

## XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### INFLUÊNCIA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA DINÂMICA DE ONDAS INTERNAS EM LAGOS E RESERVATÓRIOS

*Karollyn Larissa de Quadros<sup>1</sup>; Erika Mariellen Ferreira<sup>2</sup>; Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes<sup>3</sup>; Tobias Bleninger<sup>4</sup> & Rafael de Carvalho Bueno<sup>5</sup>*

**Resumo:** Usinas fotovoltaicas flutuantes estão sendo implementadas em lagos e reservatórios visando a redução da evaporação e geração de energia elétrica. Contudo, pouco se sabe sobre seus impactos na hidrodinâmica dos corpos d'água, principalmente relacionados a ondas internas, um fenômeno físico importante para a gestão adequada dos recursos hídricos, sendo capazes de influenciar a qualidade da água e a conservação da biodiversidade aquática. Este estudo apresenta uma análise, realizada através de um modelo hidrodinâmico tridimensional, dos efeitos de painéis fotovoltaicos flutuantes na geração de ondas internas em um reservatório simplificado com diferentes porções cobertas por painéis (20%, 38% e 56%). O reservatório foi modelado com geometria prismática e retangular com estratificação em duas camadas, perfil térmico semelhante a muitos reservatórios e lagos. Os resultados mostraram que a presença dos painéis reduz a amplitude das ondas internas, diminuindo a mistura no metalímnio. Com 56% de área coberta, a energia do vento transferida para as ondas foi reduzida em 33%. Embora ondas de maior amplitude apresentaram decaimento mais acentuado, corroborando com estudos anteriores, para o primeiro ciclo de onda os cenários com maior painel apresentaram decaimento mais elevado. A análise demonstra que a presença de painéis induz uma descontinuidade do vento, gerando, não apenas ondas estacionárias, mas também ondas propagantes, o que acarreta em um aumento da dissipação da energia das seichas internas.

**Palavras-Chave** – Seichas internas, hidrodinâmica de reservatórios, usinas fotovoltaicas flutuantes

#### INTRODUÇÃO

Lagos e reservatórios desempenham um papel fundamental no equilíbrio dos ecossistemas e no ciclo hidrológico, fornecendo água doce para uma gama de usos, incluindo o abastecimento público, produção agrícola, geração de energia elétrica, atividades recreativas (e.g. natação e pesca) e produção industrial. Por este motivo, a conservação da qualidade da água destes ambientes é vital para os seres humanos garantirem o fornecimento de água de qualidade para múltiplos usos e, assim, preservar os recursos hídricos e a biodiversidade aquática destes ecossistemas. Além do uso da água, lagos e reservatórios vem sendo amplamente utilizados para implementação de usinas fotovoltaica flutuantes (Figura 1), principalmente devido aos seus benefícios, como, por exemplo, geração de energia (Abdelal, 2021; Hassan *et al*, 2017) e redução da evaporação (Assouline *et al.*, 2011; Assouline *et al*, 2010). Estudos recentes também apontam que usinas fotovoltaicas proporcionam uma redução do crescimento de algas (Dobre, 2021), reduzindo problemas envolvendo a eutrofização destes ambientes.

Compreender a hidrodinâmica de lagos e reservatórios é fundamental para a avaliação da qualidade da água destes ambientes e uma eficaz gestão dos recursos hídricos, visto que a dinâmica

1) Estudante de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [karollynq.ambiental@gmail.com](mailto:karollynq.ambiental@gmail.com)

2) Estudante de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [erikamariellen2011@gmail.com](mailto:erikamariellen2011@gmail.com)

3) Professor, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [cris.dhs@ufpr.br](mailto:cris.dhs@ufpr.br)

4) Professor, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [bleninger@ufpr.br](mailto:bleninger@ufpr.br)

5) Estudante de doutorado, Universidade Federal do Paraná e University of Kaiserslautern-Landau, Germany, e-mail: [rafael.bueno@ufpr.br](mailto:rafael.bueno@ufpr.br)

destes sistemas influenciam a dispersão de poluentes, sedimentação, eutrofização e a proliferação de algas (Cuypers *et al.*, 2011; Pannard *et al.*, 2011; Boegman e Stastna, 2019). Assim, entender a influência dos painéis na hidrodinâmica de lagos e reservatórios pode ser fundamental na gestão de recursos hídricos permitindo que decisões que abrangem o gerenciamento da qualidade da água, a conservação da biodiversidade aquática e o impacto na sociedade envolvida, sejam tomadas de forma apropriada a fim de criar uma legislação adequada para a instalação de painéis fotovoltaicos em lagos e reservatórios.

**Figura 1.** Usina fotovoltaica flutuante no reservatório de abastecimento de água, Passaúna (PR).



Os lagos e reservatórios são muitas vezes considerados ambientes lênticos, ou seja, calmos e sem agitação. A hidrodinâmica destes ambientes é controlada majoritariamente por forças baroclínicas, oriundas das perturbações geradas nas camadas termicamente estratificadas. Nesse processo, uma parte significativa da energia do vento é dissipada ainda na camada limite atmosférica. Uma pequena fração (aproximadamente 1%) que adentra a superfície e atravessa as camadas superficiais são fontes de energia para o sistema, controlando, logo, a hidrodinâmica destes ambientes. Embora a estratificação térmica contribua para a supressão dos níveis de mistura e turbulência, uma parte significativa dessa energia disponível no interior do sistema é utilizada para a formação de ondas internas, ondas que ocorrem devido as perturbações em meios estratificados e são capazes de se estenderem por muitos dias em reservatórios e lagos, mesmo sem a ação dos ventos. Ondas internas são responsáveis pelo aumento das trocas hipolimnéticas mesmo em períodos de forte estratificação térmica (Bocaniova *et al.*, 2014). A dinâmica e evolução de seichas internas podem interferir na qualidade da água, causando alteração na distribuição de cianobactérias que se proliferam no metalimínio (Cuypers *et al.*, 2011) e nas comunidades de fitoplânctons devido as variações de temperatura nestas regiões (Pannard *et al.*, 2011; Hingsamer & Hofmann, 2014). Além disso, ondas internas são muitas vezes responsáveis pela ressuspensão e transporte de sedimentos (Boegman e Stastna, 2019).

Embora ondas internas (Anohin *et al.*, 2004; Stevens, 1999) e alguns aspectos físicos (e.g. transporte de calor e evaporação) de painéis fotovoltaicos flutuantes (Assouline *et al.*, 2011; Assouline *et al.*, 2010) já tenham sido amplamente estudados, ainda não se tem relatos de suas interações. O crescente aumento da implantação de usinas fotovoltaicas flutuantes em reservatórios tem demandado estudos mais aprofundados envolvendo os efeitos destas placas na hidrodinâmica destes ambientes, não apenas para compreender a hidrodinâmica, como também para avaliar os efeitos na qualidade da água e no ciclo biogeoquímico de lagos e reservatórios afim de desenvolver políticas públicas e uma legislação adequada para nortear a implementação deste tipo de empreendimento. Por tanto, o objetivo deste estudo é, através de um modelo hidrodinâmico tridimensional com cenários hipotéticos, compreender as influências de painéis fotovoltaicos na

hidrodinâmica de um reservatório prismático, avaliando a influência dos painéis na geração de seichas internas.

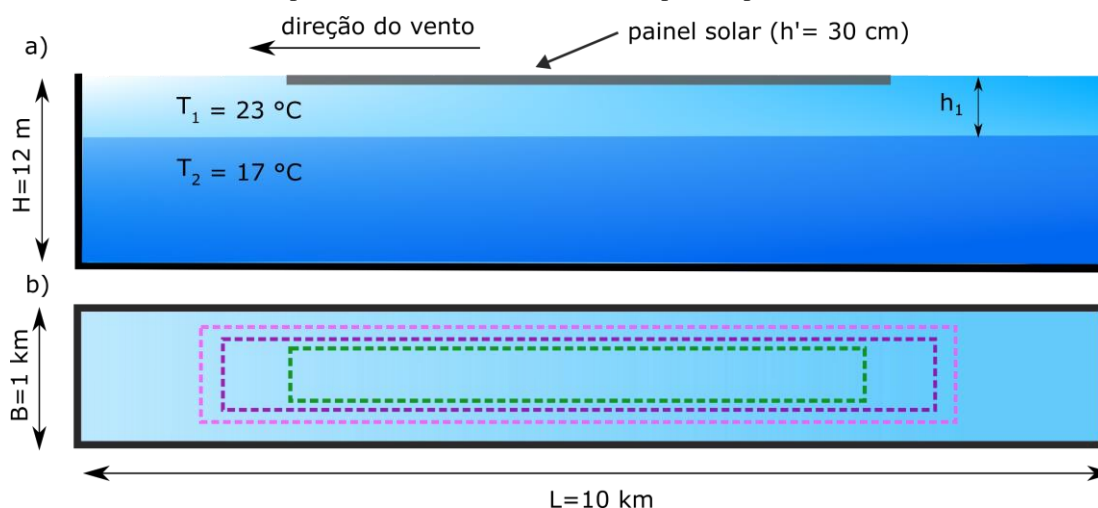
## MÉTODOS

### Modelo Numérico e caracterização do reservatório

No presente estudo, a simulação hidrodinâmica foi realizada utilizando o modelo hidrodinâmico tridimensional Delft3D com a aproximação hidrostática (Deltares, 2023), modelo já utilizado em muitos estudos para simulação da ocorrência de seichas internas e distribuição térmica, apresentando resultados satisfatórios para lagos e reservatórios (Dissanayake *et al.*, 2019; De Carvalho Bueno *et al.*, 2023; Ishikawa *et al.*, 2023).

Optou-se por simplificar as características hidrodinâmicas, excluindo elementos como rios, estruturas de controle de fluxo, sinuosidades e variações de profundidade, dessa forma foi construído um reservatório prismático de dimensão de 1 km de largura, 10 km de comprimento e 12 m de profundidade. Uma grade composta por 4000 células de 50 x 50 m foi criada, sendo 20 células ao longo do eixo principal e 200 células ao longo do eixo transversal. A profundidade foi dividida em 10 camadas de 1,2 m cada. Assim foram simuladas quatro cenários contendo usinas flutuantes de diferentes tamanhos, representando 20%, 38% e 56% da área total do reservatório (Figura 2b), além de um cenário base sem a presença das placas. A espessura escolhida para os painéis flutuantes foi de 30 cm (Figura 2a), baseado na espessura de módulos reais que suportam estes painéis. Essas proporções de cobertura foram selecionadas para permitir a comparação de diferentes coberturas no reservatório. A fim de simular a ocorrência de ondas internas, o reservatório foi estratificado em duas camadas, onde o epilímnio foi definido com espessura de 5 metros e temperatura de 23 °C, enquanto o hipolímnio foi definido com espessura de 7 metros e temperatura de 17 °C (Figura 2a).

**Figura 2.** Reservatório prismático. a) Dimensão do reservatório, através da vista lateral.  $h_1 = 5$  m indica a espessura do epilímnio e as cores em azul mostram o sistema termicamente estratificado em duas camadas. b) Reservatório prismático visto cima. Representação dos tamanhos dos painéis para os diferentes cenários. As linhas pontilhadas Verde, roxo e rosa, mostram, respectivamente, o limite da área dos painéis para as coberturas 20%, 38% e 56%.



A presença dos painéis na simulação altera as condições de contorno do modelo, pois estes atuam de modo a desconsiderar a tensão de cisalhamento do vento gerada na superfície do lago nas regiões ocupadas pelos painéis. A condição do vento nas quatro simulações foi mantida constante, com velocidade de 6 m/s ao longo do eixo principal durante as primeiras 5 h de simulação (Figura 2a). O tempo total de simulação foi de 8 dias, onde a resolução numérica foi definida em passos de 10 minutos para garantir a estabilidade numérica através do valor mínimo de Courant ( $C < 10$ ).

## Ondas internas

A periodicidade das seichas internas ( $T$ ) detectadas pelo modelo tridimensional foram comparadas à periodicidade teórica, dada pela equação de Merian (Watson, 1904):

$$T = \sqrt{\frac{4 L_s^2 H}{g' h_1 h_2}}, \quad (1)$$

onde  $H$  é a profundidade total do reservatório,  $h_1$  é a espessura do epilímnio,  $h_2$  é a espessura do hipolímnio,  $g'$  é a aceleração da gravidade reduzida ( $= g\Delta\rho/\rho$ ) e  $L_s$  é que o comprimento do reservatório.

Para a análise da estabilidade da estratificação e para a comparação com a amplitude das ondas internas geradas em reservatórios sem painéis fotovoltaicos (De Carvalho Bueno *et al.*, 2021; Shintani *et al.*, 2010) o número de Wedderburn ( $W$ ) foi calculado para todos os cenários. O número de Wedderburn representa razão da força de pressão baroclínica no ponto de *upwelling* e a força superficial imposta pela tensão de cisalhamento do vento (Imberger & Patterson, 1989):

$$W = \frac{g' h_1}{2u_*^2} \sqrt{\frac{\pi}{A}}, \quad (2)$$

onde  $u_* = (C_D \rho_{ar} U_{10}^2 / \rho_2)^{-1/2}$  é a velocidade de cisalhamento do vento a 10 m, em que  $C_D = 1,5 \cdot 10^{-3}$  é o coeficiente de arrasto para superfície da água,  $U_{10} = 6$  m/s é a velocidade do vento a 10 m da superfície do lago utilizada na simulação e  $\rho$  a massa específica da água. Observe que o comprimento do reservatório exposto à direção média do vento foi definido de forma distinta em relação à equação definida comumente na literatura (Imberger & Patterson, 1989). Como o *fetch* do vento apresenta variabilidade não apenas no eixo principal do reservatório para os cenários com os painéis (Figura 2b), o comprimento do vento foi aproximado através de uma normalização da área superficial do reservatório ( $A$ ), como definido em outros estudos para caracterização da estabilidade de lagos e reservatórios (Read *et al.*, 2011).

## Energia da onda interna

A energia da onda por unidade de largura ( $E$ ) para cada instante de tempo foi calculada através da energia cinética integrada ao longo das dimensões do reservatório para uma única seção longitudinal alinhada ao eixo principal (J/m) e para cada instante de tempo:

$$E(t) = \int_0^H \int_0^{L_s} \rho(x, z, t) u(x, z, t)^2 dx dz, \quad (3)$$

onde  $u$  é a velocidade horizontal e  $\rho$  é a massa específica da água, calculada através da equação de estado para água doce (Chen & Millero, 1986).

A fim de avaliar a proporção da energia do vento que é transferida para as ondas internas, a energia da onda interna (Equação 3) foi normalizada pela energia do vento na atmosfera (Woolway & Simpson, 2017):

$$E_{\text{norm}} = \frac{E(t)}{C_D U_{10}^3 \rho_{ar} T L_s}. \quad (4)$$

## Análise espectral

Para entender como as condições do reservatório influenciam na caracterização das ondas internas, os dados de velocidade e temperatura, estimados pelo modelo, foram avaliados através da análise espectral. Para isso, foi calculada a densidade espectral de potência através do método de

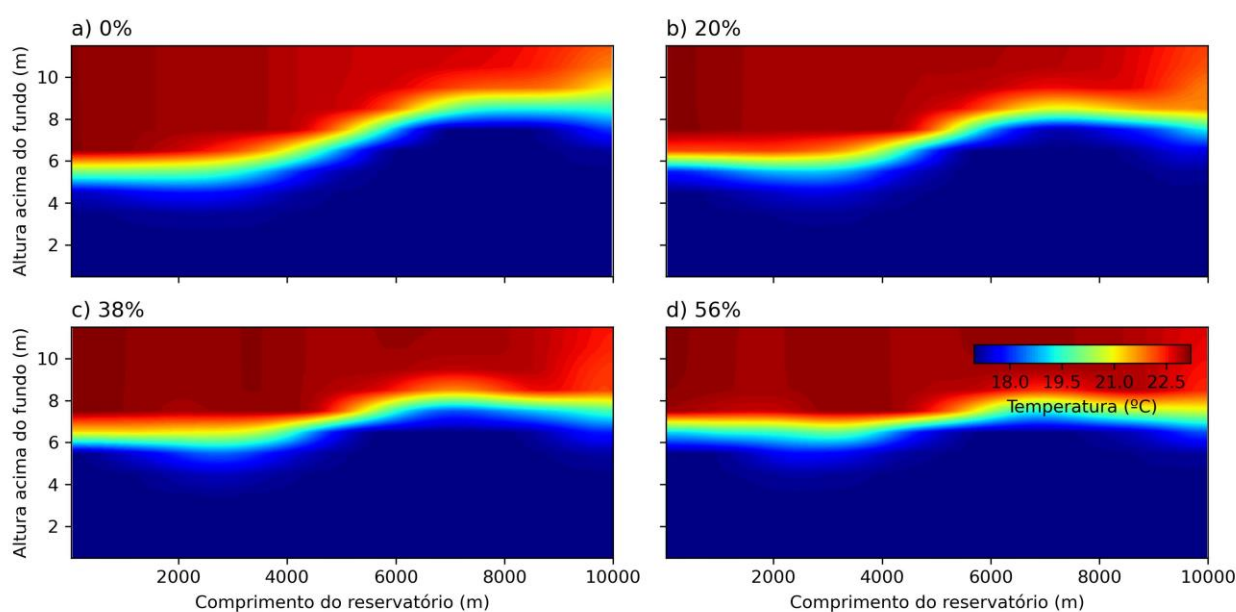


Welch (Welch, 1967) em que a transformada de Fourier da função de autocovariância do sinal é aplicada em segmentos de dados, usando uma função janela de Hamming (Heizel *et al.*, 2002). Para avaliar a não-estacionariedade dos sinais de temperatura, a análise espectral de ondaleta também foi utilizado para a análise. Essa técnica oferece informações da distribuição temporal da frequência, o que permite que sejam identificadas variações em diferentes escalas temporais (Torrence & Compo, 1998)

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O vento que age nas primeiras 5 horas de simulação gera um empilhamento da água no sotavento do reservatório (margem esquerda da Figura 2). Esse empilhamento é caracterizado pela formação de uma seicha superficial de baixa amplitude, geralmente na ordem de centímetros. Parte da energia remanescente, que não é dissipada nas primeiras camadas do epilimnio é responsável pelo aumento da energia potencial, fazendo com que ocorra uma variação vertical da termoclina no sentido oposto ao observado na superfície (Figura 3), dando origem ao início do movimento oscilatório característico das onda internas (formação do *upwelling/downwelling*).

**Figura 3.** Comparação entre as maiores amplitudes da onda para cada simulação. A maior amplitude da onda é 5h após o vento cessar e pode ser percebida pelo movimento oscilatório da camada de mistura entre as porções de água de diferentes densidades.

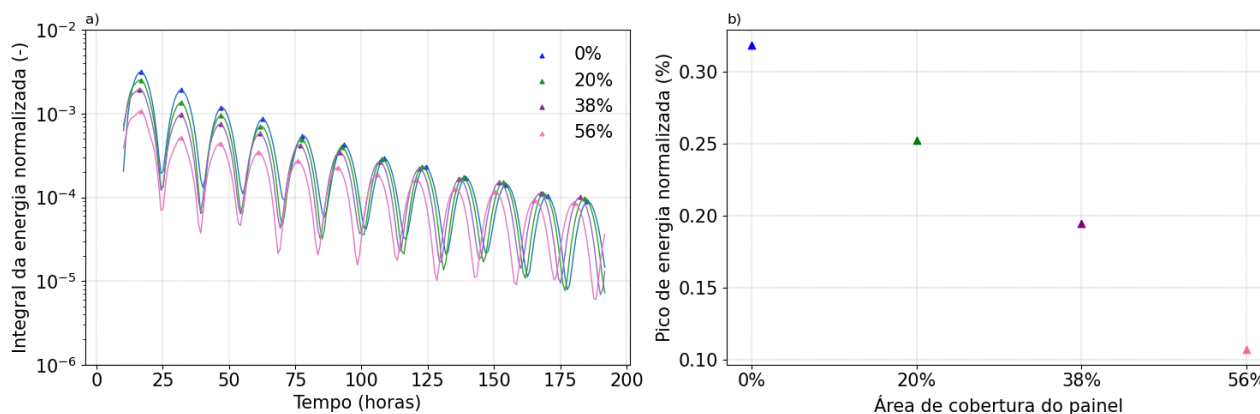


O número de Wedderburn ( $W$ ) (Equação 2), é normalmente utilizado para caracterizar a ocorrência de ondas internas em lagos e reservatórios (Shintani *et al.*, 2010), é inversamente proporcional a amplitude da onda, conforme observado em outros estudos (De Carvalho Bueno *et al.*, 2021; Spiegel & Imberger, 1980). Este indicador aumenta levemente com o aumento da área ocupada pelos painéis devido a maior área exposta ao vento (aumento de  $A$ ; Equação (2)). Para os cenários com cobertura de 0%, 20%, 38% e 56%, os valores de  $W$  são, respectivamente, de 1,28, 1,44, 1,63 e 1,94. Nesta aplicação, para todas as simulações os valores de  $W$  apresentam baixa variabilidade em relação aos valores que caracterizam o regime de dominância das seichas internas, no qual, para os cenários criados, deve ocorrer entre 0,7 e 850,0 (Spiegel & Imberger, 1980).

Analizando a variabilidade da energia cinética da onda normalizada (Figura 4a), obtida através da equação (4), é possível estimar, através dos picos de energia cinética, o período da onda para cada cenário simulado. De acordo com os resultados (Figura 4a), os painéis não demonstram gerar influencias significativa no período da onda. Para a simulação sem painel, o período de 30 h se

mantve praticamente constante e próximo ao valor teórico de 29 h 30 min (Equação (1), com erro médio de 4%). Para as demais simulações, a média do período das ondas foi de 30 h  $\pm$  24 min, valor próximo ao observado sem a presença dos painéis fotovoltaicos.

**Figura 4.** Energia cinética da onda a) Série temporal da energia cinética da onda para cada simulação. b) Valores de energia cinética máxima (inicial) para cada simulação.



Embora uma pequena diferença entre os picos de energia cinética de cada simulação seja observada ao fim da simulação (Figura 4a), a defasagem é resultante de uma variação esporádica, que ocorre em apenas alguns ciclos da onda e não se mantendo para todo o período simulado. Além disso, a simulação de maior cobertura apresenta uma leve redução do período (1h e 40 min). Essa observação só seria fisicamente viável se houvesse um aumento da estratificação durante a simulação. Como a propagação das ondas internas aumenta a mistura entre camadas, a redução do período da onda é fisicamente impossível nas simulações testadas.

Apesar do sistema inicialmente ser dividido em duas camadas, a ação contínua do vento e a propagação das ondas internas, favorecem as intabilidades e a dissipação da energia cinética turbulenta na região da termoclina, aumentando a espessura do metalímnio e proporcionando uma mistura entre camadas.

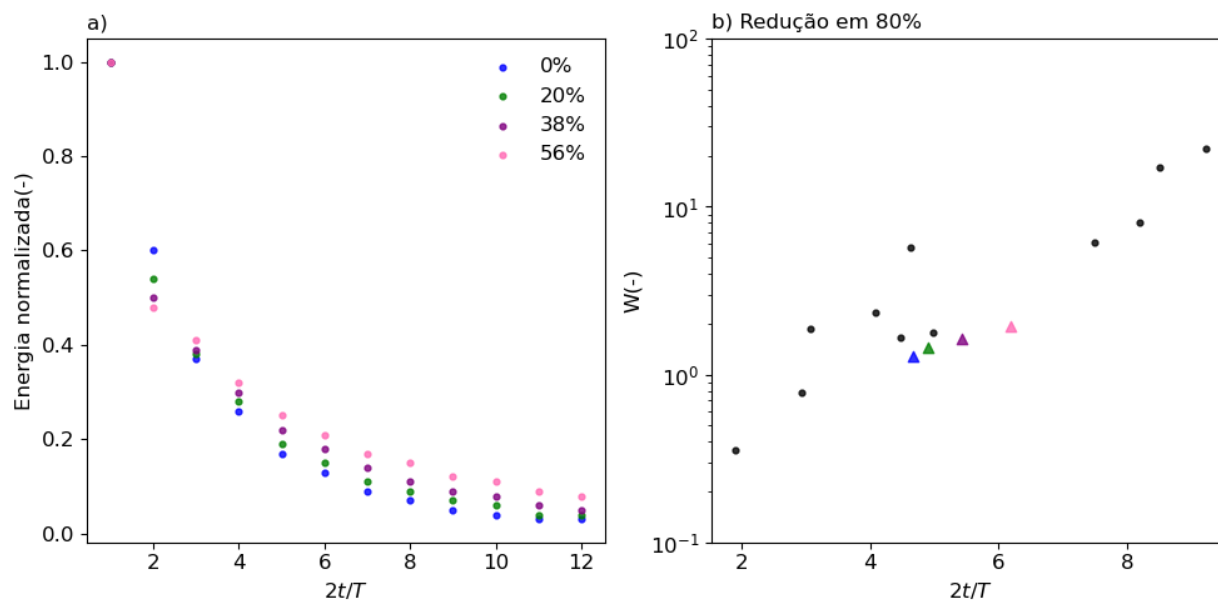
Devido à redução da amplitude da onda, a espessura da camada de mistura diminuiu, após o fim da simulação, em 11%, 21% e 29%, respectivamente, para os cenários de cobertura de 20%, 38% e 56% comparado a simulação sem painel. Ainda no início da simulação, no fim da ação do vento, o cenário com a maior área coberta (56%) apresentou uma camada de mistura 10% menor em relação aos demais cenários. Isso não apenas demonstra uma redução significativa da mistura por conta dos painéis, como explicita que as seichas internas atuaram na simulação realizada como agentes propulsores da mistura do sistema. A redução da mistura nos cenários com maiores painéis ocorre principalmente devido à redução da amplitude das ondas internas (Figura 3).

Observando a energia cinética inicial (Figura 4), também é possível perceber que o aumento da área de cobertura do reservatório, pelos painéis, gera uma redução visível da amplitude inicial das ondas internas. A energia cinética da onda interna, mostrou redução proporcional ao aumento da área de cobertura superficial (Figura 4b). Os cenários com painel de 20%, 38% e 56% da área de cobertura apresentaram, respectivamente, redução de 21%, 39% e 66,4% em relação a energia do cenário sem a presença do painel.

O decaimento dos picos de energia cinética ao longo do tempo (Figura 4a) representa o amortecimento da energia da onda, apresentando um decaimento exponencial (De Carvalho Bueno *et al.*, 2021), que ocorre por processos dissipativos e/ou não lineares (Horn *et al.*, 2001). Os valores de amplitude são proporcionais ao decaimento da onda, diminuindo para as curvas com maior área de cobertura do painel. Assim, ondas de maior amplitude apresentam decaimentos mais acentuados (Figura 5a), o que corrobora com resultados observados em outros estudos (De Carvalho Bueno *et*

*al.*, 2021). Conforme observado anteriormente, este efeito está atrelado a um aumento das instabilidades das ondas de maiores amplitudes, que conseqüentemente, favorecem o aumento da dissipação de energia cinética turbulenta (De Carvalho Bueno *et al.*, 2021).

**Figura 5.** Decaimento da seichas internas a) Decaimento dos picos de energia total de cada ciclo ( $2t/T$ ) ao longo do tempo para cada uma das simulações. b) Relação entre o número de Wedderburn e o número de ciclos de onda até que 80% da energia da onda interna inicial seja dissipada. Pontos pretos indicam experimentos realizado por de Carvalho Bueno *et al.* (2021).



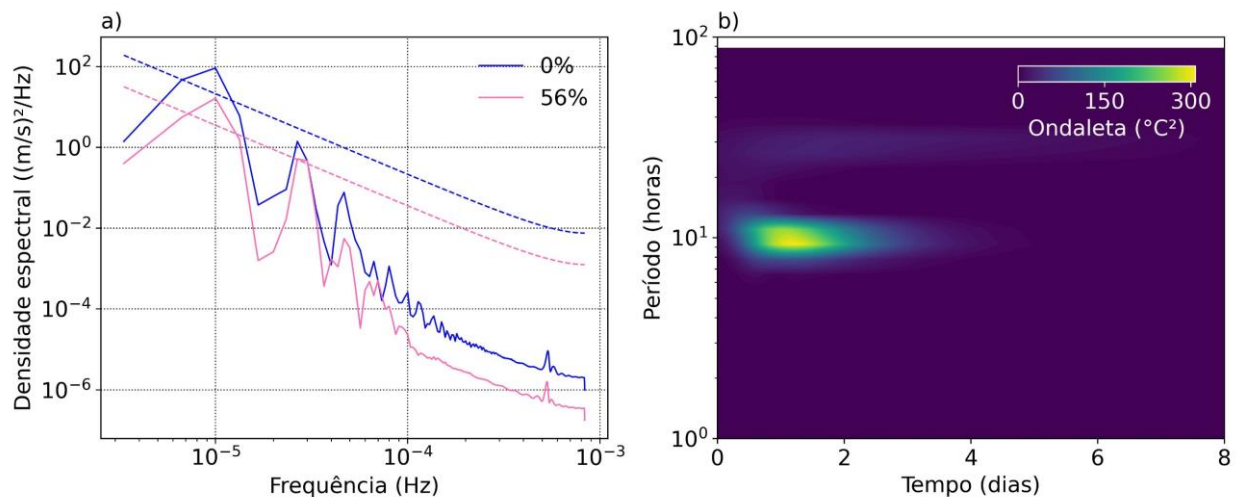
Apesar do decaimento seguir o que já foi observado em estudos anteriores, o comportamento inicial do decaimento dos picos de energia apresentou uma inversão em relação ao decaimento esperado, onde o cenário de maior cobertura, responsável por gerar as menores seichas internas, apresentou decaimento 25% maior do que o caso sem painel (Figura 5a). O padrão inverso se manteve consistente para todos os cenários durante o primeiro ciclo da onda, indicando uma possível influência causada pela presença dos painéis. Para avaliar melhor estes efeitos, foi realizado uma análise espectral nos dados modelados.

A análise espectral da velocidade horizontal no centro do reservatório (Figura 6a) mostra a existência da seicha interna de 27,7 horas, discutida acima, através do pico espectral de maior amplitude (acima do nível de significância), localizado com frequência de  $10^{-5}$  Hz (equivalente a 27,7 horas). No entanto, um segundo pico espectral de maior frequência ( $2,5 \cdot 10^{-5}$  Hz), indica a existência de uma segunda onda interna de menor periodicidade na simulação do cenário de maior cobertura (56%). Ondas de alta frequências são muitas vezes observadas decorrentes da degeneração das seichas internas (Lorke, 2001). Geralmente, ondas internas propagantes são observadas apenas depois de alguns ciclos de onda (Horn *et al.*, 2001), decorrentes de interações não lineares nas ondas longas. No entanto, através da análise espectral por ondaleta da série de temperatura (Figura 6b), a onda interna de maior frequência é gerada ainda nos primeiros ciclos de onda, e dissipada rapidamente, ainda no segundo dia.

A análise do perfil de temperatura durante essa simulação demonstrou que antes de ser formada a onda principal ( $T=27,7$  h), a descontinuidade do vento, devido a presença dos painéis, gera duas ondas propagantes, uma em cada extremidade do reservatório, nas porções expostas ao vento. Enquanto a onda da direita se propaga em direção ao centro do reservatório, a onda que foi formada no lado esquerdo rebate na borda do reservatório e volta em fase oposta. O encontro dessas duas ondas internas propagantes, que ocorre antes do fim do primeiro ciclo de onda, gera uma interferência parcialmente destrutiva, causando dissipação da energia interna do sistema. Esse efeito pode explicar

o aumento da dissipação da energia da onda interna verificada durante o primeiro ciclo de onda para os casos de ondas de menor amplitude (Figura 5a).

**Figura 6.** Análise espectral da simulação sem painel e com 56% de área coberta. a) Densidade espectral das ondas e a curva de significância da densidade. Ambas as curvas apresentam uma densidade significativa de 27,7 horas, relacionada a onda longa. A simulação de 56% de cobertura de painéis também apresenta uma onda de frequência significativa de 11,1h b) Ondaleta da flutuação de temperatura da termoclina com filtro passa-faixa com frequência de corte entre 1/9h a 1/11h.



Portanto, a utilização de painéis fotovoltaicos na superfície do reservatório implica na diminuição das trocas hipolimnéticas, desfavorecendo a mistura entre a camada superficial e o fundo. Isso ocorre pois menos energia do vento é absorvida pelo reservatório, reduzindo as amplitudes das ondas internas. No entanto, a descontinuidade do vento, esperado apenas em sistemas fotovoltaicos que ocupe áreas muito grandes, contribui para a formação de ondas propagantes. Embora estas ondas reduzam a amplitude da onda interna principal, em lagos reais a propagação destas ondas pode acarretar aumento da mistura próximo as regiões de margem, onde a termoclina interage com batimetria do reservatório, devido à maior probabilidade de arrebentação.

## CONCLUSÃO

Através de resultados de velocidade e temperatura oriundos de simulações realizadas com um modelo tridimensional hidrodinâmico para águas rasas aplicado a um reservatório prismático para diferentes cenários de cobertura (0%, 20%, 38% e 56%) foi possível analisar as principais influências dos painéis fotovoltaico na formação e dissipação das ondas internas em reservatórios e lagos termicamente estratificados.

Embora a energia inicial da onda tenha diminuído em até 66% com o aumento da área de cobertura (56%), apresentando redução da mistura em até 29%, a dissipação da onda interna foi 25% maior durante o primeiro ciclo de onda para o cenário de maior área coberta, contrariando o esperado, em que ondas de maiores amplitudes possuem maior decaimento devido as maiores instabilidades. Esse valor de maior decaimento foi atribuído ao encontro destrutivo de duas ondas propagantes formadas nas extremidades do painel decorrente da descontinuidade da ação do vento ao longo do comprimento do reservatório. Isso indica que painéis fotovoltaicos podem reduzir a formação de ondas internas longas (seichas internas), mas podem contribuir para a formação de ondas propagantes com comprimento de ondas menores. Assim, é esperado uma menor mistura e transporte das massas de água ao longo do reservatório, mas um aumento de efeitos de mistura em regiões próximo à margem, onde ondas não lineares estão susceptíveis a quebrarem.



## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Karollyn e Erika Mariellen agradecem a bolsa de iniciação científica do CNPq. Tobias Bleninger agradece a bolsa de produtividade do CNPq, processo número 312211/2020-1, chamada número 09/2020. Rafael de Carvalho Bueno agradece a CAPES pela bolsa de doutorado – código de financiamento 001. Os autores agradecem o financiamento da Fundação Araucária e da SANEPAR (Chamada Pública 17/2021, PROGRAMA PARANAENSE DE PESQUISAS EM SANEAMENTO AMBIENTAL (PPPSA)).

## REFERÊNCIAS

- ANOHN, V.V. et al. (2004). “*Effect of Long Internal Waves on the Quality of Water Withdrawn from a Stratified Reservoir*”. Water Resources Research, New York, v. 40, n. 3, p. W03502.
- ASSOULINE, S. et al. (2011) “*Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers*”. Water Resources Research, 47(7).
- ASSOULINE, S. et al. (2010). “*Evaporation from partially covered water surfaces*”. Water resources research, 46(10).
- BOCANIOVA, S, et al. (2014) “*Internal waves and mixing in a stratified reservoir: Insights from three-dimensional modeling*”. Water Resources Research, 50(9), 7160-7176.
- BOEGMAN, L.; STASTNA, M. (2019). “*Sediment resuspension and transport by internal solitary waves*”. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 51, p. 129-154.
- CHEN, Chen-Tung A; MILLERO, Frank J. (1986). “*Thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range I*”. Limnology and Oceanography, v. 31, n. 3, p. 657-662.
- CUYPERS, YANNIS et al. (2011). “*Impact of internal waves on the spatial distribution of Planktothrix rubescens (cyanobacteria) in an alpine lake*”. The ISME Journal, v. 5, p. 580-589.
- DE CARVALHO BUENO, R. et al. (2021). “*An empirical parametrization of internal seiche amplitude including secondary effects.*” Environmental Fluid Mechanics, v. 21, p. 209-237.
- DE CARVALHO BUENO, R. et al. (2023). “*Physical mechanisms of internal seiche attenuation for non-ideal stratification and basin topography*”. Environ Fluid Mech 23, 689–710. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09928-y>
- DELTARES. (2023). “*Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*”. Delft, Netherlands: Deltares.
- DISSANAYAKE, P. et al. (2019). “*Comparison of results from two 3D hydrodynamic models with field data: internal seiches and horizontal currents*”. Inland waters, 9(2), 239-260.
- DOBRE, L.C., et al. (2021). “*Floating Photovoltaic Power Plants*”, 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, pp. 1-4.
- HASSAN, A. et al. (2017). “*Investigation on floating solar panels as a solution for reducing evaporation from open water surfaces*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 1578-1589.

- HINGSAMER, et al. (2014). “*The consequences of internal waves for phytoplankton focusing on the distribution and production of Planktothrix rubescens*”. PloS one, 9(8), e104359.
- HORN, D., IMBERGER, J., & IVEY, G. (2001). “*The degeneration of large-scale interfacial gravity waves in lakes*”. Journal of Fluid Mechanics, 434, 181-207.
- IMBERGER, J., & PATTERSON, J. C. (1989). “*Physical limnology. Advances in applied mechanics*”. 27, 303-475.
- ISHIKAWA, M. et al. (2022). “*Effects of dimensionality on the performance of hydrodynamic models for stratified lakes and reservoirs*”. Geoscientific Model Development, 15(5), 2197-2220.
- LORKE, A. (2007). “*Boundary mixing in the thermocline of a large lake*”. Journal of Geophysical Research: Oceans, 112(C9).
- QASEM ABDELAL. (2021). “*Floating PV; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions*”. International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 16, Pages 732–739.
- READ, Jordan S. et al. (2011) “*Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data.*” Environmental Modelling & Software 26, no. 11: 1325-1336c.
- SHINTANI, T. et al. (2010). “*Generalizations of the Wedderburn number: Parameterizing upwelling in stratified lakes*”. Limnology and Oceanography, 55(3), 1377-1390.
- SPIGEL, R.H.; IMBERGER, Jörg. (1980). “*The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size*”. Journal of Physical Oceanography, v. 10, n. 7, p. 1104-1121.
- STEVENS, C.L. (1999). “*Internal waves in a small reservoir*”. Journal of Geophysical Research, v. 104, n. C7, p. 15,777-15,788.
- TORRENCE, C.; COMPO, G.P.. (1998) “*A practical guide to wavelet analysis Bulletin of the American Meteorological Society*”. v.79, p61-78.
- WATSON E.R. (1904). “*Movements of the waters of Loch Ness as indicated by temperature observations*”. Journal of Geographical Systems, v24, n4, p430-437.
- WELCH, Peter D.(1967) “*The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short Modified Periodograms*”. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, v.AU-15, n2, p70.
- WOOLWAY,R.I.; SIMPSON,J.H. (2017) “*Energy input and dissipation in a temperate lake during the spring transition*”. Ocean Dynamics, v67, p. 959-971.
- HASSAN, A. et al. (2017). “*Investigation on floating solar panels as a solution for reducing evaporation from open water surfaces*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80,1578-1589.