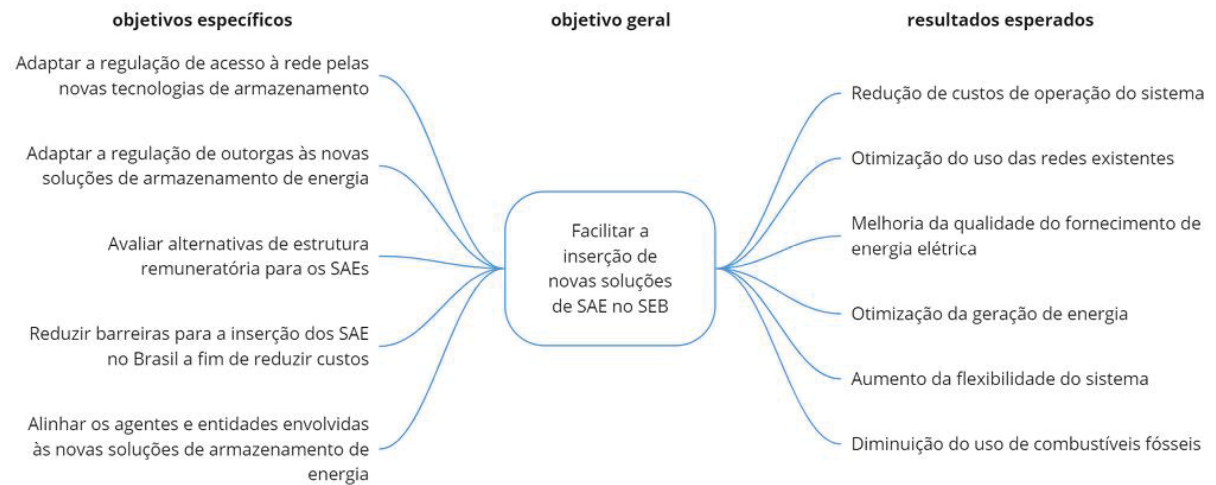
- Tempo de provisionamento: considerando a complexidade do projeto e as necessidades intrínsecas relacionadas aos processos de licenciamento e outorga, a implantação de uma UHR pode demandar prazos relativamente longos para o desenvolvimento dos estudos e para a obtenção das aprovações junto aos órgãos licenciadores, como cerca de 6 anos, podendo variar em função das particularidades de cada UHR e conforme processos de licenciamento e outorga em cada país ou mercado. Tipicamente a construção dura cerca de 5 anos, com possibilidade de variação devido aos riscos, porte e características das obras envolvidas, incluindo as condições geológicas locais.
- Valoração de benefícios e imprevisibilidade de receita: a valoração dos benefícios com as diversas características do sistema interligado pode impor aos investidores e desenvolvedores condições e riscos que estão além de sua capacidade de gestão e responsabilidade. Essa imprevisibilidade pode trazer ao investidor um risco econômico-financeiro que reduz a atratividade das UHR frente a outros investimentos.
- Enquadramento regulatório do armazenamento: a abrangência dos benefícios que podem ser fornecidos pelas UHR ao sistema dificulta o enquadramento destes empreendimentos como ativos puramente de geração ou de transmissão, resultando em maior complexidade para a inserção destas usinas nos arcabouços regulatórios existentes, cuja criação, após a desverticalização das empresas de energia, buscou separar os ambientes geração, transmissão e distribuição com diferentes formas de regulação para inibir possíveis distorções competitivas. Assim, a forma como os custos de investimento é recuperada passa a depender da maneira como as UHR são classificadas do ponto de vista regulatório, como ativos de geração (investimento recuperado no mercado competitivo) ou de transmissão (investimento recuperado pelo modelo de custo por serviço ou receita permitida), o que constitui um desafio para os sistemas de

armazenamento em geral, uma vez que possuem características de ambos os ambientes.

- Outorga para exploração: os normativos relacionados à outorga de aproveitamentos hidrelétricos no Brasil ainda não abrangem de forma adequada às reversíveis.
- Licenciamento ambiental: embora seja esperado que os impactos socioambientais decorrentes de uma UHR sejam similares aos de uma hidrelétrica convencional, trata-se de uma concepção de projeto pouco conhecida ou utilizada no país. Uma vez que não há precedentes de processos de licenciamento ambiental para usinas reversíveis no Brasil, é fundamental amadurecer a discussão em relação a esses empreendimentos.
- Outorga pelo direito de uso dos recursos hídricos: a conciliação de diversos usos torna-se bastante complexa, pois envolve diversos atores que, por vezes, possuem interesses conflitantes. Para a UHR, deve ser avaliada se essa compatibilização traz uma redução da sua capacidade operativa admissível ou não.

A respeito dos marcos regulatórios, em julho de 2023 a ANEEL avançou com o tema emitindo o relatório de Análise de Impacto Regulatório (AIR) nº 1/2023-SGM-SCE-STD-STE/ANEEL como versão pré-participação pública. Este relatório apresenta alternativas para a regulamentação do armazenamento de energia elétrica que inclui usinas hidrelétricas reversíveis com o objetivo geral de facilitar a inserção de novas soluções de sistemas de armazenamento elétrico no SEB (ver Figura 15).

Figura 15 – Objetivos e resultados esperados pela AIR.



FONTE: ANEEL (2023).

As propostas de soluções normativas e não normativas elencadas podem ser visualizadas resumidamente no Quadro 1 e Quadro 2, respectivamente.

Quadro 1 – Propostas de soluções normativas.

**Objetivo específico: Adaptar a regulação de acesso à rede pelas novas tecnologias de armazenamento**

SN1: Definição do MUST/D a ser contratado

SN2: Definição da forma de contratação do uso da rede (CUST/D)

SN3: Definição da tarifa de uso da rede a ser aplicada (TUST/D)

**Objetivo específico: Adaptar a regulação de outorgas às novas soluções de armazenamento de energia**

SN4: Definir modo de outorga para usinas reversíveis em ciclo fechado ou semifechado

SN5: Definir modo de outorga para adição de unidades reversíveis em UHE ou PCH já existente

SN6: Criação e definição do modo de outorga para o agente Armazenador Autônomo

SN7: Definir modo de outorga para usina de geração com sistema de armazenamento

**Objetivo específico: Avaliar alternativas de estruturas remuneratórias para os sistemas de armazenamento de eletricidade**

SN8: Aprimorar modo de remuneração que envolva sistemas de armazenamento

FONTE: ANEEL (2023).

Quadro 2 – Propostas de soluções não normativas.

**Objetivo específico: Adaptar a regulação de acesso à rede pelas novas tecnologias de armazenamento**

SNN1: Divulgação de dados da regulação e de mercado no sistema elétrico brasileiro

**Objetivo específico: Adaptar a regulação de outorgas às novas soluções de armazenamento de energia**

SNN2: Incentivar projetos de pesquisa e projetos-piloto

SNN3: Aproximar equipes técnicas de referência

**Objetivo específico: Avaliar alternativas de estruturas remuneratórias para os sistemas de armazenamento de eletricidade**

SNN4: Ampliar o conhecimento sobre os sistemas de armazenamento de energia elétrica

**Objetivo específico: Alinhar os agentes e entidades envolvidas às novas soluções de armazenamento de eletricidade**

SNN5: Combinar agendas entre instituições e publicá-las

FONTE: ANEEL (2023).

Para cada solução normativa e não normativa apresentada, a ANEEL buscou alternativas para abranger todas as possibilidades de atuação com a finalidade de atingir os resultados esperados. Após a avaliação e comparação entre as alternativas, o documento apresenta as alternativas selecionadas para cada proposta de solução normativa e não normativas às quais podem ser observadas pelo Quadro 3.

Quadro 3 – Alternativas escolhidas para as soluções normativas e não-normativas.

| <b>SOLUÇÃO NORMATIVA</b>                                                                    | <b>ALTERNATIVA ESCOLHIDA</b> | <b>NOME DA ALTERNATIVA</b>                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| SN1: Definição do MUST/D a ser contratado                                                   | Alternativa 1                | Montante do SAE ser considerado na faixa de potência          |
| SN2: Definição da forma de contratação do uso da rede (CUST/D)                              | Alternativa 1                | Possibilitar associação (várias outorgas em apenas um CUST/D) |
| SN3: Definição da tarifa de uso da rede a ser aplicada (TUST/D)                             | Alternativa 1                | Definir TUST/D específica para SAE                            |
| SN4: Definir modo de outorga para usinas reversíveis em ciclo fechado ou semifechado        | Alternativa 1                | Autorização sem licitação                                     |
| SN5: Definir modo de outorga para adição de unidades reversíveis em UHE ou PCH já existente | Alternativa 2                | Alteração de características técnicas em usina já existente   |
| SN6: Criação e definição do modo de outorga para o agente Armazenador Autônomo              | Alternativa 5                | Tratamento similar ao consumidor livre, sobre outorga         |
| SN7: Definir modo de outorga para usina de geração com sistema de armazenamento             | Alternativa 1                | Alteração de características técnicas em usina já existente   |
| SN8: Aprimorar modo de remuneração que envolva sistemas de armazenamento                    | Alternativa 1                | Empilhar serviços competitivos separados                      |

| <b>SOLUÇÃO NÃO-NORMATIVA</b>                                                        | <b>ALTERNATIVA ESCOLHIDA</b> | <b>NOME DA ALTERNATIVA</b>                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SNN1: Divulgação de dados da regulação e de mercado no sistema elétrico brasileiro  | Alternativa 2                | Divulgação dos dados por meio de sites, sistemas, BI, plataformas e mídias sociais                           |
| SNN2: Incentivar projetos de pesquisa e projetos-piloto                             | Alternativa 1                | Realizar projetos-pilotos ou sandboxes regulatórios                                                          |
| SNN3: Aproximar equipes técnicas de referência                                      | Alternativa 1                | Estabelecer ações de cooperação entre órgãos nacionais e internacionais                                      |
| SNN4: Ampliar o conhecimento sobre os sistemas de armazenamento de energia elétrica | Alternativa 1                | Promover capacitação (cursos, seminários, webinars, oficinas etc)                                            |
| SNN5: Combinar agendas entre instituições e publicá-las                             | Alternativa 2                | Criar agenda institucional com diversos órgãos envolvidos (planejamento, operação, regulação, políticas etc) |

FONTE: ANEEL (2023).

Ainda que a ANEEL tenha dado um passo importante sobre os temas regulatórios dos sistemas de armazenamento, as soluções propostas bem como as respectivas alternativas escolhidas ainda serão discutidas com os agentes envolvidos e ao público interessado através de uma consulta pública. Cabe salientar que considerando as alternativas selecionadas e os subtemas tratados em suas soluções poderão impactar as seguintes normas:

- REN 875, de 2020 – outorgas de fontes hídricas;
- REN 876, de 2020 – outorgas de fontes não hídricas;

- REN 905, de 2020 – regras dos serviços de transmissão de energia elétrica;
- REN 954, de 2021 – usinas híbridas e associadas;
- REN 956, de 2021 – procedimentos de distribuição de energia elétrica;
- REN 1.000, de 2021 – regras de prestação de distribuição de energia elétrica;
- REN 1.009, de 2022 – contratação de energia no ACR e ACL;
- REN 1.011, de 2022 – procedimentos para autorização para comercialização de energia;
- REN 1.016, de 2022 – critérios para adição de unidades geradoras de fonte renovável em centrais geradoras nos sistemas isolados;
- REN 1.027, de 2022 – compensação financeira pela utilização de recursos hídricos;
- REN 1.029, de 2022 – situação operacional e definição de potência instalada e líquida;
- REN 1.030, de 2022 – resposta a demanda, serviços ancilares e pagamento de *constrained-off* para eólicas.

## 2.3 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

As instalações de painéis fotovoltaicos flutuantes (PFF) abrem novas oportunidades para o aumento da capacidade de geração de energia solar, especialmente em países com alta densidade populacional e usos concorrentes para a disponibilidade de terra. Elas têm algumas vantagens em relação aos sistemas terrestres, incluindo a utilização da infraestrutura de transmissão de eletricidade existente nos locais de energia hidrelétrica, a proximidade com os centros de demanda (no caso de reservatórios de abastecimento de água) e o melhor rendimento energético graças aos efeitos de resfriamento da água e à menor presença de poeira (*World Bank Group et al.*, 2019).

A possibilidade de implantação de PFF às usinas hidrelétricas existentes é interessante, principalmente no caso de grandes empreendimentos que podem ser operados de forma flexível. A instalação solar pode ser usada para aumentar a produção de energia desses ativos e pode ajudar a gerenciar períodos de baixa disponibilidade de água, permitindo que a usina hidrelétrica opere em modo de “pico” em vez de “carga de base”. Adicionalmente, os benefícios são mútuos: a energia hidrelétrica pode suavizar a produção solar variável operando em um modo de “acompanhamento de carga” (*World Bank Group et al.* 2019).

IRENA (2020) e *World Bank Group et al.* (2019) citam como vantagens desse tipo de instalação:

- Aumento da eficiência e produtividade do uso da terra e da água;
- Redução das perdas por evaporação, com os painéis flutuantes cobrindo a superfície da água;
- Aumento da eficiência das células solares através da refrigeração da água;
- Aproveitamento da infraestrutura de transmissão existente combinado com os recursos de armazenamento para fornecer geração de energia elétrica despachável, ininterrupta e flexível;
- Melhorias na qualidade da água, por meio da redução do crescimento de algas;

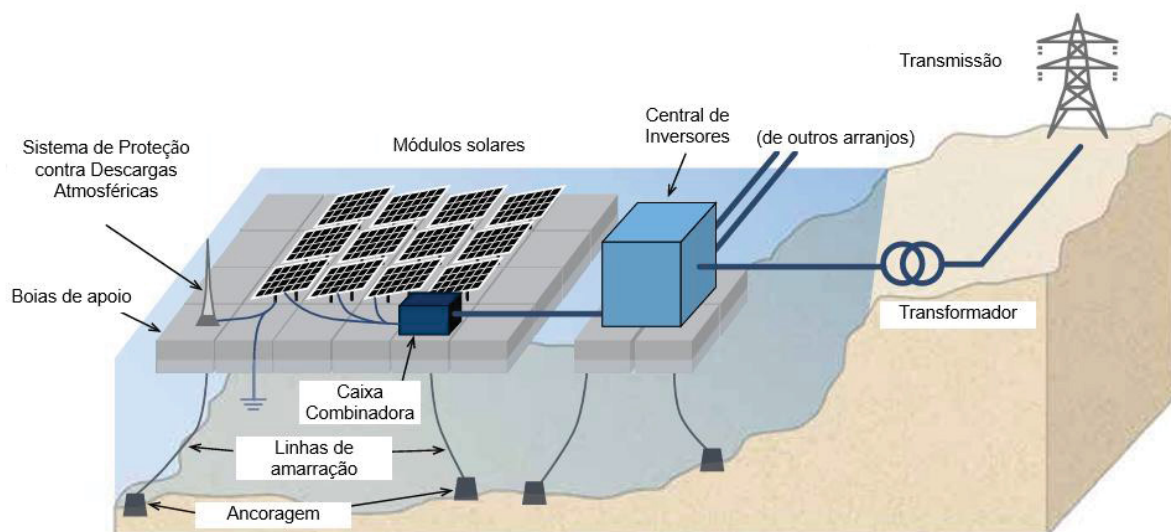
- Eliminação da necessidade de grandes preparações no local, como nivelamento ou colocação de fundações, que devem ser feitas para instalações em terra;
- Fácil instalação e implantação em locais com baixos requisitos de ancoragem e amarração e com um alto grau de modularidade, o que contribui para instalações mais rápidas.

Os principais componentes de um sistema PFF são semelhantes às instalações fotovoltaicas convencionais, com a diferença principal de que os módulos e o conjunto de inversores estão sobre uma plataforma flutuante ou boias de apoio. Os componentes principais podem ser listados da seguinte maneira (EPE, 2020):

- Módulos fotovoltaicos: convertem a irradiação solar em energia elétrica;
- Plataformas flutuantes: estrutura de suporte para os módulos fotovoltaicos, cabos elétricos e inversores;
- Ancoragem e linhas de amarração: componentes que garantem a fixação da estrutura flutuantes nas margens e no fundo do rio, resistindo a esforços de vento e variação de nível de água;
- Cabos elétricos: transmitem a energia elétrica para a subestação podendo ser subaquáticos;
- Central de inversores: transformam a corrente contínua em corrente alternada. Podem ser instalados sobre a água ou nas margens terrestres.

A corrente contínua gerada através dos módulos é acumulada nas caixas combinadoras e então são convertidas pelos inversores para corrente alternada. Assim como no sistema convencional, a estrutura de suporte dos módulos pode ser fixa ou com rastreamento de um ou dois eixos (ver Figura 16).

Figura 16 – Arranjo típico para a instalação de painéis fotovoltaicos flutuantes.



FONTE: SERIS (2019).

A maior usina fotovoltaica flutuante instalada no Brasil está localizada no reservatório da UHE Sobradinho (BA), com capacidade instalada de 1 MWp. Na UHE Porto Primavera, no estado de São Paulo, os PFF possuem potência instalada de 50 kWp (EPE, 2020). No reservatório da UHE Santa Clara, no Paraná, foram instalados 276 módulos fotovoltaicos, gerando uma potência instalada de 100 kWp (Revista Eixos, 2022).

Apesar dos benefícios supracitados em relação a instalação de painéis fotovoltaicos flutuantes, também são observados desafios neste tipo de sistema, como:

- A perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos, fator que está diretamente relacionado ao aumento da temperatura. Mesmo com temperaturas menores registradas, os ganhos de eficiência variam de 4% a 22% (EPE, 2020);
- As usinas flutuantes podem se transformar em áreas de pouso para a avifauna e de acúmulo de dejetos de pássaros o que pode gerar um custo maior com limpezas e manutenções em relação as instalações em solo (Costa, 2017);
- O sombreamento em usinas flutuantes tende a ser menor, entretanto, isso pode estar vinculado a redução da inclinação do painel sendo esta

inferior à ótima, por questões de esforços de vento. Em instalações próximas as margens o sombreamento pode ser maior e em reservatórios com deplecionamento do nível de água, isso pode ser ainda mais acentuado (EPE, 2020);

- A instalação de uma grade área de cobrimento do reservatório pode gerar impactos na vida aquática, desequilibrando a atividade fotossintética, somado com a diminuição dos níveis de oxigênio nas camadas mais profundas (EPE, 2020);
- Instalações de grande porte podem causar alterações paisagísticas e restrições a atividades recreativas e de navegação (EPE, 2020);
- Os custos adicionais associados a plataforma flutuante são menos competitivos em relação as instalações em solo (EPE, 2020);
- A manutenção pode necessitar de mão de obra especializada (EPE, 2020);
- A vida útil dos equipamentos representa um desafio tanto para os arranjos flutuantes como os convencionais não existindo infraestrutura nacional especializada na reciclagem em painéis fotovoltaicos (EPE, 2020).

Costa (2017) avaliou os impactos ambientais do projeto piloto com painéis fotovoltaicos flutuantes instalados na AHE Alto Rabagão, em Portugal. Devido ao pequeno porte de instalação do sistema em relação a área do reservatório (0,012% de cobrimento), a autora concluiu que o principal impacto ambiental é a existência do cabo de transmissão de energia devido aos efeitos eletromagnéticos.

Apesar dos desafios a serem enfrentados, o potencial de aplicação deste tipo de tecnologia considerando apenas a instalação em reservatórios artificiais são grandes. Segundo a estimativa do Grupo Banco Mundial (*World Bank Group* et al., 2019), considerando 10% de cobrimento máximo sobre os reservatórios artificiais, a capacidade de instalação mundial excede a 4.000 GWp. Segundo os estudos apresentados por Farfan e Breyer (2018), que consideraram uma área de cobrimento de 25% dos reservatórios artificiais, a capacidade instalada de PFF excede a 5.700 GW.

Yang et al. (2022), investigaram os impactos na hidrodinâmica e na qualidade da água de um sistema fotovoltaico flutuante em um reservatório de Singapura, com cobertura de 30% da superfície e capacidade de geração de 50 MW, através de um modelo hidrodinâmico-ecológico tridimensional. Segundo os autores, o modelo revelou maior estabilidade da coluna de água e energia de mistura; redução das concentrações de clorofila, carbono orgânico total e oxigênio dissolvido e; aumento no nitrogênio total e fósforo total nas áreas sob os painéis.

Não há um consenso mundial quanto ao percentual máximo de cobertura dos reservatórios com a instalação desses sistemas de modo que a utilização dessa tecnologia possa progredir de maneira sustentável. Portanto, espera-se que sejam desenvolvidos mais estudos e pesquisas em relação a este tema para que a instalação desta tecnologia possa ser difundida de maneira econômica tanto em relação aos impactos ambientais quanto aos recursos financeiros.

## 2.4 USINAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS

A ANEEL por meio da Resolução Normativa 954, de 30 de novembro de 2021 define:

- Centrais Geradoras Híbridas (UGH): a instalação de produção de energia elétrica a partir da combinação de diferentes tecnologias de geração, com medições distintas por tecnologia de geração ou não, objeto de outorga única.
- Centrais geradoras associadas: duas ou mais instalações, com a finalidade de produção de energia elétrica com diferentes tecnologias de geração, com outorgas e medições distintas, que compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e uso do sistema de transmissão.

Basicamente a diferença entre esses dois tipos de geração está na outorga e na medição, que para as centrais geradoras associadas devem ser separadas. Usualmente, a implantação de usinas híbridas ou associadas estão relacionadas ao aumento da previsibilidade da geração, uma vez que essas diferentes fontes de energia podem operar simultaneamente ou intercaladas. Comumente, essa combinação é feita entre as tecnologias de fonte hídrica, eólica e solar, incluindo fotovoltaicos, mas não se limitando a somente esses tipos de integrações (NEOENERGIA, 2024).

Conforme o cenário atual da matriz elétrica brasileira citado no item 2.1, as perspectivas para enfrentar os desafios futuros de crescimento da demanda energética, devem ser encorajadas pela associação de tecnologias de armazenamento com as fontes renováveis variáveis (EPE, 2020).

O primeiro projeto brasileiro a ter a associação aprovada pela ANEEL foi o Complexo Renovável Neoenergia, com a associação de 15 parques eólicos com potência instalada de 471,2 MW e dois parques solares com 149,2 MWp, ambos localizados na Paraíba (NEOENERGIA, 2024).

Em Montalegre, Portugal, no ano de 2017 foi desenvolvido o primeiro modelo híbrido do mundo que une painéis fotovoltaicos e usina hidrelétrica. Nesse modelo os painéis geram durante o dia e reservam energia hidrelétrica para ser usada durante o

pico da demanda a noite (IRENA, 2020). O empreendimento produz 300MWh por ano e utiliza as instalações da usina hidrelétrica para o fornecimento da energia (FIGUEIRA, 2019).

Assim como as tecnologias de fontes hídricas podem formar arranjos integrados com as fontes renováveis variáveis (FRV), as tecnologias de armazenamento, em especial, as usinas reversíveis, também podem ser combinadas com as FRV. Convencionalmente, o sistema de uma UHR garante um arranque rápido e ajustável de saída de energia que depende da demanda e também absorve o excedente de geração por FRV do sistema ao passo que minimiza perdas. Todavia, uma usina de fontes variáveis instalada próxima e acoplada a uma UHR com a função de bombear a água para o reservatório superior estaria efetivamente operando como um mecanismo por trás do medidor (IRENA, 2020).

Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), uma das formas de integrar uma FRV à uma UHR é utilizando sistemas de painéis fotovoltaicos flutuantes (PFF) que podem ser instalados no reservatório superior e inferior originando um modelo híbrido.

No contexto mundial, os arranjos de modelo híbrido entre usinas reversíveis e uma fonte renovável variável são relativamente recentes. Um exemplo a ser citado é a UHR Gorona del Viento localizada nas Ilhas Canárias a qual faz parte de um sistema híbrido com aerogeradores sendo responsável por 75% da oferta de energia elétrica da Ilha El Hierro, em média (GESEL et al., 2021).

Novos arranjos de modelo híbrido ou associados entre usinas reversíveis e as fontes variáveis estão em desenvolvimento em diferentes locais do mundo. Alguns desses projetos e os seus respectivos benefícios são elencados na Tabela 3.

Tabela 3 – Projetos de Implantação futura de UHR acopladas a tecnologias de fontes renováveis variáveis.

| Projetos de UHR                                                 | Localização       | Descrição                                                                                                                                      | Valor agregado                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| UHR acoplada com tecnologia de painéis fotovoltaicos flutuantes | Kruonis, Lituânia | Os painéis fotovoltaicos flutuantes consistirão um sistema entre 200-250 MW implantado nas instalações da UHR Kruonis com capacidade de 900 MW | O sistema permitiria o fornecimento do controle de frequência, serviços ancilares e a melhoria da conectividade com o mercado pan-europeu integrado. (Hydro Review, 2019). |

| Projetos de UHR                                                     | Localização               | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Valor agregado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| UHR acoplada com usina eólica terrestre                             | Gaildorf, Alemanha        | Neste projeto piloto, as bases das turbinas eólicas são usadas como reservatórios superiores de uma instalação UHR. Eles estão conectados à uma usina reversível que pode fornecer até 16 MW em potência instalada. A capacidade de armazenamento elétrico da usina foi projetada para total de 70 MWh (Max Bögl, 2017). | O excedente de energia eólica é armazenado no reservatório superior auxiliando na regularização da geração eólica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| UHR acoplada com usina eólica e tecnologia de painéis fotovoltaicos | Kidston, Austrália        | Uma UHR com potência instalada de 250MW (entre 8 a 10 horas de armazenamento) combinada com uma usina solar fotovoltaica com capacidade de 320 MW e um parque eólico de 150 MW (Utility Magazine, 2018).                                                                                                                 | Espera-se que o projeto seja capaz de proporcionar energia renovável confiável e despachável no pico da demanda, podendo armazenar energia solar durante o dia e gerar em períodos de picos noturnos e matutinos. Ainda, acredita-se que se possa reduzir as perdas associadas à importação de eletricidade da rede para a UHR, bem como mitigar o risco associado ao aumento dos preços de energia elétrica durante a noite. (Energy Magazine, 2018) |
| UHR acoplada com tecnologia de painéis fotovoltaicos                | Deserto do Atacama, Chile | O projeto Valhala enviará geração intermitente do Parque solar fotovoltaico de Cielos de Tarapacá com 600 MW de potência instalada para a UHR Espejo de Tarapacá com 300 MW de potência para convertê-la em uma usina despachável.                                                                                       | O projeto prevê o abastecimento de 5% da demanda de base do norte do Chile. Seria o primeiro projeto a demonstrar que a carga de base pode ser gerada a partir de uma usina fotovoltaica em grande escala. (Andrew, 2017)                                                                                                                                                                                                                             |

| Projetos de UHR                                      | Localização                   | Descrição                                                                                                                                                                                                                                         | Valor agregado                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| UHR acoplada com tecnologia de painéis fotovoltaicos | Hatta, Emirados Árabes Unidos | A instalação da UHR Hatta, com capacidade de 250MW será usada com o excedente de eletricidade gerada a partir da maior usina solar fotovoltaica planejada do mundo, o Parque solar Mohammed bin Rashid Al Maktoum, com 5GW de potência instalada. | A instalação da UHR está planejada para atingir 80% da capacidade máxima em 90 segundos. A resposta rápida será muito benéfica para o balanceamento de carga dentro do sistema elétrico dos Emirados Árabes e será essencial para alcançar a meta do país de 75% de energia renovável até 2050 (Gulf News, 2019). |

FONTE: Adaptado de IRENA, 2020.

No Brasil alguns estudos de caso têm sido desenvolvidos para plantas de usinas hidrelétricas existentes: o objetivo é agregar um sistema híbrido de usina reversível com alimentação da bomba por fontes renováveis variáveis. Maynard (2019) realizou um estudo de caso dimensionando um sistema de usina reversível na usina hidrelétrica de Sobradinho associada a um sistema de painéis fotovoltaicos flutuantes instalados no reservatório. Neste trabalho foram avaliados os diferentes cenários de instalação do projeto, a viabilidade financeira e os benefícios do empreendimento. Através de uma análise de custo-benefício, o autor afirma que para viabilizar o empreendimento as tarifas mínimas de energia fornecidas pelo projeto são próximas dos valores praticados pelas usinas fotovoltaicas convencionais, porém não são competitivas. Todavia, o autor ressalta que o real benefício desse empreendimento ao Sistema Elétrico Brasileiro está nos serviços ancilares.

Albuquerque (2022) estudou a viabilidade técnico-econômica da implantação de uma Usina Fotovoltaica Flutuante (UFF) no reservatório auxiliar da PCH REPI alimentando o sistema de bombeamento instalado no canal de fuga. Segundo o autor, a implantação do sistema proporcionou um ganho com otimização dos reservatórios e do sistema de conexão, no qual foi constatado a melhoria no fator de capacidade médio da PCH REPI. Conforme demonstrado pela pesquisa, na simulação feita para o ano de 2021, o fator de capacidade médio original era de 23,7% e com a instalação do sistema de bombeamento esse número subiu para 37,4%. Albuquerque (2022) ainda afirma que este tema é de grande importância para o Setor Elétrico Brasileiro e que mais estudos deverão ser desenvolvidos.

Apesar da contribuição dos autores supracitados, ainda há poucos trabalhos científicos que combinam as duas tecnologias de modo híbrido.

### 3 MÉTODOS

Os métodos desta pesquisa não objetivam questões institucionais como citado no AIR, portanto, a avaliação do estudo de caso será estritamente técnica. Inicialmente, será selecionada uma cascata existente a qual deverá ser estudada um arranjo específico através de um estudo de caso. Na sequência serão apresentadas os métodos e equações utilizadas para a concepção do projeto. Neste sentido, a metodologia pode ser resumida nas seguintes etapas:

- Estudo de caso;
- Dimensionamento hidráulico da UHR;
- Concepção do arranjo da UHR;
- Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos flutuantes;
- Métodos para avaliação econômica da solução proposta.

#### 3.1 ESTUDO DE CASO

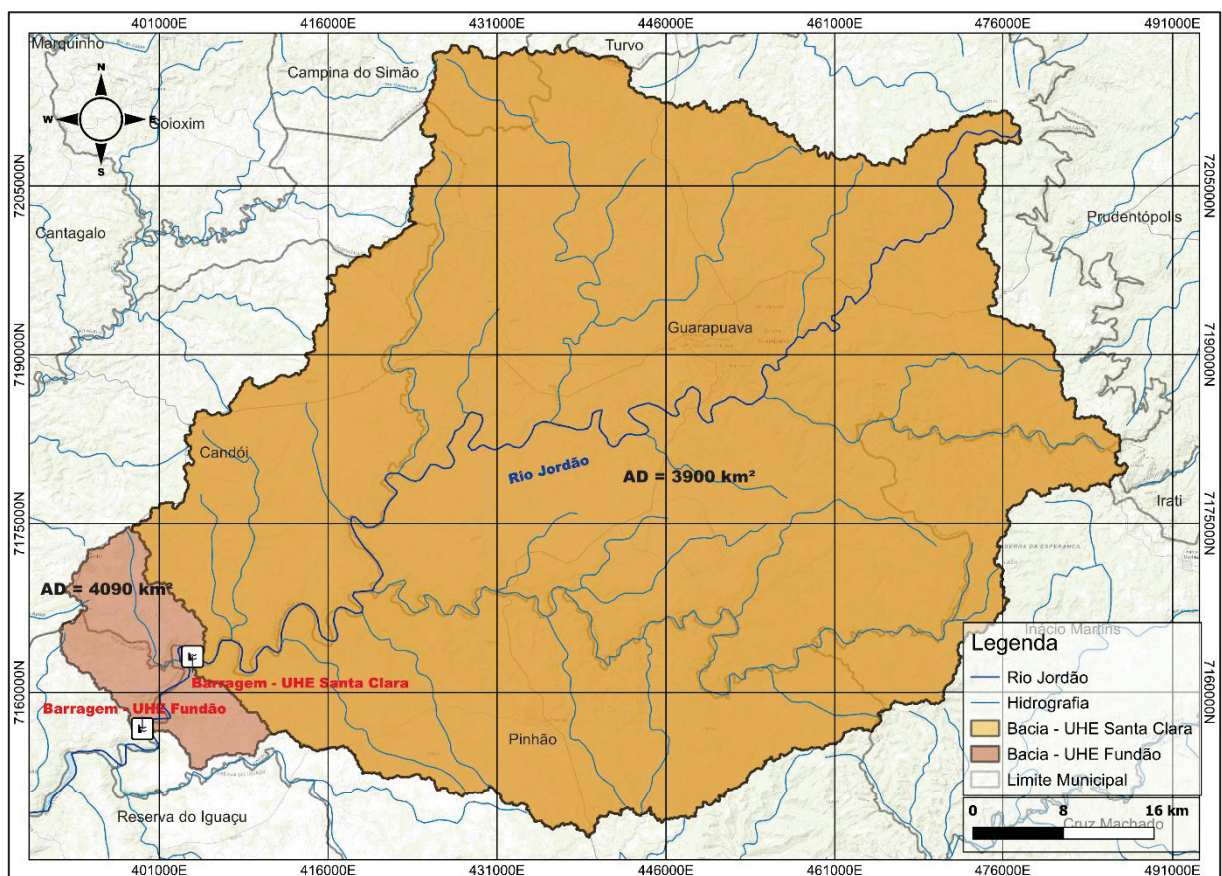
O estudo de caso é realizado a partir da seleção de um arranjo específico em uma cascata a qual deverá apresentar minimamente uma usina hidrelétrica com capacidade de regularização, ou seja, este primeiro critério de seleção inicialmente elimina as cascatas que apresentam somente usinas a fio de água. A pesquisa ainda parte da premissa do mínimo impacto ambiental possível para a implantação do sistema de armazenamento utilizando as instalações existentes, mais especificamente, os reservatórios e as infraestruturas de transmissão. Portanto, devido a essa característica é descartada a construção de novas áreas de alagamento, ou seja, arranjos de ciclo aberto. Tampouco são estudados os arranjos de ciclo fechado, uma vez que esse tipo de configuração geralmente não está instalado em um rio com alimentação natural de um curso d'água e dessa forma não vai de encontro com o objetivo de instalação de armazenamento em usinas já existentes. Dessa forma, a configuração idealizada para o estudo é do tipo *pump-back*, no qual os reservatórios superior e inferior estão instalados na mesma cascata, ou seja, no mesmo corpo hídrico, com a casa de força instalada a jusante do reservatório superior permitindo que a operação utilize máquinas do tipo turbina-

bomba, combinando a geração hídrica com o armazenamento de curto prazo. Consequentemente, não há instalação de armazenamento fora do curso do rio e, portanto, como não haverá aumento da capacidade de armazenamento, o sistema visa a melhoria da eficiência do atendimento da demanda elétrica brasileira.

GESEL et al. (2021) apresentam possíveis locais no Brasil com potencial para a instalação de UHR, o que inclui cascatas com usinas de regularização. Neste documento, também são apresentados estudos de caso elaborado pelos autores, entretanto, este trabalho objetiva utilizar algum arranjo no qual não tenha sido realizado o estudo de caso pelos autores.

Para este trabalho, foram selecionados os aproveitamentos da UHE Santa Clara (montante) e UHE Fundão (jusante), localizadas no Rio Jordão no estado do Paraná (ver Figura 17).

Figura 17 – Localização dos aproveitamentos selecionados.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2025.

As características técnicas principais dos aproveitamentos foram obtidas a partir das informações disponíveis nos dados abertos do ONS, as quais podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características técnicas dos aproveitamentos selecionados.

| <b>Aproveitamento</b>                        | <b>UHE Santa Clara</b> | <b>UHE Fundão</b> |
|----------------------------------------------|------------------------|-------------------|
| Potência Instalada (MW)                      | 120,68                 | 120,68            |
| Tipo de operação                             | Regularização          | Fio d'água        |
| Nível normal de operação - NA (m)            | 805,00                 | 705,50            |
| Nível máximo maximorum - NA <sub>M</sub> (m) | 810,35                 | 711,00            |
| Nível mínimo normal - NA <sub>m</sub> (m)    | 787,50                 | 705,50            |
| Vazão decamilenar amortecida (m³/s)          | 6.584                  | 7.227             |
| Vazão máxima turbinada (m³/s)                | 160                    | 150               |
| Volume no N.A. máx. maximorum (hm³)          | 553,91                 | 51,72             |
| Volume no N.A. normal (hm³)                  | 431,23                 | 34,59             |
| Volume no N.A. mín. normal (hm³)             | 170,46                 | 34,59             |
| Volume de acumulação (hm³)                   | 260,76                 | -                 |
| Área de drenagem (km²)                       | 3.900                  | 4.090             |
| Vazão média de longo termo (m³/s)            | 103                    | 108               |
| Área no N.A. máx. maximorum (km²)            | 23,36                  | 2,96              |
| Área N.A. máx. normal (km²)                  | 20,23                  | 2,26              |
| Área N.A. mín. normal (km²)                  | 10,95                  | 2,18              |

Fonte: Adaptado de Dados Abertos ONS, 2024.

Quanto ao local para a instalação dos painéis fotovoltaicos flutuantes, é utilizado o reservatório da UHE Fundão uma vez que o sistema ficaria mais próximo da casa de força para alimentar a turbina no modo bomba.

### 3.2 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA UHR

O dimensionamento hidráulico de uma UHR é muito semelhante à de uma usina hidrelétrica convencional: com os estudos hidrológicos e a divisão de quedas de um determinado rio, define-se a potência instalada das máquinas. A definição da potência instalada, o armazenamento energético e o tempo de operação devem considerar as características particulares dos reservatórios de montante e jusante de modo que o atendimento de carga e o tempo de bombeamento ocorram de maneira eficiente (GESEL, et al. 2021).

Partindo dessa primeira definição é concebido o arranjo geral da usina o que inclui o circuito hidráulico. O circuito hidráulico é o segmento da usina que transforma a energia do escoamento em energia elétrica, e para o caso de uma UHR a transformação contrária de energia também ocorre por este circuito. Neste sentido, as definições hidráulicas são extremamente relevantes para que o bom funcionamento do sistema aconteça.

Para a definição da vazão disponível para a operação, serão avaliados dois métodos sendo elas a sazonalidade das vazões afluentes (Hunt, et al. 2020) e o histórico de vazões vertidas.

#### 3.2.1 Sazonalidade das vazões afluentes

Hunt et al. (2020) propõem estimar inicialmente a vazão de água disponível para o armazenamento em reservatórios sazonais através das equações (1) e (2):

$$S_V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{m \in M} (\bar{q}_m - \bar{q})^2}{N_m}}}{\bar{q}}, \text{ se } S_V > 1 \text{ então } S_V = 1 \quad (1)$$

$$I_V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{y \in Y} (\bar{q}_y - \bar{q})^2}{N_y}}}{\bar{q}}, \text{ se } I_V > 1 \text{ então } I_V = 1 \quad (2)$$

Onde:

$S_V$  – Coeficiente de variação mensal;

$I_V$  – Coeficiente de variação anual;  
 $y$  – Período de tempo em anos;  
 $m$  – Período de tempo em meses;  
 $\bar{q}_m$  – Vazão do rio de um determinado mês  $m$  (m<sup>3</sup>/s);  
 $\bar{q}_y$  – Vazão média do rio de um determinado ano  $y$  (m<sup>3</sup>/s);  
 $\bar{q}$  – Vazão média do rio de  $y$  anos (m<sup>3</sup>/s);  
 $N_m$  – Número de meses;  
 $N_y$  – Número de anos.

Segundo os autores, esses parâmetros hidrológicos possuem três propósitos principais: garantir que haverá água suficiente no rio para ser armazenada no reservatório superior; a necessidade do armazenamento de água e energia não deve ter um impacto prejudicial ao fluxo do rio; o armazenamento potencial de água pretende regularizar o fluxo do rio mantendo um fluxo constante, reduzindo a sazonalidade e as variações anuais.

A partir dos coeficientes  $S_V$  e  $I_V$ , a vazão disponível para o armazenamento é dada pela expressão seguinte:

$$Q_d = 0,1 \cdot Q \cdot S_V \cdot (1 + (I_V \cdot 0,1)) \quad (3)$$

Onde:

$Q_d$  – Vazão disponível para o armazenamento (m<sup>3</sup>/s);  
 $Q$  – Vazão média do rio (m<sup>3</sup>/s).

### 3.2.2 Vazões Vertidas

A vazão disponível a partir das vazões vertidas consiste em, a partir dos dados de operação da usina de montante selecionada, soma-se as vazões vertidas registradas durante  $y$  anos e divide-se pelo tempo em segundos do mesmo período, obtendo-se uma média das vazões vertidas, conforme a expressão:

$$Q_d = \frac{\sum_{d \in D} Q_v}{N_s} \quad (4)$$

Onde:

$Q_d$  – Vazão disponível para o armazenamento ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$Q_v$  – Vazão vertida na usina de montante ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$N_d$  – Número de segundos do histórico.

Definida a vazão disponível, o dimensionamento inicia-se da seguinte maneira: a partir da definição da queda bruta (diferença entre as cotas máximas e mínimas de montante e jusante) e das perdas de carga durante o turbinamento e o bombeamento, calculam-se as alturas de queda (geração) e elevação (consumo) líquidas nominal, máxima e mínima de operação (GESEL, et al. 2021), como segue:

$$H_t = \left[ \left( \frac{NA_{Ms} + NA_{ms}}{2} \right) - \left( \frac{NA_{Mi} + NA_{mi}}{2} \right) \right] \cdot \left( 1 - \frac{h_{ft}}{100} \right) \quad (5)$$

$$H_{tM} = (NA_{Ms} - NA_{mi}) \cdot \left( 1 - \frac{h_{ft}}{100} \right) \quad (6)$$

$$H_{tm} = (NA_{ms} - NA_{Mi}) \cdot \left( 1 - \frac{h_{ft}}{100} \right) \quad (7)$$

$$H_b = \left[ \left( \frac{NA_{Ms} + NA_{ms}}{2} \right) - \left( \frac{NA_{Mi} + NA_{mi}}{2} \right) \right] \cdot \left( 1 + \frac{h_{fb}}{100} \right) \quad (8)$$

$$H_{bM} = (NA_{Ms} - NA_{mi}) \cdot \left( 1 + \frac{h_{fb}}{100} \right) \quad (9)$$

$$H_{bm} = (NA_{ms} - NA_{Mi}) \cdot \left( 1 + \frac{h_{fb}}{100} \right) \quad (10)$$

Onde:

$H_t$  – Altura de queda líquida nominal (m);

$H_{tM}$  – Altura de queda líquida máxima (m);

$H_{tm}$  – Altura de queda líquida mínima (m);

$H_b$  – Altura de elevação líquida nominal (m);

$H_{bM}$  – Altura de elevação líquida máxima (m);

$H_{bm}$  – Altura de elevação líquida mínima (m);

$NA_{Ms}$  – Nível de água máximo do reservatório superior (m);

$NA_{ms}$  – Nível de água mínimo do reservatório superior (m);

$NA_{Mi}$  – Nível de água máximo do reservatório inferior (m);

$NA_{mi}$  – Nível de água mínimo do reservatório inferior (m);

$h_{ft}$  – Perda de carga na geração (%);

$h_{fb}$  – Perda de carga no bombeamento (%).

O cálculo é iterativo porque inicialmente é arbitrado um percentual de perda de carga para serem calculadas as vazões turbinadas e bombeadas, antes de ser concebido o arranjo da UHR. Após a concepção do arranjo definitivo são calculadas as perdas de carga e novamente recalculadas as quedas líquidas.

Com o valor de  $Q_d$  e as alturas de elevação e de queda, é possível estimar a potência da máquina turbo-bomba igualando a vazão disponível com a vazão turbinada e bombeada e arbitrando-se os rendimentos da máquina no modo turbina e bomba, os quais são aplicados na equação (11) e (12):

$$P_t = \frac{Q_t \cdot H_t \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\eta_t}{100} \cdot \frac{\eta_g}{100}}{10^6} \quad (11)$$

$$P_b = \frac{Q_b \cdot H_b \cdot \rho \cdot g}{\frac{\eta_b}{100} \cdot \frac{\eta_g}{100} \cdot 10^6} \quad (12)$$

Onde:

$P_t$  – Potência da turbina (MW);

$P_b$  – Potência da bomba (MW);

$Q_t$  – Vazão unitária nominal turbinada (m³/s);

$Q_b$  – Vazão unitária nominal bombeada (m³/s);

$\rho$  – Massa específica da água (kg/m³);

$g$  – Aceleração da gravidade (m/s²);

$\eta_t$  – Rendimento médio no modo geração (%);

$\eta_b$  – Rendimento médio no modo bombeamento (%);

$\eta_g$  – Rendimento médio do conjunto gerador-motor (%).

Ademais, a eficiência do ciclo de operação entre bombeamento e geração ( $\eta_{ciclo}$ ) pode ser descrita pela equação (13):

$$\eta_{ciclo} = \frac{P_t/Q_t}{P_b/Q_b} = \frac{\eta_t \eta_b \eta_g^2}{10^8} \left( \frac{H_t}{H_b} \right) \quad (13)$$

A operação da usina reversível também depende do tipo de rotação da máquina no modo bomba (conforme apresentado no subitem 2.2.3) que pode ser fixa ou variável. Uma turbina reversível convencional de rotação fixa só possui uma curva característica de altura de elevação x vazão. Isso significa que a bomba dessas máquinas só consegue recalcar um valor de vazão, geralmente a máxima vazão de recalque, para cada altura de elevação requerida, não sendo possível realizar controle de frequência. No caso de bombas de rotação variável, é possível realizar o controle de frequência, com as combinações factíveis de altura de elevação e vazão sendo definidas pelos limites de estabilidade, cavitação, potências máxima e mínima, alturas de elevação máxima e mínima e rotações máxima e mínima (GESEL, et al. 2021). Como o estudo de caso prevê a alimentação elétrica do motor da bomba por uma fonte variável de geração, será definido para o projeto a turbina reversível de rotação variável, podendo atuar com uma faixa maior de operação em função da produção de energia dos painéis fotovoltaicos melhorando a eficiência do sistema.

Outro item importante para o dimensionamento da UHR, é o cálculo da altura de sucção estática ou submergência da máquina, tanto no modo geração quanto no modo de armazenamento. Esse parâmetro consiste na diferença entre a cota do reservatório inferior e a cota da linha de centro do rotor da máquina. O procedimento de cálculo para turbinas Francis reversíveis inicia-se com a determinação do coeficiente de cavitação Thoma ( $\sigma$ ) que pode ser obtido através da seguinte sequência de cálculo que consiste na aplicação de regressões estatísticas apresentadas por Siervo e Lugaresi (1980):

- Passo 1: calcula-se a rotação específica no modo turbina ( $n_{st}$ ), em função da altura de queda nominal ( $H_t$ ) através da expressão (14);

$$n_{st} = 1825 H_t^{-0,481} \quad (14)$$

- Passo 2: obtém-se a rotação específica no modo bomba ( $n_{sb}$ ) em função da razão  $H_b/H_t$  e de  $n_{st}$  através da regressão (15);

$$n_{sb} = 0,842n_{st}^{1,033} \quad (15)$$

- Passo 3: Calcula-se o coeficiente de cavitação ( $\bar{\sigma}$ ) em função da razão  $H_{bM}/H_{bm}$  e da rotação específica estatística da bomba ( $\bar{n}_{sb}$ ) – ver regressões (16) e (17);

$$\bar{n}_{sb} = 1768H_b^{-0,480} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = 0,00122\bar{n}_{sb}^{0,982}, \text{ se } \frac{H_{bM}}{H_{bm}} < 1,05 \\ \bar{\sigma} = 0,000712\bar{n}_{sb}^{1,15}, \text{ se } \frac{H_{bM}}{H_{bm}} \geq 1,30 \end{cases} \quad (17)$$

- Passo 4: Calcula-se o coeficiente de cavitação ( $\sigma$ ) pela expressão (18);

$$\sigma = \bar{\sigma} \left( \frac{n_{sb}}{\bar{n}_{sb}} \right)^{1,25} \quad (18)$$

- Passo 5: obtém-se o valor da submergência ( $h_s$ ) em função de ( $\sigma$ ), da altura barométrica ( $h_b$ ) e da altura de pressão de vapor d'água pela expressão (19).

$$\sigma = (h_b - h_w - h_s)/H_b \quad (19)$$

Para a estimativa dos custos globais de obras civis para a implantação do sistema, se faz necessário estimar o espaço que será ocupado pelas máquinas na casa de força. Neste caso as dimensões do rotor, da caixa espiral e do tubo de sucção da turbina reversível tornam-se importantes para a avaliação de custos que será apresentada no estudo de caso (Capítulo 3.1). Essa estimativa também pode ser feita por Siervo e Lugaresi (1980) utilizando regressões para turbinas Francis reversíveis apresentadas a seguir:

---

<sup>1</sup> Na expressão (17) caso  $1,05 \leq \frac{H_{bM}}{H_{bm}} < 1,30$  o valor de  $\bar{\sigma}$  será interpolado linearmente.

- Rotor:

$$\begin{cases} K_u = 0,875 + 1,07 \cdot 10^{-3} n_{sb}, \text{ se } 1 < \frac{H_{bM}}{H_b} \leq 1,03 \\ K_u = 0,895 + 1,07 \cdot 10^{-3} n_{sb}, \text{ se } 1,05 < \frac{H_{bM}}{H_b} \leq 1,15^2 \\ K_u = 0,915 + 1,07 \cdot 10^{-3} n_{sb}, \text{ se } 1,15 > \frac{H_{bM}}{H_b} \end{cases} \quad (20)$$

$$D_1 = \frac{60K_u\sqrt{2gh}}{\pi n} \quad (21)$$

$$D_6 = (0,284 + 0,00235n_{sb})D_1 \quad (22)$$

$$\begin{cases} D_2 = D_1, \text{ se } n_{sb} \leq 190 \\ D_2 = \left( \frac{1}{1,198 - 0,00104n_{sb}} \right) D_1, \text{ se } n_{sb} > 190 \end{cases} \quad (23)$$

$$H_1 = (-0,0438 + 0,00121n_{sb})D_1 \quad (24)$$

$$H_2 + H_3 = (0,155 + 0,00119n_{sb})D_1 \quad (25)$$

Onde:

$K_u$  – Coeficiente de velocidade periférica;

$D_1$  – Diâmetro do rotor na linha de centro das pás (m);

$D_2, D_6$  – Diâmetros do rotor em diferentes posições (m);

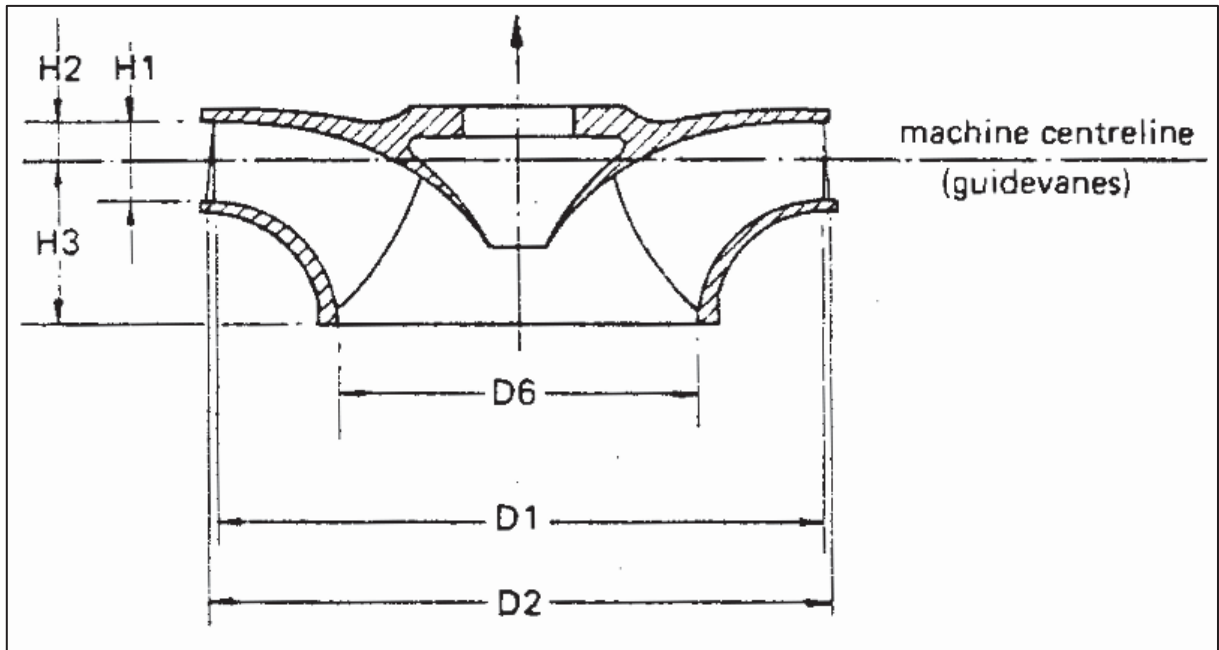
$H_1, H_2, H_3$  – Características geométricas do rotor (m).

A Figura 18 apresenta os parâmetros geométricos do rotor da turbina reversível indicados nas equações (22) a (48).

---

<sup>2</sup> Na expressão (20) caso  $1,03 < \frac{H_{bM}}{H_b} \leq 1,05$  o valor de  $K_u$  será interpolado linearmente.

Figura 18 – Dimensões do rotor da turbina reversível.



FONTE: Siervo e Lugaresi (1980).

- Caixa espiral:

$$v_{ob} = \frac{1}{0,00943 + 0,000641n_{sb}} \quad (26)$$

$$A = (0,19 + 0,0031n_{sb})D_1 \quad (27)$$

$$B = (0,84 + 0,0016n_{sb})D_1 \quad (28)$$

$$C = (0,88 + 0,0020n_{sb})D_1 \quad (29)$$

$$D = (0,91 + 0,0026n_{sb})D_1 \quad (30)$$

$$E = (0,86 + 0,0012n_{sb})D_1 \quad (31)$$

$$F = (1,58 + 0,000072n_{sb})D_1 \quad (32)$$

$$G = (1,23 + 0,0006n_{sb})D_1 \quad (33)$$

$$H = (1,084 + 0,00061n_{sb})D_1 \quad (34)$$

$$I = (-0,041 + 0,0012n_{sb})D_1 \quad (35)$$

$$L = (0,21 + 0,0022n_{sb})D_1 \quad (36)$$

$$M = (0,12 + 0,0013n_{sb})D_1 \quad (37)$$

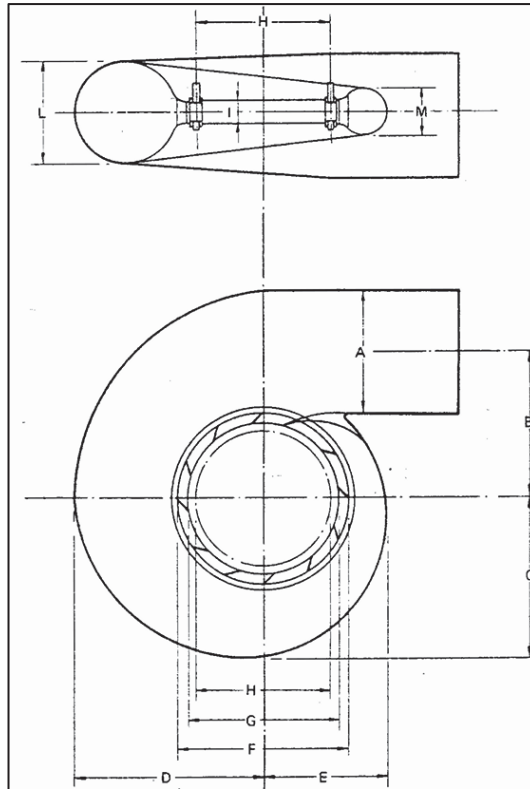
Onde:

$v_{ob}$  – Velocidade da água na seção de saída no modo bomba da caixa espiral (m/s);

$A, B, C, D, E, F, G, H, I, L, M$  – Características geométricas da caixa espiral (m).

A Figura 19 apresenta os parâmetros geométricos da caixa espiral da turbina reversível indicados nas equações (27) a (37).

Figura 19 – Dimensões da caixa espiral da turbina reversível.



FONTE: Siervo e Lugaresi (1980).

- Tubo de sucção tubular:

$$v_{ib} = \frac{1}{0,043 + 0,000355n_{sb}} \quad (38)$$

$$N = (1,84 + 0,0039n_{sb})D_1 - H_t \quad (39)$$

$$O = (0,57 + 0,00033n_{sb})D_1 \quad (40)$$

$$P = (0,42 + 0,0026n_{sb})D_1 \quad (41)$$

$$Q = (0,57 + 0,0026n_{sb})D_1 \quad (42)$$

$$R = (0,64 + 0,0036n_{sb})D_1 \quad (43)$$

$$S = (2,32 + 0,0059n_{sb})D_1 \quad (44)$$

$$T = (0,55 + 0,0028n_{sb})D_1 \quad (45)$$

$$U = (0,15 + 0,0012n_{sb})D_1 \quad (46)$$

$$Z = (-0,083 + 0,012n_{sb})D_1 \quad (47)$$

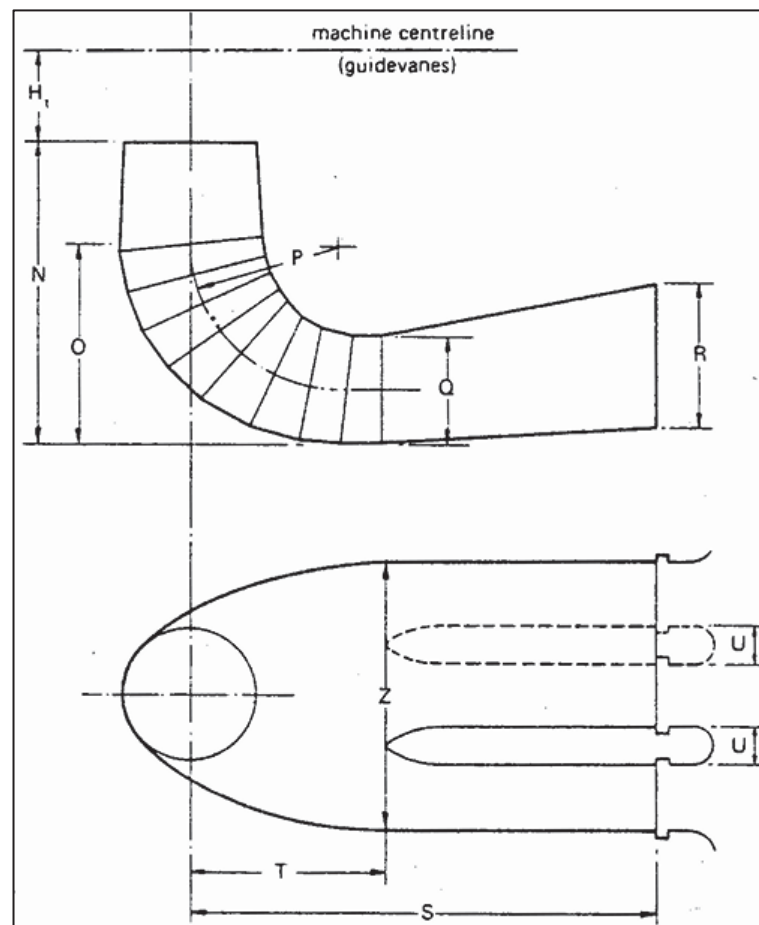
Onde:

$v_{ib}$  – Velocidade da água na seção de entrada no modo bomba do tubo de sucção (m/s);

$N, H_t, O, P, Q, R, S, T, U, Z$  – Características geométricas tubo de sucção (m).

A Figura 20 apresenta os parâmetros geométricos da caixa espiral da turbina reversível indicados nas equações (39) a (47).

Figura 20 – Dimensões do tubo de sucção da turbina reversível.



FONTE: Siervo e Lugaresi (1980).

### 3.3 CONCEPÇÃO DO ARRANJO DA USINA

A concepção do arranjo da usina reversível passa pelo dimensionamento hidráulico do circuito de geração-armazenamento. O método apresentado nesta etapa utiliza as informações hidroenergéticas do empreendimento para conceber as estruturas do circuito e calcular as perdas de carga envolvidas. Como o projeto prevê a implantação de um sistema reversível a uma hidrelétrica já existente, as estruturas como vertedouro e barragem serão aproveitadas da própria instalação atual. Portanto, as estruturas dimensionadas serão a tomada de água, túnel/conduto de adução, conduto forçado, chaminé de equilíbrio e casa de força.

O dimensionamento da tomada de água deve prever uma aceleração gradual do fluxo de água proveniente do reservatório superior, evitando-se a separação do fluxo e perdas de carga excessivas (ELETROBRÁS, 2003). Segundo o Eletrobrás (2003), recomenda-se adotar velocidade bruta na grade de 1,0 a 1,5 m/s para tomadas com coluna de água superior a 30 m e 1,5 m/s a 2,5 m/s para tomadas com coluna de água inferior. Adicionalmente, o projeto da tomada de água deve evitar que a formação de vórtices (quando estes alcançam a superfície) reduza a vazão aduzida e aumente a perda de carga. Desse modo, a determinação da submersão mínima ou crítica se faz necessária para definir a cota da geratriz superior da tomada de água de modo que no caso de nível mínimo de operação ( $NA_{ms}$ ), o afogamento da tomada seja suficiente para evitar a aparição desses vórtices. Alguns autores propõem equações para a estimativa da submersão mínima em tomadas de águas verticais (TABASNIK et al. 2015), como Gordon (1970), Hecker (1981) Knauss (1987), Blaisdell (1989), entre outros. Para o projeto avaliado, a submersão crítica é calculada por Gordon (1970), como segue:

$$S_c = C \cdot U \cdot \sqrt{D} \quad (48)$$

Onde:

$S_c$  – Submersão crítica ou mínima (m);

$C$  – Coeficiente de simetria (0,545 para escoamento simétrico, 0,725 para escoamento assimétrico);

$U$  – Velocidade média no interior da tomada (m/s);

$D$  – Diâmetro interno da tomada (m).

Quanto a forma da tomada será baseada no *Hydraulic Design Criteria* (HDC) publicado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), em 1977. Em relação ao cálculo da perda de carga envolvida na estrutura da tomada de água, este é composto pela soma das perdas de carga em cada componente. São eles: grade, tomada de água e ranhuras da comporta. As equações envolvidas para esta estimativa foram apresentadas por Levin (1968) como segue:

- Grades:

$$\Delta h = K_d K_f p^{1,6} f\left(\frac{L}{b}\right) \sin\theta \frac{V^2}{2g} \quad (49)$$

$$f\left(\frac{L}{b}\right) = 8 + 2,3 \frac{L}{b} + 2,4 \frac{b}{L} \quad (50)$$

Onde:

$\Delta h$  – Perda de carga localizada (m);

$K_d$  – Coeficiente de resto de detritos;

$K_f$  – Coeficiente de forma da barra;

$p$  – Relação entre a área ocupada pelas barras e a área total (%);

$L$  – Largura das barras (m);

$b$  – Distância entre as barras (m);

$\theta$  – Ângulo de inclinação das barras;

$\frac{V^2}{2g}$  – Altura de velocidade (m).

- Tomada:

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} \quad (51)$$

Onde:

$\Delta h$  – Perdas de carga localizada e distribuída (m);

$K$  – Coeficiente de perda de carga localizada e distribuída.

- Ranhuras curtas:

$$K_r = \left( \frac{\sigma^{1,8} - 1}{1,43\sigma^{1,8} + 1} \right)^2 \text{sen}\theta \quad (52)$$

$$\sigma = \frac{S + 0,25 lb}{S} \quad (53)$$

Onde:

$K_r$  – Coeficiente de perda de carga localizada na ranhura;

$\sigma$  – Coeficiente de superfície da ranhura;

$\theta$  – Ângulo de inclinação da ranhura;

$S$  – Área da superfície da seção a montante e a jusante da ranhura;

$l$  – Comprimento da ranhura no sentido do fluxo;

$b$  – Comprimento da ranhura no sentido normal ao fluxo.

Com o cálculo de  $K_r$ , obtém-se a perda de carga localizada na ranhura pela expressão (51).

O dimensionamento do conduto ou túnel adutor deve ser feito com uma análise de diâmetro econômico. Simplificadamente, a Eletrobrás (2003) traz recomendações quanto à velocidade máxima do escoamento para o pré-dimensionamento, sendo para túnel não revestido de 2,5 m/s, 3,0 m/s para o caso do túnel revestido com concreto projetado e 4,5 m/s para túnel revestido em concreto estrutural. Adicionalmente, a estimativa da perda de carga contínua pode ser obtida a partir do método das diferenças finitas “*Standard Step Method*” com a utilização da equação de Manning-Stickler:

$$h_f = L \left( \frac{nV}{R_h^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (54)$$

Onde:

$h_f$  – Perda de carga contínua no túnel adutor (m);

$L$  – Comprimento do túnel (m);

$n$  – Coeficiente de rugosidade;

$V$  – Velocidade média na seção (m/s);  
 $R_h$  – Raio hidráulico da seção (m).

Assim como o conduto ou túnel adutor, o conduto forçado também deve ser dimensionado calculando-se o diâmetro econômico. A Eletrobrás (2003) recomenda utilizar velocidades máximas de 7,0 ou 8,0 m/s para condutos revestidos em concreto ou aço, respectivamente. A perda de carga contínua pode ser calculada pela fórmula de Darcy-Weisbach, como segue:

$$h_f = f \left( \frac{LV^2}{D2g} \right) \quad (55)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2\varepsilon}{D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (56)$$

Onde:

$h_f$  – Perda de carga contínua no conduto forçado (m);  
 $f$  – Coeficiente de perda de carga universal obtido pela expressão (56) de Colebrook-White;  
 $L$  – Comprimento do conduto forçado (m);  
 $D$  – Diâmetro do conduto forçado (m);  
 $\frac{V^2}{2g}$  – Altura de velocidade (m);  
 $\varepsilon$  – Altura de rugosidade das paredes do conduto (m);  
 $Re$  – Número de Reynolds.

As perdas de carga localizadas podem ser obtidas pela expressão (51).

Adicionalmente, a implantação de arranjos derivativos por meio de túnel ou conduto adutor requer a verificação da necessidade de implantação de chaminés de equilíbrio ou câmaras de carga, uma vez que quanto maior o comprimento dos condutos forçados em relação a queda, maior é a necessidade deste tipo de estrutura que auxilia na redução do golpe de aríete. Essa verificação pode ser feita por meio de 5 critérios, conforme é apresentado por Eletrobrás (2000) e (2003), os quais são listados a seguir:

- Clássico – Eletrobrás;
- Canambra simplificado;
- Canambra estendido;
- Inércia das Massas Girantes;
- Operação em Sistema Interligado – Método Montreal Engineering

Em geral, cada critério pode apresentar resultados indicando a necessidade de se projetar uma chaminé ou não para um mesmo arranjo. Para tanto, a verificação será realizada pelos 5 métodos e o dimensionamento da chaminé será condicionada pelo resultado favorável de 3 das metodologias. As equações de cada método são apresentadas a seguir:

- Clássico – Eletrobrás:

$$\frac{L_{cf}}{H_b} > 5 \quad (57)$$

$$t_h = \frac{v_{cf} L_{cf}}{g H_b} \quad (58)$$

Onde,

$L_{cf}$  – Comprimento do conduto forçado (m);

$H_b$  – Queda bruta nominal (m);

$t_h$  - Tempo de aceleração do escoamento no conduto forçado (s);

$v_{cf}$  – Velocidade do escoamento no conduto forçado (m/s);

$g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Condição 1: Se  $\frac{L}{H_b} > 5$ , recomenda-se a instalação de uma chaminé;

Condição 2:

Se  $t_h < 3,0$  s, não há necessidade de instalação da chaminé;

Se  $3,0 \text{ s} \leq t_h \leq 6,0 \text{ s}$ , é desejável, mas não obrigatória;

Se  $t_h > 6,0$  s, é obrigatória a instalação da chaminé.

- Canambra simplificado considerando uma usina interligada:

P/ pequenas usinas com reservatórios  $\frac{L}{H_b} > 10$ ;

P/ pequenas usinas  $\frac{L}{H_b} > 6$ ;

P/ grandes usinas  $\frac{L}{H_b} > 4$ .

- Canambra estendido:

$$\Delta h = \frac{2VL}{gT_e} \quad (59)$$

$$LV < 25H_b \quad (60)$$

Onde,

$\Delta h$  – Sobrepressão (m.c.a.);

$V$  – Velocidade média no conduto forçado para a vazão máxima (m/s);

$L$  - Comprimento do conduto (m);

$T_e$  – Tempo efetivo de fechamento (s).

Condição: se  $LV > 25H_b$ , a instalação é obrigatória.

- Inércia das Massas Girantes:

$$T_s = \frac{WR^2 n^2}{67.000P} \quad (61)$$

$$WR^2 = 1.000 \left( \frac{P}{\frac{3}{n^2}} \right)^{\frac{5}{4}}, \text{ para Turbina} \quad (62)$$

$$WR^2 = 15.000 \left( \frac{KVA}{\frac{3}{n^2}} \right)^{\frac{5}{4}}, \text{ para Gerador} \quad (63)$$

$$T_p = \frac{\sum LV}{gH_b} \quad (64)$$

$$T_c = T_e + (0,25 \text{ a } 1,5) \quad (65)$$

Onde,

$T_s$  – Tempo de aceleração da unidade (s);

$WR^2$  – Efeito da inércia da unidade (kgf.m<sup>2</sup>);

$n$  – Rotação síncrona (rpm);

$P$  – Potência da unidade em plena abertura (hp);

$T_p$  – Tempo de transitório hidráulico;

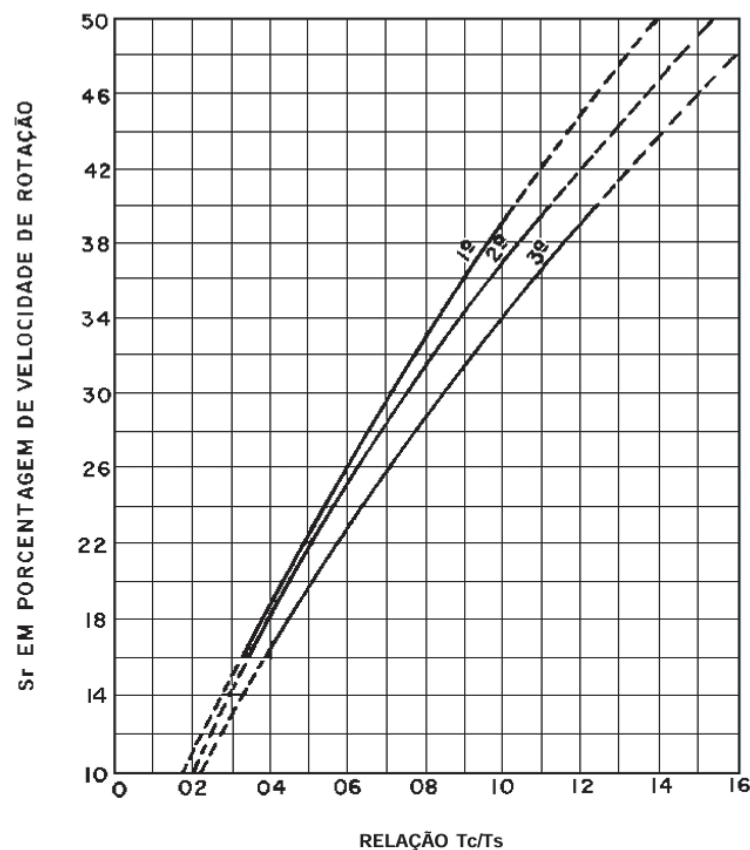
$LV$  – Comprimentos e velocidades de cada trecho de conduto de todo o circuito;

$T_c$  – Tempo total de ação do servomotor;

$T_e$  – Tempo efetivo de operação (entre 6 a 10s).

Condição: Se  $T_s \geq 2T_p^2$ , as unidades terão boas condições de regulação. Este critério ainda deve levar em consideração o efeito da sobrevelocidade da máquina em função da relação  $T_c/T_s$ , obtida a partir da Figura 21 e do golpe de aríete multiplicado pela relação  $(1 + T_p/T_e)$ .

Figura 21 – Taxa de Sobrevelocidade.



Fonte: Eletrobrás (2003).

- Método *Montreal Engineering*:

Este método utiliza um gráfico elaborado pela *Montreal Engineering*, com base na experiência de projetos da empresa e considera a relação  $\frac{T_p}{T_e}$  (tempo transitório hidráulico e tempo efetivo do regulador) e  $\frac{T_S}{T_C}$  (tempo transitório mecânico e o tempo total do regulador). O cálculo de  $T_p$  é calculado pela expressão a seguir:

$$T_p = \frac{(L_R + L_S + L_P) \cdot V}{gH} \quad (66)$$

Onde,

$L_R$  – Comprimento da chaminé de equilíbrio (m);

$L_S$  – Metade do comprimento da caixa espiral (m);

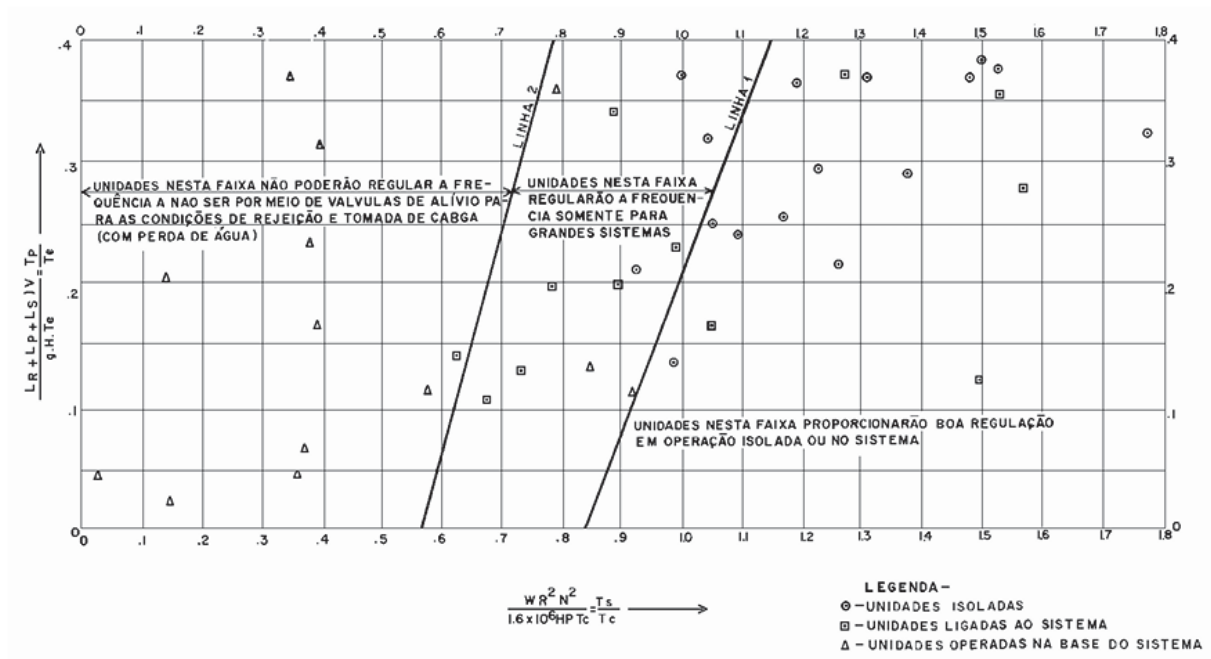
$L_P$  – Comprimento do conduto forçado (m);

$V$  – Média das velocidades do escoamento a plena carga no conduto forçado, caixa espiral e tubo de sucção);

$H$  – Queda útil da usina (m).

A partir das relações de  $\frac{T_p}{T_e}$  (ordenadas) e  $\frac{T_S}{T_C}$  (abscissas) é definido se haverá necessidade de chaminé de equilíbrio no arranjo estudado, conforme é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Faixas de regulação em função do tipo de sistema e das relações  $\frac{T_p}{T_e}$  e  $\frac{T_s}{T_c}$ .



Fonte: Eletrobrás (2003).

Caso sejam necessárias as chaminés de equilíbrio, será realizado o dimensionamento da estrutura hidráulica com o cálculo das dimensões mínimas a partir dos critérios de dimensionamento apresentados por Eletrobrás (2003).

- Critério de Sparre:

$$F \geq f \quad (67)$$

Onde,

$F$  - Área da seção transversal da chaminé ( $m^2$ );

$f$  - Área da seção transversal da adução na bifurcação com a chaminé ( $m^2$ ).

Esta condição garante a segurança do conduto de adução a montante da chaminé.

- Critério de Thoma:

$$F \geq F_T \quad (68)$$

$$F_T = \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{fL}{h(H_m - h)} \quad (69)$$

Onde,

$F$  - Área da seção transversal da chaminé (m<sup>2</sup>);

$F_T$  - Área mínima da seção transversal da chaminé - Seção de Thoma (m<sup>2</sup>);

$V$  - Velocidade do escoamento para vazão nominal (m/s);

$f$  - Área do conduto de adução (m<sup>2</sup>);

$L$  - Comprimento do conduto de adução (m);

$H_m$  - Altura de queda bruta mínima (m);

$h$  - Perda de carga ao longo do conduto de adução para a vazão nominal (m).

Em relação à casa de força, esta deverá ser dimensionada com espaço suficiente para abrigar os equipamentos eletromecânicos e hidromecânicos protegendo este espaço contra níveis de cheias que possam inundar a casa de força por jusante. Geralmente a proteção mínima da estrutura é referente a uma recorrência milenar.

### 3.4 DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

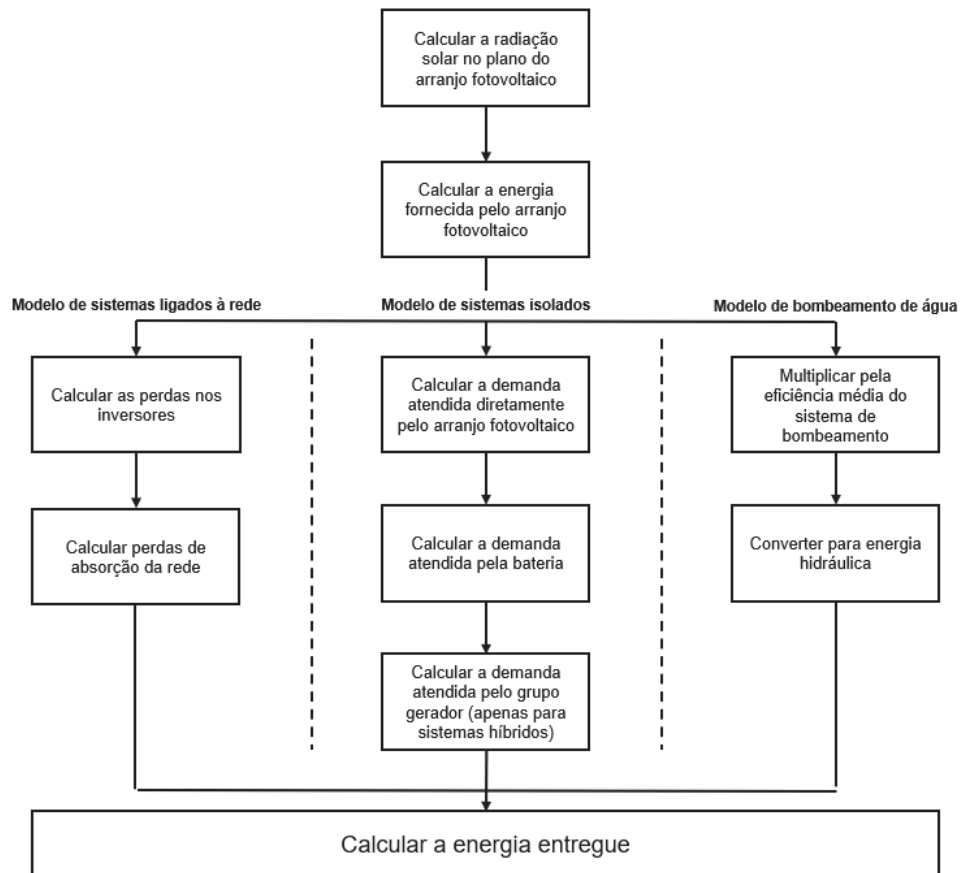
O dimensionamento e a quantificação de custos dos painéis fotovoltaicos serão realizados com a utilização do software RETScreen versão 4.0. O programa computacional é uma ferramenta desenvolvida para a análise de pré-viabilidade e viabilidade de tecnologias de energia limpa que consiste na análise de projetos que podem ser utilizados no mundo todo para a avaliação da produção de energia, custos do ciclo de vida e reduções de emissões de gases de efeito estufa (Retscreen, 2005).

Uma das tecnologias de energia limpa que a ferramenta oferece recursos de dimensionamento são os sistemas fotovoltaicos para diferentes tipos de aplicações: sistemas ligados à rede, sistemas isolados fora da rede e sistemas de bombeamento (Retscreen, 2005).

O modelo de projeto fotovoltaico consiste em 6 etapas: Dados iniciais, Modelo Energético, Análise de Custos, Análise de Emissões, Análise Financeira e Análise de Riscos (Retscreen, 2005). Para este trabalho as alternativas serão avaliadas até a etapa de modelo energético apenas para realizar o dimensionamento do sistema fotovoltaico. É importante ressaltar que esta versão do RETScreen não apresenta um modelo específico para painéis flutuantes, entretanto, o dimensionamento do sistema em termos de produção energética é muito semelhante às aplicações em solo.

Inicialmente calcula-se a radiação solar incidente no local do projeto. Esta etapa é necessária para as três aplicações e depende da orientação dos painéis, dos dados diários médios mensais de radiação solar incidente na superfície horizontal e da demanda de energia anual necessária para alimentar a bomba. Em seguida define-se o arranjo do sistema fotovoltaico selecionando o tipo de módulo fotovoltaico dentro do banco de dados do *software*. A Figura 23 apresenta o fluxograma do algoritmo de cálculo que norteia o dimensionamento do Reetscreen.

Figura 23 – Fluxograma do algoritmo de cálculo do RETscreen versão 4.0.



Fonte: Adaptado de Retscreen, versão 4.0 (2005).

### 3.5 MÉTODO DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA

O método de avaliação econômica consiste na comparação de projetos de investimentos. Casarotto Filho e Kopittke (2007), elencam 3 critérios que devem estar presentes na decisão da implantação de um projeto. São eles:

- Econômicos: rentabilidade do investimento;
- Financeiros: disponibilidade de recursos;
- Imponderáveis: fatores não conversíveis em dinheiro.

Os autores afirmam que uma análise puramente econômico-financeira, pode não ser suficiente para a tomada de decisões de implantação de um projeto. Ainda assim, esta avaliação será realizada como objetivo comparativo entre as alternativas estudadas.

Neste sentido, há três parâmetros de avaliação econômica que consistem em métodos determinísticos de análise de investimentos e integram a análise do Fluxo de Caixa Descontado (FCD). São eles:

- Índice Custo-Benefício (ICB);
- Valor Presente Líquido (VPL);
- Taxa Interna de Retorno (TIR).

### 3.5.1 Índice Custo-Benefício (ICB)

O cálculo do índice custo-benefício concentra-se em calcular todos os custos envolvidos no investimento do empreendimento e nos benefícios que pode ser medido pela energia garantida anual.

A estimativa de custos do projeto envolve o investimento que está relacionado ao custo de oportunidade, aos custos de operação e manutenção e custos de transmissão. Para o caso do projeto, os custos com a transmissão serão considerados nulos, uma vez que o sistema será implantado utilizando as linhas de transmissão já existentes nas usinas. Portanto, resumidamente os custos totais serão a soma dos investimentos para a construção do sistema e os custos de operação e manutenção.

A estimativa dos benefícios poderá ser calculada a partir dos preços de leilão da venda de energia da referida usina no modelo de negócio “por trás do medidor”. Logo, o *ICB* pode ser calculado da seguinte forma (MME, 2007):

$$ICB = \frac{I_0 \cdot FR + OM \cdot P}{EG \cdot PV} \quad (70)$$

Onde,

$I_0$  – Valor inicial do investimento (R\$);

$FR$  – Fator de recuperação de capital do investimento (%/ano);

$OM$  – Custos anuais de operação e manutenção (R\$/MW/ano);

$P$  – Potência instalada (MW);

$EG$  – Energia garantida da usina (MWh/ano);

$PV$  – Preço de venda da energia (R\$/MWh).

### 3.5.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O método VPL pode ser calculado da seguinte maneira:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (71)$$

Onde,

$n$  – Horizonte de análise;

$t$  – Período de análise (1;  $n$ );

$S_t$  – Valor líquido recebido ao fim do período  $t$ ;

$k$  – Taxa de desconto associada ao custo de oportunidade;

$I_0$  – Valor inicial do investimento.

A tomada de decisão a partir do resultado do VPL pode ser guiada do seguinte modo:

- $VPL > 0$ , indica que o valor atualizado do projeto é maior que o capital inicial investido, portanto, deve-se aceitar o projeto;
- $VPL < 0$ , indica que o valor atualizado do projeto é menor que o capital inicial investido, portanto, deve-se rejeitar o projeto;
- $VPL = 0$ , indica que o valor atualizado do projeto é equivalente ao capital inicial investido, portanto a decisão é indiferente.

### 3.5.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

O método TIR pode ser calculado da seguinte maneira:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (72)$$

Onde,

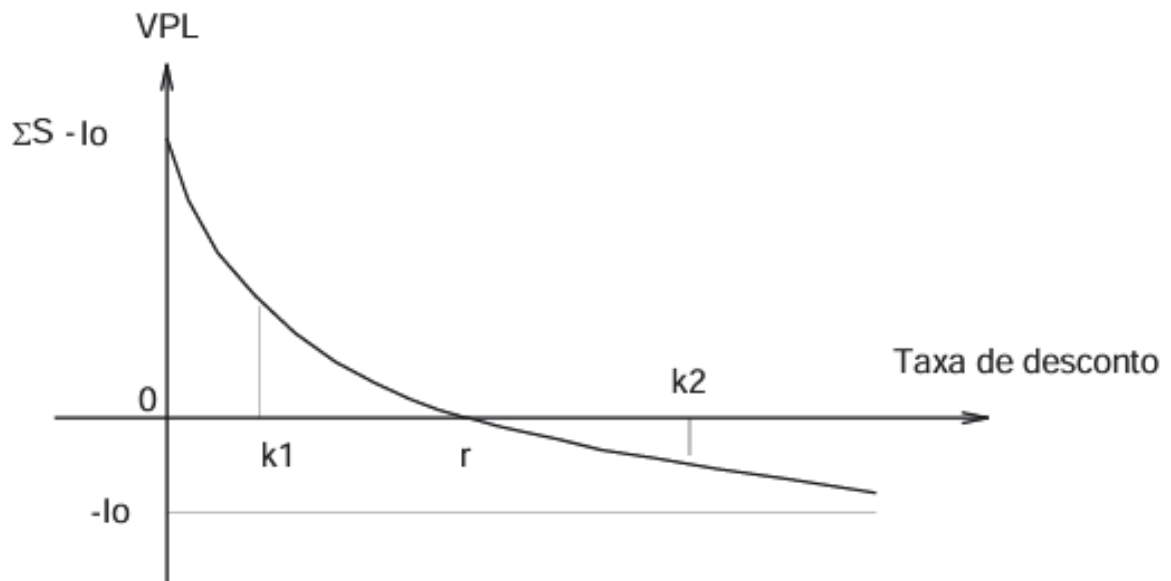
$r$  – Taxa interna de retorno (TIR).

A tomada de decisão a partir do resultado do TIR pode ser guiada do seguinte modo:

- $TIR > k$ , indica que o retorno financeiro do projeto é maior que o uso alternativo do capital, portanto deve-se aceitar o projeto;
- $TIR < k$ , indica que o retorno financeiro do projeto é menor que o uso alternativo do capital, portanto deve-se rejeitar o projeto;
- $TIR = k$ , indica que o retorno financeiro do projeto é equivalente ao uso alternativo do capital, portanto a decisão é indiferente.

A relação entre os métodos VPL e TIR pode ser verificada através da Figura 24 no qual o investimento inicial ocorre antes dos recebimentos. Para  $TIR > k$ , o VPL do projeto é positivo, para  $TIR < k$  o VPL torna-se negativo. Ou seja, se o projeto é aceito pelo método VPL também é aceito pelo método TIR e para o caso de rejeição em um dos métodos, o projeto também é rejeitado no outro.

Figura 24 – Representação gráfico de um projeto convencional.



Fonte: Casarotto Filho e Kopittke (2007).

### 3.5.4 Estimativa de Custos

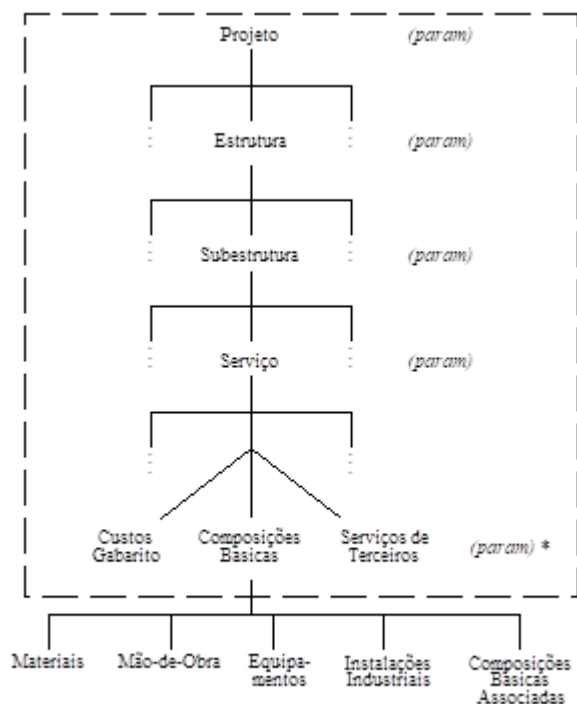
A avaliação de custos das obras civis das alternativas estudadas se deu através da ferramenta Sistema de Orçamento de Usinas Hidrelétricas (SISORH)

versão 6.0 que realiza o cálculo no modelo do Orçamento Padrão Eletrobras (OPE) para empreendimentos hidrelétricos. A elaboração dos orçamentos através do SISORH procura obter os custos através de uma simulação completa do processo construtivo, podendo levar em conta todos os detalhes dos processos construtivos, do planejamento executivo e das condições de execução dos serviços. Ele é adequado para orçamentos em fases de estudo que vão desde inventário até projeto executivo. Para calcular estes custos, a ferramenta possui um banco de dados que faz uso de uma estrutura hierárquica em classes da seguinte maneira (Eletrobras, 2007):

- Cada projeto é definido como um conjunto de estruturas;
- Cada estrutura é composta por um conjunto de subestruturas;
- Cada subestrutura é composta por um conjunto de serviços;
- Cada serviço é formado por um conjunto de composições básicas, um de custos gabarito e um outro de serviços de terceiros;
- As composições básicas refletem as tecnologias de construção. Ao se definir a utilização de uma composição, determina-se, indiretamente, a utilização de insumos (materiais, mão-de-obra, equipamentos e instalações industriais) e composições associadas, usadas para implementar uma composição maior subdividida em outras.

Esta estrutura de nível hierárquico pode ser visualizada pela Figura 25.

Figura 25 – Estrutura hierárquica do SISOHR.



\* Obs.: Os parâmetros se referem somente à composição básica

Fonte: Eletrobras, 2007.

Conforme especificado no manual da ferramenta, o identificador (*param*) indica os níveis onde podem ser feitas definições de parâmetros de cálculo para o projeto. Alguns destes parâmetros são apresentados como padrão pelo programa, mas podem ser alterados pelo usuário. Para cada classe existem diversos tipos de parâmetros que podem ser configurados pelo usuário, como por exemplo, turnos de trabalho, tipo de solo, tipo de rocha, entre outros. Para a classe de composições básicas podem ser definidas as quantidades de um determinado serviço o qual será utilizado para calcular automaticamente a quantidade de materiais, mão de obra, equipamentos, instalações industriais e composições básicas associadas envolvidas em uma determinada composição básica. Trimestralmente a EPE disponibiliza no banco de dados os preços atualizados relativos aos equipamentos, materiais e mão de obra envolvidos nas composições básicas que podem ser importados para o programa do SISOHR. Essa função torna a ferramenta muito precisa e eficiente na estimativa dos custos envolvidos para a execução dos empreendimentos hidrelétricos, uma vez que estes preços são corrigidos pela Fundação Getúlio Vargas (FGV).

Em relação a estimativa das instalações fotovoltaicas flutuantes, os custos serão definidos a partir de índices em dólar/MWp e transformado em real/MWp.

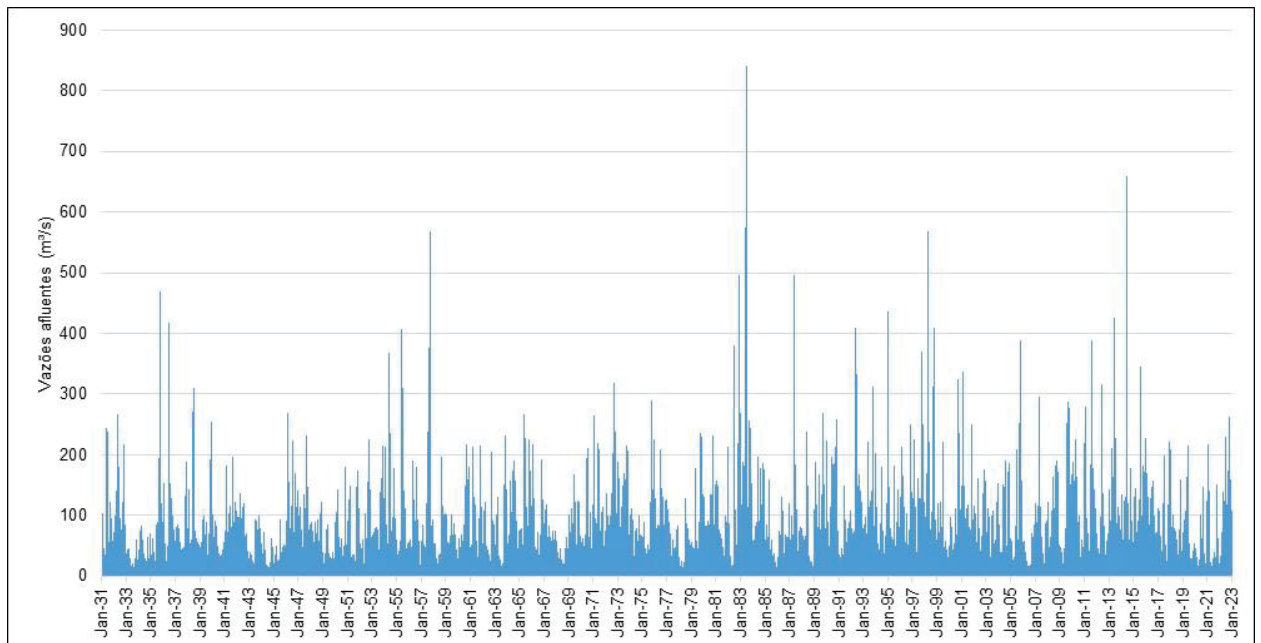
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA UHR

A definição da vazão disponível para a operação pode ser considerada a peça-chave para a dimensionamento da UHR, uma vez que as reversíveis se enquadram como dispositivos de armazenamento de energia e muitas vezes esta “bateria” está fora do corpo hídrico. Desse modo a proposta apresentada por Hunt et al. (2020) baseia-se na sazonalidade das vazões afluentes ao aproveitamento, conforme especificado no item 3.2.1. A depender do quão bem definida são as vazões em períodos de estiagem e de cheia, essa metodologia pode resultar em vazões maiores ou menores.

Os dados de vazões afluentes à UHE Santa Clara, foram obtidos a partir dos dados abertos disponibilizados pela ONS<sup>3</sup> para o período de 1931 a 2022, a nível mensal, os quais são apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Histórico de vazões afluentes médias mensais – UHE Santa Clara.



Fonte: Autor (2024).

<sup>3</sup> Ver Anexo 1 – Dados Abertos ONS.

A partir dos dados acima os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 5<sup>4</sup>.

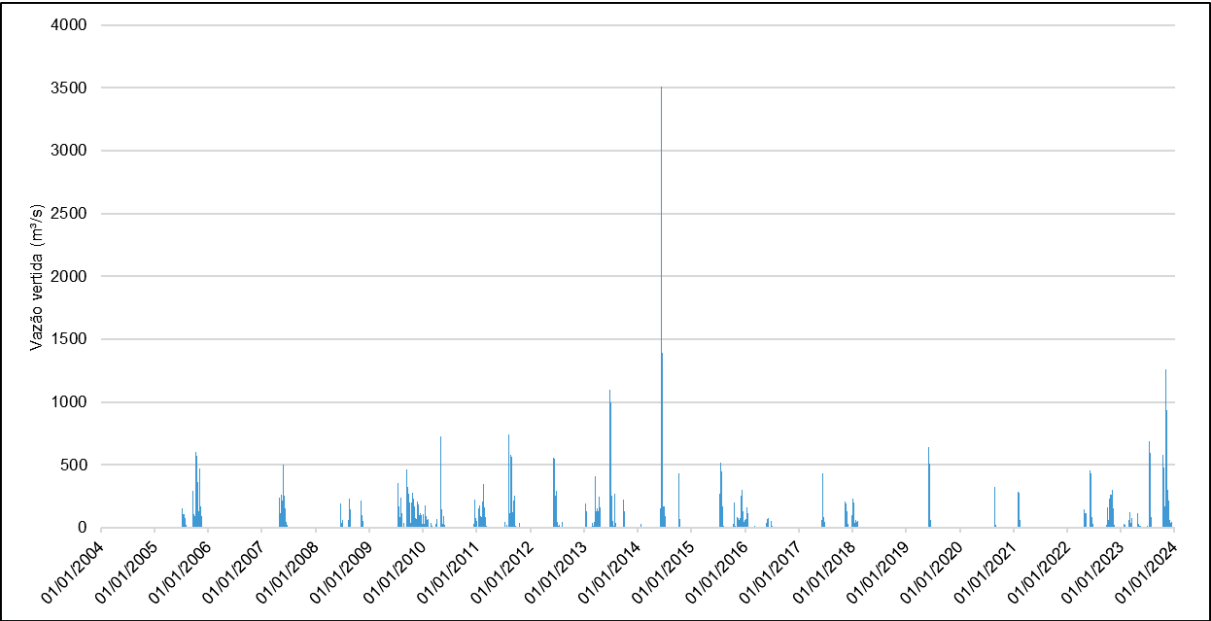
Tabela 5 – Resultados - Sazonalidade.

| Resultados                                              | UHE Santa Clara |
|---------------------------------------------------------|-----------------|
| Vazão média de longo termo - $q_s$ ( $m^3/s$ )          | 103,34          |
| Número de meses - $N_m$                                 | 1.104           |
| Índice de Variação Sazonal - $S_v$                      | 0,78            |
| Número de anos - $N_y$                                  | 92              |
| Índice de variação interanual - $I_v$                   | 0,37            |
| Vazão anual do rio - $Q$ ( $km^3/ano$ )                 | 3,26            |
| Vazão disponível para armazenamento - $Q_d$ ( $m^3/s$ ) | <b>8,41</b>     |

Fonte: Autor (2024).

Devido à particularidade do estudo de caso em questão com o sistema reversível sendo aplicado à aproveitamentos hidrelétricos existentes, também foi analisado o histórico dos dados de vazões vertidas pela UHE Santa Clara no período entre 2004 e 2023 à nível diário, obtido pelos dados abertos da ONS. Estas informações podem ser visualizadas pela Figura 27.

Figura 27 – Histórico de vazões vertidas diárias – UHE Santa Clara.



Fonte: Autor (2024).

<sup>4</sup> Resultados detalhados são apresentados no Apêndice 1.

A partir dos dados apresentados na Figura 27, a vazão disponível obtida através do histórico de vazões vertidas da UHE Santa Clara é de 22,54 m<sup>3</sup>/s, ou seja, superior em mais de duas vezes a metodologia de sazonalidade.

No que se refere aos cálculos das alturas de queda e de elevação, estes foram baseadas nas características técnicas dos aproveitamentos das UHEs Santa Clara e Fundão, os quais foram apresentados no item 3.1. Essa informação foi utilizada como parâmetro de cálculo para a obtenção das potências instaladas no modo turbina e bomba de cada alternativa. Estes parâmetros podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros iniciais de cálculo.

| Parâmetros                                              | Unidade           |        |
|---------------------------------------------------------|-------------------|--------|
| Nível máximo maximorum reservatório superior            | m                 | 810,35 |
| Nível mínimo normal reservatório superior               | m                 | 787,50 |
| Nível máximo maximorum reservatório inferior            | m                 | 711,00 |
| Nível mínimo normal reservatório inferior               | m                 | 705,50 |
| Perda de carga inicial arbitrada ( $h_{fi}$ )           | %                 | 5,00   |
| Altura de queda líquida nominal ( $H_t$ )               | m                 | 86,14  |
| Altura de queda líquida máxima ( $H_{tM}$ )             | m                 | 99,61  |
| Altura de queda líquida mínima ( $H_{tm}$ )             | m                 | 72,68  |
| Altura de elevação líquida nominal ( $H_b$ )            | m                 | 95,21  |
| Altura de elevação líquida máxima ( $H_{bM}$ )          | m                 | 110,09 |
| Altura de elevação líquida mínima ( $H_{bm}$ )          | m                 | 80,33  |
| Massa específica da água ( $\rho$ )                     | kg/m <sup>3</sup> | 1000   |
| Rendimento no modo turbina ( $\eta_t$ )                 | %                 | 92,00  |
| Rendimento no modo bomba ( $\eta_b$ )                   | %                 | 88,00  |
| Rendimento médio do conjunto moto-gerador ( $\eta_g$ )  | %                 | 97,00  |
| Eficiência do ciclo de operação ( $\eta_{ciclo}$ )      | %                 | 68,9   |
| Volume de acumulação do reservatório superior ( $V_s$ ) | hm <sup>3</sup>   | 260,76 |
| Aceleração gravitacional ( $g$ )                        | m/s <sup>2</sup>  | 9,81   |

Fonte: Autor (2024).

As potências das máquinas no modo turbina e bomba para as duas alternativas de UHR, considerado a vazão disponível previamente calculada e os parâmetros apresentados na Tabela 6, podem ser visualizados na Tabela 7.

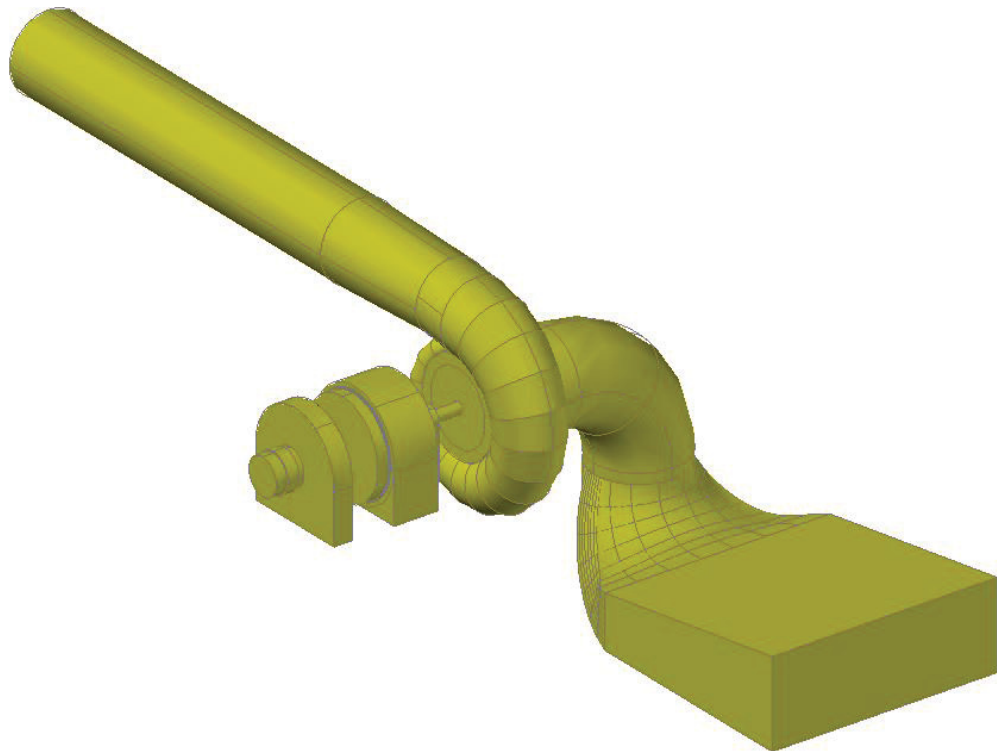
Tabela 7 – Pré-dimensionamento da UHR.

| Método                         | Sazonalidade | Vazões Vertidas |
|--------------------------------|--------------|-----------------|
| $Q_t, Q_b$ (m <sup>3</sup> /s) | 8,41         | 22,54           |
| $P_t$ (MW)                     | 6,54         | 17,52           |
| $P_b$ (MW)                     | 6,91         | 18,52           |

Fonte: Autor (2024).

A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 6 foi possível dimensionar a turbina reversível. A Figura 28 apresenta um modelo tridimensional ilustrativo do equipamento concebido, enquanto as características técnicas da máquina hidráulica reversível são apresentadas no Quadro 4.

Figura 28 – Modelo tridimensional ilustrativo da turbina reversível dimensionada.



Fonte: Autor (2024).

Quadro 4 – Dimensionamento da turbina reversível.

| SUBMERGÊNCIA                                 |      |                      |      |                |        |
|----------------------------------------------|------|----------------------|------|----------------|--------|
| Rotação específica da máquina                |      | $n$ (rpm)            |      |                | 212,83 |
| Rotação específica no modo turbo             |      | $n_{st}$ (rpm)       |      |                | 212,53 |
| Rotação específica no modo bomba             |      | $n_{st}$ (rpm)       |      |                | 213,57 |
| Rotação específica no modo bomba estatística |      | $\bar{n}_{sb}$ (rpm) |      |                | 199,74 |
| Variação máxima da altura de elevação        |      | $H_{bM}/H_{bm}$      |      |                | 1,37   |
| Coeficiente de cavitação teórico             |      | $\bar{\sigma}$       |      |                | 0,31   |
| Coeficiente de cavitação atual               |      | $\sigma$             |      |                | 0,34   |
| Pressão atmosférica                          |      | $h_b$ (m)            |      |                | 9,50   |
| Pressão de vapor de água                     |      | $h_w$ (m)            |      |                | 0,24   |
| Altura de sucção estática                    |      | $h_s$ (m)            |      |                | -22,90 |
| Perda de carga na sucção                     |      | $h_{fs}$ (m)         |      |                | 0,64   |
| Submergência da bomba                        |      | $H_s$ (m)            |      |                | 23,53  |
| ROTOR                                        |      | CAIXA ESPIRAL        |      | TUBO DE SUCÇÃO |        |
| HbM/Hb                                       | 1,16 | $v_{ob}$ (m/s)       | 0,73 | $v_{ib}$ (m/s) | 8,42   |
| $K_u$                                        | 1,14 | A (m)                | 3,75 | Ht (m)         | 5,00   |
| $D_1$ (m)                                    | 4,41 | B (m)                | 5,21 | N (m)          | 4,55   |
| $D_6$ (m)                                    | 3,46 | C (m)                | 5,76 | O (m)          | 2,82   |
| $D_2$ (m)                                    | 4,51 | D (m)                | 6,46 | P (m)          | 4,30   |
| $H_1$ (m)                                    | 0,95 | E (m)                | 4,92 | Q (m)          | 2,51   |
| $H_2$ (m)                                    | 0,47 | F (m)                | 7,03 | R (m)          | 4,17   |
| $H_3$ (m)                                    | 1,33 | G (m)                | 5,98 | S (m)          | 15,77  |
|                                              |      | H (m)                | 5,35 | T (m)          | 5,06   |
|                                              |      | I (m)                | 0,95 | U (m)          | 1,79   |
|                                              |      | L (m)                | 3,00 | Z (m)          | 10,93  |
|                                              |      | M (m)                | 1,75 |                |        |

Fonte: Autor (2024).

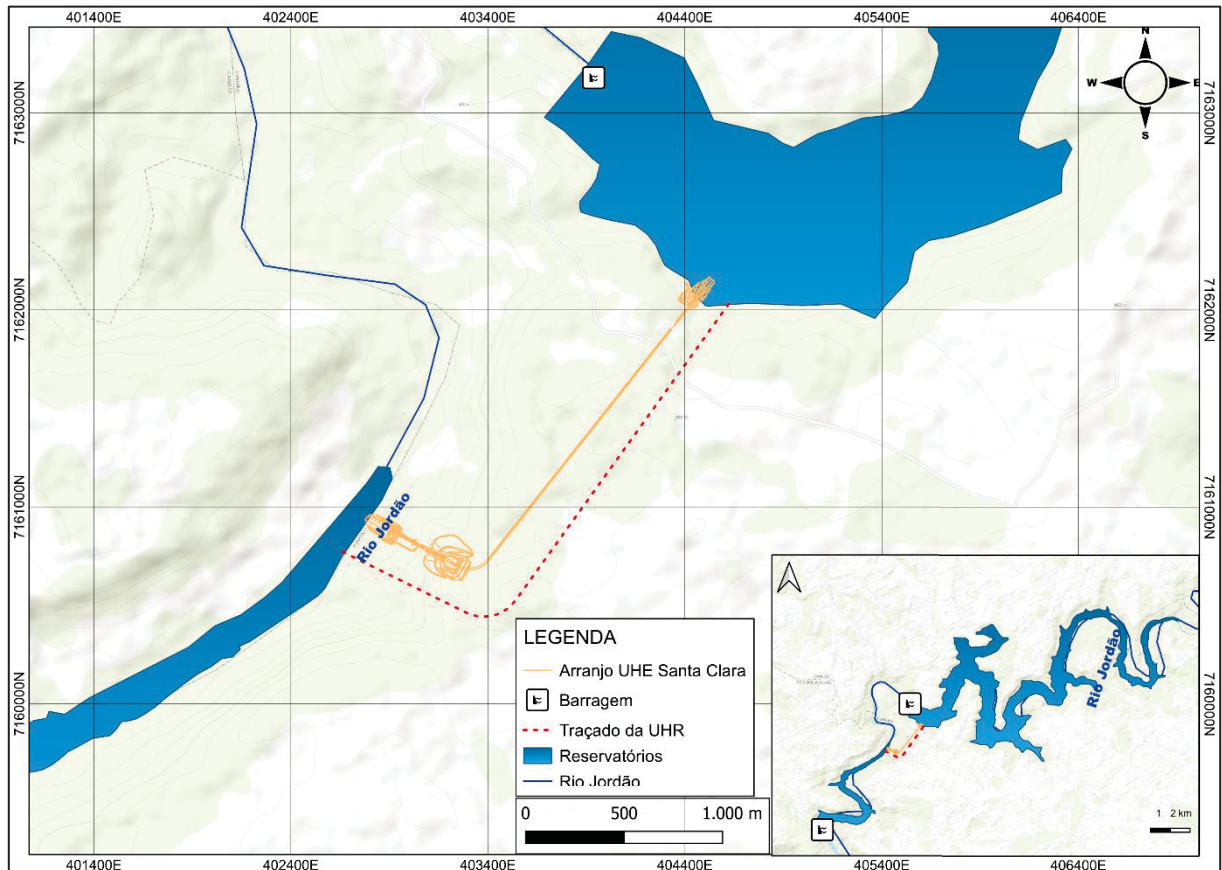
Com o método proposto por Siervo e Lugaresi (1980), que considera regressões matemáticas que dependem basicamente da rotação específica da máquina e das alturas de queda e elevação, verifica-se que a turbina reversível apresenta a mesma configuração para as duas alternativas estudadas, ou seja, sem considerar a magnitude da vazão máxima de operação na obtenção das dimensões dos componentes.

## 4.2 CONCEPÇÃO DO ARRANJO

A partir da definição dos equipamentos foi possível dar sequência ao dimensionamento das obras civis para os dois arranjos. Para a concepção foi definido

o traçado do circuito de geração e bombeamento externo ao traçado do atual circuito de geração existente da UHE Santa Clara, conforme pode ser visualizado esquematicamente na Figura 29.

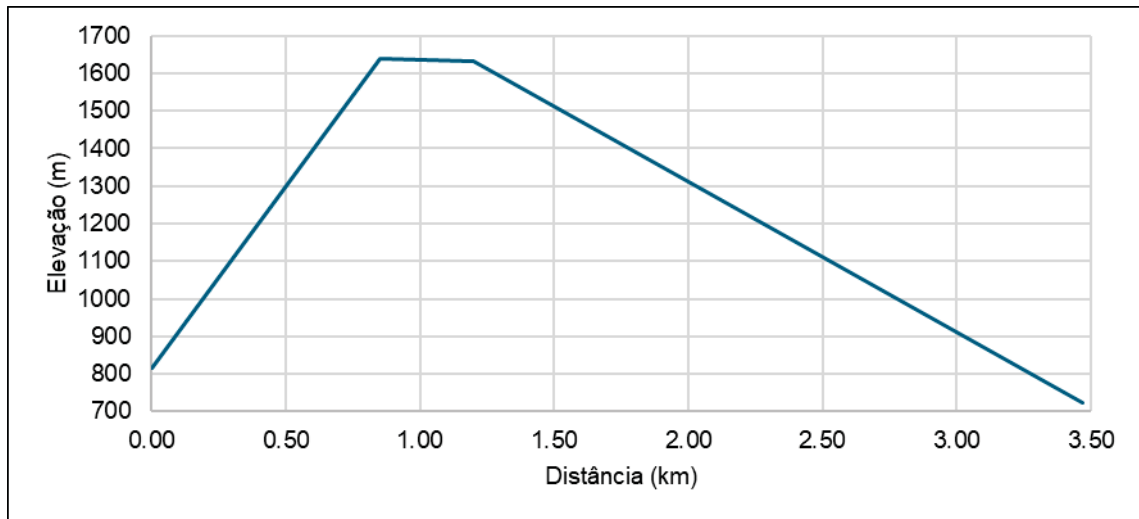
Figura 29 – Traçado esquemático do circuito da UHR.



Fonte: Autor (2024).

Devido às condições topográficas e geológicas da região, o circuito da UHR foi concebido totalmente subterrâneo. A Figura 30 apresenta o perfil topográfico do terreno no traçado do circuito da UHR.

Figura 30 – Perfil do terreno do circuito da UHR.



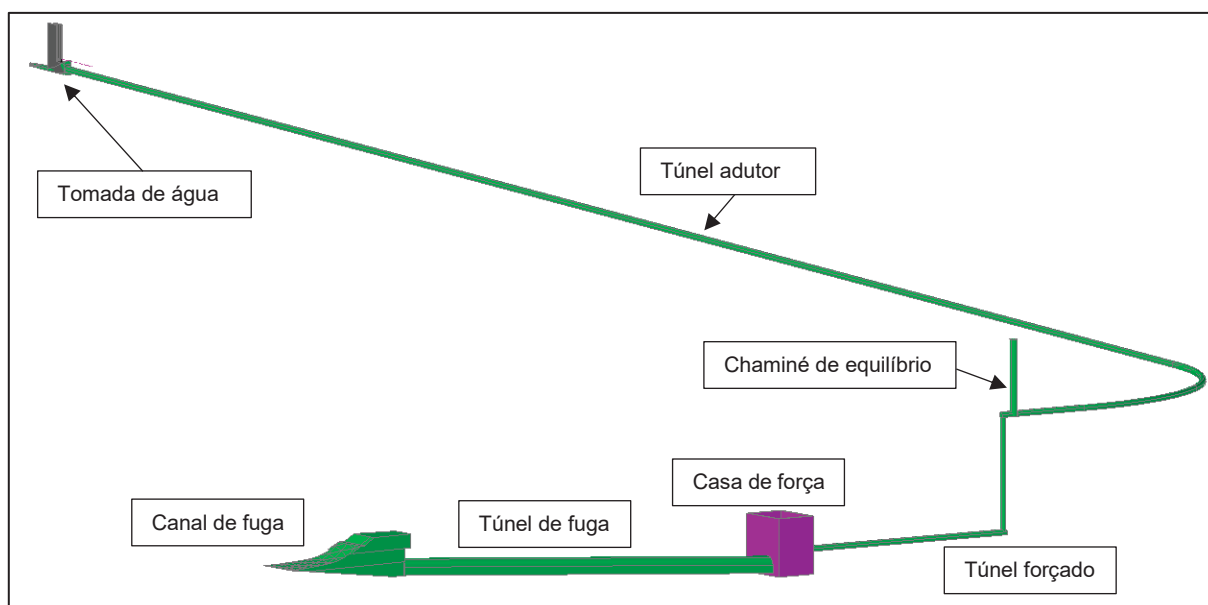
Fonte: Google Earth (2024).

Portanto, as estruturas do circuito hidráulico projetadas para os arranjos das UHRs são listadas a seguir:

- Tomada de água;
- Túnel adutor;
- Chaminé de equilíbrio;
- Túnel forçado (vertical e horizontal);
- Casa de força;
- Túnel de fuga;
- Canal de fuga.

A Figura 31 apresenta as estruturas listadas.

Figura 31 – Estruturas do circuito hidráulico da UHR.



Fonte: Autor (2024).

#### 4.2.1 Tomada de água

A tomada de água concebida constitui-se de um bloco à gravidade dotada de grades e comportas para fechamento e manutenção do circuito. Os resultados do dimensionamento hidráulico da tomada de água podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dimensionamento da tomada de água para as duas alternativas.

| Alternativa                    | Sazonalidade | Vazão Vertida |
|--------------------------------|--------------|---------------|
| N.A. Mínimo Normal (m)         | 787,50       | 787,50        |
| Vazão (m³/s)                   | 8,41         | 22,54         |
| Número de vãos                 | 1,0          | 1,0           |
| Largura do vão (m)             | 3,00         | 4,00          |
| Altura do vão (m)              | 5,40         | 5,40          |
| Tipo da tomada                 | Simétrico    | Simétrico     |
| Área (m²)                      | 16,2         | 21,6          |
| Velocidade (m/s)               | 0,52         | 1,04          |
| Número de Froude               | 0,07         | 0,14          |
| Submersão crítica (m)          | 0,66         | 1,32          |
| Cota Máxima do Teto (m)        | 786,84       | 786,18        |
| Cota adotada (m)               | 784,70       | 784,70        |
| Submersão para o NA mínimo (m) | 2,80         | 2,80          |

Fonte: Autor (2024).

Verifica-se que as duas alternativas estudadas resultaram em dimensões semelhantes com poucas alterações, não tendo um peso significativo na volumetria geral dos arranjos. Nota-se que as velocidades ficaram bem abaixo da recomendação da Eletrobras (2003), sendo que para os dois casos a dimensão do vão poderia ser menor. Ressalta-se que a largura ficou atrelada à mesma dimensão do diâmetro do túnel adutor (que será apresentado no subitem a seguir) de modo que a transição entre a tomada e o túnel fosse concebida com melhor suavidade. A altura do vão foi consequência do formato recomendado no HDC (USACE, 1977) para tomadas únicas (*single intakes*).

#### 4.2.2 Túnel adutor

O túnel adutor seguiu o traçado pré-definido na concepção do arranjo sendo que esta estrutura foi inteiramente projetada na cota 780,00 m (horizontal) até a chaminé de equilíbrio. Este trecho resultou em uma extensão de 2.110 m. A seção escolhida para o túnel foi o arco-retângulo e a diferença principal entre as alternativas estudadas foi a dimensão do diâmetro de modo que a perda de carga não fosse muito elevada. Para o caso dos arranjos estudados a variação na dimensão do diâmetro é extremamente sensível na estimativa das perdas de carga, uma vez que o comprimento é grande. Portanto, adotou-se para a metodologia da sazonalidade o diâmetro mínimo de 3,00 m enquanto para a vazão vertida adotou-se a dimensão de 4,00 m (ver Tabela 9).

Tabela 9 – Dimensionamento do túnel adutor para as duas alternativas.

| <b>Alternativa</b>     | <b>Sazonalidade</b> | <b>Vazão Vertida</b> |
|------------------------|---------------------|----------------------|
| Seção típica           | Arco-Retângulo      | Arco-Retângulo       |
| Diâmetro (m)           | 3,00                | 4,00                 |
| Área (m <sup>2</sup> ) | 8,03                | 14,28                |
| Velocidade (m/s)       | 1,05                | 1,58                 |

Fonte: Autor (2024).

Observa-se que para o caso da sazonalidade, mesmo considerando o diâmetro mínimo construtivo de 3,0 m para o túnel adutor, a vazão de 8,41 m<sup>3</sup>/s resulta numa velocidade de 1,05 m/s, muito abaixo da faixa recomendada de 2,5 a 3,0 m/s. Isso implica em menores perdas de carga, mas em alto custo de construção, visto que

poderia ser construído um túnel com diâmetro menor caso fosse possível. Desta maneira, os volumes e os custos de escavação reduziriam na mesma proporção. Em relação a alternativa de vazão vertida, a velocidade de 1,58 m/s também está fora da recomendação proposta pela Eletrobrás (2003), contudo, caso fosse escolhido o diâmetro mínimo de 3,00 m, as perdas de carga seriam muito elevadas. Em etapas mais avançadas de projeto seria recomendável o estudo de diâmetro econômico, conforme citado no item 3.3.

#### 4.2.3 Chaminé de equilíbrio

A necessidade de implantação da chaminé de equilíbrio foi verificada seguindo os critérios apresentados no item 3.3. Previamente presumia-se que seria obrigatória a instalação, uma vez que a própria UHE Santa Clara possui câmara de carga em seu arranjo, entretanto, essa verificação se fez necessária devido a concepção do novo arranjo projetado para as duas alternativas de UHR. Dos cinco métodos de verificação, quatro indicaram a necessidade de chaminé para os dois casos, conforme disposto na Tabela 10. Os cálculos detalhados podem ser visualizados no Apêndice 2.

Tabela 10 – Verificação quanto à necessidade de implantação.

| <b>Critério</b>      | <b>Sazonalidade</b> | <b>Vazões Vertidas</b> |
|----------------------|---------------------|------------------------|
| Eletrobrás           | Não                 | Sim                    |
| Canambra             | Sim                 | Sim                    |
| Canambra Estendido   | Sim                 | Sim                    |
| Massas Girantes      | Sim                 | Não                    |
| Montreal Engineering | Sim                 | Sim                    |

Fonte: Autor (2024).

A partir da constatação da necessidade de chaminé prosseguiu-se com os dimensionamentos para as duas alternativas. Para a simplificação dos cálculos, adotou-se a mesma área de seção transversal das chaminés e calculou-se os níveis máximos e mínimos atingidos para cada alternativa. Adicionalmente, foi adotado Ks de 44 para a condição mais lisa que o normal e Ks de 31 para a condição mais rugosa que o normal, considerando que em todos os casos – mais liso e mais rugoso para as duas alternativas – que toda a superfície da rocha é tratada com concreto projetado.

Os resultados do dimensionamento da chaminé de equilíbrio podem ser observados no Quadro 5.

Quadro 5 – Dimensionamento da chaminé de equilíbrio.

| Metodologia                                                                                     | -                                 | Sazonalidade | Vazão Vertida |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------|---------------|
| Nível máximo normal                                                                             | NAM (m)                           | 805,00       | 805,00        |
| Nível mínimo normal                                                                             | Namin (m)                         | 787,50       | 787,50        |
| Vazão máxima turbinada                                                                          | Q (m <sup>3</sup> /s)             | 8,41         | 22,54         |
| Diâmetro do conduto adutor                                                                      | D (m)                             | 3,00         | 4,00          |
| Área do conduto adutor                                                                          | A <sub>ta</sub> (m <sup>2</sup> ) | 8,03         | 14,28         |
| Altura de velocidade                                                                            | v <sup>2</sup> /2g (m)            | 0,06         | 0,13          |
| Comprimento do conduto adutor                                                                   | L <sub>ta</sub> (m)               | 2110         | 2110          |
| Queda Bruta mínima                                                                              | H <sub>min</sub> (m)              | 72,68        | 72,68         |
| Perda de carga no conduto de adução                                                             | h <sub>ta</sub> (m)               | 1,90         | 2,96          |
| Área mínima da Chaminé - Condição de Sparre                                                     | F <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )  | 8,03         | 14,28         |
| Área mínima da Chaminé - Condição de Thoma                                                      | F <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> )  | 7,03         | 18,53         |
| Área adotada                                                                                    | F (m <sup>2</sup> )               | 28,27        | 28,27         |
| Determinação da altura sem perdas no sistema adutor                                             | Ye=Yd (m)                         | 8,18         | 16,45         |
| VARIAÇÃO PARA CIMA                                                                              |                                   |              |               |
| Perda de carga relativa à máxima elevação                                                       | k                                 | 0,23         | 0,18          |
| Coeficiente de perda de carga relativa à máxima elevação                                        | z <sub>e</sub> (m)                | 0,85         | 0,88          |
| Altura máxima atingida                                                                          | Y <sub>E</sub> (m)                | 6,96         | 14,53         |
| Elevação máxima atingida                                                                        | Z <sub>máx</sub> (m)              | 811,96       | 819,53        |
| VARIAÇÃO PARA BAIXO                                                                             |                                   |              |               |
| Perda de carga no conduto de adução                                                             | h'ta (m)                          | 3,79         | 5,63          |
| Perda de carga relativa à mínima elevação                                                       | k'                                | 0,46         | 0,34          |
| Coeficiente de perda de carga relativa à mínima elevação para abertura total                    | z <sub>d</sub> (m)                | 0,50         | 0,58          |
| Altura mínima atingida na abertura total                                                        | Y <sub>D</sub> (m)                | 4,05         | 9,58          |
| Coeficiente de perda de carga relativa à mínima elevação para abertura parcial de 50% para 100% | z' <sub>d</sub> (m)               | 0,69         | 0,64          |
| Altura mínima atingida na abertura parcial (50%)                                                | Y' <sub>D</sub> (m)               | 5,66         | 10,46         |
| Elevação mínima atingida                                                                        | Z <sub>min</sub> (m)              | 781,84       | 777,04        |
| Deplecionamento do reservatório                                                                 | Y <sub>R</sub> (m)                | 17,50        | 17,50         |
| Altura da Chaminé                                                                               | H <sub>C</sub> (m)                | 32,12        | 44,50         |
| Cota de Coroamento da Chaminé                                                                   | Z (m)                             | 813,00       | 820,50        |

Fonte: Autor (2024).

As chaminés resultaram em alturas de 32,12 m e 44,50 m, para sazonalidade e vazão vertida. Na prática essas dimensões impactam apenas no volume de escavação em rocha.

#### 4.2.4 Túnel forçado

Assim como o túnel adutor, o túnel forçado seguiu o traçado pré-definido na concepção do arranjo. Para vencer o desnível foi projetado um trecho desta estrutura vertical, na forma de *shaft* e um segundo trecho horizontal sem declividade. Ao todo este trecho resultou em uma extensão de 84,30 m de *shaft* e 192,10 m horizontal até chegar à casa de força. A seção escolhida para o trecho vertical foi circular, enquanto o trecho horizontal foi arco-retângulo. Os diâmetros para as duas alternativas foram mantidos em 3,00 m e 4,00 m. A Tabela 11 apresenta os resultados do dimensionamento.

Tabela 11 – Dimensionamento do túnel forçado para as duas alternativas.

| <b>Alternativa</b> | <b>Sazonalidade</b>     | <b>Vazão Vertida</b>    |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| Seção típica       | Circular/Arco-Retângulo | Circular/Arco-Retângulo |
| Diâmetro (m)       | 3,00                    | 4,00                    |
| Área               | 7,07/8,03               | 12,57/14,28             |
| Velocidade (m/s)   | 1,19/1,05               | 1,79/1,58               |

Fonte: Autor (2024).

As considerações descritas no item 4.2.2 podem ser replicadas neste tópico quanto as dimensões escolhidas para cada alternativa.

#### 4.2.5 Casa de Força

A casa de força foi definida com base nas dimensões das máquinas e na submergência. Considerando os parâmetros de dimensionamento da turbina reversível, as condições topográficas e geológicas do terreno, a estrutura foi concebida totalmente subterrânea, uma vez que a turbina reversível exige um afogamento da ordem de 23,53 m. As dimensões finais da casa de força são 20 m x 30 m e 40 m x 30, para as alternativas de sazonalidade e vazão vertida, respectivamente. A Tabela 12 apresenta os volumes obtidos de escavação subterrânea e concreto para a construção da estrutura.

Tabela 12 – Volumes – Casa de Força.

| <b>Volume (m³)</b>    | <b>Sazonalidade</b> | <b>Vazão vertida</b> |
|-----------------------|---------------------|----------------------|
| Escavação Subterrânea | 50.136              | 125.340              |
| Concreto              | 22.293              | 37.155               |

Fonte: Autor (2024).

#### 4.2.6 Túnel e canal de fuga

A dimensão do túnel de fuga ficou condicionada basicamente pela dimensão do tubo de sucção, o qual apresentou grande largura devido aos resultados da metodologia de dimensionamento da turbina reversível. Desse modo, a seção transversal do túnel de fuga foi definida com diâmetro de 12 m em arco-retângulo com comprimento de 315,30 m e aclividade de 6,4%. Após este trecho o túnel torna-se um canal de fuga em função da reduzida camada de rocha sobre a geratriz superior. Este canal foi concebido com largura de 14 m, taludes verticais e aclividade de 12,5% até o leito do rio Jordão, no reservatório da UHE Fundão.

#### 4.3 PERDAS DE CARGA

As perdas de carga foram estimadas utilizando as diferentes equações apresentadas no item 3.3, sendo adaptados os valores de Ks e coeficiente de Manning em altura de rugosidade, em milímetros, para padronização dos dados de entrada de cada tipo de material. Esse parâmetro basicamente possui influência na obtenção dos coeficientes de perda de carga contínua de cada estrutura ou componente, enquanto os coeficientes de perda de carga localizados foram calculados em função do tipo de singularidade ou definidos a partir da própria literatura citada no item 3.3. A Tabela 13 apresenta os resultados para as duas alternativas, na qual verifica-se que para o arranjo dimensionado pelo método da sazonalidade gera uma perda de carga percentual de 3,62%, enquanto para a vazão vertida é de 5,66% em relação a queda bruta normal (diferença entre o nível máximo normal de montante e jusante).

Tabela 13 – Perdas de carga no circuito.

| Trecho       | Componente          | Tipo de material | Rugosidade (mm) | Perdas de carga (m) |               |
|--------------|---------------------|------------------|-----------------|---------------------|---------------|
|              |                     |                  |                 | Sazonalidade        | Vazão Vertida |
| Emboque      | Grade               | Aço              | 0,15            | 0,01                | 0,04          |
|              | Tomada D'água       | Concreto         | 1,5             | 0,00                | 0,00          |
|              | Ranhura (Tomada)    | Concreto         | 1,5             | 0,00                | 0,00          |
|              | Transição de Seções | Concreto         | 1,5             | 0,01                | 0,01          |
| Adutor       | Retilíneo           | Rocha Tratada    | 150             | 2,40                | 3,60          |
|              | Curva               | Rocha Tratada    | 150             | 0,46                | 0,71          |
|              | Retilíneo           | Rocha Tratada    | 150             | 0,08                | 0,12          |
| Forçado      | Chaminé             | Rocha Tratada    | 150             | 0,01                | 0,02          |
|              | Retilíneo           | Rocha Tratada    | 150             | 0,01                | 0,02          |
|              | Curva               | Rocha Tratada    | 150             | 0,07                | 0,15          |
|              | Shaft               | Rocha Tratada    | 150             | 0,18                | 0,29          |
|              | Curva               | Rocha Tratada    | 150             | 0,09                | 0,19          |
|              | Retilíneo           | Rocha Tratada    | 150             | 0,29                | 0,43          |
| Fuga         | Túnel e canal       | Rocha Tratada    | 150             | 0,01                | 0,06          |
| <b>Total</b> |                     |                  |                 | <b>3,60</b>         | <b>5,64</b>   |

Fonte: Autor (2024).

A partir dos valores calculados de perda para cada alternativa pode-se recalcular as alturas de queda e elevação bem como as potências instaladas no modo turbina e bomba, conforme pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros finais.

| Parâmetros                                     | Unidade | Sazonalidade | Vazão Vertida |
|------------------------------------------------|---------|--------------|---------------|
| Perda de carga inicial arbitrada ( $h_{fi}$ )  | %       | 3,62         | 5,66          |
| Altura de queda líquida nominal ( $H_t$ )      | m       | 87,39        | 85,54         |
| Altura de queda líquida máxima ( $H_{tM}$ )    | m       | 101,05       | 98,92         |
| Altura de queda líquida mínima ( $H_{tm}$ )    | m       | 73,73        | 72,17         |
| Altura de elevação líquida nominal ( $H_b$ )   | m       | 93,96        | 95,81         |
| Altura de elevação líquida máxima ( $H_{bM}$ ) | m       | 108,65       | 110,78        |
| Altura de elevação líquida mínima ( $H_{bm}$ ) | m       | 79,27        | 80,83         |
| Potência no modo turbina ( $P_t$ )             | MW      | 6,63         | 17,40         |
| Potência no modo bomba ( $P_b$ )               | MW      | 6,82         | 18,64         |

Fonte: Autor (2024).

#### 4.4 QUANTITATIVOS DE OBRAS CIVIS

A partir do dimensionamento das estruturas do arranjo, foram calculadas as quantidades dos principais volumes de obras civis os quais são as principais fontes

de informação utilizadas na estimativa de custos do empreendimento. A Tabela 15 apresenta estes valores.

Tabela 15 – Quantidades gerais de obras civis.

| Item     | Serviço                                  | Volumes (m³) |               |
|----------|------------------------------------------|--------------|---------------|
|          |                                          | Sazonalidade | Vazão Vertida |
| <b>1</b> | <b>Concreto Compactado Vibrado</b>       |              |               |
| 1.1      | Casa de Força + Area de Montagem         | 22.293       | 37.155        |
| 1.2      | Tomada                                   | 1.627        | 1.580         |
| 1.3      | Tratamento Túnel                         | 2.555        | 3.680         |
|          | Total de Concreto Compactado Vibrado     | 26.475       | 42.415        |
| <b>2</b> | <b>Concreto Projetado</b>                |              |               |
| 2.1      | Túnel Adutor                             | 2.256        | 3.034         |
| 2.2      | Túnel Forçado                            | 182          | 488           |
| 2.3      | Shaft e Chaminé                          | 117          | 158           |
|          | Total de Concreto Projetado              | 2.555        | 3.680         |
| <b>3</b> | <b>Escavação em Rocha à Céu Aberto</b>   |              |               |
| 3.1      | Canal de Fuga                            | 36.556       | 73.112        |
| 3.2      | Tomada de água                           | 1.023        | 1.023         |
| 3.3      | Shaft e Chaminé                          | 2.120        | 4.128         |
|          | Total de Escavação em Rocha à Céu Aberto | 39.699       | 78.263        |
| <b>4</b> | <b>Escavação em Rocha Subterrânea</b>    |              |               |
| 4.1      | Casa de Força + Area de Montagem         | 50.136       | 125.340       |
| 4.2      | Túnel de Adução                          | 17.245       | 24.100        |
| 4.3      | Túnel Forçado                            | 1.387        | 9.243         |
| 4.4      | Túnel de Fuga                            | 40.442       | 80.884        |
|          | Total de Escavação em Rocha Subterrânea  | 109.210      | 239.567       |
| <b>5</b> | <b>Escavação Comum</b>                   |              |               |
| 5.1      | Tomada de água                           | 847          | 847           |
| 5.2      | Canal de Fuga                            | 29.144       | 58.287        |
|          | Total de Escavação Comum                 | 29.990       | 59.134        |

Fonte: Autor (2024).

#### 4.5 DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

A primeira etapa para o dimensionamento consiste na obtenção dos dados de radiação solar para o local de instalação. Dentro do banco de dados do Retscreen 4.0 a estação mais próxima aos municípios de Candói (PR) e Pinhão (PR) com dados climáticos está localizada no município de Guarapuava (PR). As informações da localização da estação podem ser visualizadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Localização da estação.

| Dados                          | Localização dos dados climáticos |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Nome                           | Guarapuava                       |
| Código                         | 02551010                         |
| Latitude (N)                   | -25,4                            |
| Longitude (E)                  | -51,5                            |
| Elevação (m)                   | 1.058                            |
| Amplitude da temperatura do ar | 12,5                             |

Fonte: Adaptado de Retscreen, versão 4.0 (2005).

A partir da estação escolhida foram importados os dados climáticos para o desenvolvimento do projeto. As principais informações podem ser visualizadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Dados climáticos da estação Guarapuava.

| Mês          | Temperatura do Ar (°C) | Umidade relativa (%) | Radiação solar diária – horizontal (kWh/m²/d) | Pressão Atmosférica (kPa) | Velocidade do Vento (m/s) | Temperatura do ar (°C) |
|--------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| Janeiro      | 22,5                   | 73,1                 | 5,77                                          | 92,2                      | 2,6                       | 22,9                   |
| Fevereiro    | 22,2                   | 73,9                 | 5,29                                          | 92,3                      | 2,5                       | 22,4                   |
| Março        | 21,3                   | 74,0                 | 4,92                                          | 92,3                      | 2,5                       | 21,4                   |
| Abril        | 19,4                   | 73,8                 | 4,14                                          | 92,5                      | 2,6                       | 19,2                   |
| Mai          | 16,1                   | 71,3                 | 3,45                                          | 92,6                      | 2,6                       | 15,6                   |
| Junho        | 15,0                   | 67,2                 | 3,11                                          | 92,7                      | 2,6                       | 14,2                   |
| Julho        | 14,7                   | 64,6                 | 3,46                                          | 92,8                      | 2,8                       | 14,0                   |
| Agosto       | 16,7                   | 58,7                 | 4,26                                          | 92,7                      | 2,8                       | 16,4                   |
| Setembro     | 18,2                   | 61,8                 | 4,57                                          | 92,6                      | 3,0                       | 18,5                   |
| Outubro      | 20,2                   | 63,6                 | 5,19                                          | 92,4                      | 2,9                       | 20,8                   |
| Novembro     | 21,2                   | 64,8                 | 6,02                                          | 92,2                      | 3,0                       | 21,9                   |
| Dezembro     | 22,4                   | 66,6                 | 6,00                                          | 92,1                      | 2,8                       | 23,1                   |
| <b>Anual</b> | <b>19,1</b>            | <b>67,7</b>          | <b>4,68</b>                                   | <b>92,4</b>               | <b>2,7</b>                | <b>19,2</b>            |

Fonte: Adaptado de Retscreen, versão 4.0 (2005).

A definição da quantidade de painéis fotovoltaicos para suprir a energia demandada pela turbina reversível no modo bomba, requer a estimativa da demanda da energia mecânica diária necessária para a operação, transformada em demanda de energia elétrica diária considerando a eficiência do equipamento no modo bombamotor. O software Retscreen possui um módulo que considera as características de arranjo como vazão bombeada, altura de elevação, altura de sucção e perda de carga,

além de características locais como pressão manométrica. Essas características dos arranjos e a demanda de energia calculada pode ser observada pela Quadro 6.

Quadro 6 - Parâmetros de entrada e demanda de energia.

| Alternativa                                    | Sazonalidade | Vazão Vertida |
|------------------------------------------------|--------------|---------------|
| Vazão bombeada (m <sup>3</sup> /s)             | 8,41         | 22,54         |
| Período de bombeamento (h/dia)                 | 6            | 6             |
| Uso diário de água (m <sup>3</sup> /dia)       | 181.582      | 486.818       |
| Altura de sucção (m)                           | -23,64       | -23,64        |
| Altura de elevação (m)                         | 99,50        | 99,50         |
| Pressão manométrica (m)                        | 9,50         | 9,50          |
| Perdas por atrito (%)                          | 3,62%        | 5,66%         |
| Altura total (m)                               | 88,45        | 90,19         |
| Demanda de energia hidráulica - diária (kWdia) | 43.768       | 119.650       |
| Demanda de energia hidráulica - anual (kWano)  | 15.975.174   | 43.672.267    |
| Carga de pico (kW)                             | 7.295        | 19.942        |
| <b>Características do conjunto bomba-motor</b> |              |               |
| Tipo de corrente                               | CA           | CA            |
| Eficiência (%)                                 | 88%          | 88%           |
| <b>Resumo</b>                                  |              |               |
| Demanda de eletricidade - ano (MWano)          | 18.154       | 49.628        |

Fonte: Autor (2024).

A etapa de modelo energético utilizou como dados de entrada a radiação solar média mensal horizontal e a demanda de eletricidade calculada para os dois sistemas. Para a transformação da energia solar em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) usada para alimentar a bomba, foi necessário prever inversores. O software considera a eficiência dos inversores no sistema para o dimensionamento dos painéis. Conforme Blum e Riensche (2009), inversores de baixa potência podem ter eficiências de 85 a 90%, enquanto os melhores, com maior potência de saída e alta tensão de entrada, podem atingir 96%. Nas alternativas estudadas definiu-se como eficiência mínima aceitável 94% (Portal Solar, 2018). O sistema não foi concebido com baterias que são normalmente incluídas em sistemas *off-grid*, uma vez que o reservatório superior desempenhará tal função.

A última etapa para a concepção do arranjo é a escolha do módulo fotovoltaico no banco de dados do software Restscreen 4.0. Com o objetivo de minimizar a área de ocupação dos painéis fotovoltaicos sobre a superfície do reservatório, foi escolhido o módulo fotovoltaico mais eficiente disponível no banco de dados para a produção energética. Dentre as opções de módulos, optou-se pela utilização do modelo

Canadian Solar mono-Si – CS6X-300M – Max Power com sistema de posicionamento em um eixo inclinados em 30°. Ressalta-se que atualmente há módulos mais eficientes que o selecionado para a pesquisa, com índices superiores a 15%, portanto, a escolha deste módulo pode ser considerada uma limitação advinda da versão utilizada do programa.

Para instalações no hemisfério sul normalmente define-se a orientação dos módulos no sentido norte com o objetivo de aproveitar a máxima incidência solar, ou seja, azimuth 0°. Contudo, por definição do programa, o dado de entrada é o contrário do conceito do azimuth. Em uma análise de sensibilidade com a ferramenta, verificou-se que a orientação em 0° diminuiu drasticamente a produção de energia solar dos arranjos, portanto, a orientação dos painéis foi definida com o valor de entrada de 180° obtendo-se as máximas produções. A Tabela 18 apresenta o resultado do dimensionamento do sistema a partir do modelo escolhido.

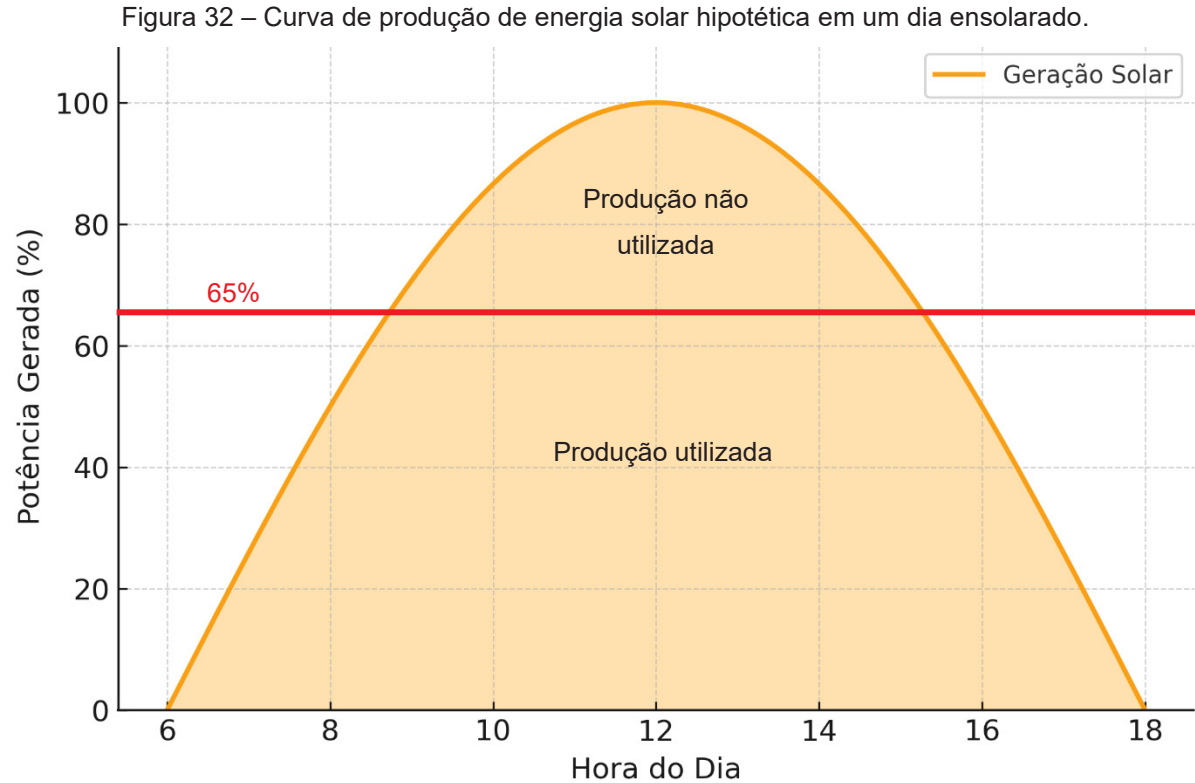
Tabela 18 – Resultado do dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.

| <b>Módulo Fotovoltaico</b>                           | <b>Sazonalidade</b>  | <b>Vazão Vertida</b> |
|------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Tipo                                                 | mono-Si              | mono-Si              |
| Fabricante                                           | Canadian Solar       | Canadian Solar       |
| Modelo                                               | CS6X-300M - MaxPower | CS6X-300M - MaxPower |
| Potência elétrica do módulo (kW)                     | 0,3                  | 0,3                  |
| Número de módulos                                    | 37.000               | 96.000               |
| Área do módulo (m²)                                  | 1,92                 | 1,92                 |
| Eficiência (%)                                       | 15,6%                | 15,6%                |
| Potência do arranjo (kWp)                            | 11.100               | 28.800               |
| Temperatura de operação normal da célula (°C)        | 45                   | 45                   |
| Coeficiente de Temperatura (% / °C)                  | 0,40%                | 0,40%                |
| Área do coletor solar (m²)                           | 71.017               | 184.261              |
| Sistema de posicionamento solar                      | Um eixo              | Um eixo              |
| Inclinação (°)                                       | 30                   | 30                   |
| Azimuth (°)                                          | 180                  | 180                  |
| Percentual de recobrimento do Reservatório de Fundão | 3,26%                | 8,50%                |

Fonte: Autor (2024).

Nota-se que para fornecer a energia necessária para o funcionamento da bomba durante 6 horas por dia, foi necessária instalação de 11,1 MWp e 28,8 MWp para as alternativas de sazonalidade e vazão vertida, respectivamente. Estes valores são superiores em aproximadamente 65% às potências instaladas das UHR. Esta superioridade em termos de potência instalada pode ser melhor entendida a partir da

Figura 32 que mostra uma curva hipotética de produção de energia solar em um dia ensolarado.



Fonte: Autor (2024).

Quanto ao cobrimento da superfície do reservatório as duas instalações apresentaram percentuais menores àqueles citados na literatura (item 2.3). Entretanto, ressalta-se da importância de estudos ambientais aprofundados para a validação desta proposta de instalação.

4.6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A estimativa de custos para a execução dos arranjos de UHR propostos se deu por meio da inserção das quantidades de obras civis, que basicamente consistem nos volumes apresentados no item 4.4. Para as estruturas de concreto como tomada de água e casa de força, o volume foi discretizado em toneladas de cimento e armadura considerando os consumos hipotéticos de 350 kg/m<sup>3</sup> e 50 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Quanto à utilização do banco de preços dentro do SISORH, foram importados os dados atualizados em setembro de 2024.

Adicionalmente às quantidades de obras civis, foram estimados os custos dos equipamentos hidromecânicos e eletromecânicos para complemento da OPE. O custo dos equipamentos foi baseado no Manual do Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas, publicado pelo Ministério de Minas e Energia em 2007, cujo ANEXO C apresenta as planilhas de dimensionamento e quantificação. Neste anexo há o procedimento de cálculo de uma casa de força com turbinas Francis eixo horizontal – para a pesquisa foi considerado apenas os itens relativos à estimativa de custos dos equipamentos que leva em conta algumas características técnicas como dimensões de comportas e ponte rolante, características técnicas das máquinas mecânicas e elétricas, além do custo percentual com equipamentos diversos. Devido a referência ter sido publicada em 2007, após a obtenção dos custos de cada equipamento, estes foram corrigidos pelo Índice Geral de Preços (IGP-DI) acumulado para o período entre janeiro de 2008 a novembro de 2024 representando um percentual de 216,13%. A Tabela 19 apresenta os custos dos equipamentos obtidos para cada alternativa.

Tabela 19 – Custos de equipamentos.

| <b>Equipamentos</b>        | <b>Sazonalidade</b>      | <b>Vazão Vertida</b>     |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Turbo-Bomba                | R\$ 7.874.482,04         | R\$ 15.748.964,08        |
| Gerador-Motor              | R\$ 5.657.815,87         | R\$ 11.315.631,73        |
| Comporta Vagão TA          | R\$ 1.030.218,30         | R\$ 1.030.218,30         |
| Comporta Ensecadeira       | R\$ 359.869,18           | R\$ 359.869,18           |
| Comporta do Tubo de Sucção | R\$ 811.937,87           | R\$ 1.623.875,75         |
| Grade e Limpa Grade        | R\$ 407.988,16           | R\$ 407.988,16           |
| Pórtico Rolante            | R\$ 1.400.620,84         | R\$ 1.400.620,84         |
| <b>TOTAL</b>               | <b>R\$ 17.542.932,26</b> | <b>R\$ 31.887.168,04</b> |

Fonte: Autor (2024).

Com as informações apresentadas na Tabela 19 incluídas no programa SISOHR obteve-se o custo final para as duas alternativas de UHR no formato OPE (ver Apêndice 3), os quais resultaram em R\$ 138.732.494,24 e R\$ 217.342.943,19, para as alternativas de sazonalidade e vazão vertida, nesta ordem. Esses valores correspondem em índices de R\$ 20.077.061,40 e R\$ 11.735.580,09/MW, respectivamente. Conforme, a notícia divulgada pela Associação Brasileira de PCHs e CGHs (ABRAPCH) em 2017, para que haja viabilidade econômica recomenda-se que o valor do investimento em uma PCH ou CGH seja de até R\$ 10 milhões por MW instalado considerando os valores daquele ano. Ao corrigir este valor limítrofe para os

dias atuais, percebe-se que a alternativa de vazão vertida está dentro do orçamento esperado para o empreendimento, entretanto, o orçamento resultante para a alternativa de sazonalidade apresentou valores fora da faixa de preços comumente praticados no mercado.

Em relação a estimativa de custos das instalações fotovoltaicas, segundo o World Bank (2019), o custo desses sistemas ao redor do mundo varia entre U\$ 0,8 a U\$ 1,2 por Watt-pico instalado. A notícia mais recente apresentada pela revista PV Magazine, em maio de 2024, relata que no Brasil as instalações flutuantes apresentam um índice médio de R\$ 4,5 milhões por MWp destacando que a maior parte destes componentes são importados e, portanto, precificados em dólar. Utilizando este índice nacional e corrigindo pela variação do dólar no período de maio de 2024 a dezembro de 2024, tendo como base as cotações disponibilizadas pelo Banco Central do Brasil (BCB), obteve-se o custo total das instalações em U\$ 0,90/Wp, ou seja, dentro da faixa citada pelo World Bank (Ver Quadro 7).

Quadro 7 – Custos das instalações fotovoltaicas flutuantes.

| <b>Alternativa</b>           | <b>Sazonalidade</b> | <b>Vazão Vertida</b> |
|------------------------------|---------------------|----------------------|
| Custo (R\$/MWp) - Mai/24     | R\$ 4.500.000,00    | R\$ 4.500.000,00     |
| Conversão (BRL/USD) - Mai/24 | R\$ 5,00            | R\$ 5,00             |
| Custo (U\$/MWp)              | U\$ 900.000,00      | U\$ 900.000,00       |
| Potência Instalada (MWp)     | 11,2                | 28,8                 |
| Custo (U\$)                  | U\$ 10.080.000,00   | U\$ 25.920.000,00    |
| Dólar (BRL/USD) - Dez/24     | R\$ 6,00            | R\$ 6,00             |
| Custo total (R\$)            | R\$ 60.480.000,00   | R\$ 155.520.000,00   |
| Índice (U\$/Wp)              | U\$ 0,90            | U\$ 0,90             |

Fonte: Autor (2024).

Por fim, a avaliação econômica se deu por meio da análise do Fluxo de Caixa Descontado, através do cálculo do ICB, VPL e TIR de cada alternativa. Como este tipo de tecnologia híbrida entre o sistema de armazenamento reversível e a fonte geradora fotovoltaica flutuante ainda é pioneira no país, a avaliação do benefício econômico torna-se complexa. Inicialmente foi feita uma análise enquadrando-se os ativos como agentes puramente de geração no mercado regulado e neste caso foi adotado o preço de venda de energia do último leilão de geração ANEEL nº 004/2022 que ficou em torno de R\$ 280,00/MWh. Considerando a taxa de desconto anual de 12% e a vida útil econômica de 50 anos, o fator de recuperação do capital ficou em

12,04%. Quanto a variável de custos de operação e manutenção, assim como na estimativa de custos dos equipamentos, foi utilizada a metodologia de cálculo proposta no Manual do Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas (2007) corrigindo o valor final pelo IGP-DI acumulado no período. Considerando a energia gerada anualmente, os resultados obtidos para a avaliação econômica podem ser visualizados no Quadro 8.

Quadro 8 – Resultados da avaliação econômica.

| <b>Metodologia</b>                                 | <b>Sazonalidade</b>        | <b>Vazão Vertida</b>       |
|----------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Potência instalada Bombeamento (MW)                | 6,82                       | 18,64                      |
| OPE - UHR (R\$)                                    | R\$ 138.732.494,24         | R\$ 217.342.943,19         |
| Índice (R\$/MW)                                    | R\$ 20.342.007,95          | R\$ 11.660.029,14          |
| UFV (R\$)                                          | R\$ 60.480.000,00          | R\$ 155.520.000,00         |
| Custo geral do empreendimento (C) (R\$)            | R\$ 199.212.494,24         | R\$ 372.862.943,19         |
| Índice Geral (R\$/MW)                              | R\$ 29.210.043,14          | R\$ 20.003.376,78          |
| Taxa anual de desconto – (j) ou (k) (%)            | 12%                        | 12%                        |
| Vida econômica útil (anos)                         | 50                         | 50                         |
| Fator de Recuperação de Capital - FRC (%)          | 12,04%                     | 12,04%                     |
| Custos de Operação e Manutenção - COM (R\$/kW/ano) | R\$ 92,49                  | R\$ 63,66                  |
| Custo total anual (CT) (R\$/ano)                   | R\$ 24.619.302,84          | R\$ 46.085.469,84          |
| Preço de Venda da Energia (R\$/MWh)                | R\$ 280,00                 | R\$ 280,00                 |
| Energia gerada anual (MWano)                       | 15.975                     | 43.672                     |
| Benefício Energético (R\$)                         | R\$ 4.473.048,77           | R\$ 12.228.234,65          |
| <b>ICB</b>                                         | <b>5,50</b>                | <b>3,77</b>                |
| <b>VPL</b>                                         | <b>-R\$ 162.066.067,51</b> | <b>-R\$ 271.313.587,00</b> |
| <b>TIR</b>                                         | <b>0,46%</b>               | <b>2,14%</b>               |

Fonte: Autor (2024).

Observa-se que, considerando os atuais valores de venda de energia para ativos de geração, os índices de fluxo de caixa descontado resultaram em valores não favoráveis a implantação dos projetos. O índice custo-benefício foi superior a 5 para o método da sazonalidade e maior que 3 para o método da vazão vertida, ou seja, ambos maior que 1,0, o que indica que os preços praticados no ambiente regulado não tornam os benefícios energéticos superiores aos custos de implantação do empreendimento. Quanto ao VPL, os dois projetos resultaram em valores negativos e a TIR menor que a taxa de desconto associada ao custo de oportunidade, indicando a não aceitabilidade do projeto. Ressalta-se que essas simulações consideram o custo de implantação da usina fotovoltaica flutuante. Caso estas não fossem construídas

ainda seria necessário considerar o custo da compra da energia do sistema elétrico nesta avaliação.

Como análise complementar foi realizada a verificação inversa, ou seja, buscou-se identificar qual seria o preço mínimo de venda de energia para que os projetos se tornassem viáveis, portanto, entre os índices analisados foi adotado o índice custo-benefício mínimo (ICB = 1,0). Verificou-se que os preços de venda de energia para a operação em apenas 6 horas durante 365 dias deveriam ser de R\$ 1.055,26 e R\$ 1.541,10, respectivamente, para as alternativas de vazão vertida e sazonalidade, o que consequentemente resulta em VPL e TIR favoráveis a implantação dos sistemas analisados, conforme pode ser visto na Tabela 20. Verifica-se que os preços obtidos só poderiam ser alcançados no ambiente de contratação livre de energia, considerando o mercado de curto prazo (*spot*) através do PLD. O despacho nº 3.625, de dezembro de 2024 publicado pela ANEEL, definiu os valores limites do PLD para o ano de 2025, sendo o mínimo de R\$ 58,60 e o máximo horário de R\$ 1.542,23. Ainda que, fosse possível atingir valores superiores de remuneração no ambiente de contratação livre, estes preços seriam variáveis podendo ficar em grande parte do tempo abaixo do valor mínimo de atratividade do empreendimento. Nesta conjuntura, estes resultados mostram que a viabilidade desses empreendimentos, em qualquer uma das alternativas avaliadas, requer um modelo específico de remuneração para que possa ocorrer benefício econômico e oferecer suporte ao crescimento das FRV.

Tabela 20 – Resultados da avaliação econômica considerando ICB mínimo.

| Parâmetros de avaliação                    | Sazonalidade       | Vazão Vertida    |
|--------------------------------------------|--------------------|------------------|
| Custo de Energia Elétrica Mínimo (R\$/MWh) | R\$ 1.541,10       | R\$ 1.055,26     |
| VPL                                        | R\$ 200.080.200,61 | R\$ 9.853.805,72 |
| TIR                                        | 12,34%             | 12,34%           |

Fonte: Autor (2024).

4.7 DISCUSSÕES

A pesquisa investigou a viabilidade de implantação de uma UHR, através de um estudo de caso em um aproveitamento hidrelétrico existente, com associação a um sistema fotovoltaico flutuante a partir de duas metodologias. Essas metodologias consistiram em delimitar a vazão disponível para a operação das UHR sendo elas baseadas na sazonalidade das vazões afluentes e no histórico de vazões vertidas do

aproveitamento existente. O estudo de caso foi aplicado à cascata do rio Jordão, no estado do Paraná, especificamente para as UHE Santa Clara e Fundão. Verificou-se que a metodologia baseada no histórico de vazões vertidas da UHE Santa Clara, resultou em uma disponibilidade de vazão superior em mais de duas vezes à metodologia de sazonalidade. Isso ocorre pelo fato de o empreendimento estar localizado em uma região com baixa variação das vazões ao longo do ano, mas com grandes picos de cheias que geram grandes volumes de vertimento.

A partir da delimitação das vazões, o trabalho prosseguiu com a estimativa da potência instalada e o dimensionamento da máquina reversível. O método utilizado para o dimensionamento da turbina reversível se baseia em dados empíricos de projetos de UHR já existentes ao redor do mundo, desenvolvidos particularmente para máquinas do tipo Francis. A partir desses dados, Siervo e Lugaresi (1980) basicamente propõem regressões matemáticas que dependem da rotação específica e das alturas de queda e elevação. Entretanto, observa-se que este método em nenhum momento considera a magnitude da vazão disponível para operação e, portanto, para as duas alternativas as dimensões do equipamento seriam as mesmas.

Quanto a estimativa de custo das máquinas a nível de viabilidade, ressalta-se que estes foram obtidos a partir de uma metodologia baseada em empreendimentos essencialmente de geração hidrelétrica e, portanto, foi assumido que estes custos são equivalentes ao de um conjunto turbo-bomba e moto-gerador. A nível de projeto básico essas estimativas poderiam ser refinadas considerando a robustez desses conjuntos para a consolidação das análises.

Quanto a concepção do arranjo civil, as estruturas foram definidas respeitando critérios construtivos. Devido as condições topográficas e geológicas do local de implantação, o circuito teve que ser concebido totalmente subterrâneo, incluindo túneis, *shaft*, chaminé de equilíbrio e casa de força e, portanto, foi necessário considerar o diâmetro mínimo construtivo para a alternativa de sazonalidade. Para o caso dos túneis, se fossem seguidas as faixas de velocidade propostas pela Eletrobras (2003), o diâmetro resultaria em valores menores que o mínimo de construção. Neste sentido, a alternativa ficou superdimensionada e a perda de carga reduzida.

Em relação ao dimensionamento do sistema fotovoltaico, foi necessário estimar a energia demandada pelo sistema em cada alternativa, para isso adotou-se como premissa a operação de 6 horas diárias nos modos bomba e turbina e 12 horas

de ociosidade. Dessa maneira não foram consideradas demandas diferentes para finais de semana e tampouco foram estudadas outras alternativas de arranjos de máquinas que pudessem flexibilizar a operação. No que se refere a escolha do módulo fotovoltaico, a versão utilizada do Restscreen (4.0) possui uma limitação na disponibilidade de módulos no banco de dados do programa e neste sentido seria possível otimizar os arranjos com painéis mais eficientes disponíveis no mercado para fases posteriores do projeto.

A avaliação econômica das alternativas estudadas mostrou que a viabilidade desse tipo de empreendimento não se torna atrativa sob os preços exclusivamente praticados de ativos geradores. A pesquisa apresenta duas análises para as alternativas estudadas: a primeira delas com o preço de venda de energia praticado no mercado regulado em torno de R\$ 280,00/MWh e a segunda considerando valores mínimos para a aceitabilidade dos projetos, resultando nos preços de R\$ 1.055,26/MWh e R\$ 1.541,10/MWh. Maynard (2019), ao realizar de atratividade mínima do projeto, obteve como preços de venda de energia valores entre R\$ 338,60/MWh e R\$ 428,90/MWh, mais próximo dos preços praticados convencionalmente no mercado regulado, entretanto, observa-se que o dimensionamento da UHR não considera os fatores físicos locais como topografia e geologia e os custos estimados para a UHR são defasados, uma vez que o método adotado tanto para o dimensionamento quanto para a estimativa de custos foram realizados pelo Manual do Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas, datado do ano de 2007 e, portanto, estes valores não foram corrigidos. A ferramenta SISORH utilizada neste trabalho apresenta valores de construção atualizados pela FGV trimestralmente, o que torna os custos mais assertivos considerando a variação nacional dos preços.

Em relação aos sistemas flutuantes, ainda que fossem os mesmos fossem desconsiderados, a compra da energia diretamente da rede ao longo dos anos de operação também impactaria no benefício econômico. Os resultados mostraram que o preço de venda de energia necessário para a viabilidade do empreendimento – apresentado pela alternativa de vazão vertida – só poderia ser alcançado em curtos períodos de alta demanda de energia, exclusivamente no ambiente de mercado livre, através do PLD horário. Dessa maneira, esta pesquisa sugere que os *stakeholders* juntamente com os agentes reguladores possam, em consenso, criar mecanismos de remuneração adequados à viabilização dos sistemas de armazenamento reversíveis,

seja através de subsídios ou através da realização de Leilões de Reserva de Capacidade de modo que haja uma forma de mecanismo compensatório para que esta tecnologia possa de fato apoiar a transição energética e dar suporte à implantação das FRV em prol da segurança energética e do benefício social.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Com o objetivo geral de responder à pergunta do problema científico, a pesquisa buscou investigar a viabilidade técnica e econômica de implantar um sistema reversível, em um aproveitamento hidrelétrico existente, com associação a um sistema fotovoltaico flutuante. Desse modo foram elencados três objetivos específicos sendo o primeiro a seleção de métodos para o cálculo da vazão disponível para o dimensionamento das UHR que resultou na escolha de dois métodos: sazonalidade das vazões afluentes e a vazão vertida. Conforme foi apresentado nas discussões deste trabalho o segundo método resultou em maior volume de água disponível para a operação; o segundo objetivo específico foi o dimensionamento dos arranjos da UHR associada ao sistema fotovoltaico flutuante e pôr fim a avaliação do benefício econômico.

Após completar cada uma destas etapas, oportunamente é refeita a pergunta do problema científico: Como contribuir para a integração harmoniosa entre os sistemas de armazenamento de energia e as fontes renováveis variáveis de forma segura, eficiente e econômica?

Os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem uma resposta para este questionamento: através de mecanismos de remuneração adequados para a viabilidade destes sistemas no contexto nacional. Para que as usinas reversíveis sejam viabilizadas, é necessário que este tipo de ativo seja considerado como uma reserva energética de fato para os ativos de geração variável e com isso propor a sua implantação como uma forma de mecanismo compensatório para acompanhar o crescimento de grande escala da capacidade instalada das FRV. Uma maneira para se atingir esse objetivo é promover subsídios comerciais em leilões de energia, estratégia já adotada anteriormente dentro do setor elétrico brasileiro ou até mesmo promovendo a realização de leilões de vendas energia específicos (Leilões de Fontes Alternativas ou Leilões de Reserva de Capacidade).

Como foi apresentado na revisão da literatura desta pesquisa, o Brasil possui uma matriz elétrica majoritariamente por fontes hídricas com grandes reservatórios o que deixa o país numa situação mais confortável em relação aos demais países do mundo. Embora este cenário ainda seja sustentável para cobrir a demanda de pico de energia, a tendência é de aumento da diversificação da matriz elétrica por fontes

variáveis e, portanto, é necessário que os agentes reguladores possam achar formas de viabilizar a implantação das baterias hidráulicas de grande escala.

Conforme também foi apresentado na revisão de literatura, outra forma de remuneração que poderia ser avaliada seria através da contratação de serviços ancilares de modo que as UHR pudessem auxiliar no bom funcionamento do sistema elétrico brasileiro. Todavia, o atual modelo de remuneração também precisaria ser reavaliado para que a inclusão das reversíveis possam atrair investimentos e contribuir com o crescimento sustentável da matriz elétrica brasileira.

Como recomendações para futuros trabalhos sugere-se a avaliação de uma alternativa considerando a compra direta da energia para a operação no modo bomba. Deste modo é possível considerar maior flexibilidade na operação com a instalação de tipos de máquinas diferentes (ternário e quaternário) e rotação variável (com operação da bomba em faixas diferentes de vazões), além do maior ciclo de operação sem se restringir a apenas 12 horas por dia.

Para um estudo mais detalhado das alternativas propostas, recomenda-se também o dimensionamento da turbina-reversível considerando as diferentes vazões estudadas neste trabalho e características locais do empreendimento através de um método não empírico, o qual foi utilizado nesta pesquisa. Essa alteração impactaria nos volumes de obras civis para as duas alternativas obtendo-se resultados mais consistentes aos arranjos estudados.

Sob a ótica ambiental existe um impacto gerado por este tipo de aplicação especialmente sobre a cobertura do corpo hídrico pelo sistema flutuante. Em virtude das poucas aplicações desta tecnologia no contexto nacional e, considerando a proporções de área encoberta para os dois casos (8,50% e 3,26%), sugere-se como pesquisa futura uma análise detalhada dos impactos ambientais que estas instalações possam causar no reservatório da UHE Fundão. Este estudo poderia contribuir com a análise de viabilidade apresentada neste trabalho e com a difusão da tecnologia de maneira econômica e eficiente.

Ainda sobre o dimensionamento dos painéis, recomenda-se que o estudo possa ser realizado considerando módulos fotovoltaicos mais eficientes, compatíveis com as tecnologias atuais que estão disponíveis no mercado. Isso ajudaria a reduzir custos de infraestrutura na instalação aquática e a área de sombreamento.

## REFERÊNCIAS

ABRAPCH. Associação Brasileira de PCHs e CGHs. Custo médio de PCHs e CGHs ficou em R\$ 225/MWh desde 2010, aponta estudo. 2017. Disponível em: <<https://abrapch.org.br/2017/08/custo-medio-de-pchs-e-cghs-ficou-em-r-225mwh-desde-2010-aponta-estudo/>>. Acesso em: 27 de janeiro de 2025.

ANDREWS, R. The Valhalla Solar/Pumped Hydro Project. Energy Matters. 2017. Disponível em: <<https://euanmearns.com/the-valhalla-solar-pumped-hydro-project/>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

ALBUQUERQUE, V. O. **Hibridização de Fontes de Energia Renováveis – Estudo de caso de Usina Hidrelétrica Reversível com Usina Fotovoltaica Flutuante**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2022.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. A ANEEL. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/a-aneel>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e Minigeração Distribuída. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 20 de abril de 2024.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 954, de 30 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021954.html>>. Acesso em: 25 de abril de 2024.

ANTAL, B.A. **Pumped Storage Hydropower: A Technical Review**. University of Colorado – Boulder. 2014.

BETTEGA, R. **Influência das Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Desempenho do Sistema Interligado Brasileiro**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2020.

BLUM, L., RIENSCH, E.. **Fuel Cells – Solid Oxide Fuel Cells Systems**. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. P. 99-119. 2009.

CASAROTTO FILHO, N., KOPITTKE, B. H. **Análise de Investimentos**. 10ª Ed. 2007.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Governança. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/web/guest/governanca>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Sobre nós. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/web/guest/sobrenos>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

CLUI. The Center for Land Use Interpretation. Disponível em: <<https://clui.org/projects/offstream/pumped-storage-facilities-usa/seneca>>. Acesso em 18 de fevereiro de 2024.

CNPE. Conselho Nacional de Política Energética. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

COSTA, S. G. **Impactes Ambientais de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes**. Universidade de Lisboa. Lisboa. 2017.

DETZEL, D. H. M. **O Novo Dilema do Operador**. Disponível em: <<https://www.oseletrico.com.br/o-novo-dilema-do-operador/>>. Acesso em: 10 de maio de 2024.

EIXOS. Hidrelétrica no Paraná instala usina fotovoltaica flutuante para consumo próprio. 2022. Disponível em: <<https://eixos.com.br/energia/hidreletrica-no-parana-instala-usina-fotovoltaica-flutuante-para-consumo-proprio/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2024.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. 2003.

ELETROBRÁS. **Sistema de Orçamento de Usinas Hidrelétricas – SISORH – Manual**. 2007.

ENERGY MAGAZINE. World's First Integrated Solar Pumped Hydro Project. 2018. Disponível em: <<https://www.energymagazine.com.au/worlds-first-integrated-solar-pumped-hydro-project/>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Quem Somos. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/a-epe/quem-somos>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

EPE. **BEN 2023 – Balanço Energético Nacional – ano base 2022 – Relatório Final**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Expansão da Geração – Solar Fotovoltaica Flutuante: Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao Planejamento**. Nº. EPE-DEE-NT-016/2020-r0. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **PNE 2050 – Plano Nacional de Energia**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Brasília. 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR): Desafios para inserção em mercados de energia elétrica**. Nota Técnica EPE/DEE/SEG/013/2021. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. 2021.

FARFAN, J., BREYER, C. **Combining Floating Solar Photovoltaic Power Plants and Hydropower Reservoirs: A Virtual Battery of Great Global Potential**. Elsevier. Energy Procedia 155 p. 403-411. 2018.

FIGUEIRA, T. **Energia Solar em Portugal - Mapeamento do potencial fotovoltaico com recurso a Sistemas de Informação Geográfica**. Universidade Nova de Lisboa. 2019.

FITZGERALD, J.P. **Operation of Seneca pumped storage plant**. IEEE Trans Power Apparatus Syst. p.1510-1516. 1973.

GESEL. Grupo de Estudos do Setor Elétrico Brasileiro. Mapeamento de UHR Mensais, Sazonais e Plurianuais no Brasil. 2019. Disponível em: <[https://www.projetouhr.com.br/mgr\\_sazonais.php](https://www.projetouhr.com.br/mgr_sazonais.php)>. Acesso em: 25 de abril de 2024.

GESEL, MCPAR Engenharia, Hedaidi Engenharia Consultoria, GPTECH, CPFL Geração. **A Viabilidade das Usinas Reversíveis no Sistema Interligado Nacional**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Programa de Pesquisa e Desenvolvimento. 2021.

GORDON, J. L. **Vortices at Intakes**. Water Power. p. 137-138. 1970.

GULF NEWS. Dubai Hydroelectric Power Station to Cost Dh1.4b; Dewa Awards Contract for Hatta Project. Disponível em: <<https://gulfnews.com/uae/government/dubai-hydroelectric-power-station-to-cost-dh14b-dewa-awards-contract-for-hatta-project-1.1566032158700>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

HATCH. **Marmora Clean Energy Hub Project: Initial Project Description**. Ontario Power Generation Inc. & Northland Power Inc. Revisão 4. 2023.

HYDRO REVIEW. 2019. Disponível em: <<https://www.hydroreview.com/world-regions/europe/floating-solar-photovoltaic-plant-to-be-installed-at-kruonis-pumped-storage-plant-in-lithuania/#gref>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

HUNT, J. D. et al. **Comparison Between Seasonal Pumped-Storage and Conventional Reservoir Dams from the Water, Wnergy and Land Nexus Perspective**. Energy Conversion and Management 166 p. 385-401. 2018.

HUNT, J. D. et al. **Existing and New Arrangements of Pumped-Hydro Storage Plants**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 129. 2020.

HUNT, J. D. et al. **Global Resource Potential of Seasonal Pumped Hydropower Storage for Energy and Water Storage**. Nature Communications 11:947. 2020.

IHA. **The world's water battery: Pumped hydropower storage and the clean energy transition**. 2018.

IHA. **Hydropower Status Report – Sector trends and insights**. 2022.

IRENA. International Renewable Energy Agency. Innovative Operation of Pumped Hydropower Storage – Innovation Landscape Brief. 2020.

LAMPIS, A. et al. **Energy transition or energy diversification? Critical thoughts from Argentina and Brazil.** Energy Policy 171 113246. 2022.

MAYNARD, R. H. K. **Aplicação de uma Usina Hidrelétrica Reversível associada à tecnologia Fotovoltaica Flutuante: Estudo de Caso na Hidrelétrica de Sobradinho.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2019.

MAX BÖGL. 2017. Disponível em: <<https://www.mbrenewables.com/en/pilotproject-current-site-status/>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

MENDOÇA, A. K. S., BRONIA, A. C. **Oportunidades para a Difusão da Energia Eólica e Solar em Sistemas Isolados no Brasil: Barreiras e Facilidades Evidenciados na Literatura.** Mix Sustentável. Florianópolis. v.5 n.3 p.81-92. 2019.

MERCURIO PARTNERS. Disponível em: <<https://mercuriopartners.com.br/usinas-reversiveis/#:~:text=Contexto%20brasileiro,a%20necessidade%20de%20usinas%20revers%C3%ADveis>>. Acesso em: 05 de maio de 2025.

MME. Ministério de Minas e Energia. CMSE. Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cmse>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

MME. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/competencias-1>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Manual do Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas.** 2007.

NACIF, L. A. **Modelagem Econômica para a Tomada de Decisões na Programação Diária da Operação de Usinas Hidrelétricas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2013.

NEOENERGIA. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/w/usinas-hibridas-e-associadas-inovacao-para-otimizar-a-geracao-de-energia#:~:text=O%20que%20s%C3%A3o%20usinas%20h%C3%ADbridas,fotovoltaica%2C%20entre%20outras%20fontes%20integradas>>. Acesso em: 25 de abril de 2024.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Dados Abertos. Disponível em: <<https://dados.ons.org.br/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2024.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>>. Acesso em: 11 de abril de 2024.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Programa Mensal de Operação (PMO) de maio de 2024.** Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. SINMAPS – Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN. Disponível em: <<https://sig.ons.org.br/app/sinmaps/>>. Acesso em: 20 de abril de 2024.

PELTIER, R. **Kannagawa hydropower plant, Japan**. Power. 2006.

PORTAL SOLAR. Inversor solar: o que é, como funciona e como escolher. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/inversor-solar-o-que-e>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2025.

POWER MAGAZINE. Disponível em: <<https://www.powermag.com/kannagawa-hydropower-plant-japan/>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2024.

RETSCREEN INTERNATIONAL. **Clean Energy Project Analysis**. 3° Edition. 2005.

SANTOS, L.S. et al. **Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Cenário Brasileiro: Um Estudo de Caso**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2019.

SALLES, J. F. **O Uso de Usinas Hidrelétricas Reversíveis para Armazenamento de Energia no Brasil e no Mundo**. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro. 2021.

SIERVO, F., LUGARESI, A. **Modern trends in selecting and designing reversible Francis pump-turbines**. Water Power & Construction p. 33-42. 1980.

TABASNIK, M. M. et al. **Análise da Submergência na Formação de Vórtices em Tomada de água Horizontal Simétrica**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2015.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydraulic Design Criteria - HDC**. Sheet 221-1 – Concrete Conduits – Intake Losses. 1977.

UTILITY MAGAZINE. Wind farm proposed for Kidston Solar Pumped Hydro Project. 2018. Disponível em: <<https://utilitymagazine.com.au/wind-farm-proposed-for-kidston-solar-pumped-hydro-project/>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

WORLD BANK GROUP, ESMAP. Energy Sector Management Assistance Program, SERIS. Solar Energy Research Institute of Singapore. **Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report**. Washington, DC. 2019.

YANG, P. et al. **Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir**. Limnology. 2022.

## APÊNDICE 1 – SAZONALIDADE DE VAZÕES AFLUENTES

### APÊNDICE 1.1 – TABELA AUXILIAR DE CÁLCULO (qm-q<sub>s</sub>)<sup>2</sup>

| (qm-q <sub>s</sub> ) <sup>2</sup> | Jan.  | Fev.  | Mar.  | Abr.  | Mai.   | Jun.  | Jul.   | Ago.  | Set.   | Out.   | Nov.   | Dez.  | Σ(qm-q <sub>s</sub> ) <sup>2</sup> | (qy-q <sub>s</sub> ) <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1931                              | 0     | 2636  | 3403  | 4535  | 19786  | 17865 | 880    | 2147  | 387    | 70     | 2056   | 1111  | 54875                              | 1                                 |
| 1932                              | 920   | 11    | 1344  | 26785 | 1495   | 5877  | 54     | 747   | 387    | 13147  | 694    | 301   | 51762                              | 793                               |
| 1933                              | 4401  | 3641  | 3403  | 6137  | 5379   | 7283  | 6616   | 7981  | 5526   | 1793   | 3174   | 5828  | 61161                              | 4924                              |
| 1934                              | 3521  | 803   | 1627  | 374   | 1793   | 4269  | 5379   | 5981  | 4670   | 1470   | 5379   | 1046  | 36311                              | 2653                              |
| 1935                              | 4670  | 5676  | 1627  | 4012  | 5981   | 336   | 178    | 3210  | 8219   | 134440 | 278    | 206   | 168834                             | 178                               |
| 1936                              | 2466  | 2434  | 4535  | 5981  | 2739   | 99012 | 455    | 2567  | 608    | 19     | 694    | 2056  | 123566                             | 64                                |
| 1937                              | 499   | 2147  | 301   | 642   | 2241   | 3641  | 5089   | 3288  | 3174   | 880    | 7338   | 642   | 29881                              | 685                               |
| 1938                              | 1179  | 1653  | 2434  | 1878  | 2988   | 27776 | 43123  | 861   | 1627   | 2241   | 2534   | 4401  | 92696                              | 82                                |
| 1939                              | 3174  | 2241  | 107   | 2056  | 19     | 1179  | 206    | 4535  | 1046   | 2636   | 8039   | 22699 | 47935                              | 105                               |
| 1940                              | 5     | 1548  | 3521  | 129   | 414    | 2739  | 4401   | 4808  | 4670   | 5089   | 3641   | 2147  | 33112                              | 2233                              |
| 1941                              | 861   | 6188  | 267   | 920   | 0      | 160   | 499    | 8586  | 54     | 178    | 387    | 13    | 18113                              | 54                                |
| 1942                              | 592   | 40    | 29    | 1133  | 70     | 136   | 278    | 178   | 1321   | 1111   | 3886   | 5676  | 14449                              | 286                               |
| 1943                              | 5379  | 4139  | 4670  | 5981  | 6616   | 107   | 1548   | 152   | 694    | 19     | 545    | 3762  | 33612                              | 2041                              |
| 1944                              | 2337  | 4401  | 982   | 3641  | 7113   | 7283  | 7628   | 7981  | 6295   | 6616   | 1709   | 2953  | 58938                              | 4546                              |
| 1945                              | 6780  | 4670  | 2845  | 6137  | 7454   | 5676  | 107    | 4139  | 4535   | 3062   | 2636   | 2845  | 50886                              | 3865                              |
| 1946                              | 152   | 27113 | 2669  | 694   | 592    | 160   | 14319  | 920   | 1548   | 4444   | 136    | 1344  | 54091                              | 761                               |
| 1947                              | 19    | 114   | 414   | 747   | 3062   | 940   | 129    | 59    | 16297  | 1995   | 747    | 336   | 24859                              | 23                                |
| 1948                              | 1627  | 178   | 803   | 2147  | 178    | 1046  | 2534   | 87    | 1966   | 0      | 387    | 4012  | 14965                              | 720                               |
| 1949                              | 5233  | 6780  | 4401  | 694   | 545    | 336   | 4401   | 5089  | 5379   | 4012   | 5379   | 5828  | 48075                              | 3531                              |
| 1950                              | 178   | 3     | 1653  | 2337  | 1548   | 3062  | 1627   | 4808  | 2845   | 5877   | 29     | 2534  | 26500                              | 455                               |
| 1951                              | 152   | 514   | 2177  | 3403  | 5233   | 4670  | 4535   | 6137  | 7113   | 1995   | 4853   | 59    | 40840                              | 434                               |
| 1952                              | 2434  | 3288  | 4670  | 1878  | 6616   | 0     | 1627   | 4139  | 2669   | 14801  | 1495   | 1548  | 45166                              | 371                               |
| 1953                              | 1249  | 982   | 2636  | 545   | 455    | 694   | 3521   | 5828  | 1201   | 3325   | 12468  | 658   | 33562                              | 63                                |
| 1954                              | 12026 | 5     | 336   | 2337  | 70576  | 17599 | 711    | 803   | 40     | 5574   | 54     | 1793  | 111854                             | 1444                              |
| 1955                              | 3403  | 4535  | 3762  | 1966  | 3559   | 92210 | 43123  | 1418  | 93     | 3288   | 2337   | 3641  | 163336                             | 339                               |
| 1956                              | 2147  | 1878  | 3174  | 7510  | 5280   | 514   | 129    | 5877  | 87     | 1966   | 5089   | 6945  | 40596                              | 80                                |
| 1957                              | 2056  | 336   | 2636  | 3403  | 3174   | 278   | 18404  | 74890 | 215910 | 3802   | 414    | 107   | 325410                             | 3325                              |
| 1958                              | 2337  | 4948  | 2337  | 5379  | 6616   | 4535  | 4269   | 694   | 8772   | 187    | 2      | 0     | 40074                              | 972                               |
| 1959                              | 206   | 2     | 2147  | 2434  | 1394   | 5     | 1470   | 1179  | 267    | 1179   | 3641   | 5379  | 19303                              | 1156                              |
| 1960                              | 5676  | 1627  | 3062  | 1179  | 2056   | 301   | 2056   | 2177  | 13147  | 3098   | 6031   | 1111  | 41522                              | 19                                |
| 1961                              | 3174  | 2636  | 12246 | 711   | 187    | 215   | 2056   | 5089  | 70     | 5      | 12468  | 114   | 38970                              | 19                                |
| 1962                              | 2337  | 13    | 348   | 2739  | 4012   | 3641  | 4670   | 5981  | 1793   | 10335  | 129    | 301   | 36298                              | 698                               |
| 1963                              | 2534  | 5     | 711   | 336   | 4948   | 5828  | 7454   | 7804  | 6780   | 2272   | 16554  | 1653  | 56878                              | 371                               |
| 1964                              | 2434  | 3174  | 1249  | 2880  | 7      | 4993  | 821    | 7684  | 2880   | 152    | 3288   | 803   | 30365                              | 23                                |
| 1965                              | 2953  | 747   | 545   | 2534  | 26459  | 54    | 15292  | 114   | 414    | 15046  | 4993   | 187   | 69336                              | 715                               |
| 1966                              | 70    | 12919 | 658   | 3174  | 4948   | 3641  | 920    | 4535  | 1179   | 7861   | 514    | 301   | 40718                              | 61                                |
| 1967                              | 267   | 32    | 245   | 1548  | 5828   | 414   | 1470   | 2056  | 861    | 1878   | 2337   | 803   | 17737                              | 920                               |
| 1968                              | 2056  | 4012  | 5379  | 3403  | 4012   | 5676  | 6780   | 6780  | 7283   | 3403   | 1470   | 3403  | 53656                              | 4269                              |
| 1969                              | 5     | 920   | 1394  | 93    | 235    | 4181  | 387    | 2534  | 3288   | 469    | 387    | 1394  | 15288                              | 63                                |
| 1970                              | 2241  | 3174  | 1709  | 2739  | 1249   | 8402  | 11807  | 2434  | 1470   | 7      | 3288   | 245   | 38765                              | 176                               |
| 1971                              | 26134 | 1002  | 70    | 235   | 13610  | 10746 | 11377  | 861   | 3      | 136    | 2739   | 1878  | 68791                              | 1029                              |
| 1972                              | 803   | 1133  | 19    | 301   | 4948   | 11    | 1067   | 9734  | 46079  | 18134  | 152    | 0     | 82381                              | 992                               |
| 1973                              | 7338  | 3441  | 499   | 920   | 114    | 2177  | 4311   | 3098  | 12693  | 10954  | 1495   | 1249  | 48289                              | 1674                              |
| 1974                              | 2     | 75    | 107   | 2845  | 4948   | 803   | 642    | 1966  | 19     | 1548   | 1179   | 1394  | 15527                              | 803                               |
| 1975                              | 1548  | 206   | 1046  | 3288  | 4269   | 2636  | 3641   | 920   | 387    | 34842  | 1653   | 14801 | 69236                              | 2                                 |
| 1976                              | 658   | 455   | 592   | 301   | 414    | 11377 | 455    | 1820  | 765    | 336    | 469    | 560   | 18203                              | 108                               |
| 1977                              | 32    | 87    | 178   | 1046  | 4808   | 1878  | 2953   | 3403  | 3062   | 694    | 374    | 1111  | 19627                              | 1162                              |
| 1978                              | 5233  | 7283  | 5981  | 7804  | 7628   | 6295  | 658    | 235   | 642    | 3762   | 1878   | 2636  | 50036                              | 3035                              |
| 1979                              | 2241  | 3062  | 3403  | 5526  | 5725   | 1966  | 3288   | 178   | 3325   | 17599  | 16043  | 940   | 63296                              | 37                                |
| 1980                              | 765   | 414   | 414   | 3062  | 129    | 336   | 1002   | 1002  | 16297  | 1418   | 301    | 2272  | 27413                              | 180                               |
| 1981                              | 2880  | 2177  | 920   | 747   | 1111   | 1627  | 2953   | 4948  | 5379   | 11     | 178    | 12246 | 35177                              | 127                               |
| 1982                              | 267   | 2337  | 4808  | 7283  | 7113   | 6506  | 77096  | 44    | 2534   | 13610  | 154183 | 27444 | 303224                             | 3267                              |
| 1983                              | 8402  | 245   | 7168  | 6188  | 222464 | 63333 | 544144 | 136   | 23612  | 20068  | 2567   | 455   | 898782                             | 29697                             |
| 1984                              | 2056  | 1878  | 374   | 206   | 93     | 8772  | 129    | 5725  | 215    | 414    | 6833   | 5280  | 31974                              | 264                               |
| 1985                              | 1793  | 336   | 1548  | 3098  | 1249   | 3521  | 1878   | 4808  | 4401   | 6780   | 6454   | 7981  | 43847                              | 2257                              |
| 1986                              | 5233  | 861   | 1394  | 1249  | 765    | 22    | 4269   | 2434  | 1249   | 1548   | 1548   | 312   | 20883                              | 866                               |



## APÊNDICE 2 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

### APÊNDICE 2.1 – ALTERNATIVA SAZONALIDADE

| <b>CRITÉRIO 1</b>                       |                           | <b>ELETROBRAS - DIRETRIZES<br/>PCHS</b> |                                      |
|-----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Vazão máxima turbinada                  | Q (m³/s)                  | 8,41                                    |                                      |
| Comprimento total do conduto            | L (m)                     | 2110                                    |                                      |
| Queda Bruta                             | Hb (m)                    | 86,14                                   |                                      |
| Relação comprimento total x queda bruta | L/Hb                      | 24,49                                   | É recomendada a instalação           |
| Diâmetro do condutor forçado            | D (m)                     | 3,00                                    |                                      |
| Área do conduto forçado                 | Acf (m²)                  | 7,07                                    |                                      |
| Velocidade do conduto forçado           | Vcf (m/s)                 | 1,19                                    |                                      |
| Tempo de aceleração                     | th (s)                    | 2,97                                    | Não há necessidade de chaminé        |
| <b>CRITÉRIO 2</b>                       |                           | <b>CANAMBRA</b>                         |                                      |
| Operação                                | Interligado               |                                         |                                      |
| Reservatório de regularização           | Sim                       |                                         |                                      |
| Potência                                | P (MW)                    | 6,54                                    |                                      |
| Porte da usina                          | Pequena com reservatório  |                                         |                                      |
| Relação comprimento total x queda bruta | L/Hb                      | 24,49                                   | É necessário a instalação da chaminé |
| <b>CRITÉRIO 3</b>                       |                           | <b>CANAMBRA<br/>ESTENDIDO</b>           |                                      |
| Comprimento e Velocidade do escoamento  | LV                        | 2509                                    | É necessário a instalação da chaminé |
| <b>CRITÉRIO 4</b>                       |                           | <b>MASSAS GIRANTES</b>                  |                                      |
| Tempo de partida da máquina             | T <sub>s</sub> (s)        | 7                                       | Unidades com má regulação            |
| Rotação síncrona                        | n (rpm)                   | 214                                     |                                      |
| Potência ativa                          | P (hp)                    | 8764                                    |                                      |
| Potência aparente                       | P (kVA)                   | 7689                                    |                                      |
| Efeito de inércia da turbina            | WR <sup>2t</sup> (kgf.m²) | 42989                                   |                                      |
| Efeito de inércia do gerador            | WR <sup>2g</sup> (kgf.m²) | 46119                                   |                                      |
| Efeito de inércia da unidade            | WR <sup>2</sup> (kgf.m²)  | 89108                                   |                                      |
| Tempo de transitório hidráulico         | T <sub>P</sub> (s)        | 3                                       | É necessário a instalação da chaminé |
| Tempo efetivo de operação               | T <sub>e</sub> (s)        | 8                                       |                                      |
| Tempo de retardo da operação            | T <sub>r</sub> (s)        | 0,75                                    |                                      |
| Tempo total de ação do servomotor       | T <sub>C</sub> (s)        | 8,75                                    |                                      |

|                                                    |                                      |      |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|------|
| Relação Servomotor por Tempo de partida da máquina | $T_c/T_s$                            | 1,26 |
| Rotação específica                                 | ns (rpm)                             | 66   |
| <b>CRITÉRIO 5</b>                                  |                                      |      |
| <b>MONTREAL ENGINEERING</b>                        |                                      |      |
| Tempo de transitório hidráulico                    | TP (s)                               | 3    |
| Relação 1                                          | $T_p/T_e$                            | 0,37 |
| Relação 2                                          | $T_s/T_c$                            | 0,79 |
| Tipo de sistema                                    | Interligado                          |      |
| Verificar a região do gráfico abaixo               | É necessário a instalação da chaminé |      |

## APÊNDICE 2.2 – ALTERNATIVA VAZÃO VERTIDA

|                                         |                          |       |                                           |
|-----------------------------------------|--------------------------|-------|-------------------------------------------|
| <b>CRITÉRIO 1</b>                       |                          |       | <b>ELETOBRAS - DIRETRIZES PCHS</b>        |
| Vazão máxima turbinada                  | Q (m³/s)                 | 22,54 |                                           |
| Comprimento total do conduto            | L (m)                    | 2110  |                                           |
| Queda Bruta                             | Hb (m)                   | 86,14 |                                           |
| Relação comprimento total x queda bruta | L/Hb                     | 24,49 | É recomendada a instalação                |
| Diâmetro do condutor forçado            | D (m)                    | 4,00  |                                           |
| Área do conduto forçado                 | Acf (m²)                 | 12,57 |                                           |
| Velocidade do conduto forçado           | Vcf (m/s)                | 1,79  |                                           |
| Tempo de aceleração                     | th (s)                   | 4,48  | A chaminé é desejável mas não obrigatória |
| <b>CRITÉRIO 2</b>                       |                          |       | <b>CANAMBRA</b>                           |
| Operação                                | Interligado              |       |                                           |
| Reservatório de regularização           | Sim                      |       |                                           |
| Potência                                | P (MW)                   | 17,52 |                                           |
| Porte da usina                          | Pequena com reservatório |       |                                           |
| Relação comprimento total x queda bruta | L/Hb                     | 24,49 | É necessário a instalação da chaminé      |
| <b>CRITÉRIO 3</b>                       |                          |       | <b>CANAMBRA ESTENDIDO</b>                 |
| Comprimento e Velocidade do escoamento  | LV                       | 3784  | É necessário a instalação da chaminé      |
| <b>CRITÉRIO 4</b>                       |                          |       | <b>MASSAS GIRANTES</b>                    |
| Tempo de partida da máquina             | $T_s$ (s)                | 178   | Unidades com boa regulação                |
| Rotação síncrona                        | n (rpm)                  | 214   |                                           |
| Potência ativa                          | P (hp)                   | 23497 |                                           |
| Potência aparente                       | P (kVA)                  | 20614 |                                           |

|                                                    |                                      |                             |                               |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Efeito de inércia da turbina                       | $WR^2_t$ (kgf.m <sup>2</sup> )       | 5954231                     |                               |
| Efeito de inércia do gerador                       | $WR^2_g$ (kgf.m <sup>2</sup> )       | 158214                      |                               |
| Efeito de inércia da unidade                       | $WR^2$ (kgf.m <sup>2</sup> )         | 6112445                     |                               |
| Tempo de transitório hidráulico                    | $T_P$ (s)                            | 4                           | Não há necessidade de chaminé |
| Tempo efetivo de operação                          | $T_e$ (s)                            | 8                           |                               |
| Tempo de retardo da operação                       | $T_r$ (s)                            | 0,75                        |                               |
| Tempo total de ação do servomotor                  | $T_c$ (s)                            | 8,75                        |                               |
| Relação Servomotor por Tempo de partida da máquina | $T_c/T_s$                            | 0,05                        |                               |
| Rotação específica                                 | $n_s$ (rpm)                          | 108                         |                               |
| <b>CRITÉRIO 5</b>                                  |                                      | <b>MONTREAL ENGINEERING</b> |                               |
| Tempo de transitório hidráulico                    | $T_P$ (s)                            | 4                           |                               |
| Relação 1                                          | $T_p/T_e$                            | 0,56                        |                               |
| Relação 2                                          | $T_S/T_c$                            | 20,32                       |                               |
| Tipo de sistema                                    | Interligado                          |                             |                               |
| Verificar a região do gráfico abaixo               | É necessário a instalação da chaminé |                             |                               |

## APÊNDICE 3 – ORÇAMENTO PADRÃO ELETROBRAS

### APÊNDICE 3.1 – ALTERNATIVA SAZONALIDADE

|                                                                   | Quantidade | Unit.        | Total          |
|-------------------------------------------------------------------|------------|--------------|----------------|
| TOT04 CUSTO TOTAL [global]                                        |            |              | 138,732,494.24 |
| TOT03 CUSTO TOTAL SEM JUROS [global]                              |            |              | 138,732,494.24 |
| TOT02 .10 ATÉ .16 - CUSTO DIRETO TOTAL [global]                   |            |              | 102,244,570.34 |
| TOT01 .11 ATÉ .16 - CUSTO DIRETO TOTAL MENOS A CONTA .10 [global] |            |              | 102,244,570.34 |
| .11 ESTRUTURAS E BENFEITORIAS [global]                            |            |              | 57,860,162.18  |
| .11.13 Casa de Força [global]                                     |            |              | 52,600,147.44  |
| .11.13.00.12 Escavação [global]                                   |            |              | 13,188,445.11  |
| .11.13.00.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 50,136.00  | 263.05       | 13,188,445.11  |
| .11.13.00.14 Concreto [m3]                                        | 45,478.00  | 866.61       | 39,411,702.33  |
| .11.13.00.14.13 Cimento [t]                                       | 7,802.55   | 779.62       | 6,083,049.38   |
| .11.13.00.14.14.1 Concreto sem Cimento (Estrutural) [m3]          | 45,478.00  | 442.20       | 20,110,404.13  |
| .11.13.00.14.15 Armadura [t]                                      | 1,114.65   | 11,858.65    | 13,218,248.82  |
| .11.27 Eventuais da Conta .11 [global]                            |            |              | 5,260,014.74   |
| .12 RESERVATÓRIO, BARRAGENS E ADUTORAS [global]                   |            |              | 26,841,475.89  |
| .12.19 Tomada d'Água e Adutoras [global]                          |            |              | 24,401,341.72  |
| .12.19.30 Tomada d'Água [global]                                  |            |              | 2,888,310.32   |
| .12.19.30.12 Escavação [global]                                   |            |              | 111,329.63     |
| .12.19.30.12.10 Escavação Comum [m3]                              | 847.00     | 12.71        | 10,768.55      |
| .12.19.30.12.11 Escavação em Rocha a Céu Aberto [m3]              | 1,023.00   | 98.30        | 100,561.08     |
| .12.19.30.14 Concreto [m3]                                        | 3,254.00   | 853.41       | 2,776,980.68   |
| .12.19.30.14.13 Cimento [t]                                       | 569.45     | 779.62       | 443,956.46     |
| .12.19.30.14.14.1 Concreto sem Cimento (Estrutural) [m3]          | 3,254.00   | 420.50       | 1,368,322.71   |
| .12.19.30.14.15 Armadura [t]                                      | 81.35      | 11,858.65    | 964,701.51     |
| .12.19.32 Conduto Adutor [global]                                 |            |              | 5,983,727.45   |
| .12.19.32.12 Escavação [global]                                   |            |              | 4,536,355.83   |
| .12.19.32.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 17,245.00  | 263.05       | 4,536,355.83   |
| .12.19.32.14 Concreto [m3]                                        | 2,256.00   | 641.57       | 1,447,371.62   |
| .12.19.32.14.14.2 Concreto sem Cimento (Projetado) [m3]           | 2,256.00   | 641.57       | 1,447,371.62   |
| .12.19.33 Chaminé de Equilíbrio [global]                          |            |              | 632,736.36     |
| .12.19.33.12 Escavação [global]                                   |            |              | 557,673.20     |
| .12.19.33.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 2,120.00   | 263.05       | 557,673.20     |
| .12.19.33.14 Concreto [m3]                                        | 117.00     | 641.57       | 75,063.16      |
| .12.19.33.14.14.2 Concreto sem Cimento (Projetado) [m3]           | 117.00     | 641.57       | 75,063.16      |
| .12.19.34 Túnel e/ou Conduto Forçado [global]                     |            |              | 481,619.97     |
| .12.19.34.12 Escavação [global]                                   |            |              | 364,855.06     |
| .12.19.34.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 1,387.00   | 263.05       | 364,855.06     |
| .12.19.34.14 Concreto [m3]                                        | 182.00     | 641.57       | 116,764.91     |
| .12.19.34.14.14.2 Concreto sem Cimento (Projetado) [m3]           | 182.00     | 641.57       | 116,764.91     |
| .12.19.35 Canal e/ou Túnel de Fuga [global]                       |            |              | 14,414,947.63  |
| .12.19.35.12 Escavação [global]                                   |            |              | 14,414,947.63  |
| .12.19.35.12.10 Escavação Comum [m3]                              | 29,144.00  | 12.71        | 370,529.59     |
| .12.19.35.12.11 Escavação em Rocha a Céu Aberto [m3]              | 36,556.00  | 93.17        | 3,406,012.56   |
| .12.19.35.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 40,442.00  | 263.05       | 10,638,405.48  |
| .12.27 Eventuais da Conta .12 [global]                            |            |              | 2,440,134.17   |
| .12.27.1 Eventuais da Conta .12 (Obras Civas) [global]            |            |              | 2,440,134.17   |
| .13 TURBINAS E GERADORES [global]                                 |            |              | 15,734,323.26  |
| .13.13.00.23.16 Comportas do Tubo de Sucção [global]              | 1.00       | 811,937.87   | 811,937.87     |
| .13.13.00.23.17 Comportas Ensecadeiras [global]                   | 1.00       | 359,869.18   | 359,869.18     |
| .13.13.00.23.18 Comportas de Emergência [global]                  | 1.00       | 1,030,218.30 | 1,030,218.30   |
| .13.13.00.23.28 Turbinas [global]                                 | 1.00       | 7,874,482.04 | 7,874,482.04   |
| .13.13.00.23.29 Geradores [global]                                | 1.00       | 5,657,815.87 | 5,657,815.87   |
| .15 DIVERSOS EQUIPAMENTOS DA USINA [global]                       |            |              | 1,808,609.00   |
| .15.13.00.23.20 Guindaste ou Ponte Rolante [global]               | 1.00       | 1,400,620.84 | 1,400,620.84   |
| .15.00.00.23.31 Equipamentos Diversos [global]                    | 1.00       | 407,988.16   | 407,988.16     |
| .17 CUSTOS INDIRETOS [global]                                     |            |              | 36,487,923.91  |
| .17.21 Canteiro e Acampamento [global]                            |            |              | 35,617,360.74  |
| .17.21.38 Construções do Canteiro e Acampamento [global]          |            |              | 35,617,360.74  |
| .17.21.38.17 Outros Custos [global]                               |            |              | 28,060,271.85  |
| .17.21.38.35 Infra-Estrutura [global]                             |            |              | 7,557,088.89   |
| .17.21.38.35.32 Edificações [global]                              |            |              | 7,557,088.89   |
|                                                                   | Quantidade | Unit.        | Total          |
| .17.27 Eventuais da Conta .17 [global]                            |            |              | 870,563.16     |
| .17.27.1 Eventuais da Conta .17 (Obras Civas) [global]            |            |              | 870,563.16     |

### APÊNDICE 3.2 – ALTERNATIVA VAZÃO VERTIDA

|                                                                   | Quantidade | Unit.        | Total          |
|-------------------------------------------------------------------|------------|--------------|----------------|
| TOT04 CUSTO TOTAL [global]                                        |            |              | 217,342,943.19 |
| TOT03 CUSTO TOTAL SEM JUROS [global]                              |            |              | 217,342,943.19 |
| TOT02 .10 ATÉ .16 - CUSTO DIRETO TOTAL [global]                   |            |              | 166,361,484.25 |
| TOT01 .11 ATÉ .16 - CUSTO DIRETO TOTAL MENOS A CONTA .10 [global] |            |              | 166,361,484.25 |
| .11 ESTRUTURAS E BENFEITORIAS [global]                            |            |              | 101,438,909.74 |
| .11.13 Casa de Força [global]                                     |            |              | 92,217,190.67  |
| .11.13.00.12 Escavação [global]                                   |            |              | 32,036,310.88  |
| .11.13.00.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 125,340.00 | 255.60       | 32,036,310.88  |
| .11.13.00.14 Concreto [m3]                                        | 75,796.20  | 793.98       | 60,180,879.79  |
| .11.13.00.14.13 Cimento [t]                                       | 13,004.25  | 779.62       | 10,138,415.63  |
| .11.13.00.14.14.1 Concreto sem Cimento (Estrutural) [m3]          | 75,796.20  | 383.98       | 29,104,147.93  |
| .11.13.00.14.15 Armadura [t]                                      | 1,857.75   | 11,270.79    | 20,938,316.23  |
| .11.27 Eventuais da Conta .11 [global]                            |            |              | 9,221,719.07   |
| .12 RESERVATÓRIO, BARRAGENS E ADUTORAS [global]                   |            |              | 33,035,406.48  |
| .12.19 Tomada d'Água e Adutoras [global]                          |            |              | 30,032,187.71  |
| .12.19.30 Tomada d'Água [global]                                  |            |              | 2,505,718.87   |
| .12.19.30.12 Escavação [global]                                   |            |              | 74,602.56      |
| .12.19.30.12.10 Escavação Comum [m3]                              | 847.00     | 14.86        | 12,590.23      |
| .12.19.30.12.11 Escavação em Rocha a Céu Aberto [m3]              | 1,023.00   | 60.62        | 62,012.34      |
| .12.19.30.14 Concreto [m3]                                        | 3,160.00   | 769.34       | 2,431,116.31   |
| .12.19.30.14.13 Cimento [t]                                       | 553.00     | 779.62       | 431,131.66     |
| .12.19.30.14.14.1 Concreto sem Cimento (Estrutural) [m3]          | 3,160.00   | 351.14       | 1,109,591.98   |
| .12.19.30.14.15 Armadura [t]                                      | 79.00      | 11,270.79    | 890,392.67     |
| .12.19.32 Conduto Adutor [global]                                 |            |              | 9,602,003.44   |
| .12.19.32.12 Escavação [global]                                   |            |              | 7,887,669.97   |
| .12.19.32.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 30,860.00  | 255.60       | 7,887,669.97   |
| .12.19.32.14 Concreto [m3]                                        | 3,034.00   | 565.04       | 1,714,333.47   |
| .12.19.32.14.14.2 Concreto sem Cimento (Projetado) [m3]           | 3,034.00   | 565.04       | 1,714,333.47   |
| .12.19.33 Chaminé de Equilíbrio [global]                          |            |              | 1,144,373.70   |
| .12.19.33.12 Escavação [global]                                   |            |              | 1,055,097.27   |
| .12.19.33.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 4,128.00   | 255.60       | 1,055,097.27   |
| .12.19.33.14 Concreto [m3]                                        | 158.00     | 565.04       | 89,276.43      |
| .12.19.33.14.14.2 Concreto sem Cimento (Projetado) [m3]           | 158.00     | 565.04       | 89,276.43      |
| .12.19.34 Túnel e/ou Conduto Forçado [global]                     |            |              | 772,512.98     |
| .12.19.34.12 Escavação [global]                                   |            |              | 634,643.05     |
| .12.19.34.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 2,483.00   | 255.60       | 634,643.05     |
| .12.19.34.14 Concreto [m3]                                        | 244.00     | 565.04       | 137,869.93     |
| .12.19.34.14.14.2 Concreto sem Cimento (Projetado) [m3]           | 244.00     | 565.04       | 137,869.93     |
| .12.19.35 Canal e/ou Túnel de Fuga [global]                       |            |              | 16,007,578.72  |
| .12.19.35.12 Escavação [global]                                   |            |              | 16,007,578.72  |
| .12.19.35.12.10 Escavação Comum [m3]                              | 58,287.00  | 14.86        | 866,406.94     |
| .12.19.35.12.11 Escavação em Rocha a Céu Aberto [m3]              | 73,112.00  | 65.71        | 4,804,387.95   |
| .12.19.35.12.12 Escavação Subterrânea em Rocha [m3]               | 40,442.00  | 255.60       | 10,336,783.83  |
| .12.27 Eventuais da Conta .12 [global]                            |            |              | 3,003,218.77   |
| .12.27.1 Eventuais da Conta .12 (Obras Cíveis) [global]           |            |              | 3,003,218.77   |
| .13 TURBINAS E GERADORES [global]                                 |            |              | 30,078,559.04  |
| .13.13.00.23.16 Comportas do Tubo de Sucção [global]              |            |              | 1,623,875.75   |
| .13.13.00.23.17 Comportas Ensecadeiras [global]                   | 1.00       | 359,869.18   | 359,869.18     |
| .13.13.00.23.18 Comportas de Emergência [global]                  | 1.00       | 1,030,218.30 | 1,030,218.30   |
| .13.13.00.23.28 Turbinas [global]                                 | 2.00       | 7,874,482.04 | 15,748,964.08  |
| .13.13.00.23.29 Geradores [global]                                | 2.00       | 5,657,815.87 | 11,315,631.73  |
| .15 DIVERSOS EQUIPAMENTOS DA USINA [global]                       |            |              | 1,808,609.00   |
| .15.13.00.23.20 Guindaste ou Ponte Rolante [global]               | 1.00       | 1,400,620.84 | 1,400,620.84   |
| .15.00.00.23.31 Equipamentos Diversos [global]                    | 1.00       | 407,988.16   | 407,988.16     |
| .17 CUSTOS INDIRETOS [global]                                     |            |              | 50,981,458.94  |
| .17.21 Canteiro e Acampamento [global]                            |            |              | 50,102,262.40  |
| .17.21.38 Construções do Canteiro e Acampamento [global]          |            |              | 50,102,262.40  |
| .17.21.38.17 Outros Custos [global]                               |            |              | 42,545,173.51  |
| .17.21.38.35 Infra-Estrutura [global]                             |            |              | 7,557,088.89   |
| .17.21.38.35.32 Edificações [global]                              |            |              | 7,557,088.89   |
|                                                                   | Quantidade | Unit.        | Total          |
| .17.27 Eventuais da Conta .17 [global]                            |            |              | 879,196.54     |
| .17.27.1 Eventuais da Conta .17 (Obras Cíveis) [global]           |            |              | 879,196.54     |

## ANEXO 1 – DADOS ABERTOS ONS

### ANEXO 1.1 - VAZÕES MÉDIAS MENSAIS AFLUENTES UHE SANTA CLARA

| Ano  | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. | Mín. | Méd. | Máx. |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1931 | 103  | 52   | 45   | 36   | 244  | 237  | 133  | 57   | 123  | 95   | 58   | 70   | 36   | 104  | 244  |
| 1932 | 73   | 100  | 140  | 267  | 142  | 180  | 96   | 76   | 123  | 218  | 77   | 86   | 73   | 132  | 267  |
| 1933 | 37   | 43   | 45   | 25   | 30   | 18   | 22   | 14   | 29   | 61   | 47   | 27   | 14   | 33   | 61   |
| 1934 | 44   | 75   | 63   | 84   | 61   | 38   | 30   | 26   | 35   | 65   | 30   | 71   | 26   | 52   | 84   |
| 1935 | 35   | 28   | 63   | 40   | 26   | 85   | 90   | 160  | 194  | 470  | 120  | 89   | 26   | 117  | 470  |
| 1936 | 153  | 54   | 36   | 26   | 51   | 418  | 82   | 154  | 128  | 99   | 77   | 58   | 26   | 111  | 418  |
| 1937 | 81   | 57   | 86   | 78   | 56   | 43   | 32   | 46   | 47   | 133  | 189  | 78   | 32   | 77   | 189  |
| 1938 | 69   | 144  | 54   | 60   | 158  | 270  | 311  | 74   | 63   | 56   | 53   | 37   | 37   | 112  | 311  |
| 1939 | 47   | 56   | 93   | 58   | 99   | 69   | 89   | 36   | 71   | 52   | 193  | 254  | 36   | 93   | 254  |
| 1940 | 101  | 64   | 44   | 92   | 83   | 51   | 37   | 34   | 35   | 32   | 43   | 57   | 32   | 56   | 101  |
| 1941 | 74   | 182  | 87   | 73   | 103  | 116  | 81   | 196  | 96   | 90   | 123  | 107  | 73   | 111  | 196  |
| 1942 | 79   | 97   | 98   | 137  | 95   | 115  | 120  | 90   | 67   | 70   | 41   | 28   | 28   | 86   | 137  |
| 1943 | 30   | 39   | 35   | 26   | 22   | 93   | 64   | 91   | 77   | 99   | 80   | 42   | 22   | 58   | 99   |
| 1944 | 55   | 37   | 72   | 43   | 19   | 18   | 16   | 14   | 24   | 22   | 62   | 49   | 14   | 36   | 72   |
| 1945 | 21   | 35   | 50   | 25   | 17   | 28   | 93   | 39   | 36   | 48   | 52   | 50   | 17   | 41   | 93   |
| 1946 | 91   | 268  | 155  | 77   | 79   | 116  | 223  | 73   | 64   | 170  | 115  | 140  | 64   | 131  | 268  |
| 1947 | 99   | 114  | 83   | 76   | 48   | 134  | 92   | 111  | 231  | 148  | 76   | 85   | 48   | 108  | 231  |
| 1948 | 63   | 90   | 75   | 57   | 90   | 71   | 53   | 94   | 59   | 103  | 123  | 40   | 40   | 77   | 123  |
| 1949 | 31   | 21   | 37   | 77   | 80   | 85   | 37   | 32   | 30   | 40   | 30   | 27   | 21   | 44   | 85   |
| 1950 | 90   | 105  | 144  | 55   | 64   | 48   | 63   | 34   | 50   | 180  | 98   | 53   | 34   | 82   | 180  |
| 1951 | 91   | 126  | 150  | 45   | 31   | 35   | 36   | 25   | 19   | 148  | 173  | 111  | 19   | 83   | 173  |
| 1952 | 54   | 46   | 35   | 60   | 22   | 104  | 63   | 39   | 155  | 225  | 142  | 64   | 22   | 84   | 225  |
| 1953 | 68   | 72   | 52   | 80   | 82   | 77   | 44   | 27   | 138  | 161  | 215  | 129  | 27   | 95   | 215  |
| 1954 | 213  | 101  | 85   | 55   | 369  | 236  | 130  | 75   | 97   | 178  | 96   | 61   | 55   | 141  | 369  |
| 1955 | 45   | 36   | 42   | 59   | 163  | 407  | 311  | 141  | 113  | 46   | 55   | 43   | 36   | 122  | 407  |
| 1956 | 57   | 60   | 47   | 190  | 176  | 126  | 92   | 180  | 94   | 59   | 32   | 20   | 20   | 94   | 190  |
| 1957 | 58   | 85   | 52   | 45   | 47   | 120  | 239  | 377  | 568  | 165  | 83   | 93   | 45   | 161  | 568  |
| 1958 | 55   | 33   | 55   | 30   | 22   | 36   | 38   | 77   | 197  | 117  | 102  | 104  | 22   | 72   | 197  |
| 1959 | 89   | 102  | 57   | 54   | 66   | 101  | 65   | 69   | 87   | 69   | 43   | 30   | 30   | 69   | 102  |
| 1960 | 28   | 63   | 48   | 69   | 58   | 86   | 58   | 150  | 218  | 159  | 181  | 70   | 28   | 99   | 218  |
| 1961 | 47   | 52   | 214  | 130  | 117  | 118  | 58   | 32   | 95   | 101  | 215  | 114  | 32   | 108  | 215  |
| 1962 | 55   | 107  | 122  | 51   | 40   | 43   | 35   | 26   | 61   | 205  | 92   | 86   | 26   | 77   | 205  |
| 1963 | 53   | 101  | 130  | 85   | 33   | 27   | 17   | 15   | 21   | 151  | 232  | 144  | 15   | 84   | 232  |
| 1964 | 54   | 47   | 68   | 157  | 106  | 174  | 132  | 191  | 157  | 91   | 46   | 75   | 46   | 108  | 191  |
| 1965 | 49   | 76   | 80   | 53   | 266  | 96   | 227  | 114  | 83   | 226  | 174  | 117  | 49   | 130  | 266  |
| 1966 | 95   | 217  | 129  | 47   | 33   | 43   | 73   | 36   | 69   | 192  | 126  | 86   | 33   | 96   | 217  |
| 1967 | 87   | 109  | 119  | 64   | 27   | 83   | 65   | 58   | 74   | 60   | 55   | 75   | 27   | 73   | 119  |
| 1968 | 58   | 40   | 30   | 45   | 40   | 28   | 21   | 21   | 18   | 45   | 65   | 45   | 18   | 38   | 65   |
| 1969 | 101  | 73   | 66   | 113  | 88   | 168  | 123  | 53   | 46   | 125  | 123  | 66   | 46   | 95   | 168  |
| 1970 | 56   | 47   | 62   | 51   | 68   | 195  | 212  | 54   | 65   | 106  | 46   | 119  | 46   | 90   | 212  |
| 1971 | 265  | 135  | 95   | 88   | 220  | 207  | 210  | 74   | 105  | 115  | 51   | 60   | 51   | 135  | 265  |
| 1972 | 75   | 137  | 99   | 86   | 33   | 100  | 136  | 202  | 318  | 238  | 91   | 103  | 33   | 135  | 318  |
| 1973 | 189  | 162  | 81   | 73   | 114  | 150  | 169  | 159  | 216  | 208  | 142  | 68   | 68   | 144  | 216  |
| 1974 | 102  | 112  | 93   | 50   | 33   | 75   | 78   | 59   | 99   | 64   | 69   | 66   | 33   | 75   | 112  |
| 1975 | 64   | 89   | 71   | 46   | 38   | 52   | 43   | 73   | 123  | 290  | 144  | 225  | 38   | 105  | 290  |
| 1976 | 129  | 82   | 79   | 86   | 83   | 210  | 82   | 146  | 131  | 85   | 125  | 127  | 79   | 114  | 210  |
| 1977 | 109  | 94   | 90   | 71   | 34   | 60   | 49   | 45   | 48   | 77   | 84   | 70   | 34   | 69   | 109  |
| 1978 | 31   | 18   | 26   | 15   | 16   | 24   | 129  | 88   | 78   | 42   | 60   | 52   | 15   | 48   | 129  |
| 1979 | 56   | 48   | 45   | 29   | 179  | 59   | 46   | 90   | 161  | 236  | 230  | 134  | 29   | 109  | 236  |
| 1980 | 131  | 83   | 83   | 48   | 92   | 85   | 135  | 135  | 231  | 141  | 86   | 151  | 48   | 117  | 231  |
| 1981 | 157  | 150  | 73   | 76   | 70   | 63   | 49   | 33   | 30   | 100  | 90   | 214  | 30   | 92   | 214  |
| 1982 | 87   | 55   | 34   | 18   | 19   | 184  | 381  | 110  | 53   | 220  | 496  | 269  | 18   | 161  | 496  |
| 1983 | 195  | 119  | 188  | 182  | 575  | 355  | 841  | 115  | 257  | 245  | 154  | 82   | 82   | 276  | 841  |
| 1984 | 58   | 60   | 84   | 89   | 113  | 197  | 92   | 179  | 118  | 83   | 186  | 176  | 58   | 120  | 197  |
| 1985 | 61   | 85   | 64   | 159  | 68   | 44   | 60   | 34   | 37   | 21   | 23   | 14   | 14   | 56   | 159  |
| 1986 | 31   | 74   | 66   | 68   | 131  | 108  | 38   | 54   | 68   | 64   | 64   | 121  | 31   | 74   | 131  |
| 1987 | 60   | 100  | 43   | 68   | 496  | 185  | 110  | 68   | 41   | 75   | 82   | 78   | 41   | 117  | 496  |
| 1988 | 54   | 67   | 60   | 66   | 239  | 150  | 70   | 34   | 25   | 24   | 18   | 19   | 18   | 69   | 239  |
| 1989 | 110  | 188  | 118  | 82   | 167  | 51   | 76   | 135  | 268  | 151  | 80   | 60   | 51   | 124  | 268  |
| 1990 | 223  | 89   | 51   | 103  | 114  | 197  | 184  | 187  | 214  | 258  | 141  | 75   | 51   | 153  | 258  |
| 1991 | 36   | 31   | 23   | 45   | 36   | 150  | 93   | 56   | 29   | 78   | 90   | 108  | 23   | 65   | 150  |
| 1992 | 80   | 66   | 71   | 75   | 410  | 334  | 150  | 167  | 134  | 140  | 123  | 78   | 66   | 152  | 410  |

| Ano  | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. | Mín. | Méd. | Máx. |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1993 | 86   | 98   | 75   | 70   | 221  | 115  | 124  | 77   | 140  | 312  | 84   | 202  | 70   | 134  | 312  |
| 1994 | 73   | 114  | 54   | 44   | 88   | 181  | 172  | 74   | 37   | 67   | 120  | 112  | 37   | 95   | 181  |
| 1995 | 436  | 148  | 79   | 65   | 41   | 60   | 183  | 50   | 89   | 143  | 82   | 63   | 41   | 120  | 436  |
| 1996 | 130  | 213  | 165  | 115  | 44   | 57   | 104  | 52   | 76   | 250  | 140  | 138  | 44   | 124  | 250  |
| 1997 | 128  | 226  | 115  | 47   | 40   | 162  | 129  | 129  | 104  | 371  | 251  | 123  | 40   | 152  | 371  |
| 1998 | 97   | 133  | 170  | 568  | 221  | 77   | 106  | 138  | 313  | 410  | 93   | 60   | 60   | 199  | 568  |
| 1999 | 62   | 120  | 72   | 122  | 81   | 176  | 222  | 49   | 59   | 43   | 31   | 38   | 31   | 90   | 222  |
| 2000 | 50   | 98   | 82   | 43   | 54   | 69   | 112  | 68   | 325  | 236  | 109  | 74   | 43   | 110  | 325  |
| 2001 | 150  | 338  | 149  | 95   | 95   | 111  | 118  | 82   | 77   | 250  | 88   | 93   | 77   | 137  | 338  |
| 2002 | 116  | 104  | 57   | 22   | 162  | 78   | 42   | 67   | 124  | 136  | 176  | 158  | 22   | 104  | 176  |
| 2003 | 73   | 111  | 97   | 54   | 32   | 100  | 107  | 54   | 42   | 60   | 123  | 154  | 32   | 84   | 154  |
| 2004 | 86   | 40   | 37   | 39   | 151  | 148  | 190  | 75   | 51   | 171  | 187  | 62   | 37   | 103  | 190  |
| 2005 | 59   | 31   | 27   | 31   | 84   | 209  | 102  | 60   | 252  | 388  | 158  | 53   | 27   | 121  | 388  |
| 2006 | 57   | 59   | 40   | 26   | 16   | 14   | 16   | 20   | 70   | 64   | 50   | 85   | 14   | 43   | 85   |
| 2007 | 121  | 90   | 117  | 137  | 296  | 115  | 65   | 38   | 22   | 26   | 88   | 91   | 22   | 101  | 296  |
| 2008 | 123  | 47   | 33   | 65   | 107  | 163  | 111  | 182  | 68   | 191  | 171  | 52   | 33   | 109  | 191  |
| 2009 | 47   | 40   | 31   | 21   | 45   | 80   | 253  | 165  | 288  | 277  | 152  | 167  | 21   | 131  | 288  |
| 2010 | 188  | 158  | 128  | 225  | 163  | 90   | 99   | 67   | 32   | 60   | 48   | 220  | 32   | 123  | 225  |
| 2011 | 174  | 279  | 96   | 71   | 42   | 41   | 185  | 389  | 178  | 144  | 111  | 56   | 41   | 147  | 389  |
| 2012 | 71   | 46   | 37   | 97   | 111  | 316  | 137  | 84   | 36   | 59   | 71   | 69   | 36   | 95   | 316  |
| 2013 | 144  | 91   | 211  | 164  | 91   | 426  | 228  | 87   | 115  | 99   | 58   | 76   | 58   | 149  | 426  |
| 2014 | 135  | 60   | 124  | 115  | 131  | 660  | 121  | 60   | 146  | 179  | 92   | 57   | 57   | 157  | 660  |
| 2015 | 130  | 146  | 118  | 73   | 91   | 127  | 345  | 100  | 85   | 182  | 172  | 228  | 73   | 150  | 345  |
| 2016 | 170  | 113  | 130  | 86   | 128  | 147  | 120  | 157  | 99   | 70   | 72   | 113  | 70   | 117  | 170  |
| 2017 | 102  | 108  | 67   | 42   | 121  | 199  | 51   | 53   | 25   | 118  | 221  | 177  | 25   | 107  | 221  |
| 2018 | 210  | 82   | 101  | 78   | 33   | 74   | 60   | 36   | 77   | 160  | 84   | 41   | 33   | 86   | 210  |
| 2019 | 72   | 94   | 107  | 78   | 164  | 216  | 54   | 29   | 29   | 23   | 41   | 55   | 23   | 80   | 216  |
| 2020 | 45   | 31   | 16   | 10   | 27   | 102  | 62   | 147  | 56   | 37   | 22   | 124  | 10   | 57   | 147  |
| 2021 | 218  | 140  | 57   | 23   | 16   | 29   | 28   | 40   | 32   | 152  | 63   | 21   | 16   | 68   | 218  |
| 2022 | 28   | 33   | 72   | 139  | 125  | 230  | 62   | 119  | 174  | 263  | 160  | 108  | 28   | 126  | 263  |
| Mín. | 21   | 18   | 16   | 10   | 16   | 14   | 16   | 14   | 18   | 21   | 18   | 14   | 10   | 33   | 61   |
| Med. | 94   | 94   | 81   | 79   | 106  | 132  | 117  | 89   | 108  | 139  | 108  | 93   | 37   | 103  | 250  |
| Máx. | 436  | 338  | 214  | 568  | 575  | 660  | 841  | 389  | 568  | 470  | 496  | 269  | 82   | 276  | 841  |

## ANEXO 1.2 - VAZÕES DIÁRIAS VERTIDAS UHE SANTA CLARA

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 01/07/2005      | 154                  | 14/07/2009      | 244                  | 12/09/2011      | 130,63               | 09/12/2014      | 0,19                 | 07/03/2018      | 1,35                 |
| 02/07/2005      | 148                  | 15/07/2009      | 170                  | 13/09/2011      | 78,3                 | 14/12/2014      | 0,35                 | 08/03/2018      | 4,57                 |
| 03/07/2005      | 131                  | 16/07/2009      | 123                  | 14/09/2011      | 49,81                | 18/12/2014      | 0,01                 | 09/03/2018      | 3                    |
| 04/07/2005      | 132                  | 17/07/2009      | 98,4                 | 15/09/2011      | 30,86                | 19/12/2014      | 0,29                 | 10/03/2018      | 0,04                 |
| 05/07/2005      | 152                  | 18/07/2009      | 98,8                 | 16/09/2011      | 18,87                | 20/12/2014      | 0,06                 | 14/03/2018      | 1,21                 |
| 06/07/2005      | 148                  | 19/07/2009      | 92,3                 | 17/09/2011      | 10,43                | 21/12/2014      | 3,15                 | 15/03/2018      | 0,46                 |
| 07/07/2005      | 129                  | 20/07/2009      | 65                   | 18/09/2011      | 5,13                 | 22/12/2014      | 4,68                 | 17/03/2018      | 0,04                 |
| 08/07/2005      | 109                  | 21/07/2009      | 41,4                 | 19/09/2011      | 0,72                 | 01/01/2015      | 0,12                 | 18/03/2018      | 0,55                 |
| 09/07/2005      | 107                  | 22/07/2009      | 31,3                 | 27/09/2011      | 2,27                 | 02/01/2015      | 0,02                 | 21/03/2018      | 0,01                 |
| 10/07/2005      | 107                  | 23/07/2009      | 50                   | 29/09/2011      | 3,46                 | 04/01/2015      | 0,56                 | 28/03/2018      | 0,2                  |
| 11/07/2005      | 104                  | 24/07/2009      | 83,2                 | 02/10/2011      | 0,51                 | 05/01/2015      | 0,02                 | 30/03/2018      | 0,04                 |
| 12/07/2005      | 90                   | 25/07/2009      | 80,8                 | 05/10/2011      | 0,55                 | 12/01/2015      | 0,23                 | 08/04/2018      | 0,3                  |
| 13/07/2005      | 90                   | 26/07/2009      | 57,2                 | 09/10/2011      | 5,62                 | 13/01/2015      | 0,06                 | 16/04/2018      | 0,08                 |
| 14/07/2005      | 89                   | 27/07/2009      | 52,8                 | 10/10/2011      | 7,68                 | 16/01/2015      | 0,1                  | 18/04/2018      | 0,45                 |
| 15/07/2005      | 86                   | 28/07/2009      | 89,5                 | 11/10/2011      | 3,85                 | 17/01/2015      | 0,56                 | 07/05/2018      | 0,42                 |
| 16/07/2005      | 89                   | 29/07/2009      | 187                  | 12/10/2011      | 0,06                 | 20/01/2015      | 0,38                 | 08/05/2018      | 0,06                 |
| 17/07/2005      | 99                   | 30/07/2009      | 237                  | 13/10/2011      | 0,32                 | 25/01/2015      | 0,02                 | 15/05/2018      | 0,04                 |
| 18/07/2005      | 107                  | 31/07/2009      | 204                  | 17/10/2011      | 16,69                | 03/02/2015      | 4,45                 | 21/05/2018      | 1,16                 |
| 19/07/2005      | 101                  | 01/08/2009      | 145                  | 18/10/2011      | 40,19                | 04/02/2015      | 4,23                 | 12/06/2018      | 1,5                  |
| 20/07/2005      | 95                   | 02/08/2009      | 116                  | 19/10/2011      | 20,53                | 09/02/2015      | 0,32                 | 24/06/2018      | 2,44                 |
| 21/07/2005      | 74                   | 03/08/2009      | 122                  | 20/10/2011      | 6,28                 | 11/02/2015      | 0,29                 | 26/06/2018      | 0,23                 |
| 22/07/2005      | 60                   | 04/08/2009      | 118                  | 22/10/2011      | 0,02                 | 12/02/2015      | 0,27                 | 27/06/2018      | 2,35                 |
| 23/07/2005      | 75                   | 05/08/2009      | 89,1                 | 25/10/2011      | 4,25                 | 18/02/2015      | 0,45                 | 29/06/2018      | 2,07                 |
| 24/07/2005      | 75                   | 06/08/2009      | 60,8                 | 26/10/2011      | 0,91                 | 20/02/2015      | 0,06                 | 13/07/2018      | 0,5                  |

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 25/07/2005      | 75                   | 07/08/2009      | 39,9                 | 29/10/2011      | 0,33                 | 22/02/2015      | 0,02                 | 14/07/2018      | 4,79                 |
| 26/07/2005      | 34                   | 08/08/2009      | 27,4                 | 08/11/2011      | 0,48                 | 23/02/2015      | 0,11                 | 16/07/2018      | 2,3                  |
| 27/07/2005      | 22                   | 09/08/2009      | 17,8                 | 09/11/2011      | 0,64                 | 24/02/2015      | 0,21                 | 18/07/2018      | 1,34                 |
| 28/07/2005      | 27                   | 10/08/2009      | 7,32                 | 10/11/2011      | 0,09                 | 25/02/2015      | 0,23                 | 20/07/2018      | 1,67                 |
| 29/07/2005      | 17                   | 11/08/2009      | 0,35                 | 11/11/2011      | 0,26                 | 27/02/2015      | 0,81                 | 26/07/2018      | 4,67                 |
| 30/07/2005      | 7                    | 13/08/2009      | 1,34                 | 12/11/2011      | 0,11                 | 01/03/2015      | 0,08                 | 27/07/2018      | 4,85                 |
| 31/07/2005      | 9                    | 14/08/2009      | 1,34                 | 29/11/2011      | 1,97                 | 04/03/2015      | 0,02                 | 18/08/2018      | 0,26                 |
| 01/08/2005      | 8                    | 18/08/2009      | 0,59                 | 08/12/2011      | 2,2                  | 07/03/2015      | 0,02                 | 24/08/2018      | 1,41                 |
| 02/08/2005      | 8                    | 21/08/2009      | 27,8                 | 13/12/2011      | 4,71                 | 11/03/2015      | 0,22                 | 25/08/2018      | 1,33                 |
| 03/08/2005      | 8                    | 22/08/2009      | 39,3                 | 14/12/2011      | 7,38                 | 12/03/2015      | 0,84                 | 30/08/2018      | 3,09                 |
| 04/08/2005      | 8                    | 23/08/2009      | 25,5                 | 15/12/2011      | 3,43                 | 21/03/2015      | 0,38                 | 31/08/2018      | 4,3                  |
| 05/08/2005      | 8                    | 24/08/2009      | 9,44                 | 03/01/2012      | 0,07                 | 26/03/2015      | 0,04                 | 04/09/2018      | 0,11                 |
| 06/08/2005      | 8                    | 25/08/2009      | 0,04                 | 13/01/2012      | 0,54                 | 02/04/2015      | 0,42                 | 06/09/2018      | 0,38                 |
| 07/08/2005      | 8                    | 04/09/2009      | 0,03                 | 14/01/2012      | 0,51                 | 11/04/2015      | 6,18                 | 12/09/2018      | 0,57                 |
| 08/08/2005      | 8                    | 07/09/2009      | 1,01                 | 18/01/2012      | 0,81                 | 12/04/2015      | 6,4                  | 15/09/2018      | 0,02                 |
| 09/08/2005      | 8                    | 08/09/2009      | 100                  | 21/01/2012      | 0,54                 | 28/04/2015      | 2,85                 | 23/09/2018      | 0,02                 |
| 10/08/2005      | 8                    | 09/09/2009      | 448                  | 24/01/2012      | 1,39                 | 29/04/2015      | 3,58                 | 24/09/2018      | 0,17                 |
| 11/08/2005      | 8                    | 10/09/2009      | 463                  | 26/01/2012      | 0,7                  | 02/05/2015      | 0,07                 | 25/09/2018      | 1,84                 |
| 12/08/2005      | 8                    | 11/09/2009      | 422                  | 02/02/2012      | 0,46                 | 16/05/2015      | 0,04                 | 26/09/2018      | 0,32                 |
| 13/08/2005      | 5                    | 12/09/2009      | 324                  | 06/02/2012      | 0,06                 | 19/05/2015      | 4,47                 | 28/09/2018      | 2,41                 |
| 14/08/2005      | 8                    | 13/09/2009      | 227                  | 12/02/2012      | 2                    | 20/05/2015      | 4,66                 | 30/09/2018      | 0,16                 |
| 15/08/2005      | 8                    | 14/09/2009      | 201                  | 13/02/2012      | 0,06                 | 23/05/2015      | 0,49                 | 13/10/2018      | 0,8                  |
| 24/08/2005      | 2                    | 15/09/2009      | 187                  | 19/02/2012      | 2                    | 02/06/2015      | 1,36                 | 19/10/2018      | 0,06                 |
| 25/08/2005      | 4                    | 16/09/2009      | 112                  | 20/02/2012      | 6                    | 03/06/2015      | 2,61                 | 23/10/2018      | 4,89                 |
| 26/08/2005      | 8                    | 17/09/2009      | 65,1                 | 28/02/2012      | 2                    | 12/06/2015      | 0,03                 | 24/10/2018      | 4,61                 |
| 27/08/2005      | 8                    | 18/09/2009      | 43,4                 | 01/03/2012      | 0,5                  | 17/06/2015      | 0,89                 | 31/10/2018      | 1                    |
| 28/08/2005      | 8                    | 19/09/2009      | 79,4                 | 05/03/2012      | 0,26                 | 20/06/2015      | 0,04                 | 06/11/2018      | 0,2                  |
| 29/08/2005      | 8                    | 20/09/2009      | 102                  | 06/03/2012      | 0,18                 | 21/06/2015      | 0,11                 | 07/11/2018      | 1,59                 |
| 30/08/2005      | 8                    | 21/09/2009      | 75,6                 | 14/03/2012      | 0,14                 | 25/06/2015      | 1,28                 | 18/11/2018      | 0,33                 |
| 31/08/2005      | 8                    | 22/09/2009      | 46,5                 | 29/03/2012      | 2                    | 06/07/2015      | 0,39                 | 25/11/2018      | 0,65                 |
| 01/09/2005      | 8                    | 23/09/2009      | 132                  | 04/04/2012      | 4,77                 | 08/07/2015      | 1,74                 | 07/12/2018      | 1,81                 |
| 02/09/2005      | 8                    | 24/09/2009      | 271                  | 05/04/2012      | 4,64                 | 09/07/2015      | 126                  | 12/12/2018      | 0,79                 |
| 03/09/2005      | 8                    | 25/09/2009      | 265                  | 12/04/2012      | 1,02                 | 10/07/2015      | 197                  | 15/12/2018      | 0,05                 |
| 04/09/2005      | 8                    | 26/09/2009      | 201                  | 02/05/2012      | 0,54                 | 11/07/2015      | 211                  | 19/12/2018      | 2,23                 |
| 05/09/2005      | 8                    | 27/09/2009      | 138                  | 03/05/2012      | 10,7                 | 12/07/2015      | 270                  | 20/12/2018      | 5,27                 |
| 06/09/2005      | 8                    | 28/09/2009      | 111                  | 04/05/2012      | 9,38                 | 13/07/2015      | 360                  | 21/12/2018      | 0,42                 |
| 07/09/2005      | 8                    | 29/09/2009      | 110                  | 05/05/2012      | 1                    | 14/07/2015      | 363                  | 22/12/2018      | 0,26                 |
| 08/09/2005      | 8                    | 30/09/2009      | 87,5                 | 11/05/2012      | 3,07                 | 15/07/2015      | 422                  | 26/12/2018      | 5,77                 |
| 09/09/2005      | 8                    | 01/10/2009      | 60,9                 | 12/05/2012      | 4,11                 | 16/07/2015      | 454                  | 27/12/2018      | 6,93                 |
| 10/09/2005      | 8                    | 02/10/2009      | 41,2                 | 28/05/2012      | 1                    | 17/07/2015      | 516                  | 28/12/2018      | 0,26                 |
| 11/09/2005      | 8                    | 03/10/2009      | 29,9                 | 29/05/2012      | 1                    | 18/07/2015      | 515                  | 30/12/2018      | 0,4                  |
| 12/09/2005      | 8                    | 04/10/2009      | 20,7                 | 03/06/2012      | 0,88                 | 19/07/2015      | 448                  | 31/12/2018      | 2,76                 |
| 13/09/2005      | 81                   | 05/10/2009      | 11,8                 | 04/06/2012      | 66,3                 | 20/07/2015      | 354                  | 01/01/2019      | 7,01                 |
| 14/09/2005      | 181                  | 06/10/2009      | 15,6                 | 05/06/2012      | 531                  | 21/07/2015      | 332                  | 02/01/2019      | 3,6                  |
| 15/09/2005      | 291                  | 07/10/2009      | 30,1                 | 06/06/2012      | 555                  | 22/07/2015      | 297                  | 03/01/2019      | 0,2                  |
| 16/09/2005      | 258                  | 08/10/2009      | 32,3                 | 07/06/2012      | 547                  | 23/07/2015      | 227                  | 05/01/2019      | 0,11                 |
| 17/09/2005      | 189                  | 09/10/2009      | 31,6                 | 08/06/2012      | 355                  | 24/07/2015      | 180                  | 08/01/2019      | 1,75                 |
| 18/09/2005      | 138                  | 10/10/2009      | 20,3                 | 09/06/2012      | 218                  | 25/07/2015      | 176                  | 09/01/2019      | 4,58                 |
| 19/09/2005      | 107                  | 11/10/2009      | 4,82                 | 10/06/2012      | 163                  | 26/07/2015      | 170                  | 10/01/2019      | 2,75                 |
| 20/09/2005      | 89                   | 12/10/2009      | 88,2                 | 11/06/2012      | 185                  | 27/07/2015      | 133                  | 11/01/2019      | 2,57                 |
| 21/09/2005      | 64                   | 13/10/2009      | 199                  | 12/06/2012      | 211                  | 28/07/2015      | 87,3                 | 14/01/2019      | 2,95                 |
| 22/09/2005      | 45                   | 14/10/2009      | 143                  | 13/06/2012      | 171                  | 29/07/2015      | 64,2                 | 15/01/2019      | 5,37                 |
| 23/09/2005      | 37                   | 15/10/2009      | 167                  | 14/06/2012      | 108                  | 30/07/2015      | 47,9                 | 16/01/2019      | 1,68                 |
| 24/09/2005      | 28                   | 16/10/2009      | 218                  | 15/06/2012      | 69,7                 | 31/07/2015      | 38,8                 | 22/01/2019      | 2,29                 |
| 25/09/2005      | 24                   | 17/10/2009      | 231                  | 16/06/2012      | 46                   | 01/08/2015      | 25,7                 | 23/01/2019      | 2,33                 |
| 26/09/2005      | 48                   | 18/10/2009      | 278                  | 17/06/2012      | 30,8                 | 02/08/2015      | 15,9                 | 24/01/2019      | 1,69                 |
| 27/09/2005      | 97                   | 19/10/2009      | 270                  | 18/06/2012      | 69,8                 | 03/08/2015      | 10,9                 | 25/01/2019      | 2,46                 |
| 28/09/2005      | 80                   | 20/10/2009      | 262                  | 19/06/2012      | 255                  | 04/08/2015      | 3,76                 | 27/01/2019      | 0,06                 |
| 29/09/2005      | 48                   | 21/10/2009      | 227                  | 20/06/2012      | 295                  | 05/08/2015      | 0,06                 | 29/01/2019      | 2,26                 |

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 30/09/2005      | 36                   | 22/10/2009      | 227                  | 21/06/2012      | 256                  | 19/08/2015      | 0,05                 | 05/02/2019      | 0,04                 |
| 01/10/2005      | 70                   | 23/10/2009      | 207                  | 22/06/2012      | 192                  | 21/08/2015      | 0,15                 | 06/02/2019      | 1,83                 |
| 02/10/2005      | 107                  | 24/10/2009      | 175                  | 23/06/2012      | 160                  | 24/08/2015      | 0,02                 | 11/02/2019      | 1,41                 |
| 03/10/2005      | 147                  | 25/10/2009      | 219                  | 24/06/2012      | 127                  | 27/08/2015      | 0,01                 | 15/02/2019      | 0,33                 |
| 04/10/2005      | 130                  | 26/10/2009      | 214                  | 25/06/2012      | 93,5                 | 29/08/2015      | 3,08                 | 27/03/2019      | 0,74                 |
| 05/10/2005      | 343                  | 27/10/2009      | 230                  | 26/06/2012      | 67,4                 | 30/08/2015      | 4,92                 | 28/03/2019      | 0,73                 |
| 06/10/2005      | 469                  | 28/10/2009      | 200                  | 27/06/2012      | 48                   | 07/09/2015      | 0,02                 | 13/04/2019      | 0,25                 |
| 07/10/2005      | 488                  | 29/10/2009      | 168                  | 28/06/2012      | 34,1                 | 16/09/2015      | 0,02                 | 14/04/2019      | 0,09                 |
| 08/10/2005      | 603                  | 30/10/2009      | 142                  | 29/06/2012      | 23,1                 | 21/09/2015      | 0,06                 | 24/04/2019      | 1                    |
| 09/10/2005      | 571                  | 31/10/2009      | 119                  | 30/06/2012      | 14,2                 | 24/09/2015      | 0,13                 | 26/04/2019      | 1                    |
| 10/10/2005      | 404                  | 01/11/2009      | 102                  | 01/07/2012      | 6,83                 | 25/09/2015      | 0,34                 | 02/05/2019      | 0,06                 |
| 11/10/2005      | 334                  | 02/11/2009      | 88,4                 | 02/07/2012      | 1,08                 | 03/10/2015      | 0,05                 | 04/05/2019      | 0,57                 |
| 12/10/2005      | 237                  | 03/11/2009      | 76,9                 | 03/07/2012      | 0,83                 | 05/10/2015      | 0,25                 | 06/05/2019      | 0,37                 |
| 13/10/2005      | 216                  | 04/11/2009      | 66,5                 | 04/07/2012      | 3,31                 | 08/10/2015      | 1,23                 | 11/05/2019      | 1,04                 |
| 14/10/2005      | 181                  | 05/11/2009      | 56,3                 | 05/07/2012      | 15,7                 | 09/10/2015      | 0,28                 | 24/05/2019      | 2,64                 |
| 15/10/2005      | 117                  | 06/11/2009      | 48,9                 | 06/07/2012      | 1,46                 | 10/10/2015      | 1,9                  | 26/05/2019      | 2,96                 |
| 16/10/2005      | 183                  | 07/11/2009      | 51,4                 | 07/07/2012      | 0,13                 | 11/10/2015      | 3,96                 | 28/05/2019      | 14,2                 |
| 17/10/2005      | 329                  | 08/11/2009      | 64,8                 | 08/07/2012      | 10,1                 | 12/10/2015      | 34,5                 | 29/05/2019      | 85,9                 |
| 18/10/2005      | 361                  | 09/11/2009      | 76,4                 | 09/07/2012      | 8,06                 | 13/10/2015      | 201                  | 30/05/2019      | 138                  |
| 19/10/2005      | 330                  | 10/11/2009      | 81,5                 | 10/07/2012      | 18,2                 | 14/10/2015      | 199                  | 31/05/2019      | 369                  |
| 20/10/2005      | 290                  | 11/11/2009      | 72,1                 | 11/07/2012      | 21,9                 | 15/10/2015      | 142                  | 01/06/2019      | 644                  |
| 21/10/2005      | 176                  | 12/11/2009      | 67,3                 | 12/07/2012      | 2,07                 | 16/10/2015      | 101                  | 02/06/2019      | 565                  |
| 22/10/2005      | 130                  | 13/11/2009      | 52,8                 | 27/07/2012      | 6,72                 | 17/10/2015      | 78,1                 | 03/06/2019      | 514                  |
| 23/10/2005      | 131                  | 14/11/2009      | 34,2                 | 28/07/2012      | 5,55                 | 18/10/2015      | 46,1                 | 04/06/2019      | 401                  |
| 24/10/2005      | 77                   | 15/11/2009      | 31,1                 | 31/07/2012      | 0,9                  | 19/10/2015      | 25,4                 | 05/06/2019      | 273                  |
| 25/10/2005      | 80                   | 16/11/2009      | 35,5                 | 01/08/2012      | 42,4                 | 20/10/2015      | 12,5                 | 06/06/2019      | 175                  |
| 26/10/2005      | 96                   | 17/11/2009      | 47,5                 | 02/08/2012      | 50,4                 | 21/10/2015      | 5,49                 | 07/06/2019      | 126                  |
| 27/10/2005      | 89                   | 18/11/2009      | 39,6                 | 03/08/2012      | 24,3                 | 22/10/2015      | 3,56                 | 08/06/2019      | 94                   |
| 28/10/2005      | 257                  | 19/11/2009      | 27,2                 | 04/08/2012      | 7,95                 | 23/10/2015      | 9,32                 | 09/06/2019      | 79                   |
| 29/10/2005      | 474                  | 20/11/2009      | 21,6                 | 05/08/2012      | 0,26                 | 24/10/2015      | 7,85                 | 10/06/2019      | 65                   |
| 30/10/2005      | 415                  | 21/11/2009      | 111                  | 15/08/2012      | 0,47                 | 25/10/2015      | 0,5                  | 11/06/2019      | 42,5                 |
| 31/10/2005      | 375                  | 22/11/2009      | 183                  | 16/08/2012      | 3,08                 | 26/10/2015      | 0,2                  | 12/06/2019      | 26,1                 |
| 01/11/2005      | 296                  | 23/11/2009      | 210                  | 19/09/2012      | 2                    | 02/11/2015      | 12,7                 | 13/06/2019      | 14,4                 |
| 02/11/2005      | 238                  | 24/11/2009      | 185                  | 01/10/2012      | 4,36                 | 03/11/2015      | 44,5                 | 14/06/2019      | 6,05                 |
| 03/11/2005      | 198                  | 25/11/2009      | 146                  | 02/10/2012      | 3,31                 | 04/11/2015      | 45,7                 | 15/06/2019      | 0,66                 |
| 04/11/2005      | 173                  | 26/11/2009      | 117                  | 03/10/2012      | 0,12                 | 05/11/2015      | 56,3                 | 18/06/2019      | 1,94                 |
| 05/11/2005      | 145                  | 27/11/2009      | 109                  | 05/10/2012      | 0,02                 | 06/11/2015      | 84,3                 | 28/06/2019      | 2                    |
| 06/11/2005      | 136                  | 28/11/2009      | 92,8                 | 11/10/2012      | 0,09                 | 07/11/2015      | 68,9                 | 29/06/2019      | 4                    |
| 07/11/2005      | 126                  | 29/11/2009      | 79,1                 | 18/10/2012      | 0,22                 | 08/11/2015      | 51,7                 | 09/07/2019      | 2                    |
| 08/11/2005      | 160                  | 30/11/2009      | 74,6                 | 22/10/2012      | 0,6                  | 09/11/2015      | 79,7                 | 28/07/2019      | 3                    |
| 09/11/2005      | 144                  | 01/12/2009      | 67,6                 | 23/10/2012      | 0,92                 | 10/11/2015      | 65,2                 | 14/08/2019      | 3,45                 |
| 10/11/2005      | 120                  | 02/12/2009      | 57,1                 | 25/10/2012      | 1,92                 | 11/11/2015      | 57,2                 | 15/08/2019      | 4                    |
| 11/11/2005      | 92                   | 03/12/2009      | 68,9                 | 26/10/2012      | 0,3                  | 12/11/2015      | 66,7                 | 03/10/2019      | 2                    |
| 12/11/2005      | 89                   | 04/12/2009      | 80,2                 | 03/11/2012      | 0,74                 | 13/11/2015      | 49,3                 | 04/10/2019      | 3                    |
| 13/11/2005      | 81                   | 05/12/2009      | 102                  | 07/11/2012      | 0,04                 | 14/11/2015      | 39,7                 | 11/10/2019      | 1                    |
| 14/11/2005      | 25                   | 06/12/2009      | 95,6                 | 08/11/2012      | 3,43                 | 15/11/2015      | 22,5                 | 17/10/2019      | 2                    |
| 15/11/2005      | 1                    | 07/12/2009      | 88,6                 | 09/11/2012      | 3,62                 | 16/11/2015      | 12,5                 | 20/10/2019      | 2                    |
| 16/11/2005      | 3                    | 08/12/2009      | 87                   | 27/11/2012      | 0,53                 | 17/11/2015      | 20,1                 | 22/10/2019      | 5                    |
| 17/11/2005      | 8                    | 09/12/2009      | 78,8                 | 30/11/2012      | 0,04                 | 18/11/2015      | 39,9                 | 23/10/2019      | 7                    |
| 18/11/2005      | 8                    | 10/12/2009      | 47,5                 | 05/12/2012      | 0,2                  | 19/11/2015      | 51,2                 | 24/10/2019      | 4                    |
| 19/11/2005      | 8                    | 11/12/2009      | 27,3                 | 08/12/2012      | 0,02                 | 20/11/2015      | 52,7                 | 27/10/2019      | 2                    |
| 27/11/2005      | 1                    | 12/12/2009      | 24,9                 | 10/12/2012      | 0,14                 | 21/11/2015      | 64,6                 | 04/11/2019      | 1                    |
| 08/12/2005      | 5                    | 13/12/2009      | 119                  | 14/12/2012      | 0,16                 | 22/11/2015      | 76,2                 | 13/11/2019      | 1                    |
| 10/12/2005      | 1                    | 14/12/2009      | 102                  | 15/12/2012      | 0,65                 | 23/11/2015      | 45,4                 | 20/11/2019      | 1                    |
| 01/01/2006      | 3                    | 15/12/2009      | 42,8                 | 19/12/2012      | 0,71                 | 24/11/2015      | 41,8                 | 27/11/2019      | 1                    |
| 07/01/2006      | 4                    | 16/12/2009      | 12,1                 | 20/12/2012      | 0,69                 | 25/11/2015      | 42,6                 | 12/12/2019      | 2                    |
| 16/01/2006      | 1                    | 17/12/2009      | 14                   | 22/12/2012      | 0,1                  | 26/11/2015      | 31,8                 | 13/12/2019      | 7                    |
| 17/01/2006      | 7                    | 18/12/2009      | 38                   | 25/12/2012      | 0,03                 | 27/11/2015      | 19,8                 | 14/12/2019      | 4                    |
| 18/01/2006      | 7                    | 19/12/2009      | 62                   | 01/01/2013      | 1,44                 | 28/11/2015      | 25,5                 | 05/01/2020      | 1                    |

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 05/02/2006      | 1                    | 20/12/2009      | 40                   | 06/01/2013      | 0,09                 | 29/11/2015      | 42,9                 | 10/01/2020      | 1                    |
| 20/02/2006      | 4                    | 21/12/2009      | 19                   | 08/01/2013      | 3,98                 | 30/11/2015      | 38,9                 | 07/02/2020      | 1                    |
| 21/02/2006      | 7                    | 22/12/2009      | 4                    | 09/01/2013      | 175                  | 01/12/2015      | 32,1                 | 16/04/2020      | 2                    |
| 22/02/2006      | 7                    | 23/12/2009      | 5                    | 10/01/2013      | 193                  | 02/12/2015      | 48,1                 | 05/05/2020      | 1                    |
| 23/02/2006      | 3                    | 24/12/2009      | 2                    | 11/01/2013      | 134                  | 03/12/2015      | 165                  | 07/05/2020      | 4                    |
| 24/03/2006      | 2                    | 25/12/2009      | 19                   | 12/01/2013      | 68,6                 | 04/12/2015      | 257                  | 08/05/2020      | 7                    |
| 25/03/2006      | 7                    | 26/12/2009      | 35                   | 13/01/2013      | 31,1                 | 05/12/2015      | 302                  | 09/05/2020      | 3                    |
| 02/04/2006      | 1                    | 27/12/2009      | 82                   | 14/01/2013      | 10,4                 | 06/12/2015      | 241                  | 12/05/2020      | 1                    |
| 25/04/2006      | 1                    | 28/12/2009      | 101                  | 15/01/2013      | 3,35                 | 07/12/2015      | 183                  | 22/05/2020      | 1                    |
| 01/05/2006      | 2                    | 29/12/2009      | 105                  | 16/01/2013      | 2,22                 | 08/12/2015      | 140                  | 20/08/2020      | 181                  |
| 11/05/2006      | 3                    | 30/12/2009      | 71,7                 | 17/01/2013      | 4,66                 | 09/12/2015      | 101                  | 21/08/2020      | 322                  |
| 25/06/2006      | 1                    | 31/12/2009      | 47,5                 | 18/01/2013      | 0,16                 | 10/12/2015      | 118                  | 22/08/2020      | 222                  |
| 20/08/2006      | 3                    | 01/01/2010      | 50,5                 | 01/02/2013      | 2,03                 | 11/12/2015      | 152                  | 23/08/2020      | 130                  |
| 21/08/2006      | 6                    | 02/01/2010      | 38,6                 | 02/02/2013      | 0,84                 | 12/12/2015      | 130                  | 24/08/2020      | 79                   |
| 26/08/2006      | 1                    | 03/01/2010      | 26,9                 | 14/02/2013      | 4,9                  | 13/12/2015      | 96,3                 | 25/08/2020      | 48                   |
| 09/09/2006      | 2                    | 04/01/2010      | 27,5                 | 15/02/2013      | 5,02                 | 14/12/2015      | 89,3                 | 26/08/2020      | 27                   |
| 23/09/2006      | 1                    | 05/01/2010      | 26,3                 | 21/02/2013      | 7,17                 | 15/12/2015      | 74,1                 | 27/08/2020      | 11                   |
| 01/10/2006      | 2                    | 06/01/2010      | 17,2                 | 22/02/2013      | 34,3                 | 16/12/2015      | 60,4                 | 28/08/2020      | 1                    |
| 21/10/2006      | 5                    | 07/01/2010      | 5,01                 | 23/02/2013      | 35,9                 | 17/12/2015      | 40,8                 | 01/09/2020      | 2                    |
| 01/11/2006      | 3                    | 12/01/2010      | 2,65                 | 24/02/2013      | 23,3                 | 18/12/2015      | 25,7                 | 03/09/2020      | 2                    |
| 04/11/2006      | 3                    | 13/01/2010      | 96,8                 | 25/02/2013      | 13,3                 | 19/12/2015      | 22,8                 | 07/09/2020      | 4                    |
| 05/11/2006      | 1                    | 14/01/2010      | 180                  | 26/02/2013      | 6,89                 | 20/12/2015      | 41,8                 | 08/09/2020      | 4                    |
| 11/11/2006      | 5                    | 15/01/2010      | 150                  | 27/02/2013      | 7,4                  | 21/12/2015      | 48,4                 | 09/09/2020      | 2                    |
| 12/11/2006      | 7                    | 16/01/2010      | 91,6                 | 28/02/2013      | 15                   | 22/12/2015      | 31,4                 | 10/09/2020      | 3                    |
| 13/11/2006      | 7                    | 17/01/2010      | 50,5                 | 01/03/2013      | 12,1                 | 23/12/2015      | 17,3                 | 11/09/2020      | 3                    |
| 14/11/2006      | 5                    | 18/01/2010      | 28,1                 | 02/03/2013      | 6,22                 | 24/12/2015      | 8,93                 | 14/09/2020      | 4                    |
| 15/11/2006      | 3                    | 19/01/2010      | 16,8                 | 03/03/2013      | 0,14                 | 25/12/2015      | 5,92                 | 15/09/2020      | 5                    |
| 18/11/2006      | 1                    | 20/01/2010      | 15,6                 | 06/03/2013      | 0,94                 | 26/12/2015      | 1,87                 | 16/09/2020      | 2                    |
| 22/11/2006      | 4                    | 21/01/2010      | 31,6                 | 07/03/2013      | 17,6                 | 28/12/2015      | 7,4                  | 25/01/2021      | 57                   |
| 23/11/2006      | 7                    | 22/01/2010      | 52,5                 | 08/03/2013      | 24,3                 | 29/12/2015      | 66                   | 26/01/2021      | 237                  |
| 28/11/2006      | 4                    | 23/01/2010      | 62,7                 | 09/03/2013      | 16,5                 | 30/12/2015      | 64,6                 | 27/01/2021      | 285                  |
| 29/11/2006      | 7                    | 24/01/2010      | 64,8                 | 10/03/2013      | 18,6                 | 31/12/2015      | 53,1                 | 28/01/2021      | 227                  |
| 01/12/2006      | 2                    | 25/01/2010      | 54,9                 | 11/03/2013      | 47,4                 | 01/01/2016      | 50,8                 | 29/01/2021      | 194                  |
| 02/12/2006      | 2                    | 26/01/2010      | 41,2                 | 12/03/2013      | 89,1                 | 02/01/2016      | 59,8                 | 30/01/2021      | 207                  |
| 06/12/2006      | 1                    | 27/01/2010      | 37                   | 13/03/2013      | 304                  | 03/01/2016      | 66,3                 | 31/01/2021      | 257                  |
| 12/12/2006      | 2                    | 28/01/2010      | 49,7                 | 14/03/2013      | 408                  | 04/01/2016      | 70,1                 | 01/02/2021      | 279                  |
| 20/12/2006      | 1                    | 29/01/2010      | 66,8                 | 15/03/2013      | 359                  | 05/01/2016      | 52,3                 | 02/02/2021      | 224                  |
| 28/12/2006      | 1                    | 30/01/2010      | 52,2                 | 16/03/2013      | 258                  | 06/01/2016      | 47,5                 | 03/02/2021      | 167                  |
| 29/12/2006      | 4                    | 31/01/2010      | 32,3                 | 17/03/2013      | 188                  | 07/01/2016      | 64,8                 | 04/02/2021      | 129                  |
| 11/01/2007      | 1                    | 01/02/2010      | 30,7                 | 18/03/2013      | 131                  | 08/01/2016      | 90                   | 05/02/2021      | 101                  |
| 13/01/2007      | 1                    | 02/02/2010      | 37,7                 | 19/03/2013      | 90,9                 | 09/01/2016      | 116                  | 06/02/2021      | 76                   |
| 17/01/2007      | 1                    | 03/02/2010      | 23,3                 | 20/03/2013      | 70,7                 | 10/01/2016      | 113                  | 07/02/2021      | 61                   |
| 19/01/2007      | 2                    | 04/02/2010      | 5,01                 | 21/03/2013      | 100                  | 11/01/2016      | 125                  | 08/02/2021      | 40                   |
| 24/01/2007      | 1                    | 17/02/2010      | 3,59                 | 22/03/2013      | 123                  | 12/01/2016      | 165                  | 09/02/2021      | 24                   |
| 08/02/2007      | 6                    | 18/02/2010      | 31,5                 | 23/03/2013      | 100                  | 13/01/2016      | 150                  | 10/02/2021      | 12                   |
| 09/02/2007      | 7                    | 19/02/2010      | 35,8                 | 24/03/2013      | 77,4                 | 14/01/2016      | 117                  | 11/02/2021      | 4                    |
| 10/02/2007      | 3                    | 20/02/2010      | 25,2                 | 25/03/2013      | 148                  | 15/01/2016      | 77,8                 | 24/02/2022      | 1                    |
| 12/02/2007      | 2                    | 21/02/2010      | 11,6                 | 26/03/2013      | 156                  | 16/01/2016      | 47,6                 | 24/04/2022      | 41                   |
| 25/02/2007      | 2                    | 22/02/2010      | 8,48                 | 27/03/2013      | 110                  | 17/01/2016      | 25,6                 | 25/04/2022      | 150                  |
| 26/02/2007      | 6                    | 23/02/2010      | 16,7                 | 28/03/2013      | 71,8                 | 18/01/2016      | 10,3                 | 26/04/2022      | 117                  |
| 02/03/2007      | 1                    | 24/02/2010      | 20,1                 | 29/03/2013      | 46,4                 | 19/01/2016      | 5,34                 | 27/04/2022      | 76                   |
| 03/03/2007      | 1                    | 25/02/2010      | 12,6                 | 30/03/2013      | 30,6                 | 20/01/2016      | 7,98                 | 28/04/2022      | 46                   |
| 06/03/2007      | 1                    | 26/02/2010      | 4,05                 | 31/03/2013      | 19,7                 | 21/01/2016      | 7,97                 | 29/04/2022      | 29                   |
| 13/03/2007      | 1                    | 01/03/2010      | 0,12                 | 01/04/2013      | 11,2                 | 22/01/2016      | 3,23                 | 30/04/2022      | 22                   |
| 15/03/2007      | 5                    | 02/03/2010      | 0,57                 | 02/04/2013      | 8,41                 | 26/01/2016      | 4,97                 | 01/05/2022      | 26                   |
| 16/03/2007      | 1                    | 03/03/2010      | 0,02                 | 03/04/2013      | 6,63                 | 09/02/2016      | 0,16                 | 02/05/2022      | 25                   |
| 17/03/2007      | 1                    | 06/03/2010      | 0,02                 | 04/04/2013      | 1,75                 | 12/02/2016      | 1,43                 | 03/05/2022      | 22                   |
| 18/03/2007      | 2                    | 13/03/2010      | 1,56                 | 05/04/2013      | 59,4                 | 16/02/2016      | 0,03                 | 04/05/2022      | 93                   |
| 21/03/2007      | 1                    | 14/03/2010      | 3,16                 | 06/04/2013      | 131                  | 18/02/2016      | 0,24                 | 05/05/2022      | 119                  |

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 26/03/2007      | 2                    | 22/03/2010      | 0,83                 | 07/04/2013      | 104                  | 01/03/2016      | 6,51                 | 06/05/2022      | 83                   |
| 27/03/2007      | 3                    | 23/03/2010      | 0,16                 | 08/04/2013      | 54,9                 | 02/03/2016      | 14,9                 | 07/05/2022      | 73                   |
| 06/04/2007      | 1                    | 29/03/2010      | 29,8                 | 09/04/2013      | 29,8                 | 03/03/2016      | 13,9                 | 08/05/2022      | 77                   |
| 08/04/2007      | 1                    | 30/03/2010      | 71                   | 10/04/2013      | 18,7                 | 04/03/2016      | 15,3                 | 09/05/2022      | 31                   |
| 09/04/2007      | 5                    | 31/03/2010      | 49                   | 11/04/2013      | 11,1                 | 05/03/2016      | 6,19                 | 10/05/2022      | 10                   |
| 10/04/2007      | 8                    | 01/04/2010      | 28,2                 | 12/04/2013      | 30,1                 | 06/03/2016      | 0,04                 | 11/05/2022      | 2                    |
| 11/04/2007      | 8                    | 02/04/2010      | 14,8                 | 13/04/2013      | 250                  | 15/03/2016      | 2,06                 | 12/05/2022      | 1                    |
| 12/04/2007      | 8                    | 03/04/2010      | 2,7                  | 14/04/2013      | 162                  | 16/03/2016      | 2,97                 | 14/05/2022      | 3                    |
| 13/04/2007      | 8                    | 06/04/2010      | 5,29                 | 15/04/2013      | 92,4                 | 18/03/2016      | 1,95                 | 15/05/2022      | 11                   |
| 15/04/2007      | 8                    | 07/04/2010      | 7,98                 | 16/04/2013      | 52                   | 25/03/2016      | 0,98                 | 16/05/2022      | 4                    |
| 16/04/2007      | 8                    | 08/04/2010      | 5,26                 | 17/04/2013      | 32,5                 | 26/03/2016      | 0,34                 | 02/06/2022      | 48                   |
| 17/04/2007      | 8                    | 12/04/2010      | 0,75                 | 18/04/2013      | 21,1                 | 27/03/2016      | 4,79                 | 03/06/2022      | 418                  |
| 18/04/2007      | 8                    | 22/04/2010      | 0,07                 | 19/04/2013      | 10,2                 | 29/03/2016      | 0,63                 | 04/06/2022      | 457                  |
| 19/04/2007      | 8                    | 24/04/2010      | 0,9                  | 20/04/2013      | 1,4                  | 07/04/2016      | 0,42                 | 05/06/2022      | 432                  |
| 20/04/2007      | 8                    | 26/04/2010      | 324                  | 06/05/2013      | 2,22                 | 24/04/2016      | 6,37                 | 06/06/2022      | 288                  |
| 21/04/2007      | 8                    | 27/04/2010      | 729                  | 22/05/2013      | 2                    | 25/04/2016      | 4,06                 | 07/06/2022      | 208                  |
| 22/04/2007      | 8                    | 28/04/2010      | 543                  | 01/06/2013      | 0,82                 | 26/04/2016      | 7,61                 | 08/06/2022      | 173                  |
| 23/04/2007      | 8                    | 29/04/2010      | 454                  | 02/06/2013      | 0,64                 | 27/04/2016      | 7,62                 | 09/06/2022      | 136                  |
| 24/04/2007      | 8                    | 30/04/2010      | 316                  | 08/06/2013      | 0,06                 | 28/04/2016      | 4,56                 | 10/06/2022      | 118                  |
| 25/04/2007      | 8                    | 01/05/2010      | 207                  | 18/06/2013      | 0,77                 | 09/05/2016      | 2,39                 | 11/06/2022      | 107                  |
| 26/04/2007      | 5                    | 02/05/2010      | 147                  | 19/06/2013      | 7,88                 | 10/05/2016      | 2,96                 | 12/06/2022      | 86                   |
| 27/04/2007      | 72                   | 03/05/2010      | 106                  | 20/06/2013      | 8,05                 | 11/05/2016      | 0,52                 | 13/06/2022      | 62                   |
| 28/04/2007      | 238                  | 04/05/2010      | 78,1                 | 21/06/2013      | 635                  | 23/05/2016      | 8,56                 | 14/06/2022      | 43                   |
| 29/04/2007      | 183                  | 05/05/2010      | 57,6                 | 22/06/2013      | 1100                 | 24/05/2016      | 35,6                 | 15/06/2022      | 30                   |
| 30/04/2007      | 117                  | 06/05/2010      | 39,5                 | 23/06/2013      | 987                  | 25/05/2016      | 26,3                 | 16/06/2022      | 19                   |
| 01/05/2007      | 88                   | 07/05/2010      | 28,9                 | 24/06/2013      | 1010                 | 26/05/2016      | 11,2                 | 17/06/2022      | 14                   |
| 02/05/2007      | 73                   | 08/05/2010      | 27,6                 | 25/06/2013      | 995                  | 27/05/2016      | 6,94                 | 18/06/2022      | 22                   |
| 03/05/2007      | 67                   | 09/05/2010      | 28,2                 | 26/06/2013      | 787                  | 28/05/2016      | 14,3                 | 19/06/2022      | 31                   |
| 04/05/2007      | 49                   | 10/05/2010      | 22                   | 27/06/2013      | 684                  | 29/05/2016      | 19,1                 | 20/06/2022      | 23                   |
| 05/05/2007      | 37                   | 11/05/2010      | 16                   | 28/06/2013      | 543                  | 30/05/2016      | 38,4                 | 21/06/2022      | 11                   |
| 06/05/2007      | 31                   | 12/05/2010      | 15                   | 29/06/2013      | 415                  | 31/05/2016      | 69,2                 | 22/06/2022      | 2                    |
| 07/05/2007      | 29                   | 13/05/2010      | 8,65                 | 30/06/2013      | 390                  | 01/06/2016      | 75,8                 | 20/09/2022      | 10                   |
| 08/05/2007      | 95                   | 14/05/2010      | 1,27                 | 01/07/2013      | 318                  | 02/06/2016      | 73,1                 | 21/09/2022      | 24                   |
| 09/05/2007      | 242                  | 18/05/2010      | 6,74                 | 02/07/2013      | 256                  | 03/06/2016      | 56,4                 | 22/09/2022      | 22                   |
| 10/05/2007      | 265                  | 19/05/2010      | 87                   | 03/07/2013      | 208                  | 04/06/2016      | 37,1                 | 23/09/2022      | 15                   |
| 11/05/2007      | 215                  | 20/05/2010      | 93,1                 | 04/07/2013      | 170                  | 05/06/2016      | 22,8                 | 24/09/2022      | 6                    |
| 12/05/2007      | 155                  | 21/05/2010      | 48,5                 | 05/07/2013      | 139                  | 06/06/2016      | 16,8                 | 25/09/2022      | 2                    |
| 13/05/2007      | 117                  | 22/05/2010      | 24                   | 06/07/2013      | 114                  | 07/06/2016      | 7,03                 | 26/09/2022      | 70                   |
| 14/05/2007      | 103                  | 23/05/2010      | 9,02                 | 07/07/2013      | 92,1                 | 08/06/2016      | 0,62                 | 27/09/2022      | 158                  |
| 15/05/2007      | 86                   | 24/05/2010      | 0,19                 | 08/07/2013      | 73,2                 | 09/06/2016      | 0,69                 | 28/09/2022      | 163                  |
| 16/05/2007      | 36                   | 26/05/2010      | 4,95                 | 09/07/2013      | 57,5                 | 13/06/2016      | 0,33                 | 29/09/2022      | 121                  |
| 17/05/2007      | 27                   | 27/05/2010      | 5,02                 | 10/07/2013      | 44,4                 | 17/06/2016      | 0,09                 | 30/09/2022      | 81                   |
| 18/05/2007      | 64                   | 20/06/2010      | 0,07                 | 11/07/2013      | 33,7                 | 21/06/2016      | 0,48                 | 01/10/2022      | 57                   |
| 19/05/2007      | 218                  | 22/06/2010      | 2,26                 | 12/07/2013      | 24,2                 | 22/06/2016      | 4,89                 | 02/10/2022      | 50                   |
| 20/05/2007      | 239                  | 27/06/2010      | 3,6                  | 13/07/2013      | 15,7                 | 23/06/2016      | 3,71                 | 03/10/2022      | 31                   |
| 21/05/2007      | 226                  | 28/06/2010      | 3,84                 | 14/07/2013      | 8,53                 | 24/06/2016      | 31                   | 04/10/2022      | 15                   |
| 22/05/2007      | 402                  | 29/06/2010      | 7,33                 | 15/07/2013      | 2,3                  | 25/06/2016      | 55                   | 05/10/2022      | 6                    |
| 23/05/2007      | 482                  | 30/06/2010      | 7,05                 | 16/07/2013      | 0,02                 | 26/06/2016      | 40,1                 | 06/10/2022      | 11                   |
| 24/05/2007      | 506                  | 01/07/2010      | 3,22                 | 19/07/2013      | 1,83                 | 27/06/2016      | 15,7                 | 07/10/2022      | 58                   |
| 25/05/2007      | 496                  | 16/07/2010      | 0,41                 | 20/07/2013      | 0,03                 | 28/06/2016      | 2,39                 | 08/10/2022      | 64                   |
| 26/05/2007      | 378                  | 17/07/2010      | 1,75                 | 21/07/2013      | 15,8                 | 04/07/2016      | 5,03                 | 09/10/2022      | 62                   |
| 27/05/2007      | 255                  | 20/07/2010      | 0,79                 | 22/07/2013      | 171                  | 05/07/2016      | 7,91                 | 10/10/2022      | 30                   |
| 28/05/2007      | 197                  | 21/07/2010      | 0,7                  | 23/07/2013      | 272                  | 06/07/2016      | 5,2                  | 11/10/2022      | 44                   |
| 29/05/2007      | 196                  | 23/07/2010      | 2,29                 | 24/07/2013      | 241                  | 13/07/2016      | 0,19                 | 12/10/2022      | 233                  |
| 30/05/2007      | 176                  | 30/07/2010      | 0,69                 | 25/07/2013      | 177                  | 01/08/2016      | 1,91                 | 13/10/2022      | 214                  |
| 31/05/2007      | 150                  | 04/08/2010      | 0,03                 | 26/07/2013      | 121                  | 07/08/2016      | 2,16                 | 14/10/2022      | 203                  |
| 01/06/2007      | 138                  | 31/08/2010      | 1,76                 | 27/07/2013      | 83,8                 | 15/08/2016      | 0,33                 | 15/10/2022      | 198                  |
| 02/06/2007      | 156                  | 13/10/2010      | 0,39                 | 28/07/2013      | 59,3                 | 18/08/2016      | 1,8                  | 16/10/2022      | 221,96               |
| 03/06/2007      | 147                  | 30/10/2010      | 1,05                 | 29/07/2013      | 41                   | 19/08/2016      | 0,22                 | 17/10/2022      | 182                  |

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 04/06/2007      | 115                  | 04/12/2010      | 0,18                 | 30/07/2013      | 27,3                 | 20/08/2016      | 3,06                 | 18/10/2022      | 135                  |
| 05/06/2007      | 100                  | 05/12/2010      | 5,58                 | 31/07/2013      | 16,6                 | 24/08/2016      | 0,65                 | 19/10/2022      | 106                  |
| 06/06/2007      | 81                   | 06/12/2010      | 6,02                 | 01/08/2013      | 7,76                 | 30/08/2016      | 0,23                 | 20/10/2022      | 154                  |
| 07/06/2007      | 65                   | 07/12/2010      | 5,04                 | 02/08/2013      | 1,22                 | 11/09/2016      | 4,34                 | 21/10/2022      | 266                  |
| 08/06/2007      | 56                   | 08/12/2010      | 7,88                 | 15/08/2013      | 0,03                 | 12/09/2016      | 7,95                 | 22/10/2022      | 266                  |
| 09/06/2007      | 50                   | 09/12/2010      | 5,77                 | 31/08/2013      | 5                    | 13/09/2016      | 7,27                 | 23/10/2022      | 221                  |
| 10/06/2007      | 43                   | 10/12/2010      | 0,28                 | 16/09/2013      | 1                    | 16/09/2016      | 0,21                 | 24/10/2022      | 161                  |
| 11/06/2007      | 36                   | 11/12/2010      | 0,02                 | 20/09/2013      | 1,2                  | 27/09/2016      | 0,08                 | 25/10/2022      | 122                  |
| 12/06/2007      | 32                   | 12/12/2010      | 33,4                 | 22/09/2013      | 7,31                 | 12/10/2016      | 0,34                 | 26/10/2022      | 93                   |
| 13/06/2007      | 29                   | 13/12/2010      | 111                  | 23/09/2013      | 7,91                 | 13/10/2016      | 4,17                 | 27/10/2022      | 67                   |
| 14/06/2007      | 26                   | 14/12/2010      | 224                  | 24/09/2013      | 77,5                 | 16/10/2016      | 0,15                 | 28/10/2022      | 49                   |
| 15/06/2007      | 23                   | 15/12/2010      | 193                  | 25/09/2013      | 227                  | 20/10/2016      | 0,24                 | 29/10/2022      | 48                   |
| 16/06/2007      | 20                   | 16/12/2010      | 141                  | 26/09/2013      | 135                  | 26/10/2016      | 0,19                 | 30/10/2022      | 113                  |
| 17/06/2007      | 18                   | 17/12/2010      | 115                  | 27/09/2013      | 61,6                 | 17/11/2016      | 4,47                 | 31/10/2022      | 260                  |
| 18/06/2007      | 15                   | 18/12/2010      | 90,1                 | 28/09/2013      | 23,8                 | 18/11/2016      | 4,33                 | 01/11/2022      | 304                  |
| 19/06/2007      | 11                   | 19/12/2010      | 62                   | 29/09/2013      | 4,94                 | 25/11/2016      | 0,06                 | 02/11/2022      | 268                  |
| 20/06/2007      | 8                    | 20/12/2010      | 36,1                 | 30/09/2013      | 0,05                 | 28/11/2016      | 0,19                 | 03/11/2022      | 208                  |
| 21/06/2007      | 5                    | 21/12/2010      | 26,9                 | 08/10/2013      | 0,02                 | 02/12/2016      | 1,99                 | 04/11/2022      | 152                  |
| 22/06/2007      | 2                    | 22/12/2010      | 26,8                 | 09/10/2013      | 0,43                 | 03/12/2016      | 0,87                 | 05/11/2022      | 115                  |
| 21/10/2007      | 0,64                 | 23/12/2010      | 23,2                 | 21/10/2013      | 2,91                 | 16/12/2016      | 0,07                 | 06/11/2022      | 113                  |
| 22/10/2007      | 0,44                 | 24/12/2010      | 53,2                 | 22/10/2013      | 7,83                 | 28/12/2016      | 0,44                 | 07/11/2022      | 77                   |
| 24/10/2007      | 1,04                 | 25/12/2010      | 81                   | 23/10/2013      | 5,06                 | 29/12/2016      | 0,13                 | 08/11/2022      | 50                   |
| 25/10/2007      | 0,41                 | 26/12/2010      | 53,4                 | 26/10/2013      | 0,63                 | 01/01/2017      | 0,01                 | 09/11/2022      | 34                   |
| 01/11/2007      | 3,3                  | 27/12/2010      | 33,2                 | 27/10/2013      | 1,39                 | 03/01/2017      | 0,13                 | 10/11/2022      | 22                   |
| 02/11/2007      | 7,03                 | 28/12/2010      | 20,7                 | 04/11/2013      | 0,03                 | 10/01/2017      | 4,48                 | 11/11/2022      | 12                   |
| 03/11/2007      | 7,08                 | 29/12/2010      | 12,3                 | 08/11/2013      | 0,07                 | 27/01/2017      | 0,05                 | 12/11/2022      | 6                    |
| 04/11/2007      | 7,16                 | 30/12/2010      | 5,93                 | 11/11/2013      | 0,55                 | 28/01/2017      | 0,69                 | 13/11/2022      | 8                    |
| 05/11/2007      | 7,22                 | 31/12/2010      | 0,23                 | 15/11/2013      | 0,11                 | 31/01/2017      | 1,46                 | 14/11/2022      | 21                   |
| 06/11/2007      | 5,06                 | 08/01/2011      | 0,3                  | 19/11/2013      | 0,04                 | 01/02/2017      | 5,93                 | 15/11/2022      | 20                   |
| 09/11/2007      | 0,41                 | 12/01/2011      | 8,15                 | 25/11/2013      | 0,03                 | 14/02/2017      | 0,06                 | 16/11/2022      | 14                   |
| 13/11/2007      | 0,19                 | 13/01/2011      | 101,12               | 26/11/2013      | 3,02                 | 17/02/2017      | 0,57                 | 17/11/2022      | 4                    |
| 14/11/2007      | 0,54                 | 14/01/2011      | 153,08               | 27/11/2013      | 7,18                 | 22/02/2017      | 0,34                 | 24/11/2022      | 1                    |
| 15/11/2007      | 0,91                 | 15/01/2011      | 179,13               | 28/11/2013      | 7,17                 | 23/02/2017      | 3,69                 | 19/01/2023      | 20                   |
| 16/11/2007      | 7,51                 | 16/01/2011      | 145,2                | 29/11/2013      | 7,14                 | 26/02/2017      | 0,51                 | 20/01/2023      | 34                   |
| 17/11/2007      | 4,94                 | 17/01/2011      | 65,17                | 30/11/2013      | 4,76                 | 01/03/2017      | 0,49                 | 21/01/2023      | 29                   |
| 26/11/2007      | 0,89                 | 18/01/2011      | 59,85                | 03/12/2013      | 2,33                 | 12/03/2017      | 0,45                 | 22/01/2023      | 27                   |
| 29/11/2007      | 0,14                 | 19/01/2011      | 78,58                | 05/12/2013      | 0,04                 | 15/03/2017      | 0,26                 | 23/01/2023      | 18                   |
| 04/12/2007      | 0,45                 | 20/01/2011      | 101,3                | 07/12/2013      | 0,39                 | 16/03/2017      | 1,91                 | 18/02/2023      | 8                    |
| 12/12/2007      | 0,19                 | 21/01/2011      | 84,26                | 27/12/2013      | 0,1                  | 20/03/2017      | 1,89                 | 19/02/2023      | 16                   |
| 20/12/2007      | 0,34                 | 22/01/2011      | 88,86                | 28/12/2013      | 0,11                 | 28/03/2017      | 0,13                 | 20/02/2023      | 17                   |
| 27/12/2007      | 0,88                 | 23/01/2011      | 90,92                | 29/12/2013      | 0,02                 | 29/03/2017      | 2,46                 | 21/02/2023      | 24                   |
| 28/12/2007      | 0,5                  | 24/01/2011      | 90,51                | 30/12/2013      | 0,43                 | 30/03/2017      | 0,24                 | 22/02/2023      | 57                   |
| 04/01/2008      | 1,01                 | 25/01/2011      | 79,3                 | 31/12/2013      | 0,03                 | 05/04/2017      | 0,44                 | 23/02/2023      | 44                   |
| 05/01/2008      | 1,04                 | 26/01/2011      | 65,7                 | 02/01/2014      | 0,12                 | 07/04/2017      | 0,17                 | 24/02/2023      | 62                   |
| 11/01/2008      | 0,42                 | 27/01/2011      | 33,8                 | 03/01/2014      | 0,12                 | 10/04/2017      | 0,38                 | 25/02/2023      | 114                  |
| 04/02/2008      | 0,32                 | 28/01/2011      | 20,01                | 06/01/2014      | 3,08                 | 16/04/2017      | 0,05                 | 26/02/2023      | 122                  |
| 09/02/2008      | 0,38                 | 29/01/2011      | 12,63                | 07/01/2014      | 7,72                 | 26/04/2017      | 6,54                 | 27/02/2023      | 88                   |
| 11/02/2008      | 0,27                 | 30/01/2011      | 36,9                 | 08/01/2014      | 4,11                 | 27/04/2017      | 4,16                 | 28/02/2023      | 61                   |
| 19/02/2008      | 0,3                  | 31/01/2011      | 59,65                | 10/01/2014      | 0,13                 | 10/05/2017      | 0,07                 | 01/03/2023      | 43                   |
| 03/03/2008      | 0,39                 | 01/02/2011      | 44,46                | 11/01/2014      | 0,1                  | 13/05/2017      | 0,49                 | 02/03/2023      | 34                   |
| 04/03/2008      | 4,57                 | 02/02/2011      | 58,12                | 18/01/2014      | 19,2                 | 19/05/2017      | 0,07                 | 03/03/2023      | 23                   |
| 05/03/2008      | 4,68                 | 03/02/2011      | 81,86                | 19/01/2014      | 34,9                 | 29/05/2017      | 0,11                 | 04/03/2023      | 23                   |
| 06/03/2008      | 2,05                 | 04/02/2011      | 62,66                | 20/01/2014      | 20,9                 | 01/06/2017      | 6                    | 05/03/2023      | 28                   |
| 08/03/2008      | 0,83                 | 05/02/2011      | 55,82                | 21/01/2014      | 4,61                 | 02/06/2017      | 60,26                | 06/03/2023      | 30                   |
| 15/03/2008      | 0,75                 | 06/02/2011      | 71,15                | 22/01/2014      | 0,07                 | 03/06/2017      | 59,36                | 07/03/2023      | 24                   |
| 21/03/2008      | 0,54                 | 07/02/2011      | 153,1                | 24/01/2014      | 0,06                 | 04/06/2017      | 41,99                | 08/03/2023      | 14                   |
| 05/04/2008      | 0,89                 | 08/02/2011      | 177,69               | 28/01/2014      | 0,1                  | 05/06/2017      | 37,32                | 09/03/2023      | 36                   |
| 06/04/2008      | 0,35                 | 09/02/2011      | 206,58               | 30/01/2014      | 0,03                 | 06/06/2017      | 160,18               | 10/03/2023      | 80                   |
| 14/04/2008      | 0,71                 | 10/02/2011      | 161,16               | 02/02/2014      | 0,72                 | 07/06/2017      | 432,52               | 11/03/2023      | 65                   |

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 26/04/2008      | 0,87                 | 11/02/2011      | 237,73               | 04/02/2014      | 0,93                 | 08/06/2017      | 383,91               | 12/03/2023      | 51                   |
| 29/04/2008      | 1,64                 | 12/02/2011      | 276,42               | 06/02/2014      | 2,36                 | 09/06/2017      | 307,29               | 13/03/2023      | 27                   |
| 05/05/2008      | 2,19                 | 13/02/2011      | 349                  | 07/02/2014      | 0,01                 | 10/06/2017      | 234,71               | 14/03/2023      | 9                    |
| 12/05/2008      | 0,78                 | 14/02/2011      | 304,56               | 09/02/2014      | 0,9                  | 11/06/2017      | 177,03               | 15/03/2023      | 1                    |
| 29/05/2008      | 4,23                 | 15/02/2011      | 264,12               | 13/02/2014      | 1,14                 | 12/06/2017      | 131,75               | 18/04/2023      | 8                    |
| 09/06/2008      | 5,1                  | 16/02/2011      | 211,94               | 14/02/2014      | 2,84                 | 13/06/2017      | 84,3                 | 19/04/2023      | 87                   |
| 10/06/2008      | 7,96                 | 17/02/2011      | 166,08               | 19/02/2014      | 0,21                 | 14/06/2017      | 55,17                | 20/04/2023      | 119                  |
| 11/06/2008      | 7,96                 | 18/02/2011      | 125,62               | 22/02/2014      | 0,46                 | 15/06/2017      | 37,52                | 21/04/2023      | 92                   |
| 12/06/2008      | 7,96                 | 19/02/2011      | 110,22               | 25/02/2014      | 0,68                 | 16/06/2017      | 24,8                 | 22/04/2023      | 75                   |
| 13/06/2008      | 3,55                 | 20/02/2011      | 96,87                | 26/02/2014      | 0,04                 | 17/06/2017      | 21,24                | 23/04/2023      | 65                   |
| 14/06/2008      | 4,33                 | 21/02/2011      | 91,09                | 02/03/2014      | 0,4                  | 18/06/2017      | 16,46                | 24/04/2023      | 43                   |
| 15/06/2008      | 125                  | 22/02/2011      | 86,64                | 03/03/2014      | 0,06                 | 19/06/2017      | 22,99                | 25/04/2023      | 30                   |
| 16/06/2008      | 197                  | 23/02/2011      | 85,85                | 10/03/2014      | 0,22                 | 20/06/2017      | 41,78                | 26/04/2023      | 26                   |
| 17/06/2008      | 160                  | 24/02/2011      | 86,74                | 11/03/2014      | 0,17                 | 21/06/2017      | 44,04                | 27/04/2023      | 24                   |
| 18/06/2008      | 99,4                 | 25/02/2011      | 71,94                | 12/03/2014      | 2,78                 | 22/06/2017      | 39,89                | 28/04/2023      | 13                   |
| 19/06/2008      | 61,3                 | 26/02/2011      | 55,71                | 18/03/2014      | 0,29                 | 23/06/2017      | 28,75                | 29/04/2023      | 15                   |
| 20/06/2008      | 37,2                 | 27/02/2011      | 63,01                | 22/03/2014      | 0,15                 | 24/06/2017      | 1,99                 | 30/04/2023      | 22                   |
| 21/06/2008      | 31                   | 28/02/2011      | 56,55                | 04/04/2014      | 0,95                 | 27/06/2017      | 5,08                 | 01/05/2023      | 22                   |
| 22/06/2008      | 28,8                 | 01/03/2011      | 33,31                | 05/04/2014      | 1,32                 | 28/06/2017      | 7,96                 | 02/05/2023      | 17                   |
| 23/06/2008      | 20,8                 | 02/03/2011      | 15,53                | 07/04/2014      | 0,02                 | 29/06/2017      | 7,94                 | 03/05/2023      | 8                    |
| 24/06/2008      | 8,56                 | 03/03/2011      | 4,14                 | 11/04/2014      | 1,92                 | 30/06/2017      | 7,92                 | 04/05/2023      | 5                    |
| 25/06/2008      | 0,19                 | 04/03/2011      | 0,04                 | 12/04/2014      | 7,75                 | 01/07/2017      | 7,91                 | 05/05/2023      | 5                    |
| 27/06/2008      | 0,39                 | 06/03/2011      | 0,06                 | 13/04/2014      | 5,45                 | 02/07/2017      | 7,9                  | 06/05/2023      | 9                    |
| 29/06/2008      | 21,5                 | 11/03/2011      | 0,08                 | 17/04/2014      | 0,13                 | 03/07/2017      | 7,89                 | 07/05/2023      | 13                   |
| 30/06/2008      | 60                   | 15/03/2011      | 0,55                 | 18/04/2014      | 2,76                 | 04/07/2017      | 7,87                 | 08/05/2023      | 15                   |
| 01/07/2008      | 41                   | 25/03/2011      | 0,14                 | 07/05/2014      | 0,24                 | 05/07/2017      | 7,85                 | 09/05/2023      | 9                    |
| 02/07/2008      | 21,4                 | 26/03/2011      | 1,85                 | 19/05/2014      | 0,67                 | 06/07/2017      | 7,83                 | 10/05/2023      | 4                    |
| 03/07/2008      | 7,82                 | 27/03/2011      | 0,29                 | 26/05/2014      | 1,3                  | 07/07/2017      | 5,2                  | 11/05/2023      | 1                    |
| 04/07/2008      | 0,12                 | 28/03/2011      | 0,02                 | 29/05/2014      | 0,1                  | 16/07/2017      | 0,54                 | 18/06/2023      | 2                    |
| 07/08/2008      | 0,1                  | 30/03/2011      | 0,02                 | 30/05/2014      | 16                   | 23/07/2017      | 1,86                 | 19/06/2023      | 1                    |
| 09/08/2008      | 16,4                 | 04/04/2011      | 0,01                 | 31/05/2014      | 44,5                 | 09/08/2017      | 0,45                 | 25/06/2023      | 18                   |
| 10/08/2008      | 58,1                 | 06/04/2011      | 0,03                 | 01/06/2014      | 126                  | 14/08/2017      | 0,22                 | 26/06/2023      | 11                   |
| 11/08/2008      | 62                   | 19/04/2011      | 0,05                 | 02/06/2014      | 153                  | 15/08/2017      | 0,04                 | 27/06/2023      | 1                    |
| 12/08/2008      | 42,8                 | 25/04/2011      | 0,28                 | 03/06/2014      | 125                  | 21/08/2017      | 4,29                 | 28/06/2023      | 2                    |
| 13/08/2008      | 51,2                 | 06/05/2011      | 1,72                 | 04/06/2014      | 88,5                 | 22/08/2017      | 4,18                 | 29/06/2023      | 1                    |
| 14/08/2008      | 103                  | 17/05/2011      | 1,2                  | 05/06/2014      | 35,3                 | 24/08/2017      | 0,71                 | 11/07/2023      | 322                  |
| 15/08/2008      | 207                  | 19/05/2011      | 0,04                 | 06/06/2014      | 123                  | 25/08/2017      | 1,01                 | 12/07/2023      | 686                  |
| 16/08/2008      | 230                  | 21/05/2011      | 1,16                 | 07/06/2014      | 759                  | 30/08/2017      | 0,17                 | 13/07/2023      | 592                  |
| 17/08/2008      | 205                  | 23/05/2011      | 3,51                 | 08/06/2014      | 3370                 | 03/09/2017      | 0,11                 | 14/07/2023      | 407                  |
| 18/08/2008      | 151                  | 24/05/2011      | 1,59                 | 09/06/2014      | 3510                 | 18/09/2017      | 0,76                 | 15/07/2023      | 284                  |
| 19/08/2008      | 104                  | 25/05/2011      | 4,03                 | 10/06/2014      | 2320                 | 20/09/2017      | 0,29                 | 16/07/2023      | 229                  |
| 20/08/2008      | 75,6                 | 26/05/2011      | 4,08                 | 11/06/2014      | 1390                 | 02/10/2017      | 0,07                 | 17/07/2023      | 144                  |
| 21/08/2008      | 50,3                 | 27/05/2011      | 0,11                 | 12/06/2014      | 832                  | 06/10/2017      | 0,04                 | 18/07/2023      | 96                   |
| 22/08/2008      | 33,3                 | 28/05/2011      | 0,22                 | 13/06/2014      | 529                  | 09/10/2017      | 0,69                 | 19/07/2023      | 77                   |
| 23/08/2008      | 23,4                 | 30/05/2011      | 4,63                 | 14/06/2014      | 402                  | 19/10/2017      | 1,04                 | 20/07/2023      | 84                   |
| 24/08/2008      | 14,1                 | 31/05/2011      | 7,2                  | 15/06/2014      | 321                  | 21/10/2017      | 4,8                  | 21/07/2023      | 53                   |
| 25/08/2008      | 4,97                 | 01/06/2011      | 7,18                 | 16/06/2014      | 255                  | 29/10/2017      | 0,32                 | 22/07/2023      | 64                   |
| 29/09/2008      | 4,59                 | 02/06/2011      | 7,17                 | 17/06/2014      | 202                  | 01/11/2017      | 0,04                 | 23/07/2023      | 83                   |
| 30/09/2008      | 7,14                 | 03/06/2011      | 7,15                 | 18/06/2014      | 167                  | 07/11/2017      | 16,57                | 24/07/2023      | 61                   |
| 01/10/2008      | 4,52                 | 04/06/2011      | 7,14                 | 19/06/2014      | 146                  | 08/11/2017      | 139,45               | 25/07/2023      | 19                   |
| 09/10/2008      | 0,34                 | 05/06/2011      | 7,14                 | 20/06/2014      | 119                  | 09/11/2017      | 183,53               | 26/07/2023      | 1                    |
| 11/10/2008      | 1,37                 | 06/06/2011      | 7,14                 | 21/06/2014      | 92,6                 | 10/11/2017      | 183,22               | 17/09/2023      | 2                    |
| 17/10/2008      | 1,09                 | 07/06/2011      | 7,13                 | 22/06/2014      | 70,7                 | 11/11/2017      | 209,79               | 08/10/2023      | 1                    |
| 18/10/2008      | 0,5                  | 08/06/2011      | 7,12                 | 23/06/2014      | 53,9                 | 12/11/2017      | 193,85               | 09/10/2023      | 239                  |
| 23/10/2008      | 1,79                 | 09/06/2011      | 7,13                 | 24/06/2014      | 40,8                 | 13/11/2017      | 116,27               | 10/10/2023      | 352                  |
| 24/10/2008      | 4,63                 | 10/06/2011      | 4,84                 | 25/06/2014      | 30,2                 | 14/11/2017      | 38,76                | 11/10/2023      | 316                  |
| 25/10/2008      | 2,77                 | 20/06/2011      | 0,16                 | 26/06/2014      | 24,4                 | 15/11/2017      | 10,98                | 12/10/2023      | 579                  |
| 26/10/2008      | 5,56                 | 21/06/2011      | 0,13                 | 27/06/2014      | 50,7                 | 16/11/2017      | 0,81                 | 13/10/2023      | 570                  |
| 27/10/2008      | 6,08                 | 22/06/2011      | 0,54                 | 28/06/2014      | 113                  | 18/11/2017      | 3,75                 | 14/10/2023      | 483                  |

| Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) | Data da Medição | Vazão Vertida (m³/s) |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 28/10/2008      | 0,46                 | 28/06/2011      | 0,1                  | 29/06/2014      | 174                  | 19/11/2017      | 95,78                | 15/10/2023      | 392                  |
| 02/11/2008      | 28,2                 | 30/06/2011      | 0,18                 | 30/06/2014      | 148                  | 20/11/2017      | 130,97               | 16/10/2023      | 220                  |
| 03/11/2008      | 207                  | 06/07/2011      | 30,11                | 01/07/2014      | 96,1                 | 21/11/2017      | 87,73                | 17/10/2023      | 178                  |
| 04/11/2008      | 216                  | 07/07/2011      | 49,48                | 02/07/2014      | 59,8                 | 22/11/2017      | 86,12                | 18/10/2023      | 252                  |
| 05/11/2008      | 147                  | 08/07/2011      | 31,9                 | 03/07/2014      | 39                   | 23/11/2017      | 85,85                | 19/10/2023      | 234                  |
| 06/11/2008      | 97,3                 | 09/07/2011      | 15,32                | 04/07/2014      | 23                   | 24/11/2017      | 57,22                | 20/10/2023      | 184                  |
| 07/11/2008      | 83,6                 | 10/07/2011      | 4,37                 | 05/07/2014      | 13                   | 25/11/2017      | 31,49                | 21/10/2023      | 170                  |
| 08/11/2008      | 66,2                 | 11/07/2011      | 0,74                 | 06/07/2014      | 13                   | 26/11/2017      | 28,33                | 22/10/2023      | 152                  |
| 09/11/2008      | 41                   | 22/07/2011      | 1,37                 | 07/07/2014      | 10,3                 | 27/11/2017      | 25,93                | 23/10/2023      | 95                   |
| 10/11/2008      | 30,9                 | 23/07/2011      | 26,19                | 08/07/2014      | 2,5                  | 28/11/2017      | 14,37                | 24/10/2023      | 58                   |
| 11/11/2008      | 37,6                 | 24/07/2011      | 23,76                | 09/07/2014      | 1,88                 | 29/11/2017      | 3,54                 | 25/10/2023      | 66                   |
| 12/11/2008      | 53,9                 | 25/07/2011      | 10,17                | 15/07/2014      | 0,07                 | 30/11/2017      | 0,52                 | 26/10/2023      | 43                   |
| 13/11/2008      | 44,3                 | 26/07/2011      | 1,66                 | 17/07/2014      | 0,05                 | 02/12/2017      | 0,93                 | 27/10/2023      | 34                   |
| 14/11/2008      | 49,5                 | 28/07/2011      | 0,17                 | 21/07/2014      | 1,7                  | 04/12/2017      | 0,06                 | 28/10/2023      | 279                  |
| 15/11/2008      | 40,7                 | 29/07/2011      | 1,2                  | 22/07/2014      | 2,25                 | 16/12/2017      | 0,04                 | 29/10/2023      | 1255                 |
| 16/11/2008      | 24,2                 | 30/07/2011      | 0,37                 | 23/07/2014      | 2,72                 | 17/12/2017      | 0,32                 | 30/10/2023      | 1259                 |
| 17/11/2008      | 12,2                 | 31/07/2011      | 7,51                 | 24/07/2014      | 0,87                 | 25/12/2017      | 3,76                 | 31/10/2023      | 1158                 |
| 18/11/2008      | 2,84                 | 01/08/2011      | 382,17               | 31/07/2014      | 1                    | 26/12/2017      | 47,55                | 01/11/2023      | 1010                 |
| 22/11/2008      | 0,46                 | 02/08/2011      | 743,63               | 12/08/2014      | 2,78                 | 27/12/2017      | 104,23               | 02/11/2023      | 836                  |
| 30/11/2008      | 0,85                 | 03/08/2011      | 706,28               | 13/08/2014      | 7,43                 | 28/12/2017      | 95,44                | 03/11/2023      | 818                  |
| 01/12/2008      | 4,7                  | 04/08/2011      | 647,41               | 14/08/2014      | 5,04                 | 29/12/2017      | 127,36               | 04/11/2023      | 937                  |
| 14/12/2008      | 2,09                 | 05/08/2011      | 438,95               | 18/08/2014      | 0,05                 | 30/12/2017      | 217,8                | 05/11/2023      | 828                  |
| 22/12/2008      | 1,09                 | 06/08/2011      | 267,19               | 25/08/2014      | 0,06                 | 31/12/2017      | 228,79               | 06/11/2023      | 660                  |
| 24/12/2008      | 1,54                 | 07/08/2011      | 165,25               | 26/08/2014      | 0,53                 | 01/01/2018      | 192                  | 07/11/2023      | 496                  |
| 28/12/2008      | 1,53                 | 08/08/2011      | 119,17               | 02/09/2014      | 0,01                 | 02/01/2018      | 200                  | 08/11/2023      | 379                  |
| 09/01/2009      | 0,18                 | 09/08/2011      | 95,62                | 18/09/2014      | 0,02                 | 03/01/2018      | 227                  | 09/11/2023      | 299                  |
| 14/01/2009      | 0,92                 | 10/08/2011      | 84,59                | 19/09/2014      | 0,06                 | 04/01/2018      | 203                  | 10/11/2023      | 270                  |
| 15/01/2009      | 0,4                  | 11/08/2011      | 65,67                | 21/09/2014      | 0,02                 | 05/01/2018      | 152                  | 11/11/2023      | 260                  |
| 09/02/2009      | 4,44                 | 12/08/2011      | 45,81                | 23/09/2014      | 0,03                 | 06/01/2018      | 113                  | 12/11/2023      | 176                  |
| 10/02/2009      | 7,14                 | 13/08/2011      | 30,19                | 24/09/2014      | 0,06                 | 07/01/2018      | 85,3                 | 13/11/2023      | 129                  |
| 11/02/2009      | 7,14                 | 14/08/2011      | 18,74                | 28/09/2014      | 0,09                 | 08/01/2018      | 62,3                 | 14/11/2023      | 124                  |
| 12/02/2009      | 7,13                 | 15/08/2011      | 10                   | 29/09/2014      | 0,08                 | 09/01/2018      | 43,5                 | 15/11/2023      | 238                  |
| 13/02/2009      | 7,12                 | 16/08/2011      | 3,67                 | 01/10/2014      | 86,3                 | 10/01/2018      | 31,1                 | 16/11/2023      | 220                  |
| 14/02/2009      | 4,53                 | 17/08/2011      | 0,13                 | 02/10/2014      | 436                  | 11/01/2018      | 28,8                 | 17/11/2023      | 191                  |
| 15/02/2009      | 0,06                 | 18/08/2011      | 2,14                 | 03/10/2014      | 394                  | 12/01/2018      | 33,8                 | 18/11/2023      | 184                  |
| 21/02/2009      | 0,2                  | 19/08/2011      | 243,96               | 04/10/2014      | 268                  | 13/01/2018      | 36,8                 | 19/11/2023      | 129                  |
| 22/02/2009      | 0,64                 | 20/08/2011      | 583,88               | 05/10/2014      | 187                  | 14/01/2018      | 40                   | 20/11/2023      | 89                   |
| 24/02/2009      | 0,96                 | 21/08/2011      | 557,17               | 06/10/2014      | 125                  | 15/01/2018      | 35,9                 | 21/11/2023      | 58                   |
| 02/03/2009      | 0,04                 | 22/08/2011      | 559,51               | 07/10/2014      | 89,1                 | 16/01/2018      | 30,8                 | 22/11/2023      | 43                   |
| 08/03/2009      | 0,83                 | 23/08/2011      | 562,4                | 08/10/2014      | 68,9                 | 17/01/2018      | 45,1                 | 23/11/2023      | 56                   |
| 18/03/2009      | 2,17                 | 24/08/2011      | 385,97               | 09/10/2014      | 48,3                 | 18/01/2018      | 48,6                 | 24/11/2023      | 61                   |
| 19/03/2009      | 2,85                 | 25/08/2011      | 275,38               | 10/10/2014      | 27                   | 19/01/2018      | 63,3                 | 25/11/2023      | 39                   |
| 20/03/2009      | 0,79                 | 26/08/2011      | 207,69               | 11/10/2014      | 14,6                 | 20/01/2018      | 59,2                 | 26/11/2023      | 59                   |
| 26/03/2009      | 0,02                 | 27/08/2011      | 160,47               | 12/10/2014      | 4,94                 | 21/01/2018      | 60,2                 | 27/11/2023      | 35                   |
| 04/04/2009      | 0,75                 | 28/08/2011      | 126,52               | 13/10/2014      | 0,12                 | 22/01/2018      | 59                   | 28/11/2023      | 28                   |
| 06/04/2009      | 0,27                 | 29/08/2011      | 100,26               | 15/10/2014      | 5,22                 | 23/01/2018      | 45,2                 | 29/11/2023      | 30                   |
| 07/04/2009      | 0,47                 | 30/08/2011      | 89,83                | 16/10/2014      | 5,98                 | 24/01/2018      | 30,7                 | 30/11/2023      | 28                   |
| 08/04/2009      | 2,56                 | 31/08/2011      | 110,54               | 18/10/2014      | 0,61                 | 25/01/2018      | 19,2                 | 01/12/2023      | 18                   |
| 16/04/2009      | 0,03                 | 01/09/2011      | 103,74               | 19/10/2014      | 0,06                 | 26/01/2018      | 13,4                 | 02/12/2023      | 6                    |
| 21/04/2009      | 0,01                 | 02/09/2011      | 73,52                | 25/10/2014      | 0,06                 | 27/01/2018      | 14,8                 | 03/12/2023      | 6                    |
| 27/05/2009      | 4,77                 | 03/09/2011      | 70,21                | 30/10/2014      | 0,74                 | 28/01/2018      | 10,4                 | 04/12/2023      | 6                    |
| 28/05/2009      | 5                    | 04/09/2011      | 59,27                | 04/11/2014      | 0,02                 | 29/01/2018      | 12,5                 | 05/12/2023      | 41                   |
| 16/06/2009      | 0,02                 | 05/09/2011      | 27,7                 | 06/11/2014      | 0,25                 | 30/01/2018      | 46,4                 | 06/12/2023      | 43                   |
| 22/06/2009      | 0,4                  | 06/09/2011      | 14,95                | 07/11/2014      | 3,44                 | 31/01/2018      | 52                   | 07/12/2023      | 21                   |
| 08/07/2009      | 1,07                 | 07/09/2011      | 66,77                | 14/11/2014      | 0,1                  | 01/02/2018      | 28,3                 | 08/12/2023      | 14                   |
| 10/07/2009      | 1,66                 | 08/09/2011      | 119,19               | 19/11/2014      | 0,36                 | 02/02/2018      | 8,57                 | 09/12/2023      | 29                   |
| 11/07/2009      | 235                  | 09/09/2011      | 217,73               | 23/11/2014      | 0,38                 | 03/02/2018      | 0,11                 | 10/12/2023      | 43                   |
| 12/07/2009      | 360                  | 10/09/2011      | 254,33               | 05/12/2014      | 0,3                  | 09/02/2018      | 0,08                 | 11/12/2023      | 21                   |
| 13/07/2009      | 335                  | 11/09/2011      | 217,29               | 06/12/2014      | 0,07                 | 02/03/2018      | 0,57                 | 12/12/2023      | 4                    |



## ANEXO 2 – ÍNDICE GERAL DE PREÇOS – DISPONIBILIDADE INTERNA

| Data    | Variação<br>Perc.<br>Acum. no<br>Ano (%) | Variação<br>Perc.<br>Acum.<br>(%) | Data    | Variação<br>Perc.<br>Acum. no<br>Ano (%) | Variação<br>Perc.<br>Acum.<br>(%) | Data    | Variação<br>Perc.<br>Acum. no<br>Ano (%) | Variação<br>Perc.<br>Acum.<br>(%) | Data    | Variação<br>Perc.<br>Acum. no<br>Ano (%) | Variação<br>Perc.<br>Acum.<br>(%) |
|---------|------------------------------------------|-----------------------------------|---------|------------------------------------------|-----------------------------------|---------|------------------------------------------|-----------------------------------|---------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| 01/2008 | 0,99                                     | 0,99                              | 04/2012 | 1,95                                     | 28,12                             | 07/2016 | 5,61                                     | 73,92                             | 10/2020 | 19,02                                    | 141,30                            |
| 02/2008 | 1,37                                     | 1,37                              | 05/2012 | 2,89                                     | 29,30                             | 08/2016 | 6,07                                     | 74,68                             | 11/2020 | 22,16                                    | 147,66                            |
| 03/2008 | 2,08                                     | 2,08                              | 06/2012 | 3,59                                     | 30,18                             | 09/2016 | 6,10                                     | 74,73                             | 12/2020 | 23,08                                    | 149,54                            |
| 04/2008 | 3,22                                     | 3,22                              | 07/2012 | 5,16                                     | 32,16                             | 10/2016 | 6,24                                     | 74,96                             | 01/2021 | 2,91                                     | 156,80                            |
| 05/2008 | 5,16                                     | 5,16                              | 08/2012 | 6,52                                     | 33,86                             | 11/2016 | 6,30                                     | 75,06                             | 02/2021 | 5,69                                     | 163,74                            |
| 06/2008 | 7,14                                     | 7,14                              | 09/2012 | 7,46                                     | 35,04                             | 12/2016 | 7,18                                     | 76,51                             | 03/2021 | 7,99                                     | 169,47                            |
| 07/2008 | 8,35                                     | 8,35                              | 10/2012 | 7,12                                     | 34,62                             | 01/2017 | 0,43                                     | 77,28                             | 04/2021 | 10,38                                    | 175,45                            |
| 08/2008 | 7,93                                     | 7,93                              | 11/2012 | 7,39                                     | 34,96                             | 02/2017 | 0,50                                     | 77,39                             | 05/2021 | 14,13                                    | 184,81                            |
| 09/2008 | 8,32                                     | 8,32                              | 12/2012 | 8,10                                     | 35,84                             | 03/2017 | 0,12                                     | 76,72                             | 06/2021 | 14,26                                    | 185,12                            |
| 10/2008 | 9,51                                     | 9,51                              | 01/2013 | 0,31                                     | 36,26                             | 04/2017 | -1,13                                    | 74,52                             | 07/2021 | 15,91                                    | 189,25                            |
| 11/2008 | 9,58                                     | 9,58                              | 02/2013 | 0,51                                     | 36,53                             | 05/2017 | -1,63                                    | 73,63                             | 08/2021 | 15,75                                    | 188,85                            |
| 12/2008 | 9,10                                     | 9,10                              | 03/2013 | 0,81                                     | 36,95                             | 06/2017 | -2,58                                    | 71,96                             | 09/2021 | 15,12                                    | 187,27                            |
| 01/2009 | 0,01                                     | 9,11                              | 04/2013 | 0,76                                     | 36,87                             | 07/2017 | -2,87                                    | 71,45                             | 10/2021 | 16,96                                    | 191,86                            |
| 02/2009 | -0,11                                    | 8,98                              | 05/2013 | 1,08                                     | 37,31                             | 08/2017 | -2,64                                    | 71,86                             | 11/2021 | 16,28                                    | 190,17                            |
| 03/2009 | -0,95                                    | 8,06                              | 06/2013 | 1,85                                     | 38,36                             | 09/2017 | -2,03                                    | 72,92                             | 12/2021 | 17,74                                    | 193,80                            |
| 04/2009 | -0,90                                    | 8,11                              | 07/2013 | 1,99                                     | 38,55                             | 10/2017 | -1,94                                    | 73,09                             | 01/2022 | 2,01                                     | 199,71                            |
| 05/2009 | -0,73                                    | 8,30                              | 08/2013 | 2,46                                     | 39,19                             | 11/2017 | -1,15                                    | 74,48                             | 02/2022 | 3,55                                     | 204,22                            |
| 06/2009 | -1,04                                    | 7,96                              | 09/2013 | 3,86                                     | 41,08                             | 12/2017 | -0,42                                    | 75,77                             | 03/2022 | 6,00                                     | 211,42                            |
| 07/2009 | -1,68                                    | 7,26                              | 10/2013 | 4,51                                     | 41,97                             | 01/2018 | 0,58                                     | 76,79                             | 04/2022 | 6,44                                     | 212,71                            |
| 08/2009 | -1,59                                    | 7,36                              | 11/2013 | 4,80                                     | 42,36                             | 02/2018 | 0,73                                     | 77,06                             | 05/2022 | 7,17                                     | 214,87                            |
| 09/2009 | -1,35                                    | 7,63                              | 12/2013 | 5,52                                     | 43,34                             | 03/2018 | 1,30                                     | 78,05                             | 06/2022 | 7,84                                     | 216,84                            |
| 10/2009 | -1,39                                    | 7,58                              | 01/2014 | 0,40                                     | 43,92                             | 04/2018 | 2,24                                     | 79,70                             | 07/2022 | 7,44                                     | 215,65                            |
| 11/2009 | -1,32                                    | 7,66                              | 02/2014 | 1,25                                     | 45,13                             | 05/2018 | 3,91                                     | 82,65                             | 08/2022 | 6,84                                     | 213,90                            |
| 12/2009 | -1,43                                    | 7,54                              | 03/2014 | 2,75                                     | 47,29                             | 06/2018 | 5,45                                     | 85,35                             | 09/2022 | 5,54                                     | 210,08                            |
| 01/2010 | 1,01                                     | 8,62                              | 04/2014 | 3,22                                     | 47,95                             | 07/2018 | 5,92                                     | 86,17                             | 10/2022 | 4,89                                     | 208,17                            |
| 02/2010 | 2,11                                     | 9,81                              | 05/2014 | 2,75                                     | 47,28                             | 08/2018 | 6,63                                     | 87,43                             | 11/2022 | 4,71                                     | 207,63                            |
| 03/2010 | 2,76                                     | 10,50                             | 06/2014 | 2,10                                     | 46,35                             | 09/2018 | 8,54                                     | 90,79                             | 12/2022 | 5,03                                     | 208,58                            |
| 04/2010 | 3,50                                     | 11,30                             | 07/2014 | 1,54                                     | 45,54                             | 10/2018 | 8,83                                     | 91,29                             | 01/2023 | 0,06                                     | 208,75                            |
| 05/2010 | 5,12                                     | 13,04                             | 08/2014 | 1,60                                     | 45,63                             | 11/2018 | 7,58                                     | 89,10                             | 02/2023 | 0,09                                     | 208,86                            |
| 06/2010 | 5,48                                     | 13,43                             | 09/2014 | 1,62                                     | 45,66                             | 12/2018 | 7,10                                     | 88,25                             | 03/2023 | -0,25                                    | 207,80                            |
| 07/2010 | 5,71                                     | 13,68                             | 10/2014 | 2,22                                     | 46,52                             | 01/2019 | 0,07                                     | 88,38                             | 04/2023 | -1,26                                    | 204,68                            |
| 08/2010 | 6,87                                     | 14,93                             | 11/2014 | 3,39                                     | 48,19                             | 02/2019 | 1,32                                     | 90,74                             | 05/2023 | -3,56                                    | 197,58                            |
| 09/2010 | 8,04                                     | 16,19                             | 12/2014 | 3,78                                     | 48,76                             | 03/2019 | 2,41                                     | 92,79                             | 06/2023 | -4,96                                    | 193,26                            |
| 10/2010 | 9,16                                     | 17,38                             | 01/2015 | 0,67                                     | 49,76                             | 04/2019 | 3,33                                     | 94,53                             | 07/2023 | -5,35                                    | 192,08                            |
| 11/2010 | 10,88                                    | 19,24                             | 02/2015 | 1,21                                     | 50,56                             | 05/2019 | 3,75                                     | 95,31                             | 08/2023 | -5,30                                    | 192,21                            |
| 12/2010 | 11,30                                    | 19,69                             | 03/2015 | 2,43                                     | 52,39                             | 06/2019 | 4,40                                     | 96,54                             | 09/2023 | -4,88                                    | 193,51                            |
| 01/2011 | 0,98                                     | 20,86                             | 04/2015 | 3,37                                     | 53,78                             | 07/2019 | 4,39                                     | 96,52                             | 10/2023 | -4,40                                    | 195,01                            |
| 02/2011 | 1,94                                     | 22,01                             | 05/2015 | 3,79                                     | 54,40                             | 08/2019 | 3,86                                     | 95,53                             | 11/2023 | -3,91                                    | 196,50                            |
| 03/2011 | 2,57                                     | 22,76                             | 06/2015 | 4,50                                     | 55,46                             | 09/2019 | 4,39                                     | 96,51                             | 12/2023 | -3,30                                    | 198,40                            |
| 04/2011 | 3,07                                     | 23,37                             | 07/2015 | 5,11                                     | 56,36                             | 10/2019 | 4,96                                     | 97,59                             | 01/2024 | -0,27                                    | 197,60                            |
| 05/2011 | 3,08                                     | 23,38                             | 08/2015 | 5,53                                     | 56,99                             | 11/2019 | 5,85                                     | 99,27                             | 02/2024 | -0,67                                    | 196,39                            |
| 06/2011 | 2,95                                     | 23,21                             | 09/2015 | 7,03                                     | 59,22                             | 12/2019 | 7,70                                     | 102,74                            | 03/2024 | -0,97                                    | 195,49                            |
| 07/2011 | 2,89                                     | 23,15                             | 10/2015 | 8,91                                     | 62,02                             | 01/2020 | 0,09                                     | 102,93                            | 04/2024 | -0,26                                    | 197,63                            |
| 08/2011 | 3,52                                     | 23,91                             | 11/2015 | 10,21                                    | 63,96                             | 02/2020 | 0,11                                     | 102,95                            | 05/2024 | 0,61                                     | 200,22                            |
| 09/2011 | 4,30                                     | 24,84                             | 12/2015 | 10,70                                    | 64,68                             | 03/2020 | 1,75                                     | 106,29                            | 06/2024 | 1,11                                     | 201,71                            |
| 10/2011 | 4,72                                     | 25,34                             | 01/2016 | 1,53                                     | 67,21                             | 04/2020 | 1,80                                     | 106,39                            | 07/2024 | 1,95                                     | 204,22                            |
| 11/2011 | 5,17                                     | 25,87                             | 02/2016 | 2,33                                     | 68,53                             | 05/2020 | 2,89                                     | 108,60                            | 08/2024 | 2,07                                     | 204,58                            |
| 12/2011 | 5,00                                     | 25,67                             | 03/2016 | 2,78                                     | 69,25                             | 06/2020 | 4,54                                     | 111,94                            | 09/2024 | 3,12                                     | 207,70                            |
| 01/2012 | 0,30                                     | 26,05                             | 04/2016 | 3,15                                     | 69,87                             | 07/2020 | 6,98                                     | 116,90                            | 10/2024 | 4,70                                     | 212,43                            |
| 02/2012 | 0,37                                     | 26,13                             | 05/2016 | 4,32                                     | 71,79                             | 08/2020 | 11,13                                    | 125,30                            | 11/2024 | 5,94                                     | <b>216,13</b>                     |
| 03/2012 | 0,93                                     | 26,84                             | 06/2016 | 6,02                                     | 74,60                             | 09/2020 | 14,80                                    | 132,74                            |         |                                          |                                   |