

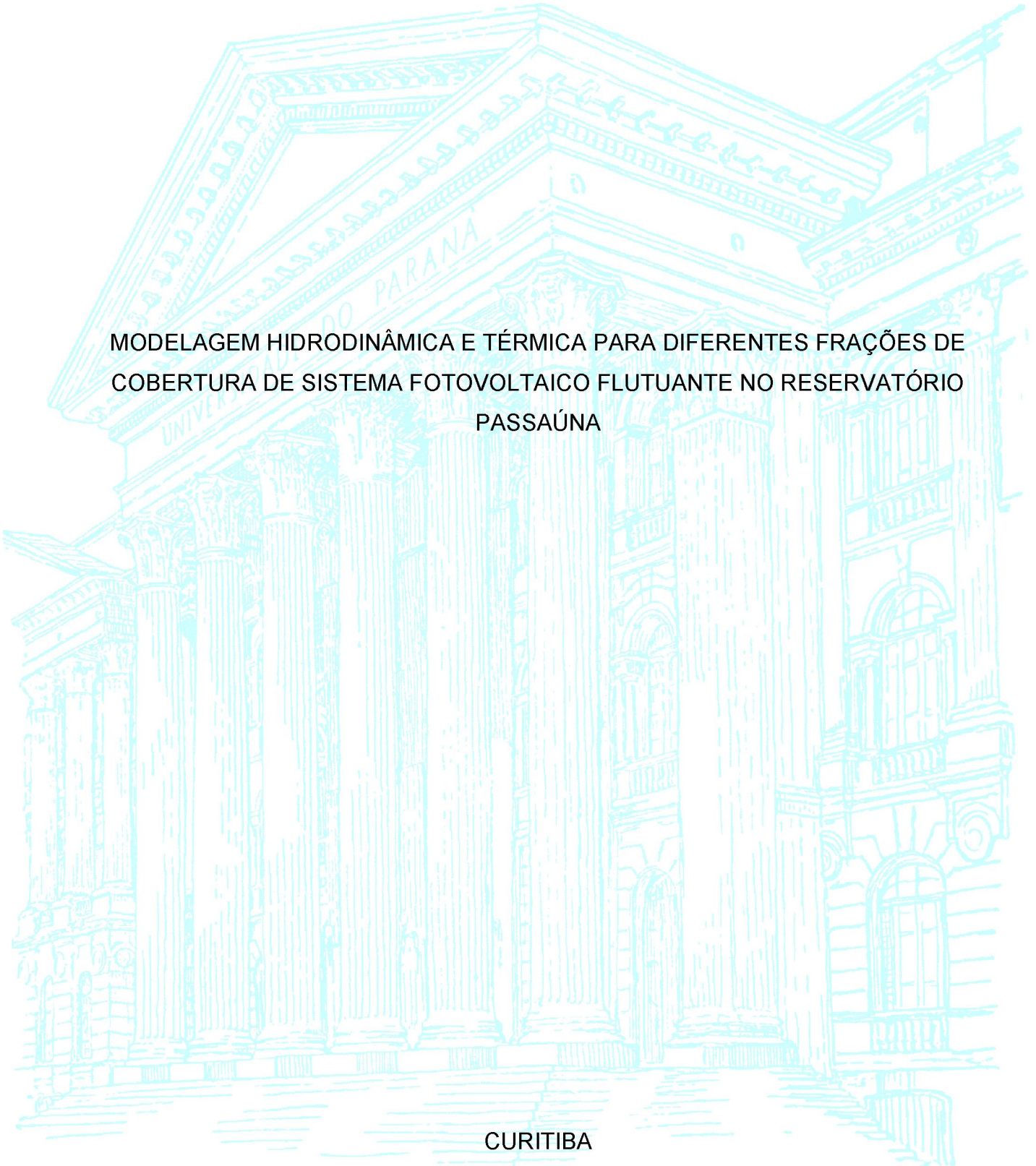
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ LUIZ DE SOUZA BONFIM

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E TÉRMICA PARA DIFERENTES FRAÇÕES DE
COBERTURA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO FLUTUANTE NO RESERVATÓRIO
PASSAÚNA

CURITIBA

2024



ANDRÉ LUIZ DE SOUZA BONFIM

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E TÉRMICA PARA DIFERENTES FRAÇÕES DE
COBERTURA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO FLUTUANTE NO RESERVATÓRIO
PASSAÚNA

Defesa de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Tobias Bleninger

Coorientadora: Dra. Mayra Ishikawa

CURITIBA

2024

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

Bonfim, André Luiz de Souza

Modelagem hidrodinâmica e térmica para diferentes frações de cobertura de sistema fotovoltaico flutuante no reservatório Passaúna / André Luiz de Souza Bonfim. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Tobias Bernward Bleninger

Coorientador: Mayra Ishikawa

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3. Hidrodinâmica. 4. Água – Temperatura. 5. Reservatórios. 6. Passaúna, Rio, Bacia (PR) . I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Bleninger, Tobias Bernward. IV. Ishikawa, Mayra. 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 AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDRÉ LUIZ DE SOUZA BONFIM** intitulada: **MODELAGEM HIDRODINÂMICA E TÉRMICA PARA DIFERENTES FRAÇÕES DE COBERTURA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO FLUTUANTE NO RESERVATÓRIO PASSAÚNA**, sob orientação do Prof. Dr. TOBIAS BERNWARD BLENINGER, 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, 29 de Maio de 2024.

Assinatura Eletrônica

31/05/2024 13:01:47.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/06/2024 11:45:34.0

TALITA FERNANDA DAS GRAÇAS SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS)

Assinatura Eletrônica

31/05/2024 10:56:54.0

MICHAEL MANNICH

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus, por me dar saúde, capacidade e condições de viver bem, sem nunca me faltar nada na vida, e por me dar fé para seguir em frente sempre.

Agradeço a minha mãe Luciana, por estar ao meu lado em todas as fases, me apoiando e me incentivando todos os dias, sendo fundamental em cada passo da minha vida e deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Tobias, por confiar em mim para executar este trabalho e por sempre estar pronto e animado para contribuir com sugestões e me manter motivado.

Aos meus amigos, cada um deles, por também estarem presentes nos bons e maus momentos, sempre os tornando melhores.

À minha coorientadora, Mayra, que também sempre me auxiliou nesta pesquisa, sempre sendo solícita mesmo nas dúvidas mais bobas que tive sobre a modelagem.

A todo o pessoal do Projeto FotoÁgua, por sempre estarem disponíveis para tirar dúvidas e fornecer os inúmeros dados do reservatório Passaúna necessários para este trabalho, e também a SANEPAR pela parceria com o Projeto, facilitando o acesso aos seus dados e ao local para as medições.

Aos professores da banca de qualificação e de defesa, pelo aceite de avaliar este trabalho e pelas sugestões de melhorias propostas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos Programas de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental (PPGEA) e de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) pela estrutura disponibilizada.

Meu muito obrigado a todos, por mim, individualmente, e por incentivarem a educação e a pesquisa acadêmica em geral.

"Pesquisar é acordar para o mundo." (Marcelo Lamy)

"Inteligência é a habilidade das espécies para viver em harmonia com o meio ambiente." (Paul Atson)

RESUMO

Sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios parecem ser uma ótima opção de geração de energia sustentável ao mesmo tempo que podem melhorar a disponibilidade de água nos reservatórios com a redução de evaporação, permitindo que estes corpos hídricos cumpram com maior eficiência as suas funções, seja de abastecimento ou geração de energia hidrelétrica. Porém, a maioria dos estudos sobre estes sistemas são teóricos, e quando incluem modelagem, têm seus focos principalmente em evaporação e não sobre a hidrodinâmica dos reservatórios. Este estudo visa verificar e analisar efeitos dos sistemas fotovoltaicos flutuantes no reservatório Passaúna, no Brasil, via modelagem tridimensional da hidrodinâmica do modelo Delft3D, considerando diferentes cenários com porcentagens de área superficial coberta distintas. Em relação à qualidade do modelo, foi realizada a recalibração de um modelo já existente para o reservatório, validada por meio da comparação com dados medidos de temperatura e nível d'água. Os resultados da modelagem mostram alterações devido ao sistema fotovoltaico flutuante em diversos parâmetros, como aumento de temperatura abaixo da estrutura flutuante e no entorno, remoção da evaporação na região coberta, diminuição da magnitude de velocidade da água na região coberta e aumento no entorno, e redução da energia dissipada na região coberta. Cabe destacar que estes efeitos foram observados apenas nas camadas superficiais do reservatório, sem alterações devido ao sistema fotovoltaico flutuante em camadas mais profundas.

Palavras-chaves: Modelagem de sistemas fotovoltaicos flutuantes. Reservatório com geração de energia solar. Hidrodinâmica. Temperatura da água. Evaporação em reservatórios.

ABSTRACT

Floating photovoltaic systems in reservoirs seem to be a great option for generating sustainable energy at the same time as they can improve the availability of water in reservoirs with the reduction of evaporation, allowing these water bodies to fulfill their functions more efficiently, whether supplying or generating hydroelectric energy. However, most studies on these systems are theoretical, and when they include modeling, they focus mainly on evaporation and not on the hydrodynamics of the reservoirs. This study aims to verify and analyze the effects of floating photovoltaic systems in the Passaúna reservoir, in Brazil, via three-dimensional modeling of the hydrodynamics of the Delft3D model, considering different scenarios with different percentages of covered surface area. Regarding the quality of the model, a recalibration of an existing model for the reservoir was carried out, validated through comparison with measured temperature and water level data. The modeling results show changes due to the floating photovoltaic system in several parameters, such as an increase in temperature below the floating structure and in the surroundings, removal of evaporation in the covered region, decrease in the magnitude of the water velocity in the covered region and increase in the surroundings, and reduction of energy dissipated in the covered region. It should be noted that these effects were observed only in the superficial layers of the reservoir, without changes due to the floating photovoltaic system in deeper layers.

Key-words: Modeling of Floating photovoltaic system. Reservoir with solar energy generation. Hydrodynamic. Water temperature. Evaporation on reservoirs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 – Localização do reservatório Passaúna e posicionamento do sistema fotovoltaico flutuante. | 23 |
| FIGURA 2 – Sistema fotovoltaico flutuante no reservatório Passaúna. | 24 |
| FIGURA 3 – Esquema do sistema de monitoramento do projeto FotoÁgua, com a representação do SFF, dos sensores fixos (nos pontos PV1 e LR e estação meteorológica) e dos sensores móveis (no barco). | 25 |
| FIGURA 4 – Localização da estação meteorológica em relação ao SFF. | 27 |
| FIGURA 5 – Figura esquemática sobre a interpretação do software Delft3D e estruturas flutuantes. sendo E: evaporação, P: precipitação, W: velocidade do vento, H e h: altura da coluna d'água. | 33 |
| FIGURA 6 – Localização das estruturas flutuantes na grade de modelagem. | 36 |
| FIGURA 7 – Séries temporais das vazões dadas como entrada para o modelo. | 38 |
| FIGURA 8 – Nível d'água na barragem do reservatório Passaúna: medições no vertedouro (azul) e resultados das simulações no cenário base (laranja). | 41 |
| FIGURA 9 – Correlação entre o nível d'água na barragem do reservatório Passaúna medido e modelado. De agosto de 2022 (roxo) até agosto de 2023 (amarelo). | 42 |
| FIGURA 10 – Séries temporais de temperatura, comparando dados medidos (MiniDot) e dados simulados (cenário base), a) na superfície do PV1 e b) 6 metros de profundidade no PV1, c) na superfície do LR e d) 6 metros de profundidade no LR. | 43 |
| FIGURA 11 – Correlação entre as temperaturas medidas e modeladas, a) na superfície do PV1 e b) 6 metros de profundidade no PV1, c) na superfície do LR e d) 6 metros de profundidade no LR. De agosto de 2022 (roxo) até agosto de 2023 (amarelo). | 44 |
| FIGURA 12 – Perfis de temperatura no ponto LR, sendo o primeiro com valores medidos, o segundo com valores simulados no cenário base e o terceiro a diferença entre eles. | 45 |
| FIGURA 13 – Perfis de temperatura no ponto PV1, sendo o primeiro com valores medidos, o segundo com valores simulados no cenário base e o terceiro a diferença entre eles. | 45 |
| FIGURA 14 – Mapas de taxa de evaporação média no reservatório Passaúna. expandido: grande cobertura de módulos; piloto: cobertura atual de módulos; base: sem módulos fotovoltaicos. | 46 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 15 – Mapas de diferença entre cenário expandido menos cenário base de taxa de evaporação no reservatório Passaúna. | 47 |
| FIGURA 16 – Frações de área coberta do reservatório e redução de volume total evaporado em cada modelagem. | 48 |
| FIGURA 17 – Diferença de volume evaporado ao longo do tempo, para cenário base menos cenário piloto acima e base menos expandido abaixo. | 48 |
| FIGURA 18 – Mapas de temperatura média superficial no reservatório Passaúna. Expandido: grande cobertura de módulos; Piloto: cobertura atual de módulos; Base: sem módulos fotovoltaicos. | 49 |
| FIGURA 19 – Mapas de temperatura média superficial no reservatório Passaúna, com zoom na região lacustre. | 50 |
| FIGURA 20 – Mapas de diferença entre cenário piloto menos cenário base de temperatura superficial no reservatório Passaúna, com zoom na área coberta. Média de todo o período; média diária; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite. | 51 |
| FIGURA 21 – Mapas de diferença entre cenário expandido menos cenário base de temperatura superficial no reservatório Passaúna. Média de todo o período; média diurna; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite. | 52 |
| FIGURA 22 – Perfil de temperatura nos pontos PV1 e LR, medidos e modelados. | 53 |
| FIGURA 23 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para o cenário base. | 54 |
| FIGURA 24 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para o cenário piloto. | 54 |
| FIGURA 25 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para o cenário expandido. | 55 |
| FIGURA 26 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para os dados medidos. | 55 |
| FIGURA 27 – Séries temporais de diferença de temperatura nos pontos PV1 menos LR. | 56 |
| FIGURA 28 – Séries temporais de diferença de temperatura na superfície menos profundidade de 6 metros. | 57 |
| FIGURA 29 – Séries de temperatura no cenário expandido, para PV1 e LR e a diferença entre eles, na camada superficial e 6 metros abaixo. | 58 |
| FIGURA 30 – Boxplots das séries de temperatura. | 58 |
| FIGURA 31 – Mapas de magnitude de velocidade média superficial no reservatório Passaúna. Expandido: grande cobertura de módulos; Piloto: cobertura atual de módulos; Base: sem módulos fotovoltaicos. | 59 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 32 – Mapas de magnitude de velocidade média superficial no reservatório Passaúna, com zoom na região lacustre. | 60 |
| FIGURA 33 – Mapas de diferença entre cenário base menos cenário piloto de magnitude de velocidade superficial no reservatório Passaúna, com zoom na área coberta. Média de todo o período; média diária; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite. | 61 |
| FIGURA 34 – Mapas de diferença entre cenário base menos cenário expandido de magnitude de velocidade superficial no reservatório Passaúna. Média de todo o período; média diurna; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite. | 61 |
| FIGURA 35 – Velocidade média do vento para cada hora, considerando o período da modelagem de Agosto/2022 até Agosto/2023. | 62 |
| FIGURA 36 – Séries de magnitude de velocidade horizontal no cenário expandido, na camada superficial e 6 metros abaixo. | 63 |
| FIGURA 37 – Boxplots das séries de velocidade horizontal. | 63 |
| FIGURA 38 – Série de magnitude de velocidade horizontal em uma média de todas as profundidades, no cenário expandido. | 64 |
| FIGURA 39 – Boxplots das séries de velocidade horizontal em uma média de todas as profundidades. | 65 |
| FIGURA 40 – Séries de dissipação de energia no cenário expandido, na camada superficial e 6 metros abaixo. Escala log para a dissipação e escala normal para as diferenças. | 66 |
| FIGURA 41 – Boxplots das séries de dissipação de energia. | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 – Estudos envolvendo modelagem com sistemas fotovoltaicos flutuantes. | 22 |
| TABELA 2 – Especificações técnicas dos sensores fixos do projeto FotoÁgua. | 26 |
| TABELA 3 – Parâmetros medidos pelos sensores da estação meteorológica. . | 28 |
| TABELA 4 – Especificações técnicas dos sensores fixos da Sanepar. | 28 |
| TABELA 5 – Especificações técnicas dos sensores móveis. | 29 |
| TABELA 6 – Resumo do monitoramento durante o projeto FotoÁgua. | 30 |
| TABELA 7 – Parâmetros e configurações da modelagem original. | 35 |
| TABELA 8 – Períodos modelados e suas finalidades. | 37 |
| TABELA 9 – Médias das variáveis em todos os cenários, para PV1 e LR. . . . | 68 |
| TABELA 10 – Aumento percentual das variáveis nos cenários com cobertura em relação ao base (negativos representam redução). | 68 |
| TABELA 11 – Probabilidades p-valor do teste ANOVA. | 69 |
| TABELA 12 – Probabilidades p-valor do teste t para 2 amostras. | 69 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | OBJETIVOS | 17 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 17 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 18 |
| 3.1 | IMPACTOS AMBIENTAIS DEVIDO AOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES | 18 |
| 3.2 | MODELAGEM DE SFF EM RESERVATÓRIOS | 19 |
| 4 | MÉTODOS | 23 |
| 4.1 | ÁREA DE ESTUDO | 23 |
| 4.2 | SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DADOS | 25 |
| 4.2.1 | Sensores Fixos — Medições contínuas | 26 |
| 4.2.2 | Sensores Móveis — Medições <i>in-situ</i> | 28 |
| 4.2.3 | Processamento e análise de dados | 29 |
| 4.3 | MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D | 31 |
| 4.3.1 | Considerações e equações do modelo | 31 |
| 4.3.2 | Representação do Sistema Fotovoltaico Flutuante | 32 |
| 4.3.3 | Limitações | 33 |
| 4.4 | MODELO PRÉVIO NO RESERVATÓRIO, MODELAGEM SIMPLIFICADA E MODELAGEM COM SFF NO PERÍODO DESSE MODELO PRÉVIO | 34 |
| 4.5 | CENÁRIOS DE COBERTURA | 35 |
| 4.6 | PERÍODOS DA MODELAGEM | 36 |
| 4.7 | DADOS PARA A MODELAGEM E RECALIBRAÇÃO | 37 |
| 4.8 | ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS | 39 |
| 4.8.1 | Resolução temporal | 39 |
| 4.8.2 | Resolução espacial | 39 |
| 4.8.3 | Ambas as resoluções | 40 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 5.1 | CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO | 41 |
| 5.2 | EVAPORAÇÃO | 45 |
| 5.2.1 | Taxa de Evaporação | 45 |
| 5.2.2 | Volume Evaporado | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3 | TEMPERATURA | 49 |
| 5.3.1 | Temperatura Superficial | 49 |
| 5.3.2 | Perfis de Temperatura em LR e PV1 | 51 |
| 5.3.3 | Séries temporais nos pontos PV1 e LR | 56 |
| 5.4 | MAGNITUDE DE VELOCIDADE | 59 |
| 5.4.1 | Velocidade Superficial | 59 |
| 5.4.2 | Séries temporais de velocidade horizontal | 62 |
| 5.4.3 | Séries temporais de velocidade horizontal em uma média de todas as profundidades | 64 |
| 5.5 | DISSIPACÃO DE ENERGIA — TURBULÊNCIA | 65 |
| 5.6 | RESUMO DOS RESULTADOS RELACIONADOS AO SFF | 67 |
| 6 | CONCLUSÕES | 71 |
| | Bibliografia | 73 |

1 INTRODUÇÃO

Reservatórios artificiais possuem um papel importante para a humanidade ao disponibilizar água para diferentes usos. Entre suas funções, uma das mais importantes está nos reservatórios destinados ao abastecimento público, principalmente ao considerar que o Brasil constantemente enfrenta problemas relacionados à seca em diferentes regiões (GETIRANA; LIBONATI; CATALDI, 2021). No entanto, a construção de reservatórios interrompe o fluxo fluvial natural, resultando, potencialmente, em problemas com assoreamento, eutrofização e de aumento da evaporação (HOGEBOM; KNOOK; HOEKSTRA, 2018). Tais problemas podem causar a redução da qualidade de água do reservatório e de forma extrema até a impossibilidade de abastecimento hídrico.

Neste contexto, o uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes (SFF) pode criar um benefício mútuo para reservatórios, gerando energia elétrica renovável e com possibilidade de reduzir a evaporação em até 90%, conforme Taboada et al. (2017), se toda a área superficial for coberta por módulos. De acordo com Scavo et al. (2020), coberturas de 50% da superfície da água reduziram a evaporação de 30 a 73%, dependendo do tipo de módulo fotovoltaico. Outro benefício para os reservatórios é, com a redução da insolação, reduzir o crescimento de algas (WORLD BANK GROUP; SERIS, 2019).

A possibilidade da instalação de SFF em reservatórios com diversos usos, como produção de hidroeletricidade, ou reservatórios com captação de água, onde já há infraestrutura elétrica de transmissão da energia existente que pode ser aproveitada, e até mesmo em lagos de aquicultura também são fatores favoráveis, embora ainda haja a necessidade de mais estudos como o de Liao et al. (2022) que atestem a vantagem econômica sem afetar a segurança alimentar.

O uso do espelho d'água reduz custos de aquisição de áreas terrestres, que além de dificultar a instalação devido às restrições topográficas, ainda precisa competir com outros usos de terra, como produção de alimentos (PRINSLOO; SCHMITZ; LOMBARD, 2023). Adicionalmente, a instalação acima de uma superfície aquática beneficia os módulos fotovoltaicos pelo seu maior resfriamento e controle térmico quando comparado a sistemas fotovoltaicos terrestres (SFT) (BAHAIDARAH et al., 2013; CHOI, 2014). Esses dois fatores juntos deixam o SFF com uma produção de energia por área utilizada maior que no caso do SFT e de outras fontes de energia renovável, como a eólica (CAGLE et al., 2020).

Devido ao crescimento mundial das aplicações de módulos fotovoltaicos, seus custos reduziram significativamente, incentivando a construção de várias usinas fotovoltaicas flutuantes pelo mundo (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL), 2019; INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA), 2019a,b).

No Paraná, atualmente, há duas usinas fotovoltaicas flutuantes em operação. Uma delas é a existente no reservatório Passaúna, operado pela Sanepar e localizado na porção oeste da cidade de Curitiba, inaugurada em 2019 com 396 módulos e capacidade máxima de 130 kWp, cobrindo uma área de aproximadamente 1.200 m² conforme SANEPAR (2021), sendo a área de estudo desta pesquisa. A previsão é de expansão de até 5 MWp neste ou em outros reservatórios da Sanepar a curto prazo. A usina fotovoltaica flutuante do reservatório Passaúna ainda é um sistema experimental de pequeno porte. No entanto, como o reservatório é utilizado para abastecimento público, se houver uma expansão da área da usina fotovoltaica, o sistema de bombeamento da Estação de Captação poderá aproveitar a energia gerada, juntando, assim, benefício ambiental e de gestão do saneamento. O estudo de Santos et al. (2022) mostrou como essa ampliação no SFF do reservatório Passaúna poderia aumentar a disponibilidade da água e de energia para a população.

Os estudos sobre benefícios ambientais destes sistemas, em sua maioria, têm o foco nos processos de evaporação, porém com poucos estudos in-situ. Haas et al. (2020) destacam que um grande desafio científico de grandes instalações está relacionado aos efeitos ecossistêmicos, sobre os quais os autores focam na análise teórica (sem medições em campo) do efeito da restrição da penetração da luz, reduzindo o potencial de fotossíntese dos organismos. Eles argumentam, como qualitativamente citado em outros estudos (WORLD BANK GROUP; SERIS, 2019), do efeito favorável, inibindo florações de algas potencialmente tóxicas e eventos de eutrofização, mas destacam que grandes instalações podem reduzir a produção primária básica, afetando a cadeia alimentar. Abdelal (2021) argumenta na mesma linha, porém, não apresenta resultados de medições ou abordagens quantitativas.

Uma das poucas pesquisas que realizavam avaliações *in situ* foi de Lee et al. (2017), comparando parâmetros de qualidade de água (temperatura, pH, oxigênio dissolvido-OD, clorofila-a, algas azuis-esverdeadas, demanda química de oxigênio, nitrogênio total-NT, e fósforo total-FT) em regiões cobertas e não cobertas. Os autores não identificaram diferenças significativas, porém, destacaram que se tratava de uma área coberta pequena (0,5% de área superficial do reservatório). Também devido à escala, Bax et al. (2023) não observaram diferenças significativas na temperatura e na concentração de OD em uma cobertura de menos de 0,01% de área superficial de um reservatório de água salgada, o que também piora a qualidade de medição, no que diz respeito a sua precisão e manutenção sem corrosão dos equipamentos.

Em relação às desvantagens desses sistemas, há uma grande escassez de estudos, porém há as altamente conhecidas relacionadas a instalação (fixação) e manutenção (acesso) do sistema. Wang et al. (2022) observou um aumento na concentração de metais pesados carcinogênicos em lagoas de subsidência de mineração com cobertura fotovoltaica comparado com as sem cobertura, tanto em um sistema flutuante como em um fixo na água.

O arranjo do SFF, por sua vez, também é importante, sendo modelos de painéis inclinados nas quais pode ou não haver aberturas para entrada de luz e interação ar-água e modelos horizontais com os painéis em contato direto com a água. Estudos mostram os diferentes efeitos no reservatório causados pelo arranjo, como Bax et al. (2023) com a diferença na luminosidade abaixo dos painéis. Em relação ao SFF, Micheli (2022) em sua revisão relata que sistemas horizontais de fato mantêm a temperatura do sistema mais baixa pela troca de calor direto com a água, já sistemas inclinados muitas vezes operam em temperaturas mais altas que sistemas terrestres, devido à troca de calor ser com o ar. Esse aumento de temperatura do sistema aumentou também a temperatura da água logo abaixo do SFF no estudo de Yang et al. (2022).

Há uma escassez de estudos relacionados a sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de maneira geral, principalmente em relação à hidrodinâmica destes corpos hídricos. Os estudos com modelagem matemática nestes arranjos também são em baixa quantidade e visa geralmente a análise da evaporação e manutenção de volume de água do reservatório, sem analisar outros aspectos relevantes, através dos modelos.

Dessa forma, a principal pergunta que este estudo visa responder é: “É possível verificar a existência de efeitos positivos e negativos de um SFF por meio de modelagem numérica de um reservatório?”. Logo, a hipótese é de que as alterações na água causadas pelo SFF, por menores que possam ser, encontrados na modelagem sejam semelhantes aos observados e medidos na situação atual do reservatório Passaúna. A estratégia e análise se dá em um modelo calibrado e capaz de representar a hidrodinâmica do reservatório, que por sua vez permitirá realizar projeções de situações futuras com maior porcentagem de área coberta por SFF, o que seria de grande relevância para estudos de implementação de SFF maiores, tanto no reservatório Passaúna como em outros reservatórios próximos e/ou com características semelhantes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar e comparar os efeitos decorrentes da implantação de SFF no reservatório do Passaúna, em diferentes cenários de cobertura, por meio da modelagem hidrodinâmica tridimensional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em relação aos objetivos específicos que se almeja alcançar durante o estudo, podem ser citados:

- recalibrar e validar o modelo, por meio de comparação com dados medidos de temperatura e nível;
- verificar a capacidade da modelagem em reproduzir as alterações locais em pontos em regiões cobertas e não cobertas, com dados medidos de:
 - Perfis de temperatura;
 - Séries temporais de temperatura;
- verificar as diferenças entre os cenários, analisando os efeitos do SFF na modelagem em:
 - Evaporação;
 - Temperatura da água;
 - Magnitude de Velocidade;
 - Dissipação de energia, para verificar a turbulência;

3 REVISÃO DE LITERATURA

Estudos envolvendo a influência do SFF na hidrodinâmica de lagos e reservatórios ainda são escassos, pois se trata de uma tecnologia recente, que está em fase de implementação (ALMEIDA et al., 2022). Grande parte dos estudos que envolvem SFF estão relacionados ao estudo de potencial de geração de energia e volumes de água não perdidos com evaporação, como o estudo de Joshi, Rosenlieb e Gadzanku (2023).

Apesar da escassez de estudos, nos últimos anos esse assunto vem despertando o interesse científico, principalmente por ser visto como uma solução para o desenvolvimento sustentável, ao gerar energia renovável, aumentar a disponibilidade e talvez até mesmo a qualidade de água desses corpos hídricos.

Nesse processo de implementação, os modelos matemáticos são ferramentas de grande auxílio, ao servirem para previsões das reações nos corpos hídricos, por meio das comparações de diferentes cenários de cobertura com SFF.

3.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DEVIDO AOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES

Os SFFs podem impactar o sistema aquático durante as fases de montagem, instalação e, principalmente, durante a operação do sistema. Dentre os principais impactos estão a limitação da luz solar (que pode causar mudanças nos ecossistemas e redução na fotossíntese), mudança nas correntes e padrões de interação da superfície da água com o vento, redução na evaporação, lixiviação de substâncias/metais pesados e, por consequência, mudanças na qualidade da água (MATHIJSEN et al., 2020). Os impactos ambientais dependem das dimensões e do arranjo do sistema, bem como das características do sistema aquático (correntes, efeitos das marés, perfil de temperatura) e condições climatológicas.

A diminuição da radiação solar e a redução da interação do vento com a superfície da água podem causar alterações na hidrodinâmica e na qualidade da água, como, por exemplo, o oxigênio dissolvido, os nutrientes e as algas.

Por consequência, se os impactos devido aos SFF chegarem a um nível mais intenso, criando condições ambientais distintas entre região coberta e não coberta, podem ocorrer alterações comportamentais da fauna local com a criação de novos nichos. Por exemplo, baixas concentrações de oxigênio dissolvido causam um ecossistema desequilibrado, com mortalidade de peixes, odores e outros incômodos estéticos. Quando as concentrações de oxigênio são reduzidas, os animais aquáticos são for-

çados a alterar seus padrões respiratórios ou diminuir seu nível de atividade (COX, 2003).

A temperatura da água é um dos parâmetros com maior influência sobre a vida e os sistemas aquáticos (CATHCART; WHEATON, 1987; LIMA et al., 2021). Pode influenciar em processos físicos, químicos e biológicos, como padrões de circulação, concentrações de oxigênio e o crescimento e mortalidade de peixes. Além disso, diversas condições biológicas estão ligadas ao regime termal fluvial (BENYAHYA et al., 2007).

A concentração de metais pesados que causam riscos carcinogênicos aos seres humanos aumentou em lagoas de subsidência com SFF no estudo de Wang et al. (2022), devido principalmente ao aumento de Níquel (Ni) e Arsênio (As) nessas lagoas quando comparadas com as lagoas sem SFF. A alta concentração de Cromo (Cr) também ligou um alerta sobre essas lagoas, contaminadas pelas atividades de mineração. Embora o SFF não libere esses metais na água, a sua presença parece favorecer a sua permanência e acumulação.

Conforme Gadzanku, Mirletz et al. (2021) os principais co-benefícios da implantação dos SFF já são conhecidos, e estão surgindo novos com o passar do tempo. Porém, de maneira negativa, também há ainda uma grande lacuna de conhecimento quando se trata de possíveis problemas e impactos prejudiciais ao corpo hídrico e a própria estrutura do SFF.

Essas lacunas fazem com que regulamentações e normativas sobre os SFF ainda sejam escassas ou inexistentes em muitos aspectos, o que também se torna um atraso e um aumento de custos no desenvolvimento e implementação desta tecnologia (GADZANKU; BESHILAS; GRUNWALD, 2021).

A falta de regulamentações e normativas também é lembrada por Nobre et al. (2024), que destaca a grande variação entre as porcentagens de cobertura dos SFF já instalados em todo o mundo, que segundo os autores, indica uma forte dependência do arranjo do SFF com a situação local ecológica de cada corpo hídrico, fator que mostra a necessidade de regulamentações locais específicas.

3.2 MODELAGEM DE SFF EM RESERVATÓRIOS

O estudo dos efeitos dos SFFs nos reservatórios pode ser realizado a partir da modelagem das condições hidrodinâmicas e de qualidade da água em reservatórios, simulando a presença da cobertura pelos módulos na interface ar-água.

Um exemplo de aplicação é o estudo realizado no reservatório de Rapel, no Chile, em que Haas et al. (2020) utilizaram modelagem numérica tridimensional com ELCOM-CAEDYM (*Estuary, Lake, and Coastal Ocean Model — Computational*

Aquatic Ecosystem Dynamics Model), observando o crescimento de algas por meio da concentração de Clorofila-a com diferentes porcentagens de cobertura por módulos. Os resultados obtidos mostraram que uma cobertura abaixo de 40% do reservatório não demonstrou efeitos significativos no desenvolvimento de algas, enquanto valores acima de 60% resultaram em sua erradicação. Uma cobertura variando entre 40% e 60% se mostrou adequada, permitindo seu desenvolvimento controlado. Este estudo também considerou a receita gerada pela usina hidrelétrica, pois os módulos necessitam da elevação do nível mínimo de água do reservatório, para manter os SFF em uma superfície aquática. Os resultados mostraram que uma cobertura acima de 60% gera perdas significativas na geração de energia hidrelétrica devido à necessidade de manutenção de um nível de água mínimo mais elevado no reservatório, reduzindo a vazão utilizada na geração de energia e aumentando a vazão pelo vertedouro.

Também utilizando o modelo ELCOM-CAEDYM e com medições *in situ*, que permitiram uma boa comparação e calibração do modelo, Yang et al. (2022) notaram impactos consistentes da cobertura de 0,7% e de 30% de SFF de área superficial dos reservatórios, nos dados medidos e nos dados modelados, respectivamente. Os resultados do estudo realizado nos reservatórios Tengeh e Poyan, na Singapura, apresentam aumento na temperatura média da água na região coberta, aumento do número de Richardson (representando estabilidade da coluna d'água), e redução da energia de mistura. Na qualidade da água, houve alterações localizadas na região coberta, com redução de clorofila-a, carbono orgânico total (COT) e oxigênio dissolvido (OD), e aumento de nitrogênio (NT) e fósforo total (FT).

Abd-Elhamid et al. (2021) observaram que cobrir áreas rasas do lago Nasser, no Egito, foi eficiente e econômico no que diz respeito à evaporação de água no reservatório. As estimativas de evaporação foram realizadas considerando métodos aerodinâmicos, utilizando a equação de Harbeck (ROSENBERRY et al., 2007). Este estudo considerou coberturas de 25%, 50%, 75% e 100% do reservatório, e estimou os volumes de água que seriam mantidos devido à redução de evaporação e da energia produzida pelos módulos, em cada um dos cenários. O estudo indicou que o uso de SFFs pode auxiliar no aumento de disponibilidade de água e na produção de energia, principalmente em regiões áridas e semiáridas.

Scavo et al. (2021) analisaram o lago Lentini, na Itália, por meio de modelos de evaporação como Penman-Monteith (PENMAN H., 1948), Valiantzas (2006), Hargreaves (HARGREAVES; ALLEN, 2003) e outros, e propuseram modelos de evaporação baseados nos métodos de regressão linear e *design of experiments (DoE)*. Os resultados mostraram que não apenas a porcentagem de superfície coberta influencia na quantidade de evaporação de água, mas também que as características do arranjo flutuante possuem significativa relevância. Além disso, com um arranjo otimizado, ou

seja, posicionado em áreas de maior evaporação e com o espaçamento adequado, é possível reduzir a evaporação em até 49% com 30% da superfície do reservatório coberta.

Exley et al. (2021) estudaram os potenciais efeitos da instalação de um SFF no lago Windemere, na Inglaterra. Por meio do modelo MyLake (modelo unidimensional-1D), simularam cenários variando a cobertura dos módulos entre 0 a 100% da superfície do lago, a partir da redução da radiação incidente e da velocidade do vento. Seus resultados não apresentaram uma variação linear, sendo dependentes do arranjo do sistema e da cobertura. Contudo, em sua maioria, apresentaram redução de temperatura da água e diminuição da estratificação térmica.

Usando o reservatório de Xiangjiaba (China) como estudo de caso, Ji et al. (2022) estudaram o impacto potencial da instalação de um sistema flutuante na área do lago. Utilizando o modelo CE-QUAL-W2 (modelo bidimensional-2D), aplicando reduções na radiação incidente e na velocidade do vento, seus resultados apresentaram reduções na temperatura da água e maior estabilidade da coluna d'água.

Ainda, recentemente Ilgen et al. (2023) quantificaram os impactos de um SFF no lago Mainwald (Alemanha), avaliando a temperatura da água, balanço de energia e estratificação da coluna d'água. Com dados de temperatura da água, medidos durante três meses, calibraram um modelo hidrodinâmico do lago com o SFF utilizando o GLM (1D), a fim de simular cenários de expansão. Seus resultados mostraram uma menor estratificação durante o verão, e a redução da temperatura da água seguiu uma relação não linear com o aumento da área de cobertura com painéis.

Na Tabela 1 é apresentado uma caracterização dos estudos citados, com informações dos locais de estudo, do SFF, da modelagem realizada, da representação do SFF adotada, a calibração do modelo e o impacto do SFF, obtido como resultado.

As diferentes abordagens de cada estudo, que, embora possuam um objetivo comum (o de encontrar o impacto do SFF em lagos ou reservatórios por meio de modelagem), avaliam diferentes variáveis, resultaram em impactos semelhantes na temperatura, embora também haja divergência. Já para as outras variáveis, os resultados se mostram mais imprevisíveis, onde as condições locais também podem possuir impacto significativo.

Tabela 1 – Estudos envolvendo modelagem com sistemas fotovoltaicos flutuantes.

| Referência | Ilgen et al., 2023 | Ji et al., 2022 | Abd-Elhamid et al., 2021 | Exley et al., 2021 | Scavo et al., 2021 | Haas et al., 2020 | Yang et al., 2022 |
|----------------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|---|---|
| Local | Lago Maiwald (Alemanha) | Reservatório Xiangjiaba (China) | Lago Nasser (Egito) | Lago Windemere (Inglaterra) | Lago Lentini (Itália) | Reservatório Rapel (Chile) | Sistema de reservatórios Tangeh-Poyan (Singapura) |
| Tamanho do lago | 0,37 km ² | 5,2 Mm ³ | 6500 km ² , 162 Mm ³ | 6,7 km ² | 12 km ² | 400 Mm ³ , prof. máxima: 55 m | Não informado |
| SFF existente ou potencial | Existente | Potencial | Potencial | Potencial | Potencial | Potencial | Existente (escala de demonstração) e potencial |
| % área de células | 0,02 | 0a 100% | 25 a 100% | - | 0 a 50% | 0 a 100% | 1% (existente) e 30% (potencial) |
| Modelo utilizado | General Lake Model (GLM) | Ce-qual-W2 | bulk aerodynamic method (estimativa de perdas por evaporação) | MyLake | Estimativa de perdas por evaporação | ELCOM-CAEDYM | ELCOM-CAEDYM |
| Tipo de modelagem | 1DV | 2DV | - | 1DV | - | 3D | 3D |
| Qualidade da Água | Não | Não | Não | Não | Não | Sim. Focando em Clorofila-a | Sim |
| Representação das células | Redução da radiação incidente e da velocidade do vento | Redução da radiação incidente e da velocidade do vento | % de área coberta | Redução da radiação incidente e da velocidade do vento | % de área coberta | Redução da radiação incidente | Radiação incidente e velocidade do vento zeradas, e umidade relativa estimada |
| Calibração | Calibrado com dados de temperatura (3 meses de medições) | Modelo calibrado previamente | - | - | - | Modelo calibrado previamente | Calibrado com vazão e dados de qualidade de água medidos |
| Impacto do SFF | Redução da temperatura e da estratificação | Redução da temperatura e aumento da estratificação | Aumento do volume de água | Redução da temperatura e da estratificação | Redução da evaporação | Desenvolvimento controlado de algas com cobertura SFF de 40 até 60% | Aumento da temperatura e da estratificação e redução da energia de mistura |

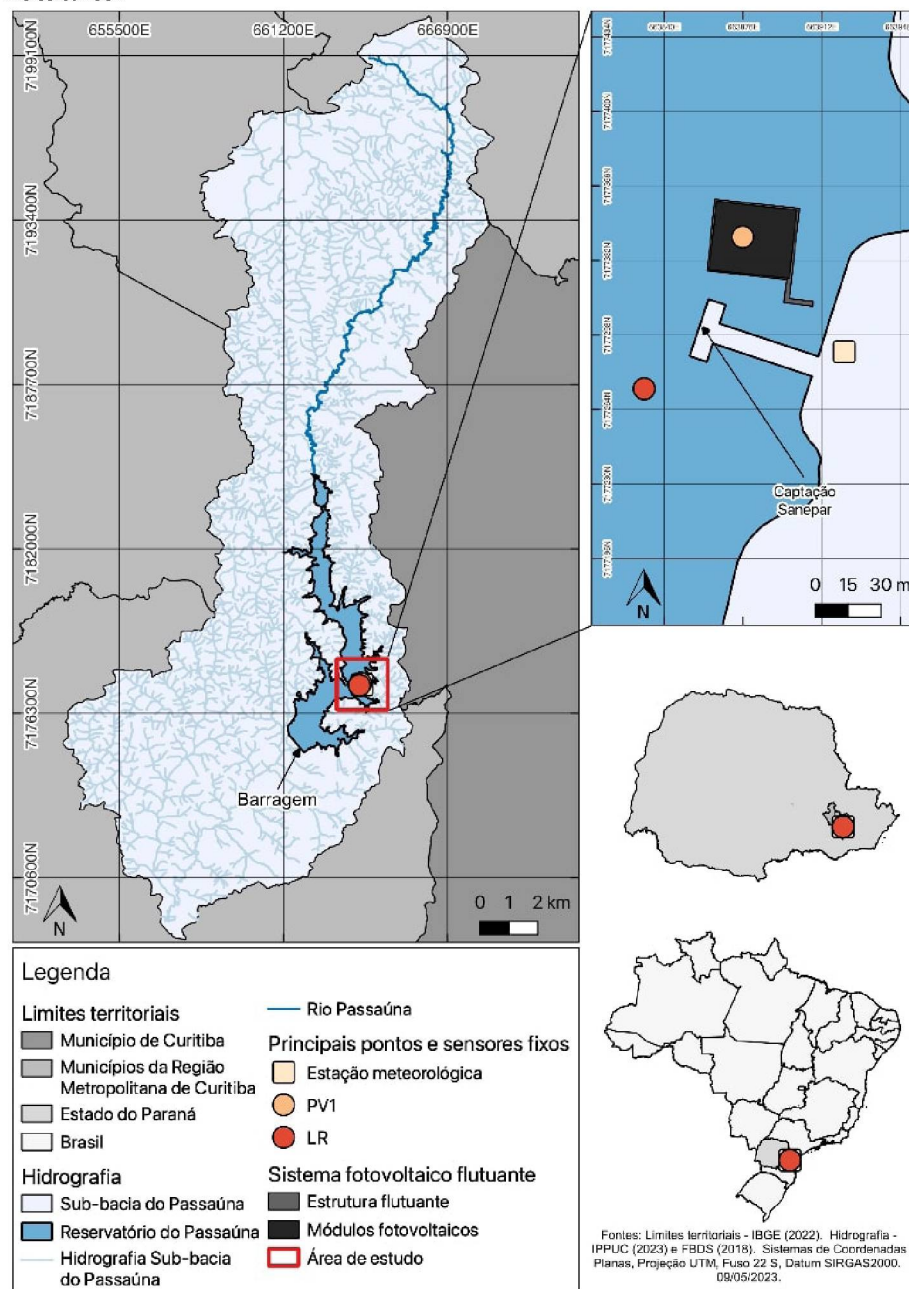
FONTE: O autor (2024)

4 MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O reservatório Passaúna está localizado na Região Metropolitana de Curitiba, capital do estado Paraná, no sul do Brasil (Figura 1).

Figura 1 – Localização do reservatório Passaúna e posicionamento do sistema fotovoltaico flutuante.



FONTE: O autor (2024)

Possui área superficial de aproximadamente 9 km², profundidade média de 8,3 m, profundidade máxima de 17,5 m, tempo de residência estimado em 292 dias e volume de aproximadamente 59 hm³ (MARCON, 2019). O reservatório Passaúna foi construído pelo barramento do rio Passaúna em 1989, com objetivo de abastecimento público.

A bacia hidrográfica do reservatório Passaúna tem aproximadamente 152 km² e abrange os municípios de Almirante Tamandaré, Campo Magro, Campo Largo, Araucária e Curitiba. O uso da terra é composto predominantemente de remanescentes florestais, área de cultivo, pastagem e áreas urbanizadas (MARCON, 2019).

O sistema fotovoltaico flutuante (SFF), apresentado na Figura 1, foi instalada pela Sanepar no reservatório Passaúna próximo à Estação de Captação em 2019, com capacidade máxima de 130 kWp, cobrindo uma área de aproximadamente 1.200 m² (SANEPAR, 2021). Uma imagem do sistema instalado é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Sistema fotovoltaico flutuante no reservatório Passaúna.



FONTE: O autor (2024)

A instalação do sistema fotovoltaico se iniciou ainda em 2017, com a pesquisa e planejamento, com o processo de licitação pela SANEPAR em 2018 e inauguração

em 2019 (NOVAK et al., 2021). Em 2019 foram realizados o projeto, a batimetria e a execução da obra. Em 2020, se iniciou a fase de operação e correção de falhas, e a partir de 2021 realizou-se a operação, manutenção e coleta de dados.

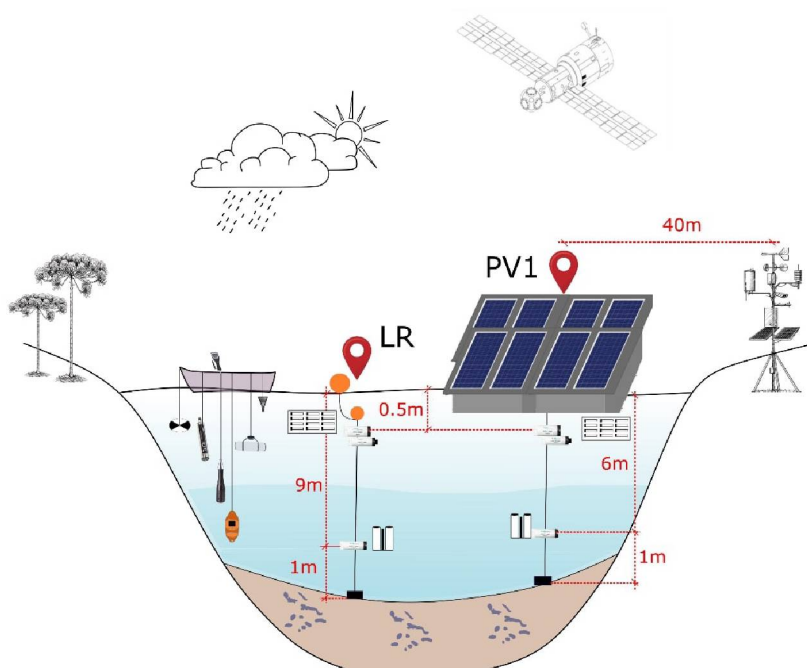
Para o monitoramento da usina foram instalados sensores de temperatura, pela SANEPAR, nos módulos fotovoltaicos e na água, embaixo dos módulos, que fornecem dados com alta frequência temporal. Também foi instalada uma estação meteorológica automática que registra dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação, velocidade e direção do vento (detalhamento na próxima seção) pelo projeto FotoÁgua.

O projeto FotoÁgua se tratou de uma parceria entre a Universidade Federal do Paraná - UFPR, a Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR, e a Fundação Araucária, que tinha como objetivo analisar efeitos de SFF sobre processos de transferência na interface ar-água e alterações na qualidade de água, envolvendo o monitoramento e processamento de dados, modelagem matemática e sensoriamento remoto do reservatório Passaúna.

4.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DADOS

O sistema de monitoramento é composto por sensores fixos de monitoramento contínuo e automatizado, complementados por sensores e equipamentos móveis utilizados durante o monitoramento mensal realizado durante o projeto FotoÁgua.

Figura 3 – Esquema do sistema de monitoramento do projeto FotoÁgua, com a representação do SFF, dos sensores fixos (nos pontos PV1 e LR e estação meteorológica) e dos sensores móveis (no barco).



FONTE: O autor (2024)

Adicionalmente, são utilizados os dados oriundos do monitoramento da SANE-PAR com relação a uma estação meteorológica já instalada no SFF do Passaúna, os dados de temperatura dos módulos e da água e os dados de operação do reservatório.

Foram monitorados três pontos na região dos módulos fotovoltaicos (PV1, PV6 e PV7) e dois pontos na região do reservatório de referência (L1 e LR), sendo os pontos PV1 e LR os mais representativos e monitorados. A localização do ponto de monitoramento da região de referência foi escolhida considerando uma área onde já não houvesse a influência dos módulos (verificado com medições e resultados de modelagem preliminares), mas próxima do local, para evitar diferenças devido à variabilidade espacial normal entre regiões do reservatório. O esquema está ilustrado na Figura 3.

A instalação dos sensores fixos foi realizada logo após o início do projeto (27/10/2022) sendo complementado por medições com sensores móveis nesta primeira data e depois a cada mês (25/11/2022; 16/12/2022; 26/01/2023; 16/02/2023 a 17/02/2023; 15/03/2023).

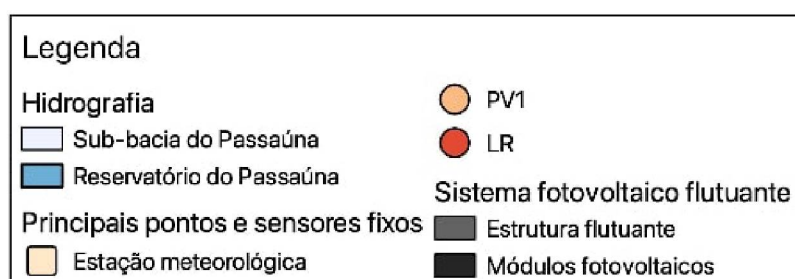
4.2.1 Sensores Fixos — Medições contínuas

O sistema de sensores fixos (Figura 4) foi desenvolvido de forma que fosse possível obter medições de radiação, temperatura e oxigênio dissolvido em dois pontos da coluna de água e em dois locais diferentes no reservatório, sendo um abaixo dos módulos fotovoltaicos (PV1, no meio do sistema flutuante) e outro fora da região dos módulos (LR), as profundidades nos dois locais são aproximadamente 7,0 m e 10,0 m, respectivamente. Em cada local foram instalados 2 sensores (um superficial a 0,5 m abaixo da superfície e um no fundo, 1,0 m acima do fundo do reservatório), dos quais a Tabela 2 apresenta as especificações técnicas destes sensores fixos adquiridos e instalados.

Tabela 2 – Especificações técnicas dos sensores fixos do projeto FotoÁgua.

| Sensor | Marca | Parâmetro / Intervalo | Precisão | Frequência de obtenção de dados |
|---------|-------|--|---|---------------------------------|
| miniDOT | PME | Oxigênio dissolvido: 0 a 150%; temperatura: 0 a 35 °C; | Oxigênio dissolvido: +/-5%; temperatura: +/-0,1 °C; | 1 medição a cada 5 min. |
| miniPAR | PME | Radiação: 400 a 700 nm (em temperaturas de 40 a 65 °C) | Sensibilidade: 4 µA por 1 000 µmol/s/m ² Azimute: <±1% de erro acima de 360° na elevação de 45° | 1 medição a cada 5 min. |
| miniLog | ICT | Temperatura: 0 a 40 °C | +/-0,2 °C | 1 medição a cada 1 min. |

Figura 4 – Localização da estação meteorológica em relação ao SFF.



FotoÁgua
Efeitos de sistemas fotovoltaicos flutuantes sobre processos de transferência na interface ar-água e efeitos para qualidade da água.

FUNDAÇÃO
ARAUCÁRIA

SANEPAR

UFPR
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Fontes: Hidrografia - IPPUC (2023). Sistemas de Coordenadas Planas, Projeção UTM, Fuso 22 S, Datum SIRGAS2000. 09/05/2023.

O sistema de sensores fixos inclui, também, os sensores presentes na estação meteorológica da Sanepar. A estação meteorológica da Sanepar está localizada aproximadamente nas coordenadas 663.922,309 L, 7.177.290,243 S (EPSG: 31982 — SIRGAS 2000 / UTM zone 22S), a uma distância de cerca de 50 m do centro do SFF. A estação meteorológica é automática e possui os três sensores para medir os dados meteorológicos, detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros medidos pelos sensores da estação meteorológica.

| Sensor | Parâmetros medidos |
|------------------------------------|--|
| Termo-higrômetro MeteoTemp RH+T | Temperatura do ar (°C) e Umidade relativa (%) |
| Anemômetro MeteoWind 2 | Velocidade do vento (m/s) e Direção do vento (°) |
| Piranômetro MS-80 | Radiação solar horizontal (W/m ²) e Radiação solar inclinada em 15° (W/m ²) |

FONTE: O autor (2024)

A Sanepar possui sensores de temperatura de água na barragem, na captação e no SFF, que, por sua vez, também dispõe de sensores de temperatura dos módulos fotovoltaicos, cujas especificações estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações técnicas dos sensores fixos da Sanepar.

| Sensor | Parâmetros medidos | Intervalo de medição | Precisão |
|-----------------|---|--|---|
| PT100, Classe A | Temperatura da água (°C) | -10 a 120 °C | $\pm 0,15 + (0,002t)$ °C, sendo t o valor absoluto de temperatura em °C (LIOHM, 2019) |
| PT100, Classe B | Temperatura do módulo fotovoltaico (°C) | -40 a 120 °C, mas armazena apenas de -20 a 80 °C | de -50 a 0 °C: $\pm 0,55$ °C; de 0 a 50 °C: $\pm 0,3$ °C; de 50 a 100°C: $\pm 0,8$ °C; de 100 a 150°C: $\pm 1,3$ °C; de 150 a 200°C: $\pm 1,8$ °C |

FONTE: O autor (2024)

4.2.2 Sensores Móveis — Medições *in-situ*

Os sensores móveis foram utilizados durante as medições nas campanhas de monitoramento com alta resolução espacial, complementando assim os sensores fixos dos quais há poucos, mas tendo alta resolução temporal. Foram utilizados os seguintes sensores, cujas especificações técnicas se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas dos sensores móveis.

| Sensor | Marca | Intervalo | Precisão | Acurácia |
|-----------------|--------|--|---|--|
| U-50-434 | Horiba | Oxigênio dissolvido: 0 a 50 mg/L; Temperatura: -10 a 55 °C; Profundidade: 30 m; pH: 0 a 14; Condutividade: 0 a 100 mS/cm; Salinidade: 0 a 70 PPT (permillage); Sólidos dissolvidos totais: 0 a 100 g/L; Turbidez: 0 a 800 NTU | Oxigênio dissolvido: +/-0,1 mg/L; Temperatura: +/-0,1 °C; pH: +/-0,1; Pot. Redox: +/-5 mV; Condutividade: +/-0,5% F.S. Salinidade: +/-1 PPT; | Oxigênio dissolvido: +/-0,2 mg/L (0 – 20 mg/L); +/-0,5 mg/L (20 – 50 mg/L); Temperatura: +/-0,3 °C + 0,005 t ; pH: +/-0,1; Pot. Redox: +/-15 mV; Condutividade: +/-1% F.S. (mediana de calibração de 2 pontos); Salinidade: +/-3 PPT; Sólidos dissolvidos totais: +/-5 g/L; Turbidez: +/-5% (leitura) ou +/-1 NTU (o que for maior) |
| CTD | Sontek | Condutividade: 0 a 100 µS/cm; Densidade: 990 a 1035 kg/m³; GPS: -; Pressão: 0 a 100 dBar; Salinidade: até 42 (PSS-78); Velocidade do som: 1400 a 1730 m/s; Condutividade específica: 0 a 250.000 µS/cm; Temperatura: -5 a 45 °C; Absorbância: 0,01 a 2.2 AU; 1,5 A 220/m; N-NO3: 0,03 a 10 mg/L; NO3: 0,13 a 44 mg/L; N-NO2: 0,05 a 15 mg/L; NO2: 0,17 a 50 mg/L; DOCEq: 0,5 a 100 mg/L; TOCEq: 0,5 a 100 mg/L; | - | Condutividade: 0,25% +/-5 µS/cm; Densidade: +/-0,02 kg/m³; GPS: 10 m; Pressão: 0,25% de FS; Salinidade: +/-0,1; Velocidade do som: +/-0,15 m/s; Condutividade específica: 0,25% +/-5 µS/cm; Temperatura: +/-0,05 °C |
| Opus | Trios | CODeq: 3 a 220 mg/L; BODeq: 3 a 220 mg/L; KHP: 0,5 a 400 mg/L; SAC254: 1,5 A 220/m; COD-SACeq: 2,2 a 320 mg/L; BOD-SACeq: 0,72 a 105 mg/L; TSSeq: 4 a 130 mg/L | - | - |
| Disco de Secchi | | Profundidade de penetração da luz. | - | - |

FONTE: O autor (2024)

4.2.3 Processamento e análise de dados

Após cada campanha mensal, foi realizado o processamento de todos os dados pela equipe do projeto FotoÁgua relacionada a segunda meta do projeto.

As etapas foram as seguintes: Análise de consistência e falhas; elaboração de gráficos comparativos (local com e sem módulos fotovoltaicos); análise de significância das diferenças; análise da correlação da intensidade das diferenças com parâmetros ambientais; e Identificação de períodos com maiores diferenças e análise de potenciais causas.

Tabela 6 – Resumo do monitoramento durante o projeto FotoÁgua.

| Parâmetro | Local | Profundidade | Frequência | Equipamento |
|--|--------------------------|--|------------------|-----------------|
| Temperatura da água (TA) e Oxigênio Dissolvido (OD) | PV1 e LR | Superficial (0,5m abaixo) e 6 metros abaixo | A cada 5 minutos | MiniDOT |
| Radiação Solar Horizontal (RSH) | PV1 e LR | Superficial (abaixo do SFF em PV1) | A cada 5 minutos | MiniPAR |
| Temperatura da água (TA) | PV1 e LR | Abaixo da Superfície em: {0,25; 0,75; 1; 2; 5; 6 (só PV1) e 8,5 (só LR)} m | A cada minuto | MiniLog |
| Temperatura da água (TA) | PV6, Captação e Barragem | Superficial (1m abaixo) | Horária | PT100, Classe A |
| Temperatura do módulo SFF (TM) | PV6 e PV7 | - | Horária | PT100, Classe B |
| Temperatura do ar (TA) e Umidade Relativa (UR) | Estação Meteorológica | - | A cada minuto | MeteoTemp RH+T |
| Velocidade (VV) e Direção do Vento (DV) | Estação Meteorológica | - | A cada minuto | MeteoWind 2 |
| Radiação Solar Horizontal (RSH) e Inclinada em 15°C (RSI) | Estação Meteorológica | - | A cada minuto | MS-80 |
| OD, TA, pH, Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Turbidez (T) e Condutividade (C) | PV1 e LR | Todas | Mensal | Horiba U-50-434 |
| TA | PV1 e LR | Todas | Mensal | CTD |
| Penetração de Luz | PV1 e LR | Até o fim da visibilidade | Mensal | Disco de Secchi |

FONTE: O autor (2024)

Com isso, a Tabela 6 apresenta em resumo os dados monitorados no reserva-

tório Passaúna, durante o projeto FotoÁgua e durante o período de execução deste trabalho.

4.3 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D

Para a realização deste estudo, foi utilizado o modelo tridimensional Delft3D, software livre, desenvolvido pela Deltares (DELTAIRES, 2018). Este modelo, que permite simulações bi ou tridimensionais, é amplamente utilizado para simulação hidrodinâmica de reservatórios, desde sua estratificação térmica até no que diz respeito a qualidade da água (WAHL; PEETERS, 2014; SOULIGNAC et al., 2017). Este modelo matemático hidrodinâmico consegue simular diversas condições de corpos hídricos distintos, apresentando resultados condizentes com o esperado. Geralmente o fator limitante para a obtenção de resultados mais precisos se dá pela falta de dados de entrada que transmitam condições específicas do corpo hídrico analisado .

O módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW simula escoamentos não permanentes, bidimensionais (média na vertical) e/ou tridimensionais, e o transporte de constituintes devido às forçantes meteorológicas, de maré e de descargas em rios, incluindo efeitos de densidade (devido aos gradientes de temperatura e salinidade) e, ainda, o transporte de sedimentos. Este módulo fornece as condições hidrodinâmicas utilizadas pelos demais módulos, sendo o primeiro passo para qualquer simulação a ser desenvolvida pelo programa Delft3D (HARARI et al., 2020).

4.3.1 Considerações e equações do modelo

O modelo Delft3D-FLOW resolve as equações para águas rasas, assumindo que as contribuições das equações de momento vertical são reduzidas as de pressão hidrostática. Outras considerações importantes, como a aproximação de Boussinesq podem ser observadas em DELTAIRES (2018).

Para uma grade retangular, o sistema de equações é constituído pelas equações de momento, continuidade e transporte. No caso das equações de momento, são consideradas as duas direções, horizontal e vertical. As equações de Navier-Stokes e de difusão-advectação utilizadas pelo modelo são bastante conhecidas na engenharia hídrica, e podem ser vistas com detalhe no trabalho de Polli (2018), ou então de maneira ainda mais completa em DELTAIRES (2018)

Para o cálculo da troca de calor entre a superfície da água e o ar, o Delft3D disponibiliza cinco modelos diferentes de fluxo de calor, que consideram os balanços de radiação de ondas curtas e longas, evaporação e fluxos de calor sensível, sendo eles: modelo 1, 2, modelo de excesso de temperatura, modelo Murakami e modelo oceânico (ISHIKAWA et al., 2022; DELTAIRES, 2018). No caso da turbulência, as

equações mencionadas são resolvidas em uma sub-grade estruturada de diferenças finitas dentre quatro opções de modelos de turbulência: modelo com coeficientes constantes (definidos pelo usuário); modelo de fechamento algébrico da viscosidade turbulenta (AEM); modelo de turbulência k-L e o modelo de turbulência k- ϵ (DELTARES, 2018; ISHIKAWA et al., 2022).

Conforme Ishikawa et al. (2022), a discretização espacial horizontal pode considerar grades curvilíneas ou retangulares, sendo as primeiras com tamanho de célula variável, melhorando a representação, e a segunda mais simples e com menor tempo para execução da modelagem. Na direção vertical, a configuração de camada Z (onde o número de camadas não é constante ao longo da bacia) ou σ (que varia com a batimetria local).

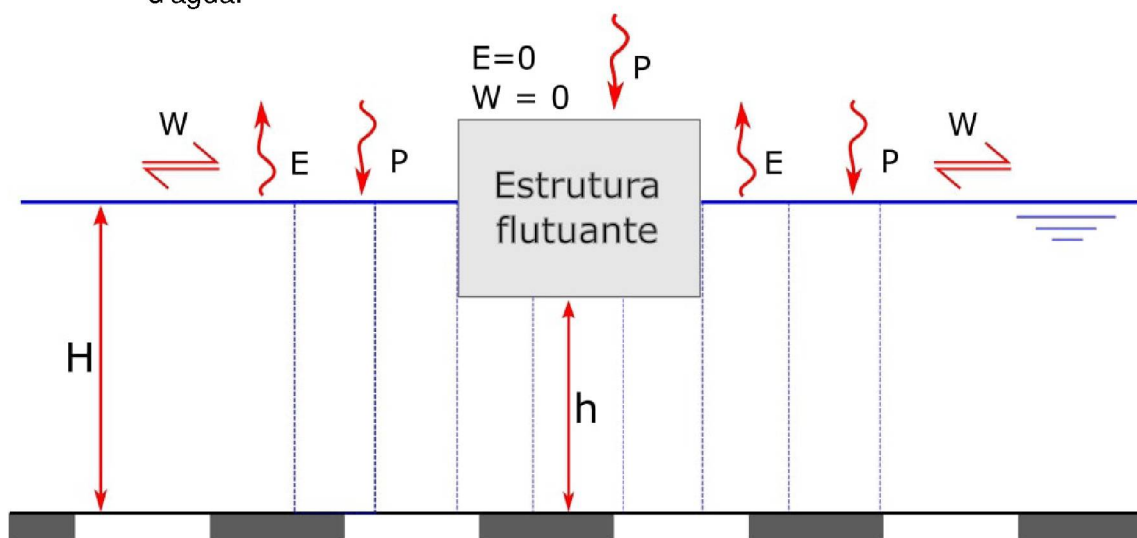
4.3.2 Representação do Sistema Fotovoltaico Flutuante

Para simular a cobertura do corpo d'água causada pelos módulos fotovoltaicos flutuantes, o Delft3D possibilita, no módulo hidrodinâmico, a inclusão de superfícies flutuantes (Figura 5) posicionadas em células da grade computacional. É possível alterar a posição e a altura (H-h na figura) submersa desta estrutura flutuante, buscando a melhor representação do sistema. O Delft3D entende que essa estrutura altera a evaporação E e a radiação (desconsiderando-as na região coberta), a ação do vento W e a influência das ondas na região coberta (desconsiderando os efeitos da passagem de ambos). Contudo, não altera os efeitos da precipitação P, com a água sendo infiltrada no local, nem a formação de turbulência na vertical, além de não haver atrito da estrutura com o escoamento (DELTARES, 2018).

Essas condições foram consideradas suficientes para simular a presença dos módulos em um corpo hídrico, em um caso limite, já que esses efeitos só ocorreriam dessa forma se o SFF não possuir nenhuma transparência e nenhuma abertura entre os módulos. Todavia, apesar do modelo prever a simulação de estruturas flutuantes, há outras formas de considerar a estrutura no modelo que poderão ser avaliadas em estudos futuros.

Essa possibilidade de simular a presença dos módulos no reservatório por meio de modelos permite que se desenvolvam estudos com diferentes cenários de cobertura de módulos fotovoltaicos, desde um cenário base sem cobertura, passando pelo cenário atual do projeto piloto, até um cenário futuro com cobertura maior. A análise comparativa dos efeitos de cada cenário irá auxiliar na busca de uma área de cobertura ideal para o reservatório Passaúna do ponto de vista da hidrodinâmica e sendo original e inovador em termos científicos onde não foram simulados desta forma.

Figura 5 – Figura esquemática sobre a interpretação do software Delft3D e estruturas flutuantes. sendo E: evaporação, P: precipitação, W: velocidade do vento, H e h: altura da coluna d'água.



FONTE: O autor (2024)

4.3.3 Limitações

Há algumas limitações na simulação de um reservatório com sistemas fotovoltaicos flutuantes por meio do Delft3D, considerando a representação vista na seção anterior, e também relacionada ao gradeamento do modelo. Há de se considerar também as limitações causadas pela falta de dados em outras regiões do reservatório Passaúna, sendo essa limitação não causada pelo modelo em si.

Ao desconsiderar efeitos do vento e a ocorrência de evaporação na região coberta, o modelo impede a interação ar-água completamente, algo que não ocorre no reservatório Passaúna, onde nas regiões abaixo dos painéis fotovoltaicos existem aberturas para a interação ar-água. Portanto, pode-se considerar a situação do modelo um caso hipotético extremo, em que a estrutura não tenha aberturas.

Embora não deixe explicitamente claro se há ou não passagem de radiação solar pela estrutura flutuante utilizada para representação, o fato de impedir a evaporação por completo indica que a radiação solar e penetração de luz também pode estar zerada nessas áreas, algo que novamente pode ser interpretado como um caso hipotético extremo de representação.

Já a estrutura em formato de grade do modelo, pode trazer erros nos cálculos, principalmente em regiões de borda do modelo, onde as interações com o ambiente possuem menor detalhamento.

Por fim, os dados disponíveis para o reservatório Passaúna são limitados, tanto espacialmente como temporalmente, o que causa limitações nas simulações do modelo,

que também afetam principalmente regiões de borda, como por exemplo os braços do reservatório, que na realidade são desembocaduras de rio, que no modelo não possuem descargas de água devido à falta de dados.

4.4 MODELO PRÉVIO NO RESERVATÓRIO, MODELAGEM SIMPLIFICADA E MODELAGEM COM SFF NO PERÍODO DESSE MODELO PRÉVIO

Durante o projeto MuDak-WRM, de 2017 a 2019, foi desenvolvida uma modelagem matemática tridimensional para o reservatório Passaúna, que apresentou resultados próximos aos medidos no que diz respeito a temperatura da água e a velocidade do fluxo, apesar de limitações em relação a efeitos turbulentos (ISHIKAWA et al., 2022).

Como condição inicial, o modelo tem uma temperatura de água uniforme de 17°C e um nível de 887 m acima do nível do mar. Foram utilizados dados de temperatura do ar, umidade relativa, radiação de ondas curtas, velocidade e direção do vento, precipitação, cobertura de nuvens, entradas e saídas de fluxo de água (saídas devido à captação e à descarga subterrânea) e temperatura. O nível de água no vertedouro representa uma borda aberta no modelo. Também foi incluído um traçador no principal afluente do reservatório com uma vazão constante desde o início de 1 kg/m³, para observar o transporte de substâncias (ISHIKAWA et al., 2022).

O período dessa modelagem foi de agosto de 2017 até fevereiro de 2019, sendo que os primeiros seis meses de modelagem foram considerados de adaptação. Foi escolhido iniciar a modelagem em agosto, pois nesse mês o reservatório se encontra misturado verticalmente (ISHIKAWA et al., 2022). Em relação às configurações dessa modelagem, a Tabela 7 apresenta uma especificação, além dos parâmetros, dos quais muitos foram definidos na calibração do modelo.

A calibração do modelo foi feita utilizando dados relacionados a troca de calor e momento na superfície da água e incluem coeficientes de arrasto do vento, atenuação da luminosidade na coluna d'água e transferência de calor sensível e latente. Para o coeficiente de extinção de luz foi usado dados medidos por disco de Secchi. A calibração foi feita de maneira manual, no qual os coeficientes da Tabela 7 foram modificados até se obter o menor erro absoluto médio (MAE) para a temperatura da água. O intervalo de tempo foi definido com base na estimativa do número de Courant para alcançar estabilidade numérica (ISHIKAWA et al., 2022).

Tabela 7 – Parâmetros e configurações da modelagem original.

| Parâmetro | Configuração (* indica valor calibrado, entre parênteses há o valor padrão) |
|--|---|
| Grade horizontal | Curvilínea; Células em torno de 40 m x 40 m. |
| Resolução da grade vertical | Eixo Z com 20 camadas; Aprox. 0,83 m de profundidade cada. |
| Resolução temporal (s) | 12 |
| Abordagem para fluxo de calor de superfície | <i>Ocean heat flux model</i> ; Radiação de onda longa: calculada pelo modelo como radiação de onda longa líquida total, em função da cobertura de nuvens, umidade relativa, e temperaturas do ar e da água na superfície; Fluxo de radiação solar: albedo constante de 0,06 |
| Abordagem para fluxo de calor por evaporação | Estimado em função da umidade relativa, somando o calor latente de convecção livre e forçada (dependente do vento). |
| Coeficiente para transferência de calor latente | * 0,0013 - (0,0013) |
| Coeficiente para transferência de calor sensível | * 0,0013 - (0,0013) |
| Coeficiente de arrasto | * Em função da velocidade do vento: De 0 até 1,25 m/s = 0,003; De 1,25 até 3,00 m/s = 0,0025; Maior que 3,00 m/s = 0,0018 |
| Coeficiente de extinção de luz (m^{-1}) | * 0,85 - (0,85) |
| Troca de calor com o sedimento | Não aplicável |
| Modelo de turbulência | Modelo k- ϵ |
| Viscosidade turbulenta horizontal (m^2/s) | * No fundo: 0,0 - (10) |
| Difusividade turbulenta horizontal (m^2/s) | * No fundo: 0,0 - (10) |
| Viscosidade turbulenta vertical (m^2/s) | * No fundo: 0,0 - (10^{-6}) |
| Difusividade turbulenta vertical (m^2/s) | * No fundo: 0,0 - (10^{-6}) |
| Coeficiente de rugosidade | Manning; 0,035 |

FONTE: Adaptado de Ishikawa et al. (2022)

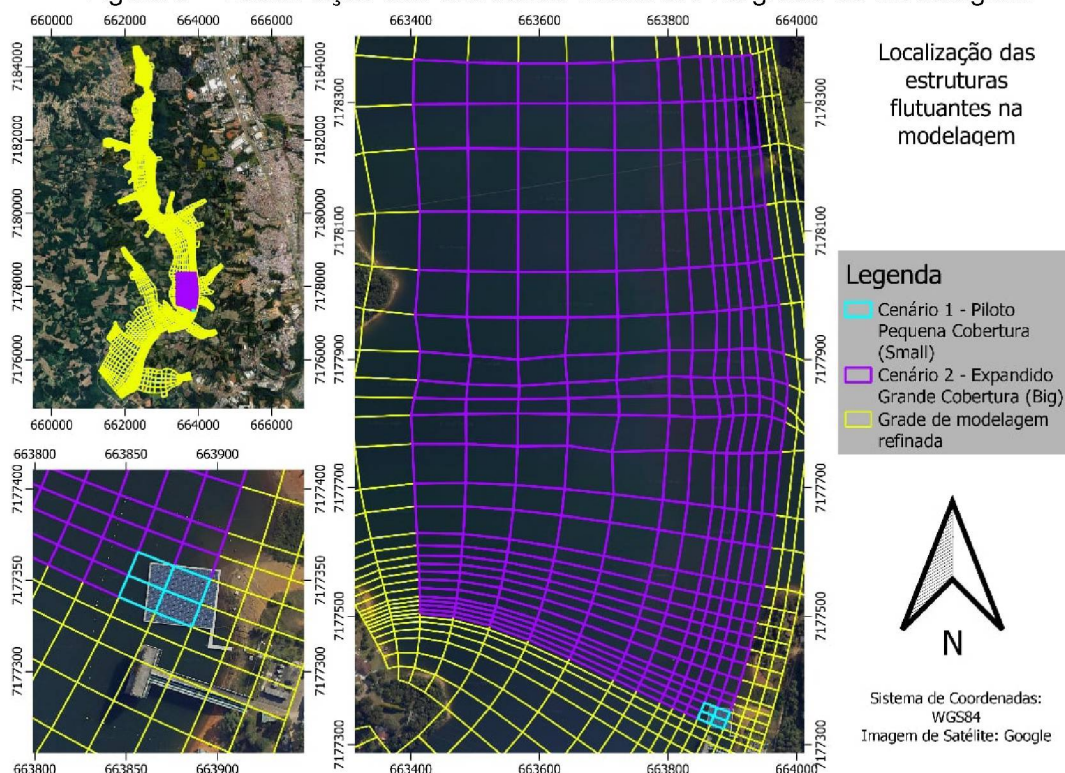
Em relação ao Erro Quadrático Médio (RMSE), a simulação feita pelo Delft3D apresentou o maior valor de cRMSE (centrado) igual 0,6 °C na profundidade de 8,6 metros quando comparado aos perfis medidos na captação, considerando todas as profundidades, o cRMSE foi de 0,5 °C.

Já com todas as informações e dimensões do modelo existente, foram inicialmente realizados dois cenários com módulos fotovoltaicos, para o período original, utilizando os meses de abril e maio de 2018, período em que o reservatório muda de termicamente misturado para estratificado, na vertical (ISHIKAWA et al., 2022), a fim de analisar os efeitos da inserção de estruturas flutuantes na modelagem do reservatório Passaúna de fato.

4.5 CENÁRIOS DE COBERTURA

O cenário Piloto representa o projeto piloto atual, porém para simular corretamente este cenário, foi necessário refinar a grade computacional horizontalmente, permitindo, assim, obter uma cobertura tão pequena em porcentagem em relação a todo o reservatório. Já o cenário Expandido simula um cenário de expansão do sistema fotovoltaico flutuante, ocupando uma área maior do reservatório. A Figura 6 apresenta os dois cenários e a estrutura atual na imagem de satélite.

Figura 6 – Localização das estruturas flutuantes na grade de modelagem.



FONTE: O autor (2024)

Em relação às áreas, enquanto a área coberta do projeto piloto atual é de aproximadamente 1.200m², no cenário Piloto simulado a área coberta foi 1.140m², e no cenário Expandido foi de 516.934 m². Em relação à área total do reservatório, têm-se 0,01% e 6,15%, respectivamente. Foi adotada a profundidade submersa da estrutura flutuante de 0,3m, semelhante à da estrutura atual, em ambos os cenários.

Com os cenários definidos, foram efetuadas comparações dos resultados observados nestes com a modelagem sem os módulos fotovoltaicos flutuantes, nas variáveis temperatura, taxa de evaporação, velocidade horizontal e turbulência. Ao fazer a diferença entre os cenários, sempre é adotada a seguinte convenção: cenário com cobertura (expandido ou piloto) menos o cenário base, logo, diferenças positivas (negativas) indicam aumento (redução) dos valores de cada variável.

4.6 PERÍODOS DA MODELAGEM

A modelagem compreende o período de agosto de 2022 até julho de 2023. O período total contempla um ciclo sazonal completo.

Este também é o período no qual o projeto FotoÁgua realizou atividades de monitoramento no reservatório, gerando dados que foram utilizados tanto como dados de entrada do modelo (dados meteorológicos), bem como para fins de validação (dados medidos no reservatório).

Cabe destacar que houve uma modelagem em outro período, mais curto, de agosto de 2022 até janeiro de 2023, devido à falta de disponibilidade de dados para o período total de 1 ano na época. Foi por meio dessa modelagem que foi realizada a recalibração. Um resumo da finalidade de todas as modelagens e seus períodos é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Períodos modelados e suas finalidades.

| Período de modelagem | Finalidade |
|----------------------------|--|
| Abril/2018 a Maio/2018 | Criação dos cenários com SFF e análise dos seus efeitos |
| Agosto/2022 a Janeiro/2023 | Recalibração do modelo e produção de resultados iniciais |
| Agosto/2022 a Agosto/2023 | Produção dos resultados finais |

FONTE: O autor (2024)

4.7 DADOS PARA A MODELAGEM E RECALIBRAÇÃO

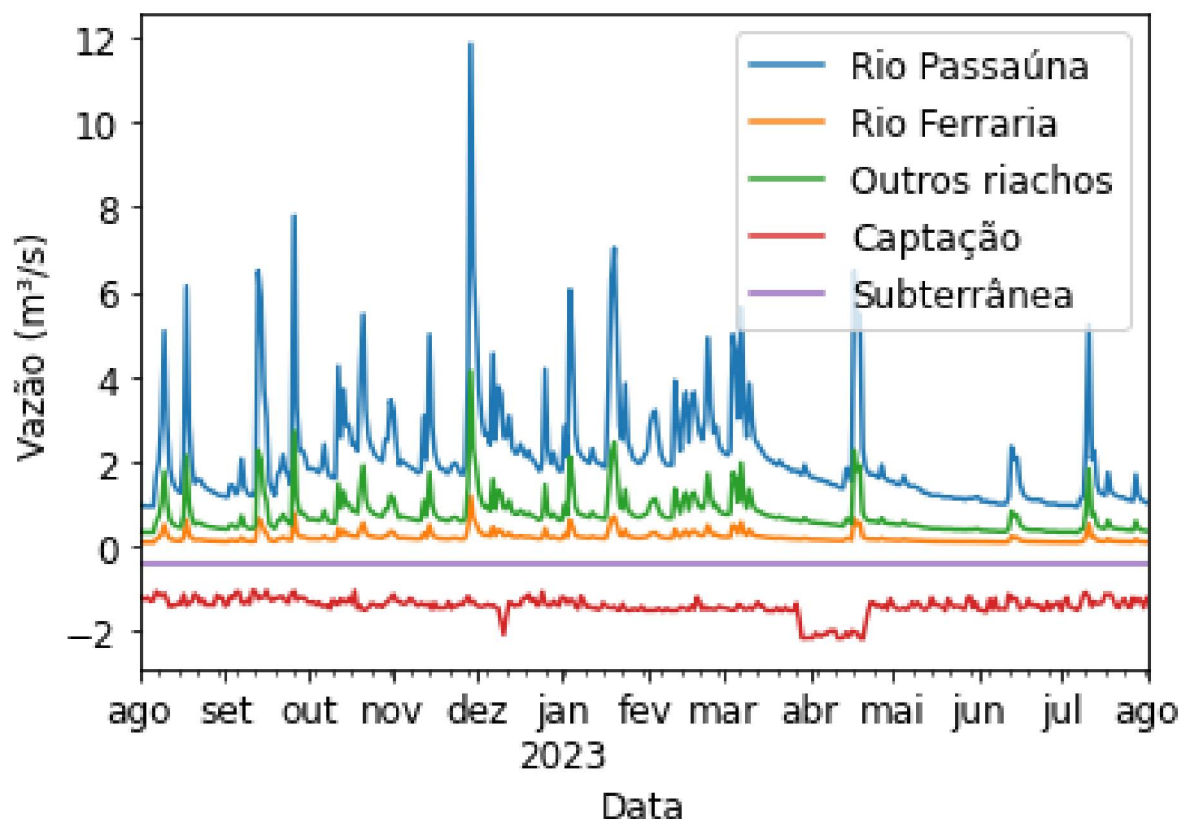
Os dados obtidos via monitoramento do projeto FotoÁgua, conforme apresentado na seção 4.2, foram utilizados para a modelagem no período atual, fornecendo os dados sobre a temperatura da água e os dados meteorológicos (umidade relativa, irradiância solar, velocidade e direção do vento, e temperatura do ar).

Para a precipitação, foi necessário utilizar duas estações pluviométricas (2549080 — Colônia Dom Pedro e 2549081 — Barragem Sanepar) com dados disponibilizados pelo Sistema de Informações Hidrológicas (SIH) do Instituto das Águas do Paraná.

Já no caso das vazões, utilizadas nos pontos de descarga do modelo, para as descargas de rios, foi feita a regionalização das vazões obtidas na estação fluviométrica 65021800 — Rio Passaúna BR-277 com dados acessados através do Hidroweb da Agência Nacional das Águas (ANA). Sendo considerados os rios Passaúna e Ferraria, e a soma da contribuição de todos os outros riachos que deságuam diretamente na área do reservatório Passaúna.

Os dados de captação de água do reservatório foram disponibilizados pela Sanepar, e a vazão de saída subterrânea foi mantida constante, tendo como base o valor usado na modelagem original, sendo cerca de 20% do valor da média da vazão principal de entrada, do rio Passaúna. A Figura 7 apresenta as vazões utilizadas como dado de entrada do modelo, em que as vazões negativas representam as saídas de água do reservatório para o modelo.

Figura 7 – Séries temporais das vazões dadas como entrada para o modelo.



FONTE: O autor (2024)

A temperatura das vazões foi definida conforme os dados de temperatura de água medidos mais próximos. Como visto anteriormente na seção sobre o monitoramento, havia medição de temperatura de água na região da captação e da barragem, além dos dados medidos em PV1 e LR.

Os dados de radiação solar medidos se mostraram falhos, causando problemas na correta simulação da radiação nos períodos diurnos e noturnos. Com isso, foram utilizados os dados do projeto de reanálise meteorológica realizado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), que também foi a fonte para os dados de cobertura de núvens da região.

Buscando melhorar os resultados da modelagem, principalmente nas camadas inferiores e relacionados à temperatura, foi buscada uma recalibração do modelo. Observando os resultados apresentados por Chanudet, Fabre e Van der Kaaij (2012), optou-se por aumentar os valores de dois parâmetros relacionados com o fluxo de calor, número de Stanton e número de Dalton, que permitiram uma troca térmica maior, com resultados em valores de temperatura nos pontos PV1 e LR mais próximos aos medidos. Os outros parâmetros permaneceram os mesmos da modelagem anterior.

4.8 ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Por se tratar de uma modelagem tridimensional de um reservatório de tamanho considerável, o Delft3D produz uma série de resultados que podem ser apresentados de maneiras distintas, considerando as dimensões temporal e espacial.

Com o objetivo de encontrar efeitos do SFF no reservatório, será necessário sempre comparar os resultados entre os cenários de modelagem, incluindo a constatação de diferenças significativas estatisticamente, por meio dos testes ANOVA e t, respectivamente para 3 e 2 amostras, permitindo comparar os 3 cenários no primeiro e os pontos PV1 e LR no segundo.

A comparação entre os cenários se dará principalmente por meio de representação gráfica da diferença entre os cenários com SFF e o cenário base. Portanto, é necessário definir padrões para a apresentação dos resultados neste trabalho.

4.8.1 Resolução temporal

Para apresentar dados com resolução temporal, como séries históricas e estatísticas temporais, é necessário definir um ponto específico no espaço, o que pode ser feito utilizando os pontos de medição da seção 4.2 ou qualquer outro ponto de interesse, que será indicado na legenda da figura em questão. Em relação à profundidade, esta sempre será dada em relação à distância da superfície, mas também podem haver dados considerando uma média vertical.

4.8.2 Resolução espacial

Dados com resolução espacial, como dados superficiais, serão apresentados em médias temporais, que podem considerar todo o período da modelagem ou recortes de períodos com características distintas, como períodos diurnos e noturnos.

Com o intuito de verificar as diferenças entre os períodos diurnos e noturnos, foram calculadas médias dos resultados somados no período diurno (06h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00 e 18h00) e noturno (20h00, 22h00, 00h00, 02h00 e 04h00). Além disso, como os efeitos na água costumam ser lentos, foi calculada a média utilizando apenas os horários de meio-dia (12h00) e meia-noite (00h00).

Além dessas médias, há figuras que representam um período específico, considerado relevante para mostrar o efeito do SFF, ou então coincidente com o período de dados medidos.

4.8.3 Ambas as resoluções

Também é possível gerar figuras que considerem as duas resoluções, como perfis longitudinais ou verticais, onde pode ser analisadas as variações em todas as profundidades de um ponto ao longo do tempo, ou então observada a variação espacial de uma seção cruzada do reservatório (perpendicular ou linear ao escoamento) em uma média temporal ou em um tempo específico.

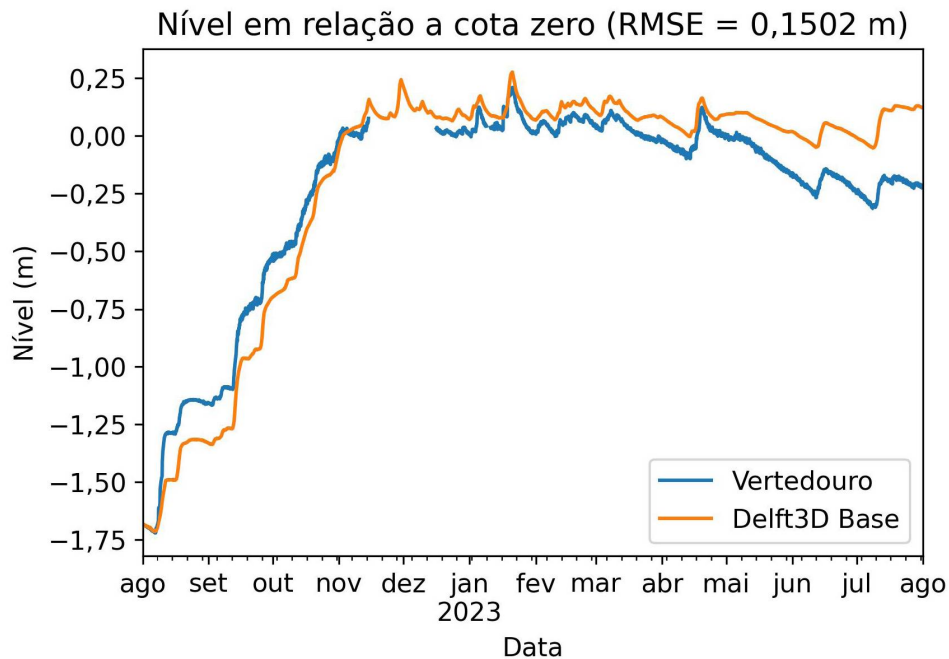
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Calibração e Validação

Para validação do modelo foram realizadas comparações entre os resultados das simulações do cenário base com os dados medidos, em relação ao nível de água na barragem do Reservatório do Passaúna e a temperatura nos pontos PV1 e LR.

Com relação ao nível, a comparação dos dados medidos pela Sanepar em séries temporais com os valores simulados no mesmo local são apresentadas na Figura 8.

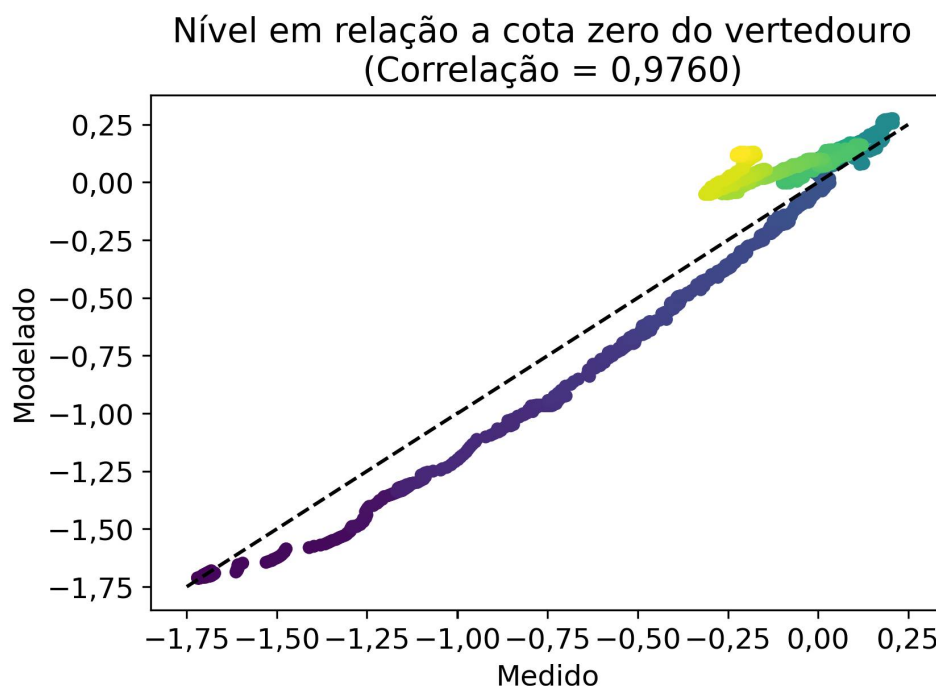
Figura 8 – Nível d'água na barragem do reservatório Passaúna: medições no vertedouro (azul) e resultados das simulações no cenário base (laranja).



FONTE: O autor (2024)

Os resultados das simulações de nível de água de agosto a meados de novembro de 2022 são inferiores aos medidos, período em que o reservatório está em processo de enchimento. Já a partir de dezembro, após o período sem dados medidos, nota-se que a simulação superestima o nível com diferenças superando 0,2 m de maio de 2023 em diante. A Figura 9 mostra essas diferenças, com as tonalidades roxas e azuis escuras sendo o período inicial da modelagem, e as amarelas e verdes o final. A correlação ficou em 0,976.

Figura 9 – Correlação entre o nível d'água na barragem do reservatório Passaúna medido e modelado. De agosto de 2022 (roxo) até agosto de 2023 (amarelo).



FONTE: O autor (2024)

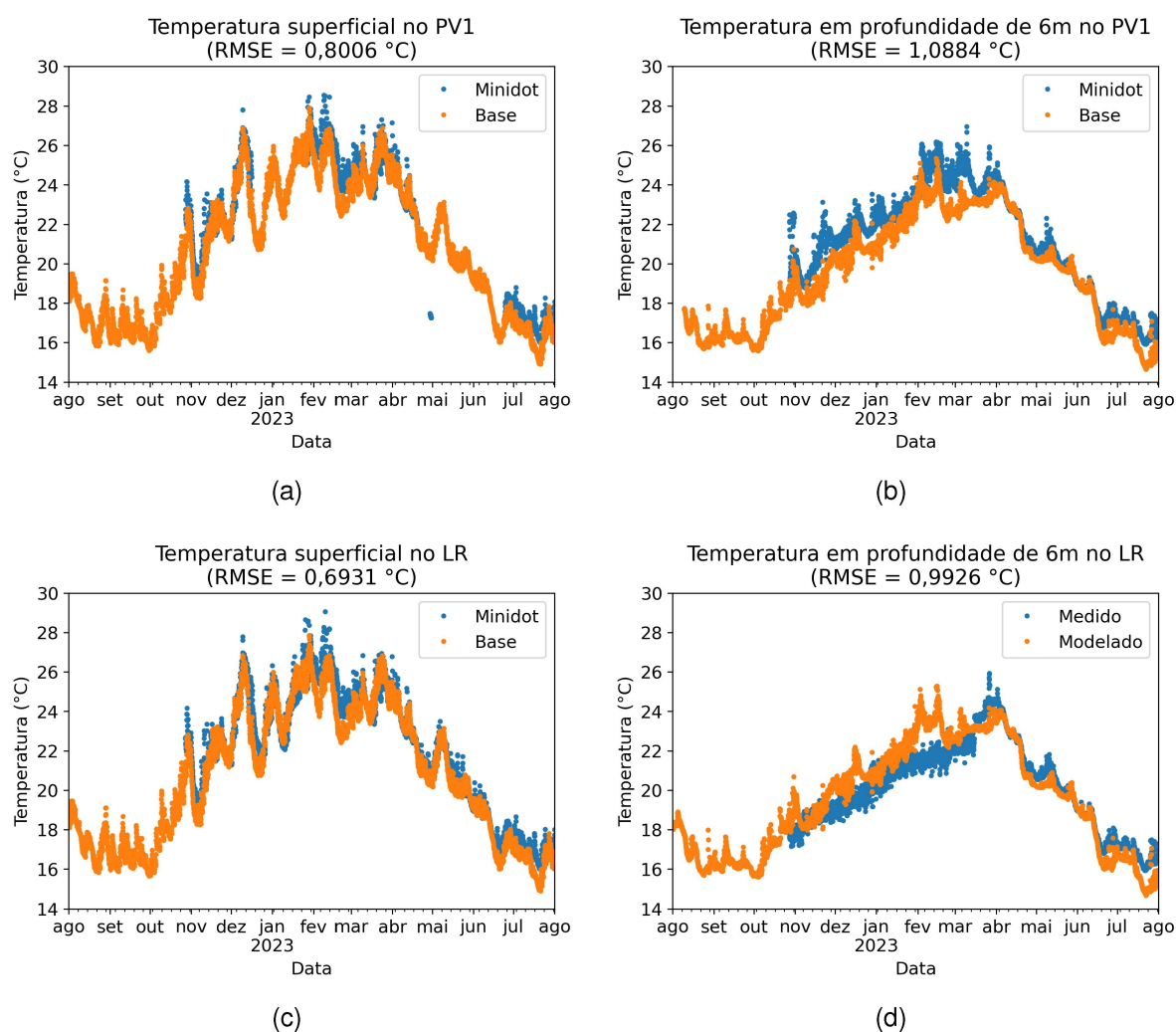
Essas diferenças crescentes entre os valores medidos e simulados de nível podem estar relacionadas a uma redução de eficiência no método de regionalização de vazão. Porém, em geral, os resultados modelados foram considerados satisfatórios, apresentando o mesmo comportamento na série temporal (aumentos e reduções de nível estão sincronizados) e raiz de erro médio quadrático (RMSE) de 0,15 m.

Na sequência foram verificados os resultados de temperatura do modelo para os cenários simulados e medidos *in loco*. De maneira geral, o modelo conseguiu simular as variações da temperatura na superfície e na coluna d'água (6 metros de profundidade) conforme pode ser observado na FIGURA 10.

O RMSE resultou em valores abaixo de 1 °C, com exceção do ponto PV1 em 6 metros abaixo da superfície, apresentando RMSE de 1,09 °C. Os resultados mostram uma acurácia maior da simulação nas camadas mais próximas à superfície do que em profundidades maiores, assim como do ponto LR em relação ao PV1, com erros menores tanto na superfície como 6 metros abaixo.

Já os gráficos de correlação (Figura 11) mostram que o modelo apresentou resultados mais aproximados na superfície, com correlações de 0,98 para PV1 e LR.

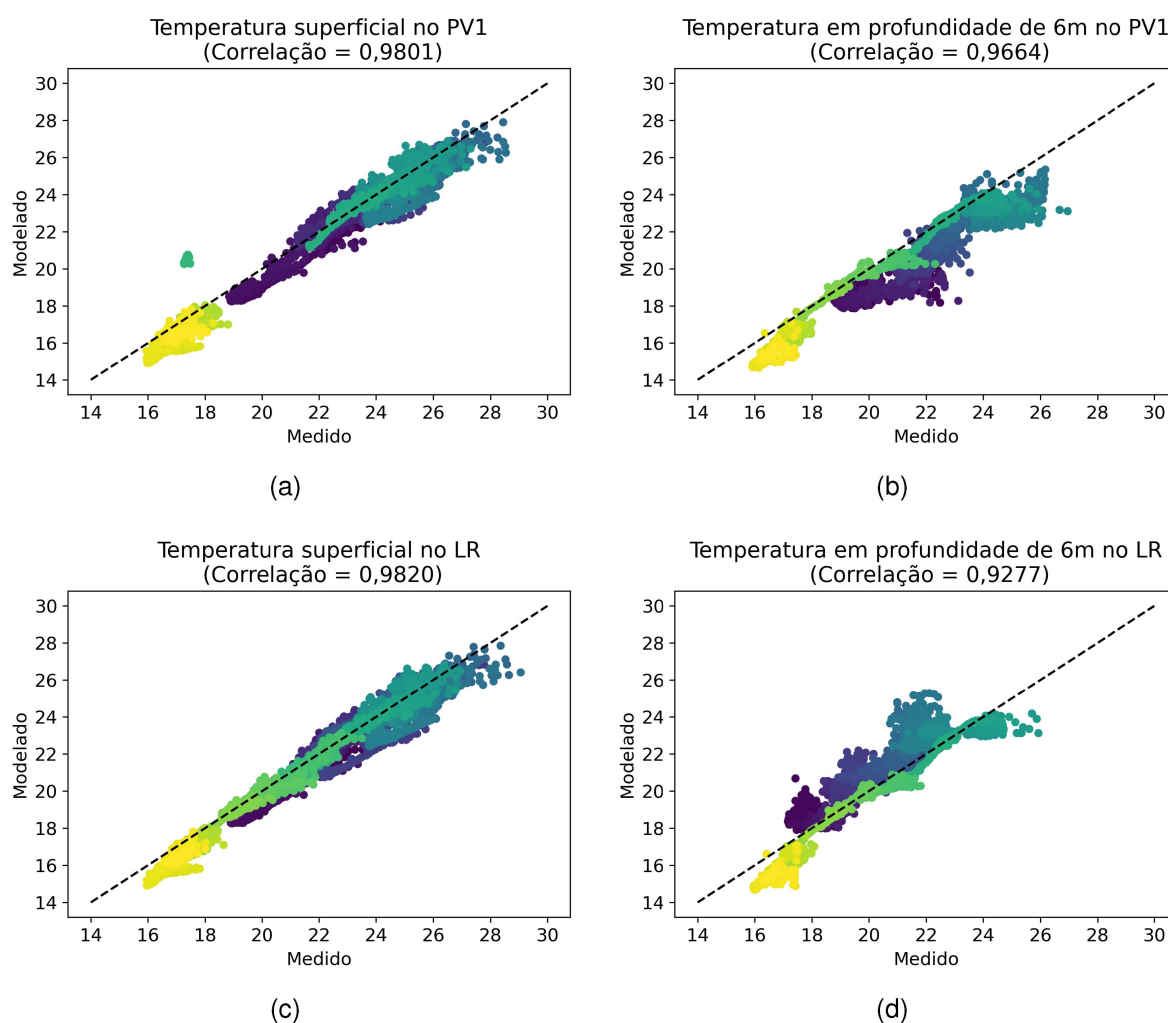
Figura 10 – Séries temporais de temperatura, comparando dados medidos (MiniDot) e dados simulados (cenário base), a) na superfície do PV1 e b) 6 metros de profundidade no PV1, c) na superfície do LR e d) 6 metros de profundidade no LR.



FONTE: O autor (2024)

Com a inclusão de outros dados de temperatura medidos, como os MiniLogs e perfiladores, foi possível obter um perfil de temperatura medido, que ao ser comparado com os dados simulados, foi possível verificar a manutenção do RMSE abaixo de 1 °C, para PV1 (Figura 13) e para LR (Figura 12).

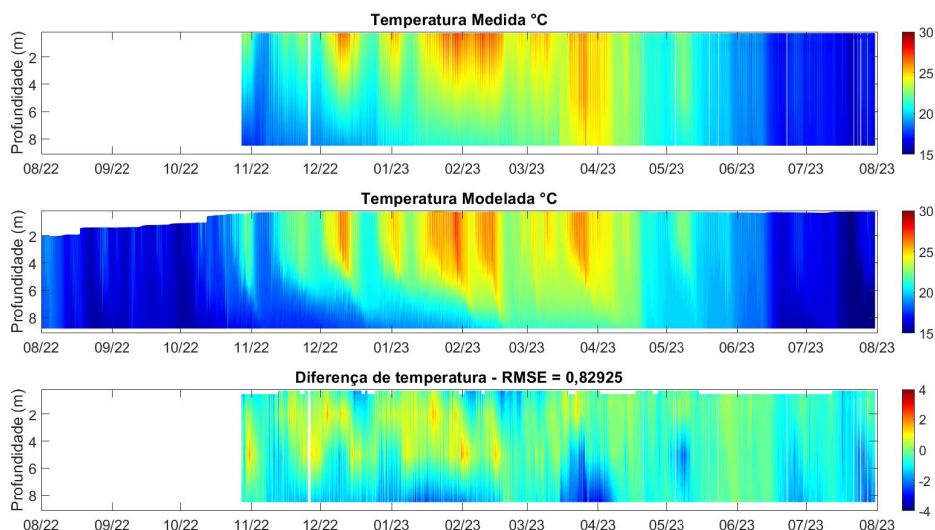
Figura 11 – Correlação entre as temperaturas medidas e modeladas, a) na superfície do PV1 e b) 6 metros de profundidade no PV1, c) na superfície do LR e d) 6 metros de profundidade no LR. De agosto de 2022 (roxo) até agosto de 2023 (amarelo).



FONTE: O autor (2024)

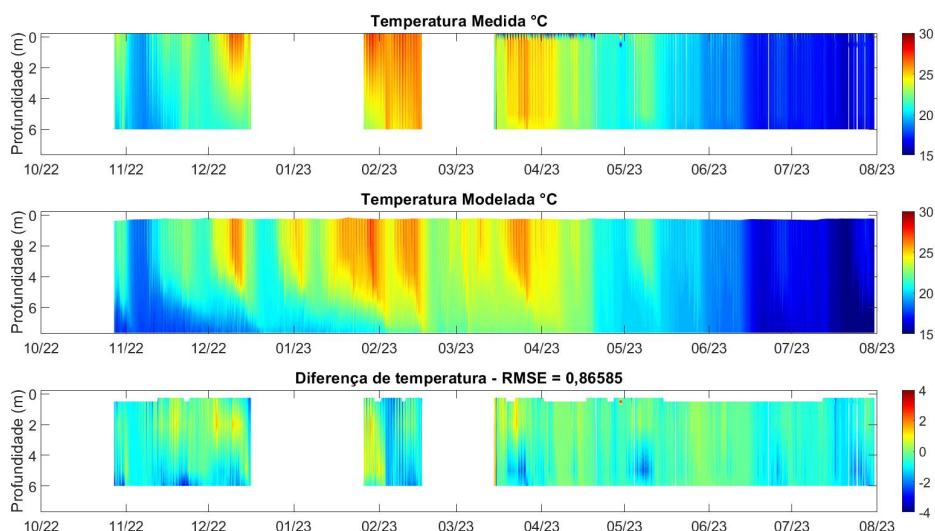
Foi possível observar que a simulação no cenário base conseguiu demonstrar semelhança nos comportamentos temporais com os dados medidos, além das raízes de erro médio quadrático serem baixas quando comparados com a amplitude de variação das variáveis nível e temperatura da água durante o período analisado (RMSE é inferior a 10% da amplitude dos resultados em quase todos os casos, com exceção do RMSE para LR em profundidade de 6 metros, que possui menor amplitude).

Figura 12 – Perfis de temperatura no ponto LR, sendo o primeiro com valores medidos, o segundo com valores simulados no cenário base e o terceiro a diferença entre eles.



FONTE: O autor (2024)

Figura 13 – Perfis de temperatura no ponto PV1, sendo o primeiro com valores medidos, o segundo com valores simulados no cenário base e o terceiro a diferença entre eles.



FONTE: O autor (2024)

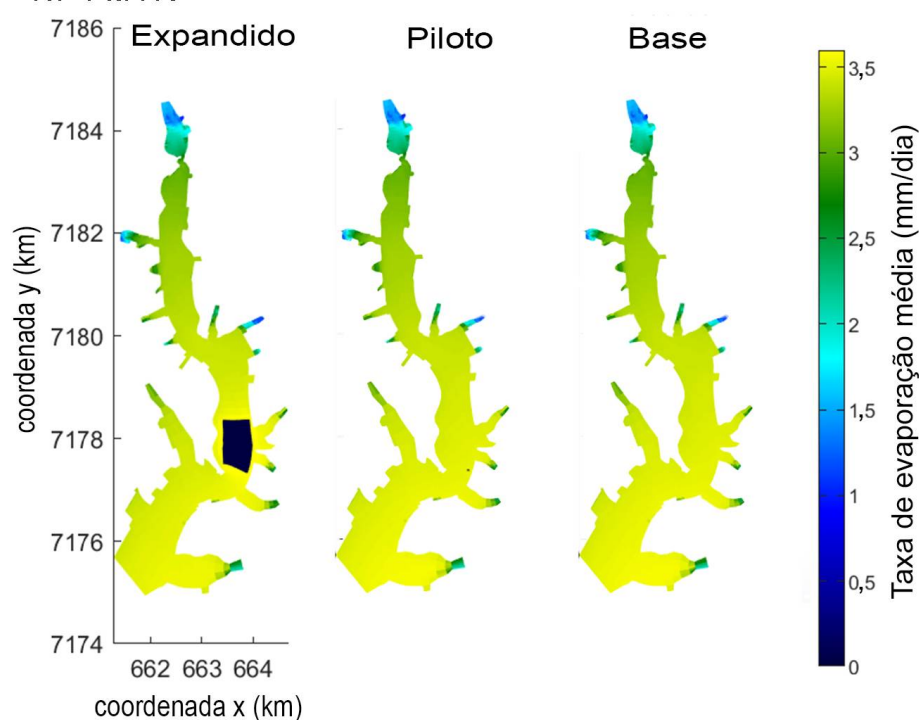
5.2 Evaporação

5.2.1 Taxa de Evaporação

Foram gerados mapas de taxas de evaporação média em todo o período (Figura 14) para o cenário base e cenários com placas solares (piloto e expandido). A taxa de evaporação, no que diz respeito à variação espacial, apresenta grande amplitude de valores.

As regiões com características hidrodinâmicas mais próximas de rios (região de montante no modelo) apresentaram taxas de evaporação até quatro vezes menores que regiões lacustres (região à jusante no modelo). Essa variação espacial se mantém praticamente em qualquer período, seja em horários diurnos ou noturnos, mas é mais intensa nos períodos diurnos. Isso ocorre devido à temperatura da água superficial, que também aumenta conforme se avança em direção à barragem do reservatório.

Figura 14 – Mapas de taxa de evaporação média no reservatório passaúna. expandido: grande cobertura de módulos; piloto: cobertura atual de módulos; base: sem módulos fotovoltaicos.

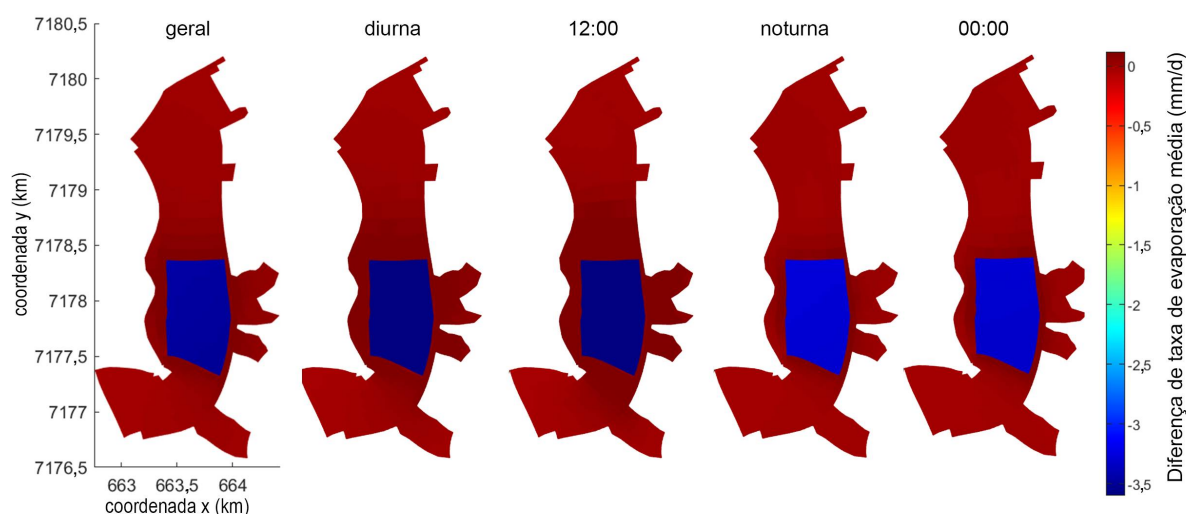


FONTE: O autor (2024)

A partir dos resultados simulados, foi possível observar que as diferenças nas taxas de evaporação estão localizadas nas áreas cobertas, sendo quase imperceptível no caso da diferença entre o cenário base e o cenário piloto. É possível observar ainda, principalmente no cenário expandido, taxa de evaporação nula na área coberta, devido à forma de representação da estrutura flutuante no modelo.

Como resultado da análise de períodos diurnos e noturnos, conforme descrição da seção 4.8.1, ao fazer a diferença entre o cenário expandido menos o cenário base, com um zoom para a região com cobertura e que de fato possui diferença para o modelo, nota-se que as médias do período diurno (diária e apenas meio-dia) possuem as maiores taxas de evaporação, enquanto as do período noturno (noturna e apenas meia-noite) são menores, com a média geral com valores intermediários entre os dois períodos, como esperado, ao mostrar que durante o dia há maior evaporação (Figura 15).

Figura 15 – Mapas de diferença entre cenário expandido menos cenário base de taxa de evaporação no reservatório Passaúna.



FONTE: O autor (2024)

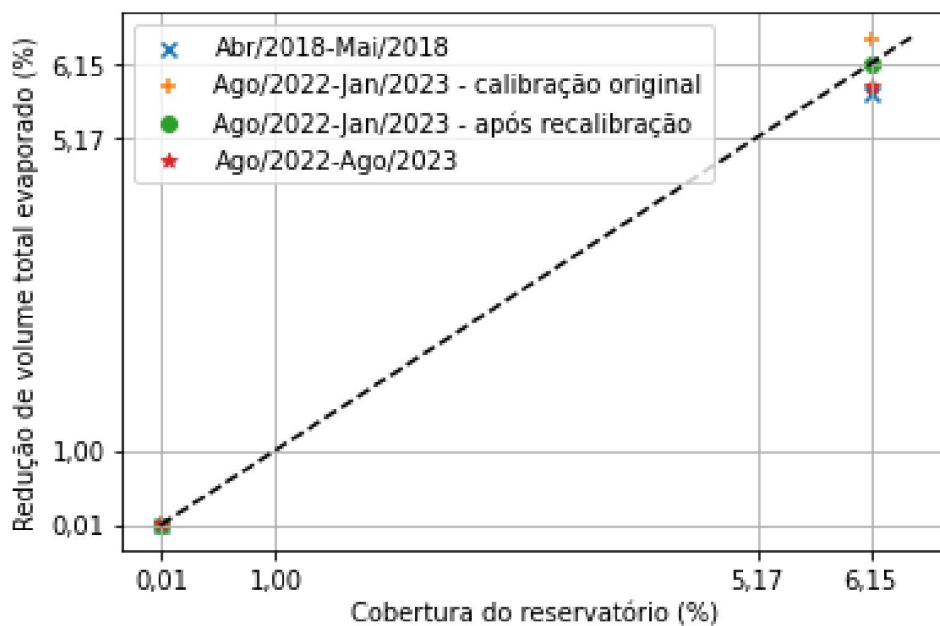
5.2.2 Volume Evaporado

O volume total evaporado foi calculado por meio da taxa de evaporação de cada célula, em cada passo temporal, que também possibilitou encontrar o volume evaporado em cada período, o qual será analisado mais adiante.

Os volumes totais de evaporação foram de 2.823.185m³ no cenário Base, 2.822.694m³ no cenário Piloto (-0,02% em relação ao Base) e 2.658.022m³ no cenário Expandido (-5,85%). Nota-se que as frações de reduções no volume total evaporado são próximas às frações de cobertura destes cenários (0,01% e 6,15%, respectivamente), semelhança que também ocorreu nas outras modelagens, de períodos distintos e com durações distintas também, e antes e depois de realizar a recalibração do modelo (Figura 16).

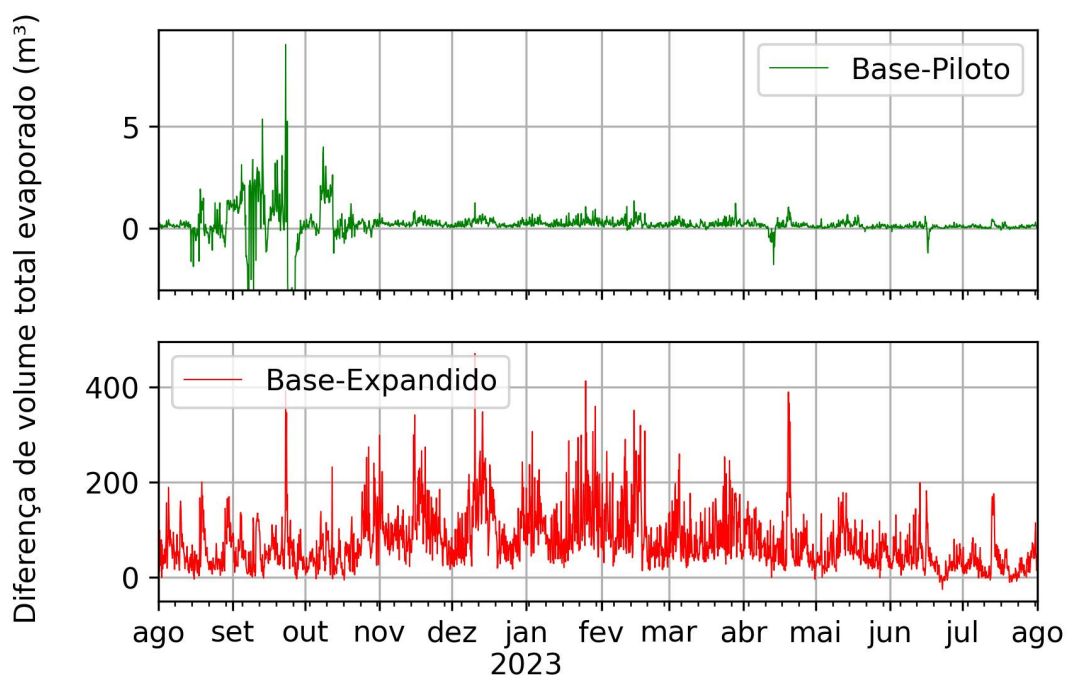
Essas porcentagens semelhantes são esperadas, uma vez que o modelo retira completamente a evaporação das áreas cobertas. Em uma situação real, onde a evaporação nas áreas cobertas não é necessariamente zero, ao menos em modelos de configuração onde o painel fotovoltaico não está junto a superfície de água, com passagens de ar que permitem a interação ar-água, as porcentagens de redução de volume total evaporado podem ser mais baixas.

Figura 16 – Frações de área coberta do reservatório e redução de volume total evaporado em cada modelagem.



FONTE: O autor (2024)

Figura 17 – Diferença de volume evaporado ao longo do tempo, para cenário base menos cenário piloto acima e base menos expandido abaixo.



FONTE: O autor (2024)

A Figura 17 apresenta a diferença de volume evaporado em cada tempo, para cada cenário coberto em relação ao cenário Base. Em ambos os gráficos, nota-se a existência de diferenças negativas de volume evaporado, indicando que o cenário com

cobertura teve maior evaporação do que o cenário base, algo que está relacionado à problemas de balanço de massa do modelo. Como os erros ocorrem em períodos de tempos de aquecimento da modelagem, principalmente no mês de agosto e setembro, eles não estão relacionados à influência da cobertura, já que em muitos deles a diferença é negativa em apenas um dos cenários.

Em relação aos efeitos da cobertura, as diferenças entre cenário base e piloto são muito mais baixas do que as diferenças entre cenário piloto e expandido.

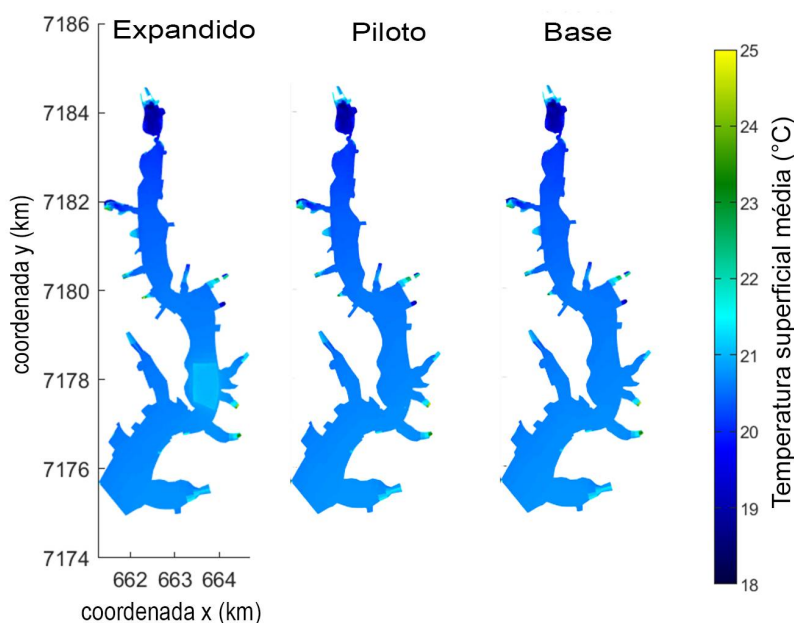
No primeiro caso, a diferença costuma ser muito próxima de zero durante todo o ano, com exceção do período de enchimento já relatado anteriormente (agosto e setembro). Já no segundo, foi observada uma grande variação sazonal, com picos nos períodos diurnos e próximos de zero nos períodos noturnos, com valores médios maiores na época mais quente do ano (de novembro até março).

5.3 Temperatura

5.3.1 Temperatura Superficial

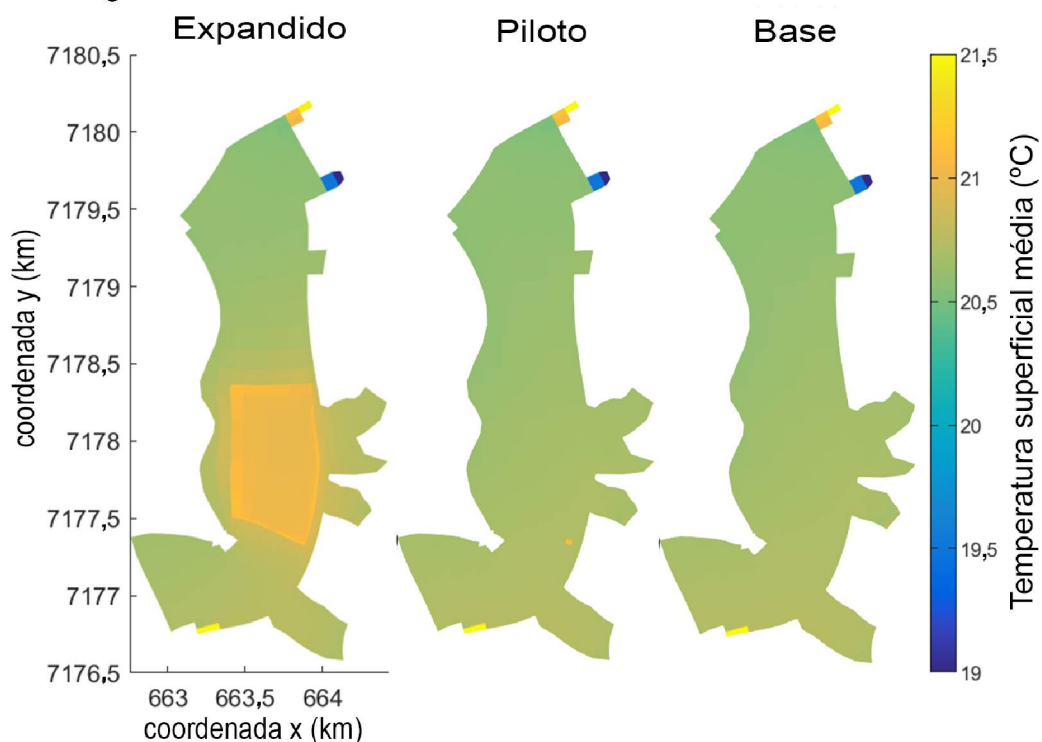
Em relação à temperatura superficial média (Figura 18), assim como na taxa de evaporação, há uma grande variação nos valores entre a área montante (com 18 °C) do reservatório e a área jusante, próximo à barragem (com 21 °C). Já o efeito da cobertura observável na figura é um leve aquecimento (cerca de 0,5 °C, vista principalmente na área coberta do cenário expandido, com cor ciano).

Figura 18 – Mapas de temperatura média superficial no reservatório Passaúna. Expandido: grande cobertura de módulos; Piloto: cobertura atual de módulos; Base: sem módulos fotovoltaicos.



FONTE: O autor (2024)

Figura 19 – Mapas de temperatura média superficial no reservatório Passaúna, com zoom na região lacustre.



FONTE: O autor (2024)

Na região lacustre afetada pelo SFF (Figura 19), e com uma escala de temperaturas menor, nota-se mais claramente o efeito de aumento de temperatura nas regiões cobertas.

No cenário expandido, é possível observar que as regiões de borda aquecem mais do que as regiões centrais de água com cobertura de SFF, também há um leve aquecimento nas camadas imediatamente ao lado da região coberta. Isso pode indicar que a existência da cobertura é uma barreira para a troca de temperatura com regiões não cobertas, causando o acúmulo de temperatura observado.

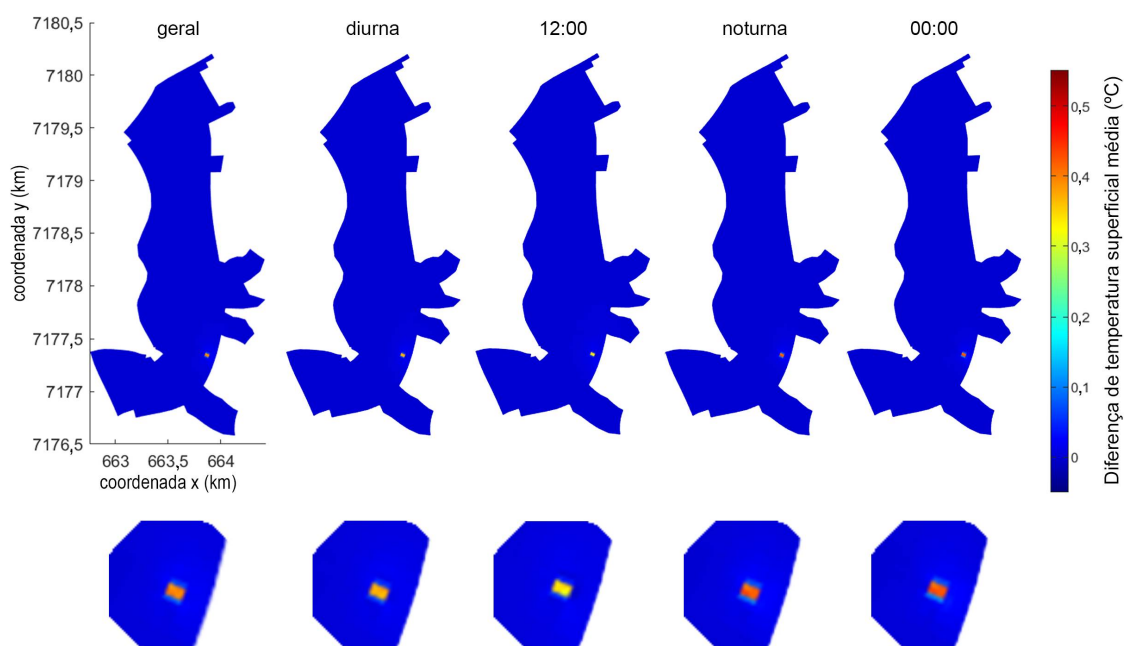
Para o cenário piloto, como a cobertura é menor, só foi possível observar o aquecimento na região coberta, a qual é de mesma magnitude que a do cenário expandido.

Quando analisadas as diferenças de temperatura superficial em relação ao cenário base, juntamente com as médias de períodos distintos ao longo do dia (Figura 20 e Figura 21), o comportamento entre o cenário Piloto e o cenário Expandido são distintos devido ao tamanho da cobertura.

No caso da diferença entre o cenário piloto menos o cenário base (Figura 20), as diferenças positivas na região coberta (temperatura no cenário Base menor que no Piloto) são maiores nas médias noturnas (cerca de 0,5°C) que nas médias diurnas (cerca de 0,3°C), sendo ao meio-dia a menor diferença em módulo. A média para todo

o período, como esperado, possui valores intermediários ($0,4^{\circ}\text{C}$). No entorno da área coberta há diferenças positivas pequenas, mostrando um leve aquecimento nestas regiões, como visto anteriormente.

Figura 20 – Mapas de diferença entre cenário piloto menos cenário base de temperatura superficial no reservatório Passaúna, com zoom na área coberta. Média de todo o período; média diária; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite.



FONTE: O autor (2024)

A diferença entre os resultados do cenário expandido e o cenário base são apresentados na Figura 21. As diferenças nas médias dos períodos diurnos novamente são menores que dos períodos noturnos.

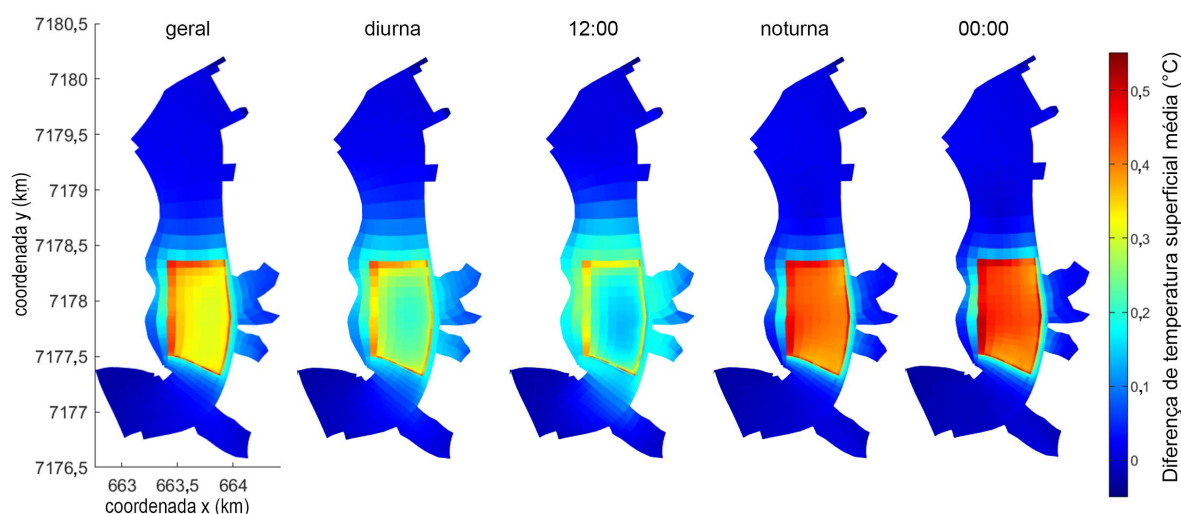
Mas com as coberturas maiores, é possível perceber que na região central coberta as diferenças são menores do que nas bordas apenas nos períodos diurnos, quando há uma maior dissipação de temperatura com as regiões não cobertas do entorno, ficando até mesmo com diferenças maiores nas regiões do entorno do que na região coberta ao meio-dia.

Durante a noite, a diferença na área coberta é mais homogênea e mais intensa, indicando que a estrutura flutuante do modelo conserva a temperatura nesta região, com pouca dissipação para o entorno.

5.3.2 Perfis de Temperatura em LR e PV1

Comparando perfis verticais nos pontos PV1 e LR modelados nos cenários

Figura 21 – Mapas de diferença entre cenário expandido menos cenário base de temperatura superficial no reservatório passaúna. Média de todo o período; média diurna; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite.



FONTE: O autor (2024)

base e expandido com valores medidos (Figura 22) nota-se que na maioria dos perfis os comportamentos da temperatura são semelhantes, sem cruzamentos de perfis ao mudar a profundidade, indicando amplitude de variação de temperatura entre superfície e fundo parecida, embora nos valores modelados sempre há uma variação de temperatura de até 2 °C para os valores medidos.

Em relação aos pontos PV1 e LR, as diferenças entre seus perfis são muito pequenas quando se compara a medição pelo mesmo equipamento ou o mesmo cenário modelado, sendo muito menos relevante e observável do que as diferenças entre esses equipamentos e a modelagem.

Com relação ao sensor na superfície abaixo do SFF e as medições pontuais na superfície e na profundidade de 6 metros, todos ficam mais próximos aos valores medidos nos perfis do que os valores modelados.

A análise sazonal dos perfis ficou comprometida devido à falta dos perfis medidos nas épocas mais frias do ano. Mas ao analisar o horário das medições, nota-se um perfil distinto no horário noturno (Figura 22f), mais misturado, onde, no ponto PV1, sequer há uma redução significativa de temperatura mesmo nas camadas mais inferiores, próximas ao fundo.

Os perfis de temperatura ao longo do tempo nos pontos PV1 e LR, nos cenários piloto e expandido, já foram comparados com os perfis medidos nestes mesmos pontos na seção de calibração, agora na sequência os perfis simulados nestes pontos serão comparados entre si, nos três cenários (Figura 23, Figura 24 e Figura 25).

Figura 22 – Perfil de temperatura nos pontos PV1 e LR, medidos e modelados.

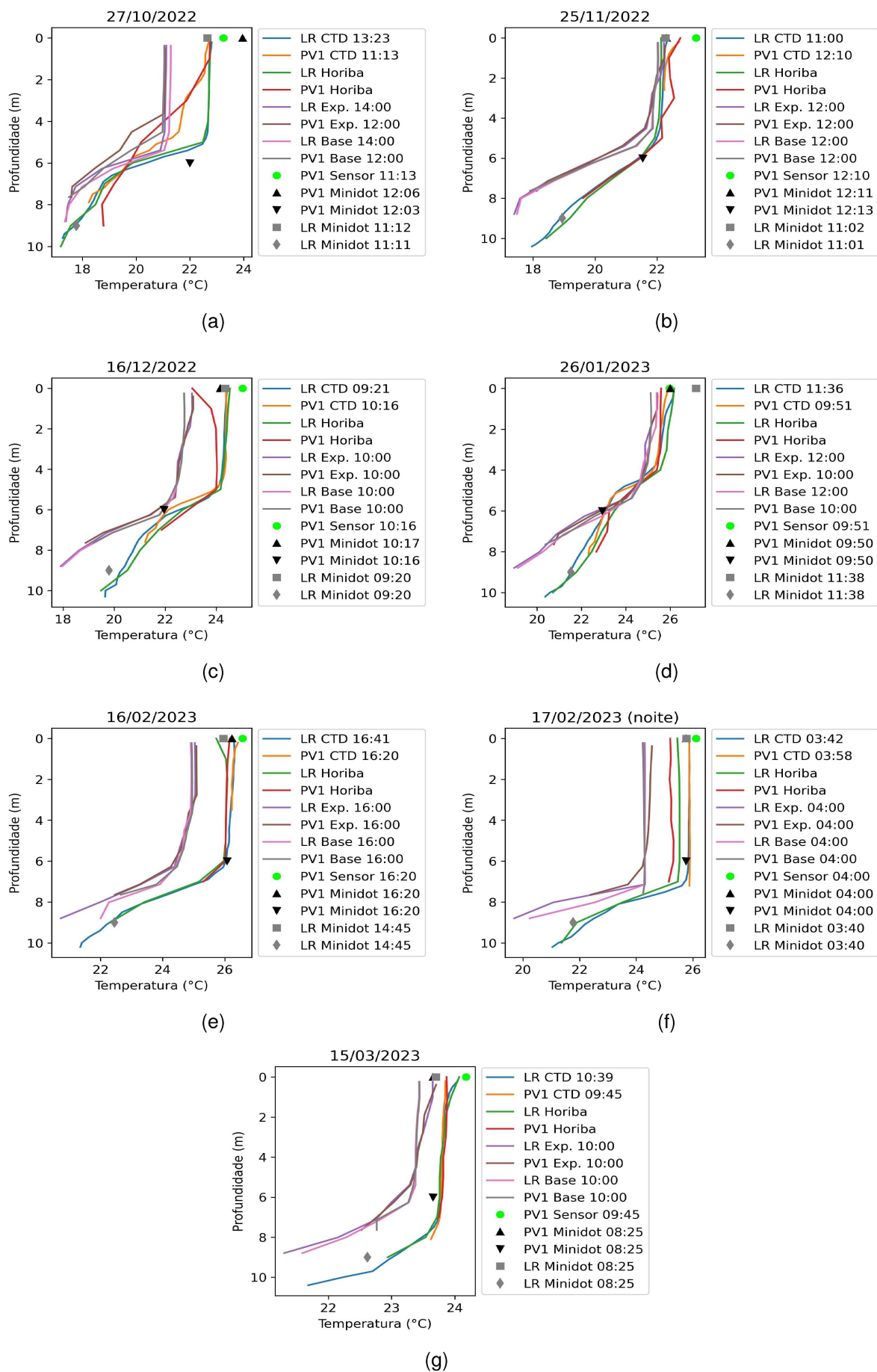
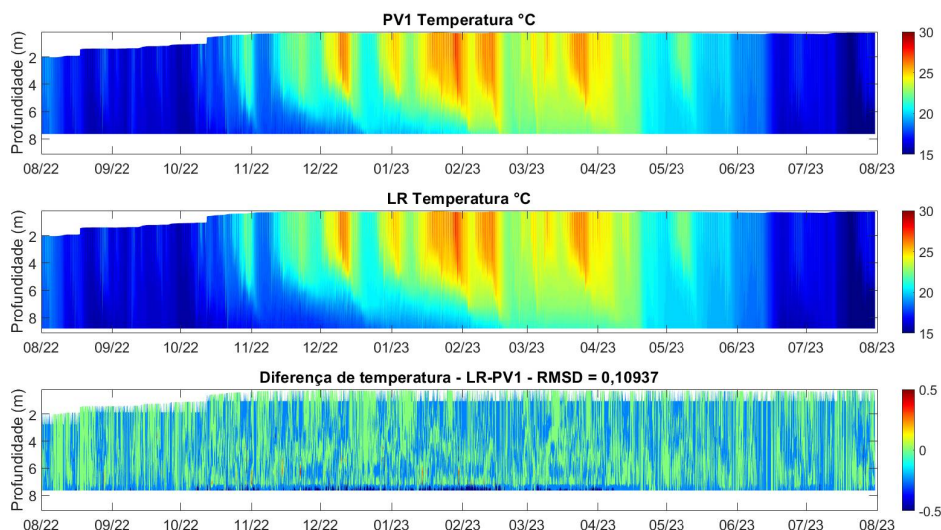
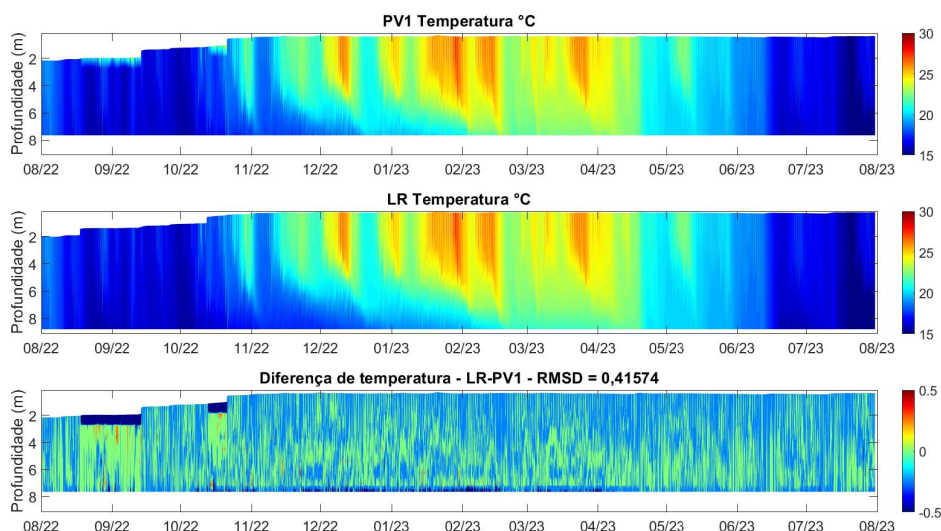


Figura 23 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para o cenário base.



FONTE: O autor (2024)

Figura 24 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para o cenário piloto.

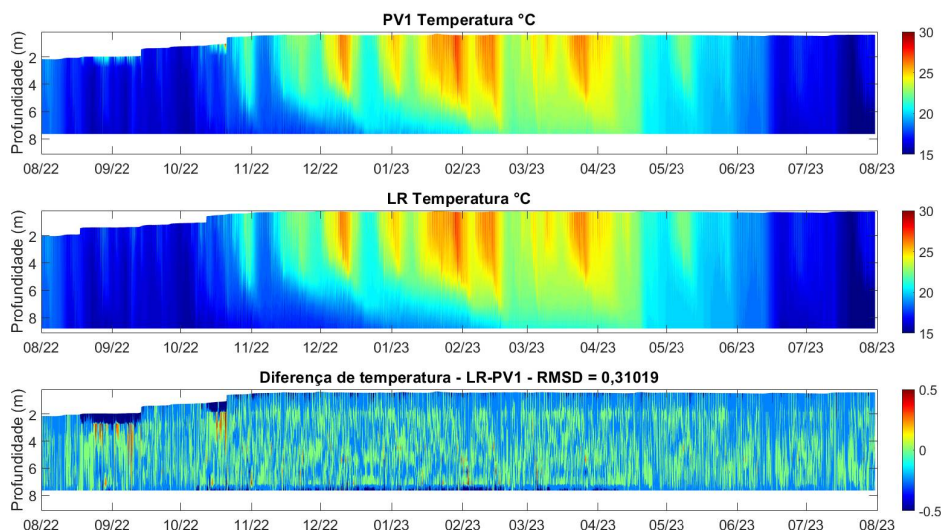


FONTE: O autor (2024)

De forma geral, as temperaturas em PV1 e LR se mostram bem semelhantes, com a raiz do desvio quadrático médio (RMSD) com valores inferiores a 10% da amplitude de variação de temperatura.

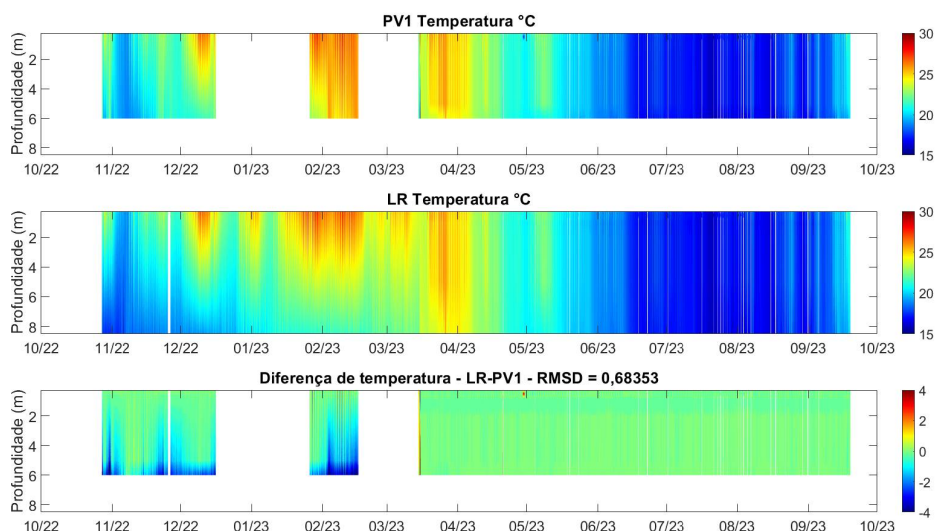
Em todos os cenários, as diferenças geralmente estão próximas de zero (tonalidade verde), ou então estão negativas (em azul), indicando que o PV1 está mais quente que LR. Diferenças positivas (em vermelho) são raras.

Figura 25 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para o cenário expandido.



FONTE: O autor (2024)

Figura 26 – Perfis de temperatura nos pontos PV1 e LR, e a diferença entre eles, para os dados medidos.



FONTE: O autor (2024)

Os pontos de maiores diferenças em módulo são pontos de profundidade mínima (com forte influência do SFF) ou máxima (com forte influência do fundo). Vale lembrar que PV1 possui menor profundidade que LR, como é possível ver nos gráficos.

O RMSD do cenário base é menor do que nos cenários com cobertura por SFF, indicando que a influência da mesma, que está sobre PV1, é menor em LR, ou seja, nos cenário com cobertura, PV1 muda mais que LR e o RMSE entre eles aumenta. Nos

cenários com cobertura, pode-se observar grandes diferenças nas camadas superficiais no período de aquecimento do modelo e de enchimento do reservatório (de agosto até outubro de 2022, nos perfis modelados de diferenças entre LR e PV1).

Cabe destacar também que o RMSD foi maior no cenário piloto do que no expandido, o que pode indicar que no cenário expandido, a influência da cobertura é maior em LR, o que o aproxima mais dos valores de PV1.

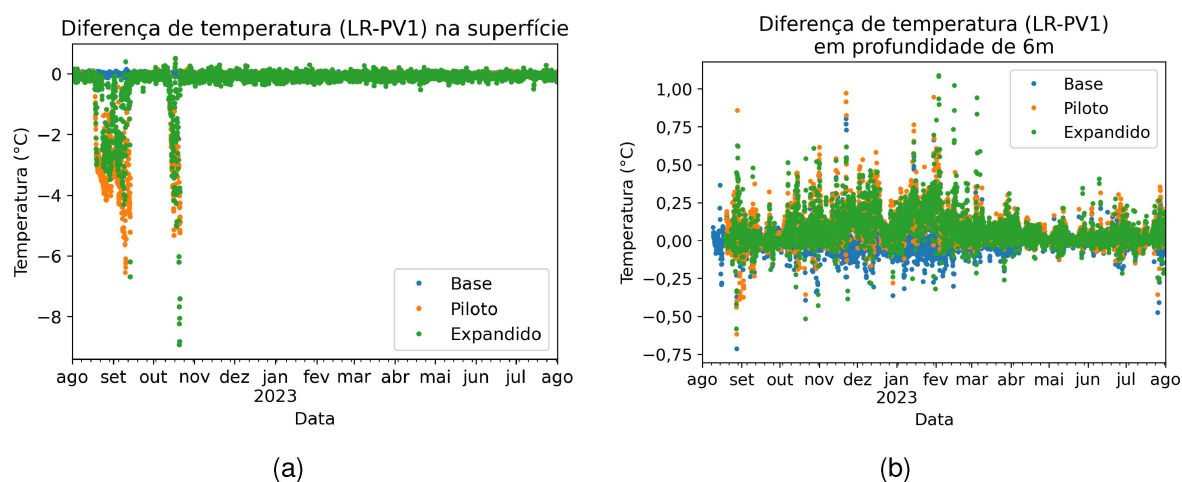
Ao comparar os valores de temperatura medidos para PV1 e LR na Figura 26, nota-se que o RMSD é maior do que nas simulações. As maiores diferenças são negativas (PV1 mais quente), e estão principalmente durante o período quente do ano, quando o reservatório possui uma grande variação térmica em função da profundidade.

Outro fator que pode ter favorecido essas diferenças, é estarem próximas ou entre as regiões de falha de medição do equipamento em PV1, o que pode ter prejudicado a qualidade destes dados.

5.3.3 Séries temporais nos pontos PV1 e LR

As séries temporais de temperatura no cenário base nos pontos PV1 e LR, na superfície e na profundidade de 6 metros já foram utilizadas na calibração (Figura 10), agora serão comparadas com os outros cenários, piloto e expandido. Serão analisadas diferenças entre os pontos e entre as profundidades.

Figura 27 – Séries temporais de diferença de temperatura nos pontos PV1 menos LR.



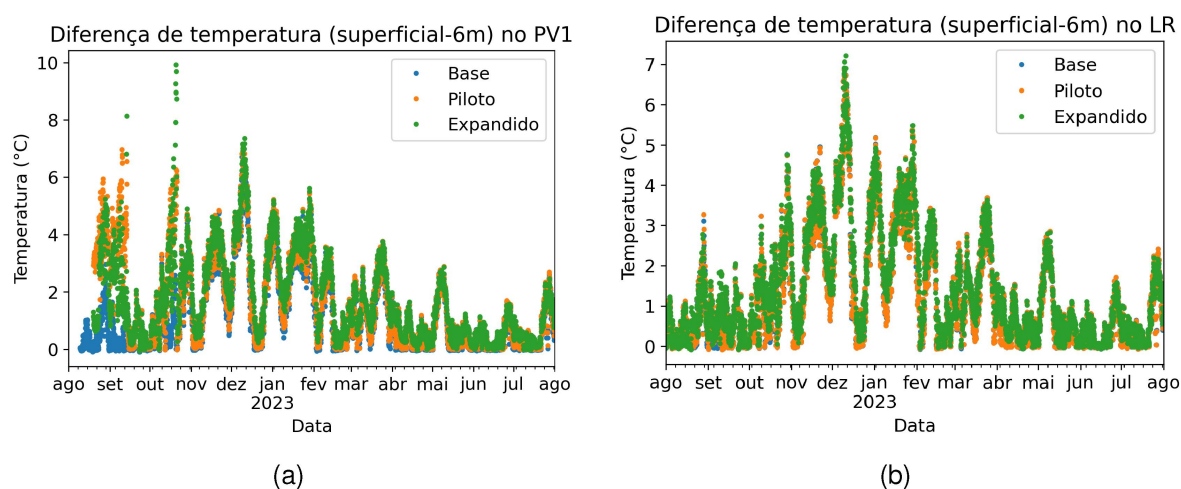
FONTE: O autor (2024)

A diferença devido à localização dos pontos, LR – PV1 (Figura 27a), mostra a superfície com grandes diferenças negativas (cerca de 7 °C no cenário piloto e 9 °C no expandido, indicando maior temperatura em PV1) em pequenos períodos, igual visto anteriormente nos perfis, influenciadas pela cobertura (diferença maior em módulo no cenário expandido), mas, por serem justamente no período entre agosto e outubro de

2022, parecem estar relacionados ao problema de balanço de massa do modelo, já relatado anteriormente.

Já na profundidade de 6 metros (FIGURA 27b), as diferenças máximas se mantiveram em torno de 1 °C em módulo, são mais positivas do que negativas (maior temperatura em LR), e não é possível notar a influência da cobertura maior em relação à menor, com os cenários piloto e expandido tendo valores próximos e alternando as diferenças máximas em módulo a cada passo de tempo.

Figura 28 – Séries temporais de diferença de temperatura na superfície menos profundidade de 6 metros.



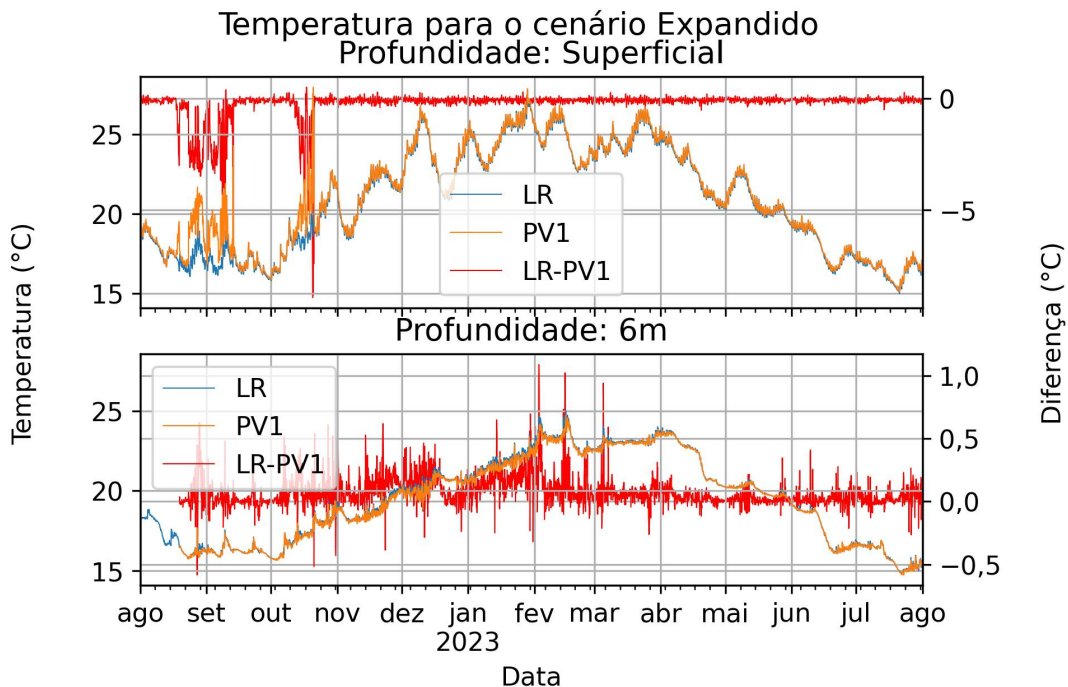
FONTE: O autor (2024)

No caso das diferenças devido à profundidade, superficial – 6 m, os comportamentos em PV1 e LR são semelhantes entre si nos três cenários, com diferenças positivas de temperatura (temperatura superficial maior).

A diferença observada em PV1 (Figura 28a), que há diferenças maiores em períodos de setembro e outubro, apenas para os cenários com cobertura, já foram discutidas anteriormente, o que indica que os erros de balanço de massa são de fato na camada superficial de PV1.

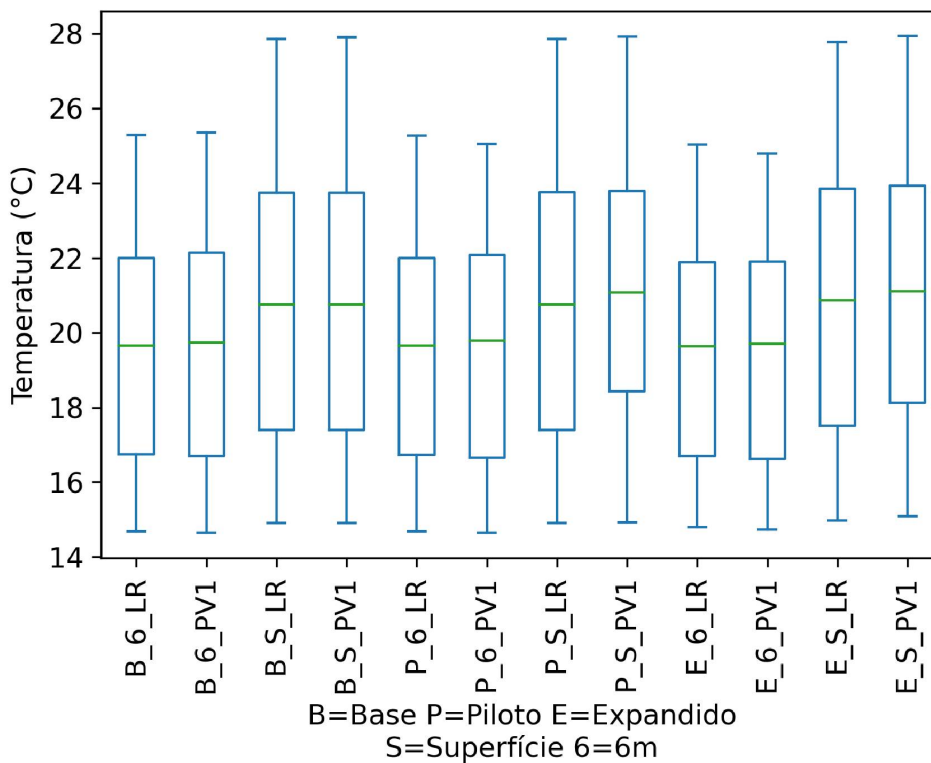
Analisando apenas as séries temporais de temperatura do cenário expandido (Figura 29), nota-se que na camada superficial há de fato grandes picos de temperatura em PV1 que não são acompanhados pelo LR, e que não existem na profundidade de 6 metros.

Figura 29 – Séries de temperatura no cenário expandido, para PV1 e LR e a diferença entre eles, na camada superficial e 6 metros abaixo.



FONTE: O autor (2024)

Figura 30 – Boxplots das séries de temperatura.



FONTE: O autor (2024)

Esta figura de série temporal também permite verificar a sazonalidade, com as temperaturas mais altas durante o período mais quente do ano, em ambas as profundidades, e que principalmente durante o verão, a diferença de temperatura entre o topo e o fundo do reservatório é maior.

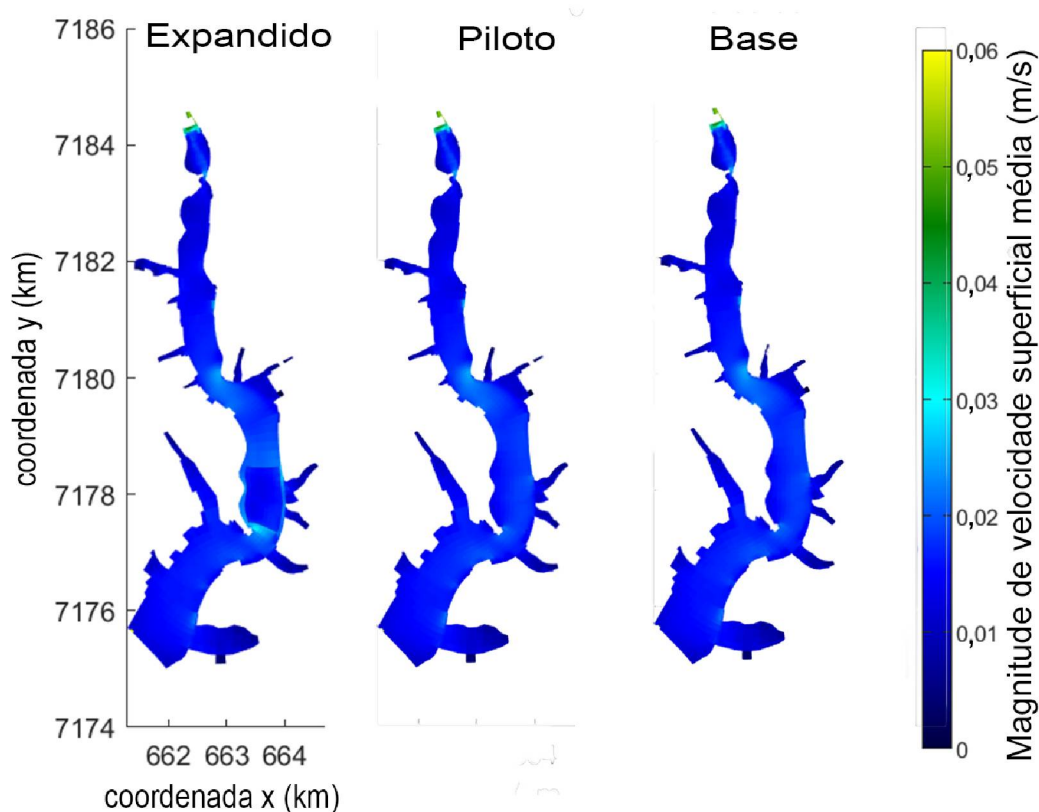
Por fim, a Figura 30 traz os boxplots de todas as séries temporais de temperatura, considerando os três cenários, os pontos PV1 e LR, e as profundidades superficial e de 6 metros. A figura indica que as maiores diferenças de temperatura estão relacionadas à profundidade, seguida dos cenários, principalmente em PV1.

5.4 Magnitude de Velocidade

5.4.1 Velocidade Superficial

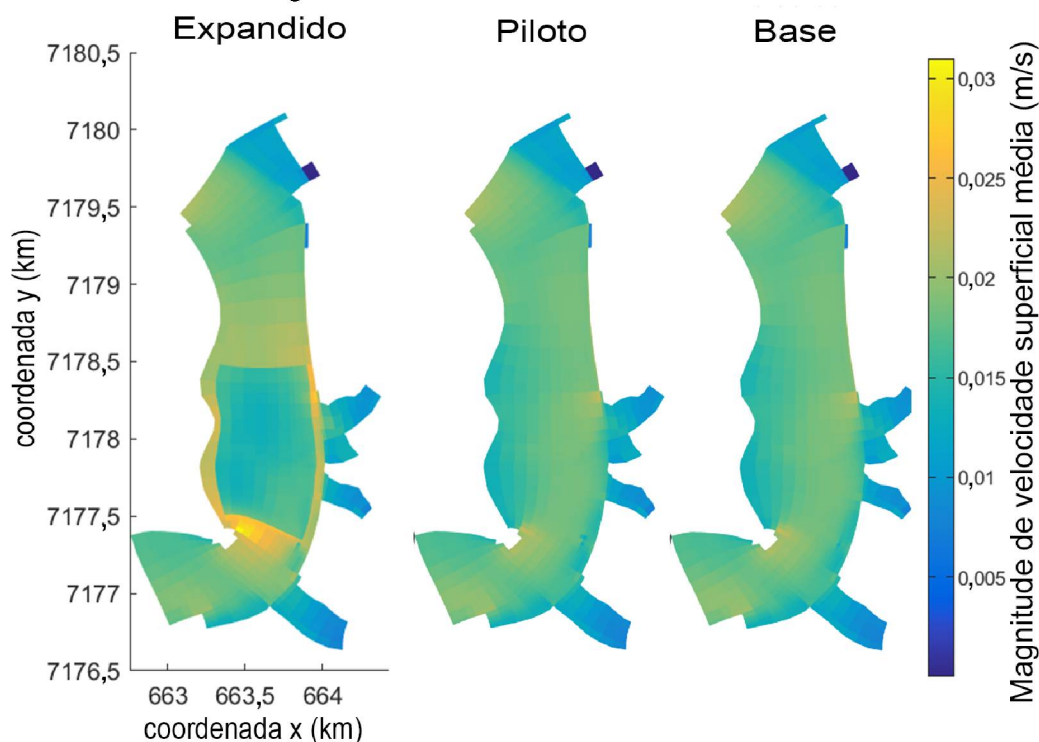
A magnitude de velocidade superficial considera os vetores de velocidades superficiais nas três componentes dimensionais (na direção do escoamento, na transversal e na vertical), os mapas da Figura 31 apresentam uma média no tempo para a velocidade na camada superficial, nos três cenários.

Figura 31 – Mapas de magnitude de velocidade média superficial no reservatório Passaúna. Expandido: grande cobertura de módulos; Piloto: cobertura atual de módulos; Base: sem módulos fotovoltaicos.



FONTE: O autor (2024)

Figura 32 – Mapas de magnitude de velocidade média superficial no reservatório Passaúna, com zoom na região lacustre.



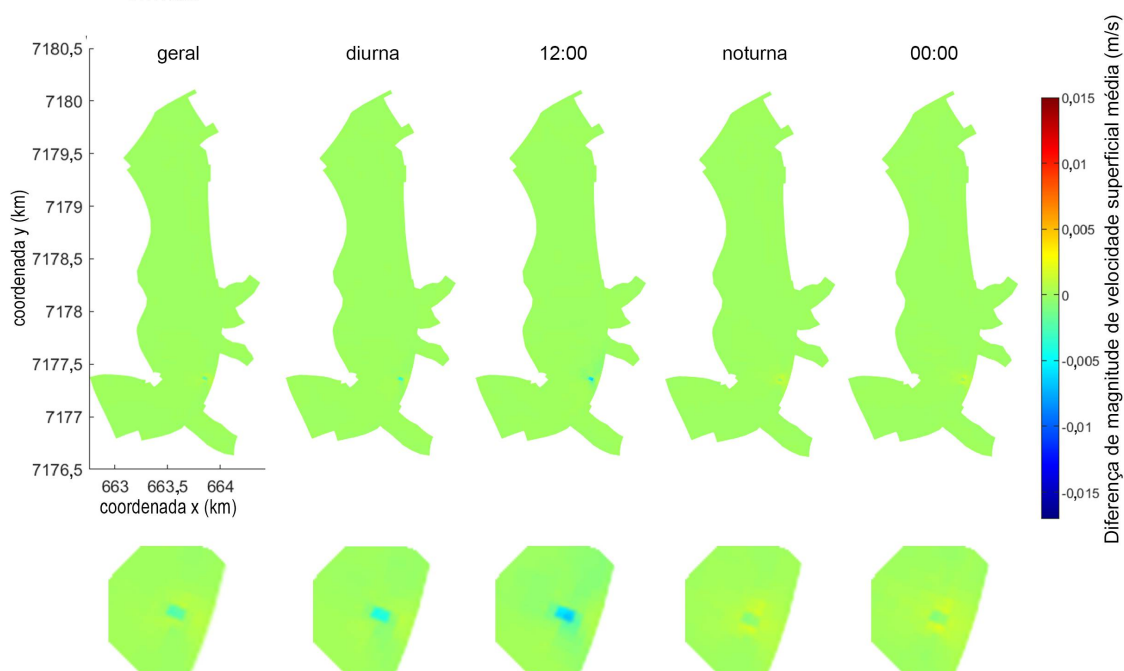
FONTE: O autor (2024)

Nota-se que no cenário expandido há uma redução de velocidade na região coberta, possivelmente devido à ação do vento removida, já que a modelagem não considera que há atrito entre a água e a estrutura. Já no entorno da cobertura, há um aumento de velocidade quando comparado com os cenários piloto e base. Com a cobertura menor do cenário piloto, não foi possível observar grandes diferenças para o cenário base, mesmo com o zoom da Figura 32.

Já nos gráficos de diferença em relação ao cenário base, no caso do cenário piloto – base (Figura 33), nota-se que as diferenças na região coberta são negativas e ocorrem apenas nos períodos diurnos, tendo seu ápice ao meio-dia. Nos períodos noturnos, as diferenças são positivas e mais intensas no entorno da região coberta, indicando que o aumento de velocidade com a cobertura no entorno é apenas à noite. Na média geral, os valores estão suavizados, o que impediu de notar diferenças em escalas de velocidade maiores das figuras anteriores.

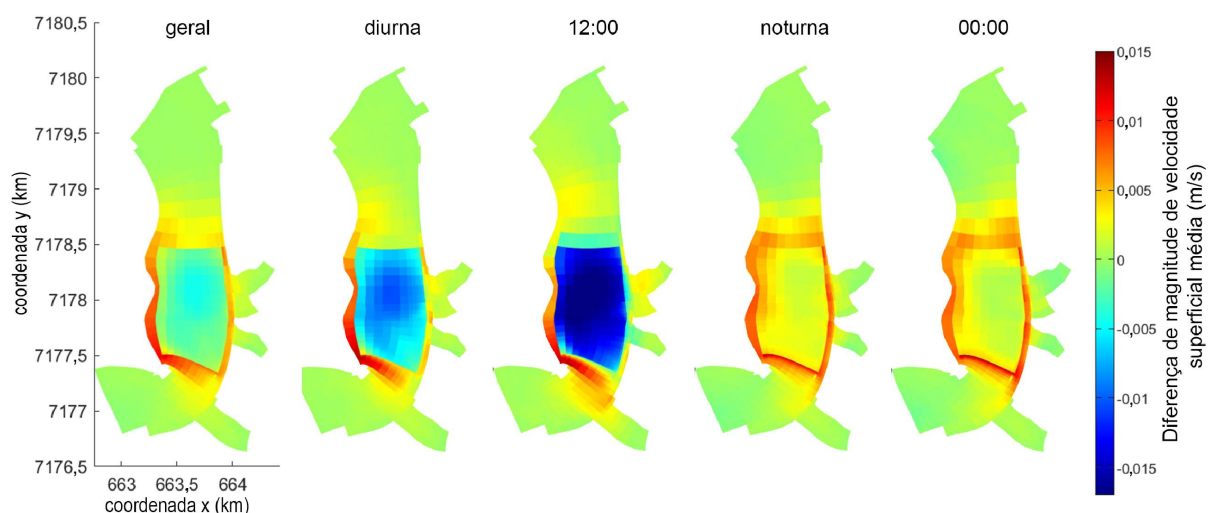
No cenário expandido da Figura 34, na região coberta os efeitos são semelhantes ao cenário piloto quando é feita a diferença com o cenário base, com a diferença negativa mais intensa durante o dia, mas no entorno, as diferenças positivas são mais intensas e ocorrem também nos períodos diurnos, embora ao meio-dia, nas camadas mais próximas, a diferença ainda seja negativa.

Figura 33 – Mapas de diferença entre cenário base menos cenário piloto de magnitude de velocidade superficial no reservatório Passaúna, com zoom na área coberta. Média de todo o período; média diária; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite.



FONTE: O autor (2024)

Figura 34 – Mapas de diferença entre cenário base menos cenário expandido de magnitude de velocidade superficial no reservatório Passaúna. Média de todo o período; média diurna; média ao meio-dia; média noturna; média à meia-noite.

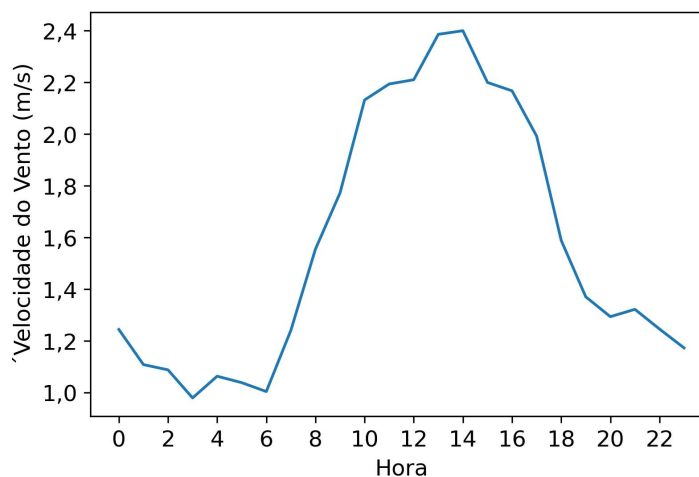


FONTE: O autor (2024)

Por meio dessas figuras é possível verificar que a velocidade é reduzida nas regiões cobertas durante o dia, enquanto as regiões no entorno ganham velocidade, principalmente durante a noite. Isso indica uma influência do vento nas diferenças

vistas na região coberta, pois durante a noite o vento é mais fraco (Figura 35), fazendo com que a falta de sua influência na água superficial da região coberta cause menos diferença.

Figura 35 – Velocidade média do vento para cada hora, considerando o período da modelagem de Agosto/2022 até Agosto/2023.



FONTE: O autor (2024)

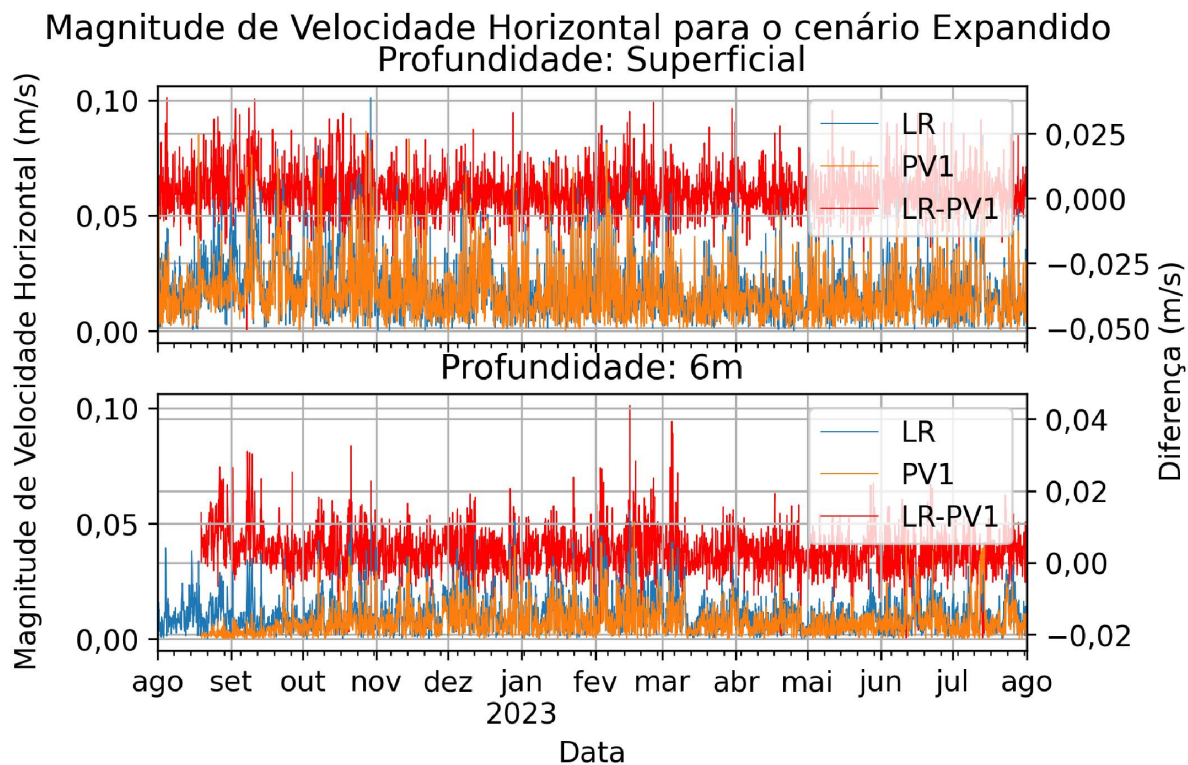
5.4.2 Séries temporais de velocidade horizontal

A velocidade horizontal, que considera apenas as componentes horizontais de velocidade, sem a componente vertical, analisada através de sua série temporal no cenário expandido na Figura 36 nos pontos PV1 e LR, não apresenta grandes diferenças sazonais ao longo do ano.

Mas as diferenças entre os pontos PV1 e LR, na camada superficial, são semelhantes às observadas na seção anterior. Já com 6 metros abaixo da superfície, as diferenças atingem valores ainda maiores, mas neste caso são influenciadas pelo fundo do reservatório, e não pelo SFF.

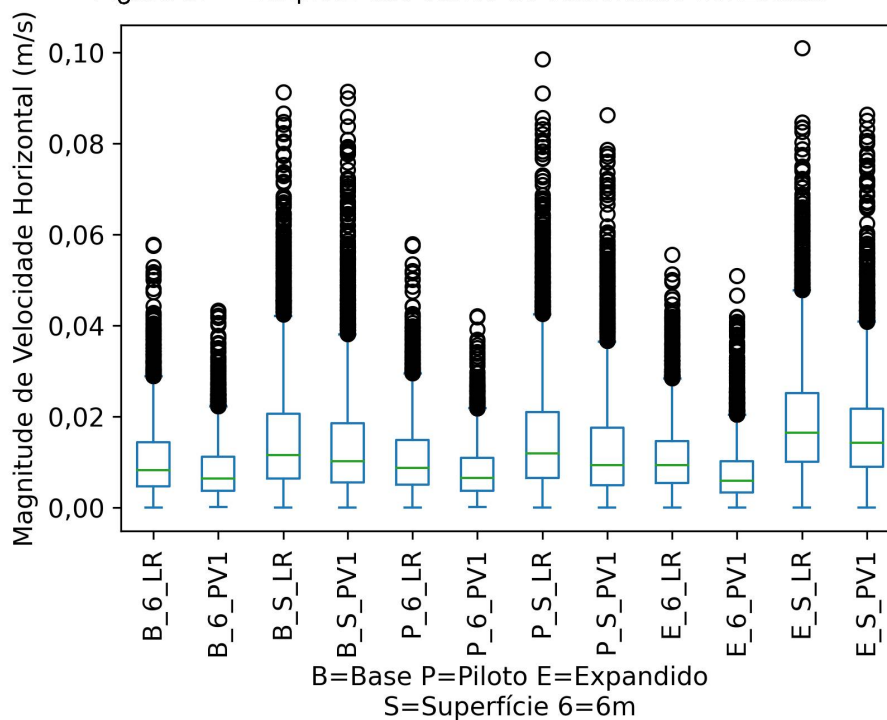
A Figura 37 traz o boxplot das séries de velocidade horizontal para os dois pontos, nas duas profundidades e nos três cenários, apresenta vários *outliers* superiores, e indica um aumento de velocidades no cenário expandido em sua camada superficial, tanto para PV1 como para LR.

Figura 36 – Séries de magnitude de velocidade horizontal no cenário expandido, na camada superficial e 6 metros abaixo.



FONTE: O autor (2024)

Figura 37 – Boxplots das séries de velocidade horizontal.



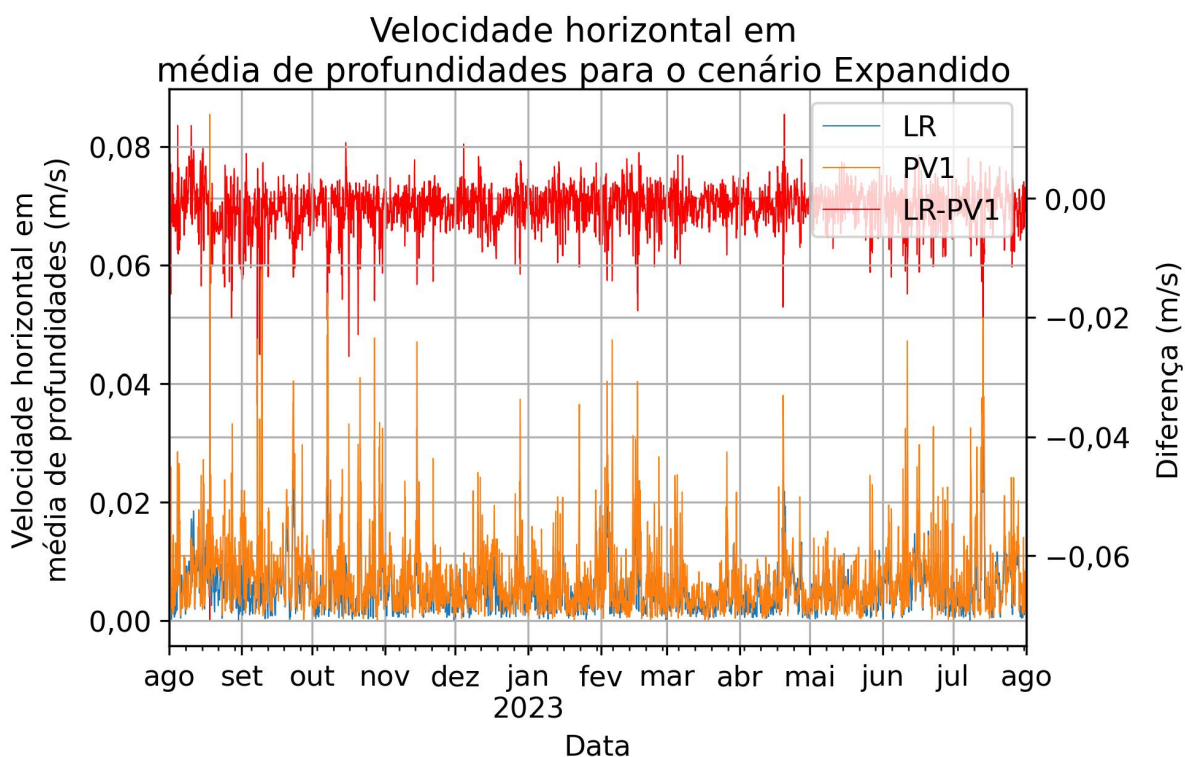
FONTE: O autor (2024)

5.4.3 Séries temporais de velocidade horizontal em uma média de todas as profundidades

Na Figura 38 é apresentada a série temporal da velocidade horizontal em uma média de todas as profundidades no PV1 e no LR para o cenário expandido, que mostra diferenças parecidas com as vistas nas camadas superficiais e 6 metros abaixo, ou seja, nas outras profundidades o comportamento é semelhante. A principal diferença notada é nos picos de diferenças negativas, que indica maior velocidade em PV1, que são maiores, indicando que nas camadas intermediárias PV1 possui mais velocidade que LR.

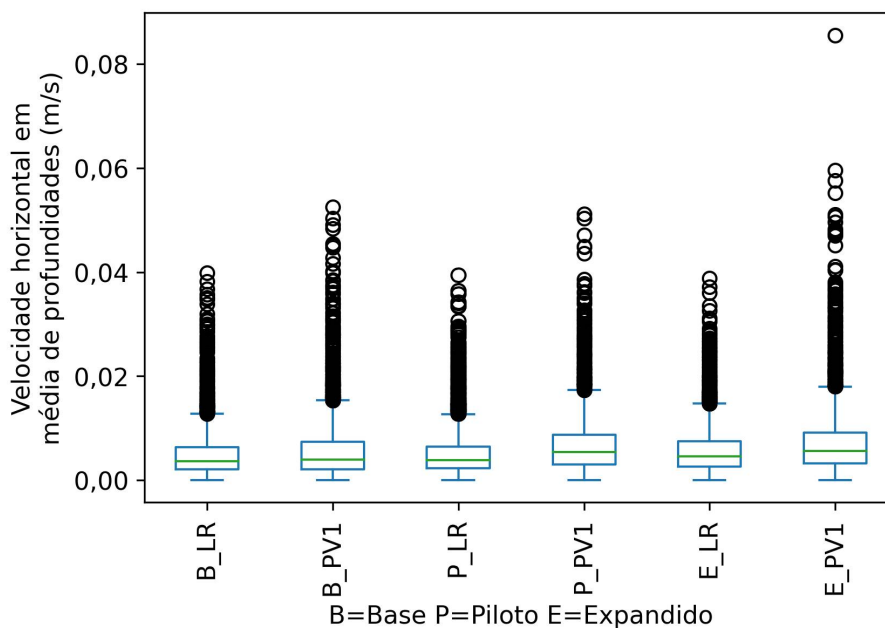
Por meio do boxplot da Figura 39, nota-se o aumento de velocidade em PV1 nos cenários em que está coberto, já em LR há o aumento apenas no cenário expandido. Esses resultados mostram que as velocidades em camadas intermediárias de PV1 são mais altas, ao parecer haver um ganho de velocidade nessa região para compensar a perda causada pelo SFF, já LR, que só é impactada pela cobertura no cenário expandido, só possui esse ganho de velocidade em camadas intermediárias neste cenário.

Figura 38 – Série de magnitude de velocidade horizontal em uma média de todas as profundidades, no cenário expandido.



FONTE: O autor (2024)

Figura 39 – Boxplots das séries de velocidade horizontal em uma média de todas as profundidades.



FONTE: O autor (2024)

5.5 Dissipação de energia — Turbulência

A turbulência é uma das principais formas de dissipação de energia em escoamentos, portanto, essa dissipação foi analisada, buscando verificar possíveis efeitos turbulentos do SFF na água.

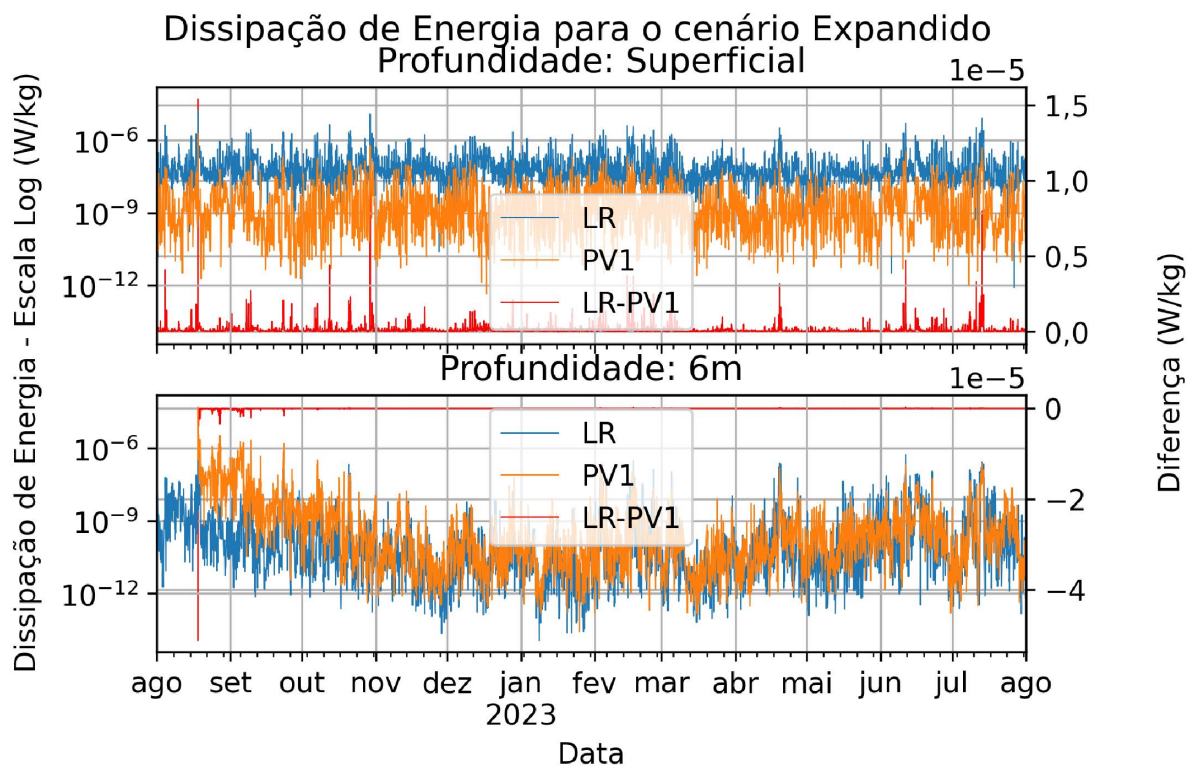
Apresentada em escala log na Figura 40, a dissipação de energia é sempre maior em LR do que em PV1 na superfície, algo esperado, já que não há atrito entre a estrutura e a água em PV1, e como vimos anteriormente, há neste ponto uma perda de velocidade, embora haja um aumento de temperatura nos cenários com cobertura.

Já na profundidade de 6 metros, PV1 sofre os efeitos turbulentos do fundo do reservatório, o que o faz ter valores de dissipação de energia maiores. A escala das dissipações de energia são menores que na superfície.

As diferenças, que não estão em escala log, ilustram como as diferenças entre LR e PV1 possuem sempre o mesmo sinal em valores representativos (positiva na superfície, e negativa 6 metros abaixo).

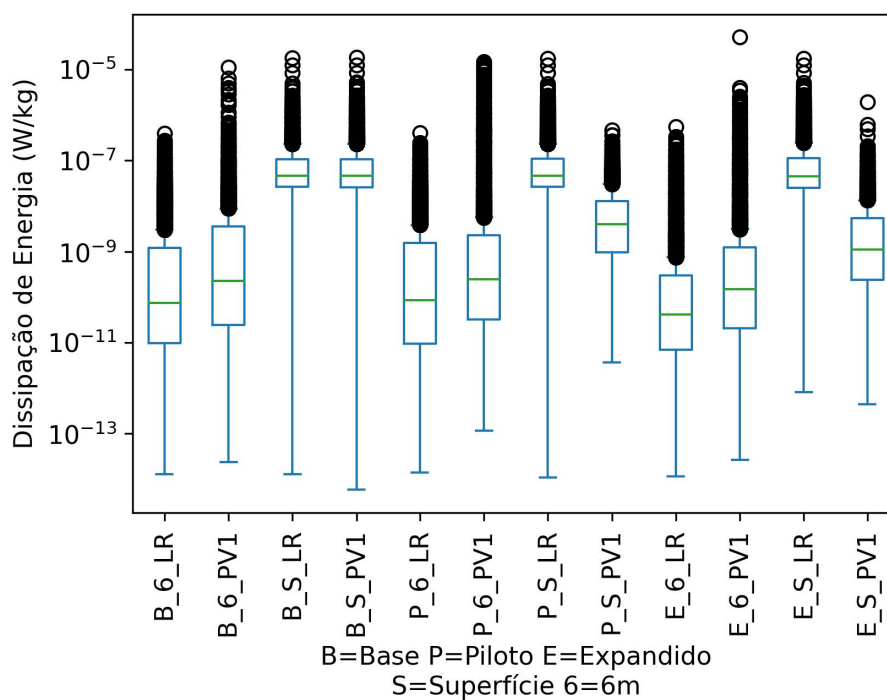
No caso das camadas inferiores, há um efeito sazonal, com uma dissipação menor nos períodos mais quentes do ano, já as diferenças só são representativas no período de aquecimento da modelagem (agosto e setembro de 2022).

Figura 40 – Séries de dissipação de energia no cenário expandido, na camada superficial e 6 metros abaixo. Escala log para a dissipação e escala normal para as diferenças.



FONTE: O autor (2024)

Figura 41 – Boxplots das séries de dissipação de energia.



FONTE: O autor (2024)

Já nos boxplots (Figura 41), nota-se claramente o efeito do SFF ao reduzir a energia dissipada nos pontos cobertos, pois PV1 superficial no cenário base tem valores de energia dissipada bastante semelhantes a LR.

5.6 Resumo dos Resultados relacionados ao SFF

Os resultados mostraram que a modelagem possui capacidade de simular a hidrodinâmica e as condições térmicas do reservatório Passaúna através da calibração e posterior validação. Os erros apresentados pela modelagem foram considerados pouco representativos, o suficiente para aceitar a modelagem no cenário base como uma referência, para então, com os cenários com cobertura, explorar os efeitos do SFF no reservatório.

Em relação à evaporação, como o modelo considera não haver evaporação na região coberta, os efeitos do SFF são bastante diretos, zerando o valor apenas na região coberta, sem alterações no entorno. Isso faz com que as parciais diferenças de volume total evaporado no período de um ano para cada cenário seja semelhante à porcentagem coberta deles.

No caso da temperatura, os efeitos do SFF são maiores nas camadas superficiais, com um aquecimento na região coberta e no entorno, com diferenças entre períodos (mais localizada na região coberta à noite, mais espalhada para o entorno durante o dia). Isso faz com que os perfis de temperatura entre os cenários sejam muito semelhantes entre si, já que as variações em camadas mais profundas são menores.

As magnitudes de velocidade superficial foram reduzidas devido ao SFF na região coberta, enquanto nas regiões no entorno houve aumento. Quando analisada apenas as magnitudes de velocidade horizontal, os resultados foram semelhantes ao considerado com a componente vertical.

Já em relação à turbulência, principal forma de dissipação de energia, esta se mostra mais baixa na região coberta nas camadas superficiais, pois o modelo não considera atrito entre a estrutura flutuante e a água, embora calcule a formação de turbulência.

A Tabela 9 traz os valores médios e as diferenças entre PV1 e LR para as variáveis em que foram feitos os boxplots, detalhando em números gerais o resumo dos resultados.

Tabela 9 – Médias das variáveis em todos os cenários, para PV1 e LR.

| Variável | Cenário | Superficial ou Média de prof. | | | 6 metros abaixo | | |
|---|-----------|-------------------------------|-----------|------------|-----------------|-----------|------------|
| | | PV1 | LR | LR - PV1 | PV1 | LR | LR - PV1 |
| Temperatura (°C) | Base | 20,712 | 20,713 | 0,002 | 19,537 | 19,509 | -0,029 |
| | Piloto | 21,041 | 20,722 | -0,319 | 19,538 | 19,508 | -0,031 |
| | Expandido | 21,070 | 20,827 | -0,242 | 19,469 | 19,444 | -0,025 |
| Magnitude de Velocidade Horizontal (m/s) | Base | 0,0141 | 0,0157 | 0,0016 | 0,0082 | 0,0105 | 0,0022 |
| | Piloto | 0,0128 | 0,0159 | 0,0031 | 0,0080 | 0,0109 | 0,0029 |
| | Expandido | 0,0170 | 0,0194 | 0,0024 | 0,0078 | 0,0110 | 0,0032 |
| Vel. Horizontal (m/s) em média de profundidades | Base | 0,0057 | 0,0048 | -0,0009 | - | - | - |
| | Piloto | 0,0067 | 0,0049 | -0,0017 | - | - | - |
| | Expandido | 0,0073 | 0,0056 | -0,0016 | - | - | - |
| Dissipação de Energia (W/kg) | Base | 1,439E-07 | 1,428E-07 | -1,150E-09 | 2,084E-08 | 4,514E-09 | -1,633E-08 |
| | Piloto | 1,269E-08 | 1,435E-07 | 1,308E-07 | 7,002E-08 | 4,549E-09 | -6,547E-08 |
| | Expandido | 7,469E-09 | 1,453E-07 | 1,378E-07 | 3,307E-08 | 3,552E-09 | -2,952E-08 |

FONTE: O autor (2024)

Na Tabela 10 há as porcentagens de aumento ou redução em relação ao cenário base. Nota-se que, no cenário expandido, apesar de a velocidade reduzir considerando toda a região coberta (Figura 31), no ponto PV1 especificamente ela aumenta, pois PV1 está na borda da cobertura expandida, já no cenário piloto, como está no centro da cobertura, há a redução.

A energia dissipada possui porcentagens altas de variação, pois como possui valores muito baixos, qualquer perturbação provoca grandes alterações na ordem de grandeza de seus valores.

Tabela 10 – Aumento percentual das variáveis nos cenários com cobertura em relação ao base (negativos representam redução).

| Variável | Cenário | Superficial ou Média de prof. | | 6 metros abaixo | |
|---|-----------|-------------------------------|--------|-----------------|---------|
| | | PV1 | LR | PV1 | LR |
| Temperatura | Piloto | 1,59% | 0,04% | 0,01% | -0,01% |
| | Expandido | 1,73% | 0,55% | -0,35% | -0,33% |
| Magnitude de Velocidade Horizontal | Piloto | -8,78% | 1,54% | -2,78% | 4,04% |
| | Expandido | 20,53% | 23,74% | -5,84% | 4,65% |
| Velocidade Horizontal em média de profundidades | Piloto | 17,68% | 2,48% | - | - |
| | Expandido | 28,38% | 17,25% | - | - |
| Dissipação de Energia | Piloto | -91,18% | 0,48% | 235,95% | 0,78% |
| | Expandido | -94,81% | 1,74% | 58,69% | -21,32% |

FONTE: O autor (2024)

O teste ANOVA é uma boa forma de comprovar ou não, de maneira estatisticamente significativa, se há diferença entre os 3 cenários apresentados, para um mesmo ponto e uma mesma profundidade. Considerando a hipótese nula (H) de que não há diferença entre o valor médio das 3 séries temporais de um mesmo ponto em uma mesma profundidade, com um nível de significância de 5%. Ou seja, só podemos dizer

que as séries entre os cenários são diferentes uma da outra se o p-valor do teste for menor que 0,05.

Tabela 11 – Probabilidades p-valor do teste ANOVA.

| Variável | Superficial ou Média de prof. | | 6 metros abaixo | |
|--|-------------------------------|--------|-----------------|--------|
| | PV1 | LR | PV1 | LR |
| Temperatura | 0,0000 | 0,1987 | 0,4057 | 0,4404 |
| Magnitude de Velocidade Horizontal | 0,0000 | 0,0000 | 0,0015 | 0,0062 |
| Velocidade Horizontal em média de profundidades | 0,0000 | 0,0000 | - | - |
| Dissipação de Energia | 0,0000 | 0,9661 | 0,0005 | 0,0113 |

FONTE: O autor (2024)

Os resultados de p-valor (Tabela 11) indicam haver diferenças significativas estatisticamente para a maioria das variáveis analisadas, em todos os pontos e em todas as profundidades, com exceção da temperatura (em que H só é rejeitada para PV1 superficial) e para a dissipação de energia em LR superficial. Porém, como já relatado anteriormente, as diferenças 6 metros abaixo da superfície estão relacionadas a efeitos do fundo do reservatório.

O teste t para 2 amostras, por sua vez, verifica se há diferença significativa estatisticamente em termos locais, entre PV1 e LR, considerando uma mesma variável, em um mesmo cenário e em uma mesma profundidade. O nível de significância segue o mesmo do teste anterior.

Tabela 12 – Probabilidades p-valor do teste t para 2 amostras.

| Variável | Cenário | Superficial ou Média de prof. | 6 metros abaixo |
|---|-----------|-------------------------------|-----------------|
| Temperatura | Base | 0,9830 | 0,6277 |
| | Piloto | 0,0000 | 0,6028 |
| | Expandido | 0,0005 | 0,6698 |
| Magnitude de Velocidade Horizontal | Base | 0,0000 | 0,0000 |
| | Piloto | 0,0000 | 0,0000 |
| | Expandido | 0,0000 | 0,0000 |
| Velocidade Horizontal em média de profundidades | Base | 0,0000 | - |
| | Piloto | 0,0000 | - |
| | Expandido | 0,0000 | - |
| Dissipação de Energia | Base | 0,9072 | 0,0000 |
| | Piloto | 0,0000 | 0,0000 |
| | Expandido | 0,0000 | 0,0162 |

FONTE: O autor (2024)

Os resultados de p-valor (Tabela 12) indicam diretamente os efeitos do SFF, com diferenças significativas nas camadas superficiais nos cenários com cobertura para temperatura e dissipação de energia. No caso da dissipação de energia, cabe destacar que em 6 metros abaixo da superfície em todos os cenários há diferença significativa, portanto não é efeito direto do SFF.

No caso da magnitude de velocidade, esta não parece ser causada apenas pelo SFF, já que ocorre em todos os cenários e em todas as profundidades e também na média de todas as profundidades.

Portanto, os resultados mostram que a modelagem pôde representar a influência do SFF exclusivamente nas camadas superficiais, sendo as maiores variações relacionadas a variável temperatura.

6 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que uso do modelo matemático tridimensional hidrodinâmico do reservatório Passaúna permitiu a análise e comparação dos efeitos da cobertura do SFF em dois cenários, um retratando a situação atual e outro uma futura expansão, com o cenário base, sem essas estruturas.

A calibração e validação do modelo foi bem sucedida, com a modelagem apresentando desvios inferiores a 10% da amplitude de variação das variáveis avaliadas, em comparação com dados medidos.

As alterações entre regiões cobertas e não cobertas, na situação atual causadas pelo SFF, são representativas estatisticamente por meio do teste t, apenas nas camadas superficiais, para os dados de temperatura e para dissipação de energia.

As diferenças entre os cenários para a evaporação teve resultados considerados em um caso extremo, já que é zerada em regiões cobertas ==, algo que pode não retratar a realidade em arranjos de SFF como os do reservatório Passaúna, onde há uma interação ar-água abaixo dos painéis.

Em relação à temperatura e magnitude de velocidade, os efeitos na simulação são de aumento da primeira e redução da segunda na região coberta, e aumento das duas variáveis no entorno. Esses efeitos já foram observados em outros estudos encontrados na literatura, indicando uma convergência, embora também haja resultados de estudos indicando efeitos opostos.

Para a energia dissipada, os resultados também foram semelhantes aos obtidos por Yang et al. (2022) e Ji et al. (2022), com redução da energia dissipada e de turbulência nas regiões cobertas. Porém cabe destacar que como o modelo não considera cisalhamento entre a estrutura do SFF e a água, os resultados reais podem indicar até mesmo o oposto.

A representação do SFF como uma estrutura flutuante no Delft3D se mostrou uma maneira aplicável e eficiente de modelagem de reservatórios com SFF, apesar das dificuldades impostas por um modelo tridimensional serem inerentes. Esta representação é relativamente simples e conseguiu produzir resultados consistentes e coerentes com os encontrados na literatura.

Por meio dessa representação do SFF, foi possível prognosticar os efeitos de uma estrutura com maior cobertura de área superficial do reservatório, com o cenário expandido, o que permite buscar cenários ideais, considerando os objetivos em cada reservatório (produção de energia, abastecimento público, entre outros).

Como recomendação para trabalhos futuros, deve-se avaliar alternativas de representação do SFF na modelagem, seja por meio de outros modelos ou até mesmo pelo Delft3D, que permite, por exemplo, a entrada de dados com resolução espacial, permitindo uma entrada de dados ainda mais precisa para simular as condições das regiões afetadas pelo SFF nos corpos hídricos.

Adicionalmente, é interessante analisar o posicionamento da estrutura e seus efeitos, analisar outros parâmetros relevantes para a hidrodinâmica (como indicadores de estratificação), e o estudo da qualidade da água, por meio do acoplamento do módulo Delft3D-WAQ, que permitirá analisar variáveis importantes para o ecossistema do reservatório Passaúna e como estes são afetados pelo sistema fotovoltaico flutuante.

BIBLIOGRAFIA

ABD-ELHAMID, Hany F. et al. Reservoir Management by Reducing Evaporation Using Floating Photovoltaic System: A Case Study of Lake Nasser, Egypt. **Water**, v. 13, n. 6, p. 769, mar. 2021. ISSN 2073-4441. DOI: 10.3390/w13060769. Citado na p. 20.

ABDELAL, Qasem. Floating PV; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions. **International Journal of Low-Carbon**, v. 16, p. 732–739, 2021. DOI: 10.1093/ijlct/ctab001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab001>>. Citado na p. 15.

ALMEIDA, R. et al. Floating solar power: evaluate trade-offs. **Nature**, v. 606, p. 246–249, jun. 2022. Citado na p. 18.

BAHAIDARAH, H. et al. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. **Energy**, v. 59, p. 445–453, set. 2013. ISSN 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2013.07.050. Citado na p. 14.

BAX, Vincent et al. Floating photovoltaic pilot project at the Oostvoornse lake: Assessment of the water quality effects of three different system designs. **Energy Reports**, v. 9, p. 1415–1425, dez. 2023. ISSN 23524847. DOI: 10.1016/j.egy.2022.12.080. Citado nas pp. 15, 16.

BENYAHYA, Loubna et al. A Review of Statistical Water Temperature Models. **Canadian Water Resources Journal**, v. 32, n. 3, p. 179–192, jan. 2007. ISSN 0701-1784. DOI: 10.4296/cwrj3203179. Citado na p. 19.

CAGLE, Alexander E. et al. The Land Sparring, Water Surface Use Efficiency, and Water Surface Transformation of Floating Photovoltaic Solar Energy Installations. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 8154, out. 2020. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su12198154. Citado na p. 14.

CATHCART, Thomas P.; WHEATON, Frederick W. Modeling temperature distribution in freshwater ponds. **Aquacultural Engineering**, v. 6, n. 4, p. 237–257, jan. 1987. ISSN 01448609. DOI: 10.1016/0144-8609(87)90021-5. Citado na p. 19.

CHANUDET, Vincent; FABRE, Violaine; VAN DER KAAIJ, Theo. Application of a three-dimensional hydrodynamic model to the Nam Theun 2 Reservoir (Lao PDR). **Journal of Great Lakes Research**, v. 38, n. 2, p. 260–269, jun. 2012. ISSN 03801330. DOI: 10.1016/j.jglr.2012.01.008. Citado na p. 38.

CHOI, Young-Kwan. A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. **International Journal of Software Engineering and Its Applications**, v. 8, n. 1, p. 75–84, jan. 2014. ISSN 17389984. DOI: 10.14257/ijseia.2014.8.1.07. Citado na p. 14.

- COX, B. A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. **The Science of The Total Environment**, v. 314-316, p. 303–334, out. 2003. ISSN 00489697. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00062-7. Citado na p. 19.
- DELTARES. **Delft3D-Flow: User Manual**. The Netherlands: [s.n.], 2018. Citado nas pp. 31, 32.
- EXLEY, Giles et al. Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. **Solar Energy**, v. 219, p. 24–33, mai. 2021. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2021.01.076. Citado na p. 21.
- GADZANKU, Sika; BESHILAS, Laura; GRUNWALD, Ursula (Bryn). **Enabling Floating Solar Photovoltaic (FPV) Deployment: Review of Barriers to FPV Deployment in Southeast Asia**. [S.l.], jun. 2021. DOI: 10.2172/1787553. Citado na p. 19.
- GADZANKU, Sika; MIRLETZ, Heather et al. Benefits and Critical Knowledge Gaps in Determining the Role of Floating Photovoltaics in the Energy-Water-Food Nexus. **Sustainability**, v. 13, p. 4317, 8 abr. 2021. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su13084317. Citado na p. 19.
- GETIRANA, Augusto; LIBONATI, Renata; CATALDI, Marcio. Brazil is in water crisis — it needs a drought plan. **Nature**, v. 600, p. 218–220, 7888 dez. 2021. ISSN 0028-0836. DOI: 10.1038/d41586-021-03625-w. Citado na p. 14.
- HAAS, J. et al. Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. **Energy Conversion and Management**, v. 206, p. 112414, fev. 2020. ISSN 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112414. Citado nas pp. 15, 19.
- HARARI, J. et al. Modelagem numérica de plumas de emissários submarinos na região costeira do Estado do Paraná-Brazil. In: RIBEIRO, J. C. (Ed.). **Ciências exatas e da terra [recurso eletrônico]: conhecimentos estratégicos para o desenvolvimento do país**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020. cap. 2, p. 388–416. Citado na p. 31.
- HARGREAVES, George H.; ALLEN, Richard G. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 129, n. 1, p. 53–63, fev. 2003. ISSN 0733-9437. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53). Citado na p. 20.
- HOGEBOM, Rick J.; KNOOK, Luuk; HOEKSTRA, Arjen Y. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. **Advances in Water Resources**, v. 113, p. 285–294, mar. 2018. ISSN 03091708. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.01.028. Citado na p. 14.
- ILGEN, K. et al. The impact of floating photovoltaic power plants on lake water temperature and stratification. **Nature: Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 7932, 2023. Citado na p. 21.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects**. Abu Dhabi, 2019. Citado na p. 15.

_____. **Renewable Power Generation Costs in 2018**. Abu Dhabi, 2019. Citado na p. 15.

ISHIKAWA, Mayra et al. Effects of dimensionality on the performance of hydrodynamic models for stratified lakes and reservoirs. **Geoscientific Model Development**, v. 15, n. 5, p. 2197–2220, mar. 2022. ISSN 1991-9603. DOI: 10.5194/gmd-15-2197-2022. Citado nas pp. 31, 32, 34, 35.

Jl, Qianfeng et al. Effect of floating photovoltaic system on water temperature of deep reservoir and assessment of its potential benefits, a case on Xiangjiaba Reservoir with hydropower station. **Renewable Energy**, v. 195, p. 946–956, ago. 2022. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2022.06.096. Citado nas pp. 21, 71.

JOSHI, Prateek; ROSENLIEB, Evan; GADZANKU, Sika. **Enabling Floating Solar Photovoltaic (FPV) Deployment: FPV Technical Potential Assessment for Southeast Asia**. [S.l.], mai. 2023. DOI: 10.2172/1974575. Citado na p. 18.

LEE, I. et al. Evaluation of the water quality changes in agricultural reservoir covered with floating photovoltaic solar-tracking systems. **Journal of Korean Society of Environmental Engineers**, v. 39, n. 5, p. 255–264, 2017. Citado na p. 15.

LIAO, Minze et al. The effect of “Fishery-PV Integration” on *Penaeus monodon* culture and research on the micro-ecological environment. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, set. 2022. ISSN 2296-7745. DOI: 10.3389/fmars.2022.963331. Citado na p. 14.

LIMA, Rui L. Pedroso de et al. In-Situ Water Quality Observations under a Large-Scale Floating Solar Farm Using Sensors and Underwater Drones. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6421, jun. 2021. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su13116421. Citado na p. 19.

LIOHM. **Catálogo de produtos: termoresistências RTD PT-100/PT-1000**. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na p. 28.

MARCON, L. . Investigation of the spatial and the temporal dynamics of ebullition from water bodies. [S.l.], 2019. Citado na p. 24.

MATHIJSEN, D. et al. Potential impact of floating solar panels on water quality in reservoirs; pathogens and leaching. **Water Practice and Technology**, v. 15, n. 3, p. 807–811, set. 2020. ISSN 1751-231X. DOI: 10.2166/wpt.2020.062. Citado na p. 18.

MICHELI, Leonardo. The temperature of floating photovoltaics: Case studies, models and recent findings. **Solar Energy**, v. 242, p. 234–245, ago. 2022. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2022.06.039. Citado na p. 16.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Q3/Q4 2018 Solar Industry Update**. Golden, CO, 2019. Citado na p. 15.

NOBRE, Regina et al. A global study of freshwater coverage by floating photovoltaics. **Solar Energy**, v. 267, p. 112244, jan. 2024. ISSN 0038092X. DOI:

10.1016/j.solener.2023.112244. Citado na p. 19.

NOVAK, L. H. et al. **Sistema fotovoltaico flutuante em uma represa de abastecimento de água: do projeto até a operação**. Curitiba-PR, 2021. Citado na p. 25.

PENMAN H. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 193, n. 1032, p. 120–145, abr. 1948. ISSN 0080-4630. DOI:

10.1098/rspa.1948.0037. Citado na p. 20.

POLLI, Bruna Arcie. **Modeling of heat transport in lakes : spatial and temporal characterization**. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Citado na p. 31.

PRINSLOO, F.C.; SCHMITZ, Peter; LOMBARD, Andrea. System dynamics characterisation and synthesis of floating photovoltaics in terms of energy, environmental and economic parameters with WELF nexus sustainability features. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 55, p. 102901, fev. 2023. ISSN 22131388. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102901. Citado na p. 14.

ROSENBERRY, Donald O. et al. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 340, n. 3-4, p. 149–166, jul. 2007. ISSN 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2007.03.018. Citado na p. 20.

SANEPAR. **Projeto da Sanepar em energia renovável conquista prêmio nacional**. [S.l.: s.n.], 2021. Citado nas pp. 15, 24.

SANTOS, Fernando Roberto dos et al. Effects of a Floating Photovoltaic System on the Water Evaporation Rate in the Passaúna Reservoir, Brazil. **Energies**, v. 15, n. 17, p. 6274, ago. 2022. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en15176274. Citado na p. 15.

SCAVO, Fausto Bontempo et al. An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 1, p. 167–188, jan. 2021. ISSN 0363-907X. DOI: 10.1002/er.5170. Citado na p. 20.

_____. Assessment of the evaporation rate in reservoir partially covered by floating photovoltaic plants. In: 2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC). [S.l.]: IEEE, out. 2020. P. 1–6. ISBN 978-1-7281-5572-2. DOI:

10.1109/IREC48820.2020.9310401. Citado na p. 14.

SOULIGNAC, Frédéric et al. Performance Assessment of a 3D Hydrodynamic Model Using High Temporal Resolution Measurements in a Shallow Urban Lake.

Environmental Modeling & Assessment, v. 22, n. 4, p. 309–322, ago. 2017. ISSN 1420-2026. DOI: 10.1007/s10666-017-9548-4. Citado na p. 31.

TABOADA, M. E. et al. Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. **Renewable Energy**, Pergamon, v. 105, p. 601–615, mai. 2017. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/J.RENENE.2016.12.094. Citado na p. 14.

VALIANTZAS, John D. Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. **Journal of Hydrology**, v. 331, n. 3-4, p. 690–702, dez. 2006. ISSN 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2006.06.012. Citado na p. 20.

WAHL, Bernd; PEETERS, Frank. Effect of climatic changes on stratification and deep-water renewal in Lake Constance assessed by sensitivity studies with a 3D hydrodynamic model. **Limnology and Oceanography**, v. 59, n. 3, p. 1035–1052, mai. 2014. ISSN 00243590. DOI: 10.4319/lo.2014.59.3.1035. Citado na p. 31.

WANG, Xingming et al. Influence of Solar Photovoltaic System on the Concentration and Environmental Risks of Heavy Metals in Subsidence Pond Water from Coal Mining Area: A Case Study from Huainan Subsidence Pond. **Water**, v. 14, n. 14, p. 2257, jul. 2022. ISSN 2073-4441. DOI: 10.3390/w14142257. Citado nas pp. 16, 19.

WORLD BANK GROUP, ESMAP; SERIS. **Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report**. Washington, DC, 2019. Citado nas pp. 14, 15.

YANG, Peipei et al. Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir. **Limnology**, v. 23, n. 3, p. 441–454, ago. 2022. ISSN 1439-8621. DOI: 10.1007/s10201-022-00698-y. Citado nas pp. 16, 20, 71.