



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KAROLLYN LARISSA DE QUADROS

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

CURITIBA

2023

KAROLLYN LARISSA DE QUADROS

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

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia da
Universidade Federal do Paraná, como requisito
à obtenção do título de bacharel em Engenharia
Ambiental.

Orientador: Dr. Tobias Bleninger

Coorientador: Dr. Rafael de Carvalho Bueno

CURITIBA

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

KAROLLYN LARISSA DE QUADROS

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

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 10, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):

Tobias Bleninger
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 1:

Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2:

Mauricio Felga Gobbi
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Curitiba, 07 de mês de 2023

Agradecimentos

Aos auxílios financeiros que recebi da PROBEM, desde o início do curso, à Fundação Araucária pelo auxílio financeiro á pesquisa relacionada ao tema desta monografia.

Ao meus orientadores Tobias Bleninger, por me aconselhar e sempre estar disponível, e Rafael de Carvalho Bueno, por acompanhar meu projeto todas as semanas com muita paciência.

Aos meus pais e irmãos, que me deram muito apoio e carinho e sempre acreditaram em mim.

Á família que fiz na UFPR durante o período de graduação, em especial aos amigos de estágio do Lactec, Grenda, Alexandre e Lucas, aos amigos que fiz no projeto de pesquisa, Betina, Erika e Luiz, que sempre me apoiaram e aconselharam, e aos meus amigos próximos, Ariane, Hian, Rafaela e Karla, pelos grupos de estudos e parceria.

Aos meus chefes nos estágios Dr. Maíra Moura da RHA, Me. Marianne Schaefer do Lactec e Dr. Alvim Leite, diretor do Simepar.

Aos professores e professoras do departamento, em especial á coordenadora do curso, a Profa. Dra. Cynara de L. da N. Cunha, que inspira a mim e às outras meninas do curso que desejam seguir na área da hidrodinâmica e hidrologia. Também um agradecimento especial aos professores Dra Alice Grimm, Dr. Ricardo Almeida, Dr. Michael Mannich, Dr. Nelson Dias e Dr. Eduardo Felga Gobbi, que fizeram, de alguma forma, parte da minha história dentro do curso e que me recordarei com muito carinho.

Resumo

Sistemas fotovoltaicos 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 seichas internas. Visto que essas ondas desempenham influências na qualidade da água e nas características da biodiversidade aquática, o objetivo desse estudo é identificar como painéis fotovoltaicos flutuantes podem modificar a ocorrência de seichas internas em lagos e reservatórios. A análise dos efeitos dos painéis flutuantes na geração e dissipação de seichas internas foi feita por meio de um modelo hidrodinâmico tridimensional, que simulou a ocorrência de seichas internas geradas a partir de um pulso de vento de 6 ms^{-1} com duração de 5 h em um reservatório com forma geométrica prismática, com estratificação em duas camadas. Seis cenários foram simulados variando a proporção do painel em relação à área superficial do lago, sendo um cenário sem a presença dos painéis e os demais cobrindo 20%, 38%, 56%, 67% e 80% da área superficial do lago. A amplitude da onda foi determinada através da distribuição temporal e espacial de temperatura e os resultados mostram que a presença dos painéis reduz a amplitude das seichas internas, apresentando uma redução da espessura da camada do metalímnio em 25% para cenários com cobertura superior à 20%, reduzindo a mistura entre as camadas estratificadas. Além disso, com cobertura de 80% do reservatório, a energia do vento transferida para as ondas foi reduzida em 95,6%, sendo encontrada uma relação de decaimento exponencial de energia com o aumento da área de cobertura. Os cenários de cobertura acima de 56% apresentam pouca redução de energia em relação ao cenário de 56%. Por meio de uma decomposição da energia da onda foi possível observar que apesar da energia interna inicial não continuar a decair, a energia da seicha interna pode continuar decaindo com o aumento da proporção das placas. Além disso, a variação do posicionamento do painel na superfície do lago mostrou uma pequena diferença de transferência da energia do vento (3,2%) nos cenários com as placas nas extremidades do reservatório, independentemente da direção do vento. No entanto, neste cenário é observado um aumento de transferência de 64% comparado ao cenário em que os painéis são posicionados no centro do reservatório, indicando uma alteração do fetch do vento devido a presença das placas. Embora seichas de maior amplitude apresentarem decaimento mais acentuado em estudo anterior, com a presença dos painéis, o maior decaimento ocorreu nos cenários de seichas de menor amplitude. Foi observado que a presença de painéis induz uma descontinuidade do vento, gerando, não apenas ondas estacionárias, mas também ondas propagantes formadas nas extremidades do lago. Este efeito acarreta um aumento da dissipação da energia das seichas internas de 25% para o cenário de menor amplitude da onda em relação ao cenário sem painel durante as primeiras 16h.

Palavras-chaves: Seichas internas, hidrodinâmica de lagos, usinas fotovoltaicas flutuantes.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Usina fotovoltaica flutuante no lago Passaúna (Curitiba-PR, Brasil).	9
Figura 2	– <i>Sungrow Power Supply Company</i> em Huainan, província de Anhui, China.	14
Figura 3	– Esquema geral da variação vertical da temperatura da água de lago termicamente estratificado e o nível de turbulência expresso pela dissipação da energia cinética turbulenta, em função da profundidade. (WÜEST; LORKE, 2003) e (HUTTULA, 2012)	15
Figura 4	– Onda interna estacionária induzida pelo vento em um lago estratificado. Esquerda: Inclinação da superfície e interface, devido ao estresse do vento. Direita: Movimento oscilatório da superfície e interface após o vento parar na metade do período da onda. As linhas tracejadas indicam a localização da superfície e da interface logo após o vento parar. Figura adaptada de Bueno et al. (2020).	17
Figura 5	– Lago prismático. a) Dimensão do lago, através da vista lateral. $h_e = 5$ m indica a espessura do epilímnio e as cores em azul mostram o sistema termicamente estratificado em duas camadas, o h' é a espessura do painel. b) lago 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%, 56%, 67% e 80%.	21
Figura 6	– Intensidade do vento aplicado de forma uniforme longitudinalmente na superfície de todo o domínio.	22
Figura 7	– Comparação entre as maiores amplitudes da onda para cada simulação. A maior amplitude da onda é 5 h após o vento cessar e pode ser percebida pelo movimento oscilatório da camada de mistura entre as porções de água de diferentes massa específica. O vento empilha amassa d'água a direita das imagens	25
Figura 8	– Energia cinética da onda a) Série temporal da energia cinética da onda normalizada de acordo com a equação 3.2 utilizando L como o comprimento total do lago para cada simulação. b) Valores de energia cinética máxima (inicial) para cada simulação. A equação é o ajuste exponencial do decaimento de energia máxima, onde a é a proporção de área coberta pelo painel	26
Figura 9	– Eficiência de transferência da energia cinética da onda variando a área de atuação do vento a) Série temporal da energia cinética da onda normalizada de acordo com a equação 3.2 utilizando $L = A/B$ para cada simulação. A linha vertical indica o momento em que o vento para. b) Valores de energia cinética máxima (inicial) para cada simulação. A equação é o ajuste exponencial do decaimento de energia máxima, onde a é a proporção de área coberta pelo painel	27
Figura 10	– Decaimento da seichas internas a) Decaimento dos máximos 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 seicha interna inicial seja dissipada. Pontos pretos indicam experimentos realizado por de (BUENO et al., 2020).	28

Figura 11 – Desenho esquemático da formação de ondas de maior frequência nas bordas do lago por maior contato com o vento e conseqüentemente maior energia.	29
Figura 12 – Formação de ondas de maior frequência observadas através da temperatura do lago para o cenário de painel com 56% da área de superfície coberta. Nas bordas do lago ocorre a formação de ondas solitárias devido maior contato com o vento e conseqüentemente maior energia. A formação, e o progresso da onda pode ser observado pelo horário de ocorrência das figuras.	30
Figura 13 – Análise espectral da simulação de todos os cenários. a) Densidade espectral das ondas (linha contínua) e a curva de significância da densidade (linha tracejada). As curvas apresentam uma densidade significativa de 27,7 h, relacionada a onda longa, e ondas de maiores frequências significativa b) Ondaleta da flutuação de temperatura da termoclina com filtro passa-faixa com frequência de corte entre 1/5,7 h a 1/11 h.	31
Figura 14 – Composição da energia para os diferentes cenários de cobertura de painel. Os valores são referentes a média da composição para os primeiros cinco ciclos de onda. Note que, os valores de decomposição (fundamental e residual) se complementam para cada cenário, pois a onda é composta basicamente por essas duas formas de energia.	32
Figura 15 – Percentual da energia de a) fundamental e b) residual do máximo valor do ciclo para cada cenário	32
Figura 16 – Energia interna do lago relativa a energia do vento a 10 m acima da superfície. A variação da posição longitudinal do painel em relação a direção do vento	33

Sumário

1	Introdução	9
2	Revisão da literatura	13
2.1	Lagos e reservatórios	13
2.1.1	Painéis fotovoltaicos flutuantes	13
2.2	Dinâmica de lagos estratificados	14
2.2.1	Fluxo de calor em lagos estratificados	14
2.2.2	Epilíminio	15
2.2.3	Metalíminio	16
2.2.3.1	Seichas internas	16
2.2.3.2	Análise espectral	19
2.2.4	Hipolíminio	19
2.3	Modelos numéricos	19
3	Métodos	21
3.1	Caracterização dos cenários do lago prismático	21
3.2	Modelo numérico para simulações do lago prismático	22
3.3	Análise da energia das ondas	23
4	Resultados	25
4.1	Amplitude da onda interna	25
4.2	Energia interna	26
4.2.1	Energia interna inicial	26
4.2.2	Eficiência de transferência de energia do vento	27
4.2.3	Dissipação da energia da seicha interna	28
4.3	Decomposição da Energia da Onda	30
4.4	Variação da posição do painel	32
4.5	Implicações físicas e ecológicas	33
5	Conclusão	35
	Referências	37

1 Introdução

Lagos e reservatórios desempenham um papel essencial no ciclo hidrológico, além de ter um importante papel na manutenção e equilíbrio dos ecossistemas, também fornecem água doce para uma variedade de usos, incluindo o abastecimento público, produção agrícola, geração de energia elétrica, atividades recreativas (e.g. natação e pesca) e produção industrial. Logo, a conservação da qualidade da água destes ambientes é vital para garantir o fornecimento de água de qualidade para múltiplos usos através da preservação dos recursos hídricos e da biodiversidade aquática destes ecossistemas. Além do uso da água, lagos¹ vêm sendo crescentemente utilizados para implementação de usinas fotovoltaicas flutuantes (Figura 1), principalmente devido aos seus benefícios, como, por exemplo, na geração de energia (HASSAN et al., 2020) e na redução da evaporação (ASSOULINE; NARKIS; OR, 2010; ASSOULINE; NARKIS; OR, 2011). Estudos recentes também apontam que os painéis fotovoltaicos flutuantes proporcionam uma redução do crescimento de algas (HAAS et al., 2020), reduzindo problemas envolvendo a eutrofização destes ambientes. A compreensão da hidrodinâmica dos lagos é de suma importância para a avaliação da qualidade da água destes ambientes e uma gestão eficaz dos recursos hídricos, isso porque a dinâmica destes sistemas tem um impacto significativo na dispersão de substâncias, sedimentação, eutrofização e na proliferação de algas (CUYPERS et al., 2011; PANNARD et al., 2011; BOEGMAN; STASTNA, 2019).

Neste contexto, entender como os painéis fotovoltaicos flutuantes influenciam a hidrodinâmica dos lagos pode ser fundamental na gestão de recursos hídricos. Isso permitiria tomar decisões fundamentadas que abrangem o gerenciamento da qualidade da água, a conservação da biodiversidade aquática e o impacto na sociedade. Esses conhecimentos podem embasar a criação de legislação adequada para a instalação de painéis fotovoltaicos flutuantes em lagos, garantindo o uso do recurso de forma a se conhecer os danos que podem ser causados na aplicação de painéis fotovoltaicos flutuantes.



Figura 1 – Usina fotovoltaica flutuante no lago Passaúna (Curitiba-PR, Brasil).

Os lagos são quase sempre classificados como ambientes lênticos, ou seja, com baixa velocidade. 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

¹ A partir daqui será utilizado apenas a palavra lagos para se referir à lagos e reservatórios.

do vento é dissipada ainda na camada limite entre a água e a atmosfera. Uma pequena fração (aproximadamente 1%) que adentra a superfície e atravessa as camadas superficiais são fontes de energia para o sistema hidrodinâmico destes ambientes (BUENO *et al.*, 2023). Embora a estratificação térmica contribui para a redução da intensidade de mistura e turbulência, uma parte significativa dessa energia disponível no interior do sistema é utilizada para a formação de seichas internas, que são ondas internas estacionárias que ocorrem devido às perturbações em meios estratificados e são capazes de perduram por muitos dias em lagos, mesmo após o fim da ação dos ventos. As seichas internas são responsáveis pelo aumento das trocas hipolimnéticas mesmo em períodos de forte estratificação térmica (BOCANIOV *et al.*, 2014a). A dinâmica e evolução de seichas internas pode interferir na qualidade da água, causando alteração na distribuição de cianobactérias que se proliferam no metalímnio (CUYPERS *et al.*, 2011) e nas comunidades de fitoplânctons devido às variações de temperatura nestas regiões (PANNARD *et al.*, 2011; HINGSAMER; PEETERS; HOFMANN, 2014a). Adicionalmente, ondas internas são muitas vezes responsáveis pela ressuspensão e transporte de sedimentos (IMBERGER, 1998a; BOEGMAN; STASTNA, 2019). Embora seichas internas (IMBERGER, 1998a; ANOHIN *et al.*, 2006a; STEVENS, 1999) e alguns aspectos físicos (e.g. transporte de calor e evaporação) de painéis fotovoltaicos flutuantes (ASSOULINE; NARKIS; OR, 2010; ASSOULINE; NARKIS; OR, 2011) já tenham sido amplamente estudados, ainda não se tem relatos de suas interações. O aumento da implantação de usinas fotovoltaicas flutuantes em lagos tem demandado estudos mais aprofundados envolvendo os efeitos destas placas, não apenas na transferência de calor, mas na hidrodinâmica destes ambientes. Com estudos mais aprofundados será possível nortear a implementação e auxiliar na gestão em empreendimentos de energia fotovoltaica, principalmente com aplicação em reservatórios de uso para abastecimento.

Este estudo busca responder a seguinte questão de pesquisa:

QUESTÃO DE PESQUISA: Como painéis fotovoltaicos influenciam a hidrodinâmica de lago e alteram os padrões de seichas internas em lagos termicamente estratificados?

HIPÓTESE 1: A energia da onda interna diminui com o aumento da área de cobertura dos painéis fotovoltaicos flutuantes; Como a principal fonte de energia da onda interna é o vento que age na superfície (IMBERGER, 2013a), a presença dos painéis pode reduzir essa troca podendo resultar em ondas internas de menor energia.

HIPÓTESE 2: Redução na taxa de energia do vento transferida para a onda interna, através da área superficial disponível, com o aumento da área de cobertura dos painéis fotovoltaicos flutuantes; A descontinuidade da ação do vento na superfície dos lagos pode interferir na taxa de transferência de energia do vento.

HIPÓTESE 3: O tempo de dissipação da onda interna pode ser menor com o aumento da área de cobertura dos painéis fotovoltaicos flutuantes. Se a energia da onda de fato diminui com o aumento da área de cobertura dos painéis, conforme hipótese 1, a amplitude das ondas tende a reduzir e, conseqüentemente, apresentariam decaimento menos acentuado (BUENO; BLENINGER, 2018).

HIPÓTESE 4: A energia da onda interna varia com a posição do painel fotovoltaico flutuante. Se a energia da onda varia com a continuidade do vento, conforme hipótese 2, o cenário de posição do painel sobre a superfície do lago que permite maior continuidade do vento, apresenta a maior energia da onda interna.

2 Revisão da literatura

2.1 Lagos e reservatórios

lagos são corpos d'água naturais ou artificiais e sua dinâmica é regida, na grande maioria dos casos, por forças baroclínicas. A circulação da água nesses ambientes depende de fatores externos, como vento, precipitação, radiação solar, profundidade, topografia, entre outros. O tempo de residência nesses ambientes é da ordem de dias, meses ou anos. Os lagos também participam do ciclo hidrológico e possuem ecossistemas próprios que dependem da disponibilidade de recursos como oxigênio e nutrientes. Os lagos também podem ser utilizados na geração de energia, não só por turbinas, mas também na disposição de painéis fotovoltaicos flutuantes em sua superfície, apresentando um aumento dos estudos em todo mundo devido aos seus inúmeros benefícios.

2.1.1 Painéis fotovoltaicos flutuantes

O aproveitamento da energia solar tem sido amplamente desenvolvida tendo em vista a demanda mundial por energias mais sustentáveis. A forma de maior aplicação dessa energia é por painéis fotovoltaicos, que demandam uma grande área para implantação. Aproveitar a existência de grandes corpos d'água pode tornar essa alternativa mais viável, reduzindo custos de instalação (BOCANIOV et al., 2014b; ABDELAL, 2021).

Comercialmente, a primeira usina fotovoltaica flutuante foi instalada em 2007 na Califórnia com capacidade de 175 kWp². Em 2014 essa forma de energia aumentou sua capacidade para 10 MWp² chegando a 2,6 GWp² em 2020. Atualmente a China lidera com 73% da capacidade mundial de geração de energia por painéis fotovoltaicos flutuantes seguida pelo Japão, Coreia do Sul e Europa (SANCHEZ et al., 2021). Atualmente a maior usina solar flutuante está localizada na China, na cidade de Huainan com uma capacidade instalada de 40 MW² e ocupa uma área de 1,6 km². Outra grande usina fica na cidade de Yamakura, localizada no Japão, com capacidade de 13,7 MW. A maior instalação de usina fotovoltaica flutuante no Brasil fica em Sobradinho (BA) com 12,5 MW inaugurada em 2019.

Além da viabilização da usina pela disposição de espaço, os painéis flutuantes podem garantir ainda mais vantagens do que os painéis solares aplicados fora da água. Estudos apontam o aumento da eficiência devido ao resfriamento natural dos painéis, diminuição do acúmulo de sujeira nos painéis, além das vantagens da redução da evaporação (ASSOULINE; NARKIS; OR, 2010; ASSOULINE; NARKIS; OR, 2011) e redução do crescimento de cianobactérias (ZELJKOVIĆ et al., 2023).

Por outro lado existem algumas desvantagens: o sistema está sujeito a eventos extremos que afetem o nível do lago podendo danificar a estrutura, a estrutura metálica pode sofrer corrosão, a diminuição da radiação incidente e da reaeração na água pode afetar o ecossistema aquático, além efeitos nas atividades de pesca, transporte e turismo (SAHU; YADAV; SUDHAKAR, 2016).

A falta de informação sobre a influência do sombreamento por painéis na qualidade da água e na vida aquática está diretamente relacionada à incipiência de estudos na área, sobretudo, de fenômenos hidrodinâmicos como ondas internas, que estão diretamente associados à qualidade da água e ao ciclo biogeoquímico

nestes ambientes (IMBERGER, 2013b).



Figura 2 – *Sungrow Power Supply Company* em Huainan, província de Anhui, China.

2.2 Dinâmica de lagos estratificados

2.2.1 Fluxo de calor em lagos estratificados

O fluxo de calor que ocorre na interface água-ar do lago é decorrente da combinação da radiação solar de onda longa e de onda curta, evaporação, precipitação, convecção de calor e fluxos de entradas e saídas na superfície. Quando a resultante do balanço de temperatura desse fluxo é positiva o lago armazena energia, típico comportamento observado no verão. Já quando a resultante é negativa, o lago tende a perder energia para a atmosfera, como ocorre tipicamente no inverno, contudo, este fenômeno de balanço pode ocorrer em diferentes escalas de variação.

A maior parte da energia fica armazenada nas camadas mais superficiais e diminui com a profundidade devido à baixa condutividade térmica da água, podendo variar de acordo com a profundidade do lago e a sua turbidez, o que determinam o alcance dos raios solares com a profundidade. Essa ação da radiação solar controla a dinâmica de mistura de lagos impulsionando fluxos biogeoquímicos. A energia transferida pelo vento também desempenha um importante papel na hidrodinâmica de lagos termicamente estratificados, o que exige uma compreensão do sistema atmosfera-água, incluindo transferência de energia (WÜEST; PIEPKE; SENDEN, 2000).

Essa distribuição desigual de energia entre as camadas resultam em um sistema termicamente estratificado, no qual forças baroclínicas e mecânicas são as principais responsáveis pelos fenômenos de mistura e transporte. Essa não homogeneidade permite a diferenciação da coluna d'água em três camadas: Epilímnio, metalímnio e hipolímnio (Figura 3): O epilímnio é a camada superior, sendo mais quente, termicamente uniforme e bastante turbulenta. O metalímnio é definido como a camada de maior gradiente de temperatura

entre o hipolímnio e o epilímnio, onde a região de taxa máxima de temperatura em relação à profundidade é conhecida como termoclina. O hipolímnio está localizado na parte mais profunda do corpo d'água, sua temperatura varia menos ao longo do tempo, se comparado ao epilímnio, a concentração de oxigênio e nutrientes é baixa e há maior concentração de sedimentos em suspensão (WETZEL, 2001).

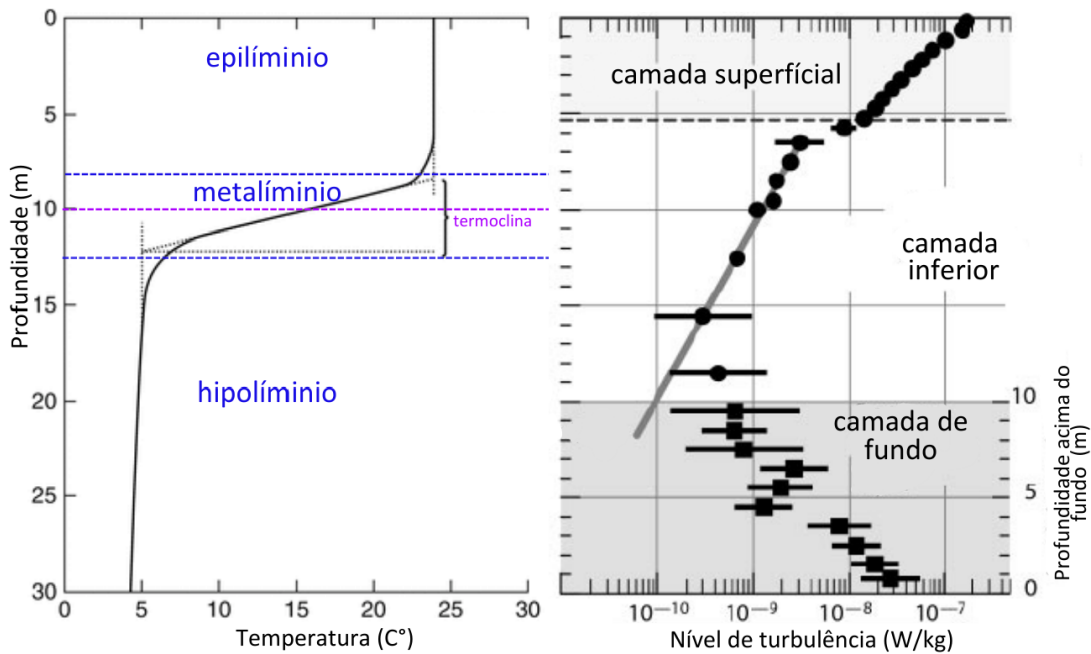


Figura 3 – Esquema geral da variação vertical da temperatura da água de lago termicamente estratificado e o nível de turbulência expresso pela dissipação da energia cinética turbulenta, em função da profundidade. (WÜEST; LORKE, 2003) e (HUTTULA, 2012)

2.2.2 Epilímnio

Os 2 m superiores da água do lago absorvem mais da metade da radiação solar e o alto calor específico da água permite o acúmulo de energia luminosa na forma de temperatura (energia interna). Alguma transferência dos sedimentos, condensação do vapor de água ou calor do ar ocorre, mas em menor proporção. A perda dessa energia pode ser causada pela radiação solar nos primeiros centímetros de água. Porém, a evaporação deve ser considerado nos balanços hídricos, podendo ser um dos principais meios de perda de calor do lago (RAGOTZKIE, 1978).

A camada superior dos lagos, denominada camada superficial (Figura 3), possui tipicamente 5 m podendo variar com as condições locais. Essa camada possui fluxos contínuos de troca de calor, quantidade de movimento e gases, causando aumento da dissipação de energia cinética turbulenta (Figura 3). Essa região é considerada a mais complexa, devido a essas trocas constantes (BOUFFARD; WUEST, 2018). A camada superficial está localizada na parte superior do epilímnio, uma região quente, iluminada e com maior disponibilidade de oxigênio, comparada às demais camadas, sendo favorável à proliferação de algas, organismo base da cadeia alimentar aquática.

Em lagos estratificados a mistura ocorre, principalmente, por forças externas, sendo induzida pelo vento, através do cisalhamento, ou por difusão molecular, sendo caracterizada por fluxos de diferentes escalas

temporais.

A tensão superficial do vento influencia a mistura no interior do lago. Embora a energia associada ao fluxo de calor seja muito maior que a energia induzida pelo vento, sua eficiência mecânica para movimentar a água é muito pequena (IMBODEN, 2004). A velocidade horizontal do vento sobre a água pode ser descrita pela "lei da parede". A tensão total incidente do vento na superfície σ_{vento} é parametrizada segundo a equação (2.1

$$\sigma_{vento} = \rho_{atm} C_D U_{10}^2, \quad (2.1)$$

em que ρ_{atm} é a massa específica do ar atmosférico, U_{10} é a velocidade do vento a 10 metros de altura e C_D é o coeficiente de arraste do vento.

O fluxo de energia (P_{vento}) do vento para a superfície da água é proporcional à tensão de cisalhamento, e pode ser expresso como:

$$P_{vento} = \sigma_{vento} U_{10}, \quad (2.2)$$

P_{vento} geralmente varia entre 0.01 e 1 W/m² na maioria dos lagos.

2.2.3 Metalímínio

O metalímínio é a zona de transição entre o epilímínio e o hipolímínio. O metalímínio é uma camada de transição entre as duas, caracterizada por uma mudança abrupta nas propriedades físicas e químicas da água. A radiação solar atravessa o epilímínio e chega até o metalímínio mais atenuada, tornando essa região menos aquecida que a superfície (Figura 3). A termoclina é a região onde esse gradiente de temperatura é máximo. A dissipação de energia nessa camada é baixa devido a estratificação térmica que amortece o movimento resultando em pouca mistura.

A energia de cisalhamento do vento não é totalmente transferida para o metalímínio, grande parte se dissipa na interface água-ar, outra parte, cerca de 20%, aceleram e mantêm as ondas de superfície (WÜEST; LORKE, 2003; SIMON, 1997). A presença das ondas superficiais faz com que a energia de cisalhamento do vento não seja homogênea ao longo da superfície.

Mesmo com forte estratificação térmica, as condições do vento podem ser fortes o suficiente levando a uma redução da estratificação. Para determinar se pode haver mistura entre as camadas, um parâmetro adimensional frequentemente utilizado é o número de Wedderburn (W) (Equação 2.3), que é aplicado em sistema de duas camadas em um lago de comprimento de ação do vento L , relacionando as forças de estabilidade com as forças de instabilidade.

$$W = \frac{N^2 h_e^3}{u_*^2 L}, \quad (2.3)$$

em que h_e é a profundidade do epilímínio, L é o comprimento do lago, e $u_* = (\sigma_{vento}/\rho_h)^{\frac{1}{2}}$ é a velocidade de cisalhamento do vento e N^2 é a frequência de empuxo dada pela equação 2.4.

$$N^2 = \frac{-g}{\rho} \frac{\delta \bar{\rho}}{\delta z} \quad (2.4)$$

2.2.3.1 Seichas internas

A termoclina é a região do metalímínio onde o gradiente de temperatura é mais acentuado com tendência a suprimir processos de mistura. Em sistemas de duas camadas, na termoclina, as seichas internas

são susceptíveis a serem geradas. Da energia do vento que atravessa a superfície da água, apenas 10% pode dar início a uma seicha interna no interior estável (IMBERGER, 2013a). Em eventos em que não há mistura, o sistema pode ou não desenvolver seichas internas. Através da combinação das equações de balanço de massa e energia é possível deduzir que a dominância de seichas internas é limitada pelo intervalo em 2.5

$$0.5 \frac{h_e}{\sqrt{H} h_h} < W < \frac{L H}{4 h_e h_h}, \quad (2.5)$$

no qual H é a profundidade total e h_e e h_h são a profundidade do epilímnio e hipolímnio, respectivamente. Sistemas com W acima dos intervalo do limite em 2.5, o sistema é muito estável para permitir movimentos de alta amplitude. Assim, quando o W coincide com os critérios 2.5, o interior do lago pode ser dominado por seichas internas fundamentais, que serão apresentadas mais adiante.

As ondas internas, diferentemente das superficiais, apresentam isóbaras e isopícnas inclinadas uma em relação à outra causando movimento de rotação, o que aumenta o cisalhamento entre as camadas gerando um aumento na intensidade da turbulência. Devido à estratificação contínua, seichas internas se propagam tanto na vertical quanto na horizontal. Além disso, devido à baixa diferença de massa específica entre as camadas, as ondas internas possuem períodos maiores em comparação a ondas superficiais, para um mesmo comprimento de onda. Na grande maioria dos lagos, a hidrodinâmica interna é dominada por seichas internas, uma vez que, majoritariamente, o período do vento que age sobre o lago é menor que o período da seicha interna fundamental (IMBERGER, 1998b) e a condição 2.5 é atendida pelo menos durante alguns períodos do ano.

Uma pequena porcentagem da energia do vento que atravessa o epilímnio é responsável pela formação das seichas internas em escala de bacia (IMBERGER, 2013b). O movimento do vento causa um deslocamento de volume de água superficial transferindo quantidade de movimento para a seicha interna através da energia cinética introduzida pelo vento (Figura 4). Se o evento persistir por tempo suficiente, parte da energia pode ser transferida formando campo de ondas internas mais profundo. A pressão horizontal na superfície causa um movimento interno em direção contrária ao gradiente de pressão (direção oposta ao vento). Quando o vento para, a inércia da água cria um movimento oscilatório em torno dos pontos nodais da onda. Esta oscilação é caracterizada pela evolução de uma seicha interna, que pode oscilar por longos períodos, persistindo por várias horas ou semanas, dependendo do tamanho do lago, condições de estratificação térmica, batimetria do lago, vento, entre outros fatores.

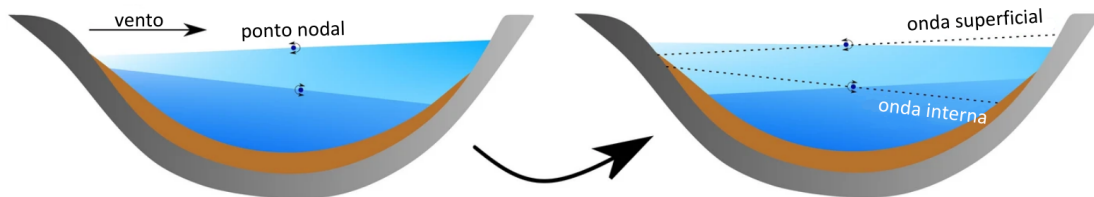


Figura 4 – Onda interna estacionária induzida pelo vento em um lago estratificado. Esquerda: Inclinação da superfície e interface, devido ao estresse do vento. Direita: Movimento oscilatório da superfície e interface após o vento parar na metade do período da onda. As linhas tracejadas indicam a localização da superfície e da interface logo após o vento parar. Figura adaptada de Bueno et al. (2020).

Seichas internas do segundo modo vertical são caracterizadas pela tensão de cisalhamento entre as camadas no qual o metalímnio flui no sentido oposto ao hipolímnio e epilímnio. Modos verticais maiores

podem ser mais recorrentes em lagos rasos, onde o metalímnio ocupa uma proporção maior da profundidade total (ROGET; SALVADÉ; ZAMBONI, 1997). A ressonância da onda com o vento também pode favorecer modos verticais (VIDAL et al., 2005) e horizontais (BOEGMAN; IVEY, 2012) mais elevados e ondas de maior amplitude (MÜNNICH; WÜEST; IMBODEN, 1992).

Geralmente, em seichas lineares, a energia interna total da onda é igualmente particionada entre energia cinética e potencial para um ciclo completo de onda. Assim, a energia total média pode ser estimada a partir dos deslocamentos verticais das isotermas devido à atividade interna da seicha (energia potencial) ou através da velocidade horizontal no centro da bacia devido à evolução da seicha interna (energia cinética).

Uma abordagem para calcular a energia total $E(t)$ depositada no sistema é integrar o campo de velocidade (GOUDSMIT et al., 2002) segundo a equação 2.6

$$E(t) = 2 E_c(t) = \int_{z_0}^H \int_{y_0}^B \int_{x_0}^L \rho(x, y, z) u^2(x, y, z) dx dy dz, \quad (2.6)$$

no qual E_c é a energia cinética, z_0 é o referencial da altura, H é a profundidade total do lago, y_0 é o referencial da largura, B é a largura total do lago, x_0 é o referencial de comprimento, L é o comprimento total do lago, $u(z)$ é o campo de velocidade horizontal ao longo da profundidade e ρ é a massa específica da água.

A onda interna pode ser dissipada pelo atrito viscoso entre as camadas e a mistura diapicnal, geralmente ocorre no fundo do lago. Dados coletados em campo mostraram que a maior parte da energia da seicha interna é perdida devido à produção de turbulência na camada limite, próxima ao fundo do lago (SIMPSON; WILES; LINCOLN, 2011).

Seichas internas de maiores amplitudes tendem a transferir energia para movimentos de escalas menores, como ondas internas de alta frequência, ondas de Kelvin-Helmholtz ou Bore, que são formadas na transição do regime supercrítico para o subcrítico (HORN; IMBERGER; IVEY, 2001a; BOEGMAN; IVEY; IMBERGER, 2005). Observações sugerem que mais de 80% da energia potencial disponível de ondas internas de grande escala é transferida para ondas de alta frequência ou dissipada por viscosidade durante ainda o período do primeiro ciclo da onda (STEVENS et al., 1996). Por outro lado, as ondas de alta frequência são muitas vezes dissipadas devido à quebra das ondas na primeira interação com a margem do lago.

A periodicidade teórica das seichas internas (Equação 2.7), pode ser dada pela equação de Merian (WATSON, 1904). Considerando um sistema linear, hidrostático e para águas rasas, o período da onda interna é definido segundo a equação 2.7

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{2L}{\sqrt{g' \overline{H}}} = \sqrt{\frac{4L^2 \overline{H}}{g' h_e h_h}}, \quad (2.7)$$

em que λ é o comprimento de onda ($\lambda = 2L$), c é a velocidade de fase da onda, \overline{H} é a profundidade total do lago, h_e é a espessura do epilímnio, h_h é a espessura do hipolímnio, g' é a aceleração da gravidade reduzida ($g' = g \Delta\rho/\rho$) e L é que o comprimento do lago.

Tendo em vista a ampla ocorrência de ondas internas em lagos, muitos estudos apontam a importância desse movimento em fluxos biogeoquímicos e sua implicação na qualidade da água. Há indícios que o movimento de grande escala na camada limite inferior responsável pelo transporte de massa está relacionado a ondas internas (IVEY; WINTERS; SILVA, 2000; FORSYTHE; MARVIN, 2005; ROMERO, 2003; ANOHIN et al., 2006b), adicionalmente, movimento vertical de grande escala pode causar deslocamento de comunidades de fitoplânctons (HINGSAMER; PEETERS; HOFMANN, 2014b).

2.2.3.2 Análise espectral

Para entender como as condições do lago influenciam na caracterização das ondas internas, os dados de velocidade e temperatura, estimados por modelo hidrodinâmico ou obtidos por medição em campo, podem ser avaliados através da análise espectral. A densidade espectral de potência é calculada 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 (BUENO; BLENINGER; LORKE, 2020).

Normalmente o espectro das ondas internas (obtidos com dados de temperatura e velocidade vertical próximo a margem) é dividido em quatro regiões principais. A primeira parte corresponde a região de baixa frequência (ondas estacionárias e de maiores períodos) que são tipicamente formadas pela ação do cisalhamento do vento. A segunda parte está relacionada a frequências um pouco maiores ($10^{-2} N < f < 10^{-1} N$, em que N é a frequência de empuxo) representando uma transferência de energia das ondas longas em ondas de maior frequência. A terceira parte caracteriza pela propagação das ondas internas de alta frequência, em que a frequência varia de $10^{-1} N$ a N , e é caracterizada por um aumento da energia espectral. Esse pico pronunciado é seguido por uma redução acentuada (BOEGMAN et al., 2003; HUBER; PEETERS; LORKE, 2011), abaixo da frequência de empuxo o sistema é fracamente estável para suportar a evolução e formação de seichas internas caracterizado como quarta parte da análise espectral. Para avaliar a não-estacionariedade dos sinais de temperatura, a análise espectral de ondaleta também pode ser utilizada 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).

2.2.4 Hipolímínio

O hipolímínio é a região mais profunda do lago estratificado, possui pouca luz e baixa concentração de oxigênio. A ação da radiação solar aquece as camadas mais próximas da superfície, então, apenas a radiação que atravessa as camadas superiores chegam ao fundo do lago.

Apesar da energia direta da atmosfera não atingir o fundo do lago, a camada de fundo possui alto nível de turbulência (Figura 3), isso porque a ocorrência das ondas internas aumenta a tensão de cisalhamento com o leito do lago, acarretando um aumento da dissipação de energia cinética turbulenta.

2.3 Modelos numéricos

Modelos numéricos hidrodinâmicos são amplamente utilizados para capturar o equilíbrio do lago e a estratificação térmica. A modelagem é fundamental, uma vez que possibilita o estudo de fenômenos em escalas espaciais e temporais sem a necessidade de medição de todos os dados observacionais, além de permitir a previsão de cenários futuros. Nas últimas décadas, uma variedade de modelos hidrodinâmicos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais surgiu para a simulação da dinâmica de lagos.

Há 6 décadas vêm sendo desenvolvidos modelos matemáticos para descrever a hidrodinâmica de lagos estratificados (HODGES et al., 2000; DISSANAYAKE; HOFMANN; PEETERS, 2019). Dada a complexidade das interações hidrodinâmicas, muitas simplificações são consideradas, contudo ainda é possível obter uma compreensão dos processos físicos quando combinados dados de campos e laboratoriais. As equações da quantidade de movimento, conservação da massa e de difusão e advecção são utilizadas para descrever a

hidrodinâmica do sistema e transporte dos constituintes (e.g., calor, salinidade e outras substâncias) em junção das características do sistema.

O *General Lake Model* (GLM) é um modelo hidrodinâmico unidimensional (1D, vertical) para ecossistemas aquáticos para um volume de controle sem fluxo. Modelos 1D (verticais) têm sido usados para capturar a trajetória de longo prazo e a resiliência de lagos como mudanças de longo prazo no oxigênio, ciclos de nutrientes e o risco variável de proliferação de algas (PEETERS et al., 2007; HU et al., 2016; SNORTHEIM et al., 2017). Os baixos requisitos computacionais em relação aos modelos 3D tornam essa abordagem mais adequada para identificação de parâmetros e análise de incerteza, trazendo um equilíbrio parcimonioso entre complexidade do processo e demanda computacional (HIPSEY; BRUCE; HAMILTON, 2014).

O CE-QUAL-W2 é um modelo bidimensional (2D), longitudinal/vertical, hidrodinâmico e de qualidade da água que se baseia nas técnicas comprovadas de solução hidrodinâmica de seus predecessores, este modelo recebeu mais de 1.000 aplicações em todo o mundo (XU; GODREJ; GRIZZARD, 2007). Ainda há outros modelos como o modelo de lago de média lateral (LARM) e o modelo de hidrodinâmica e transporte longitudinal e vertical generalizado (GLVHT).

O *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model* (ELCOM) é um modelo hidrodinâmico tridimensional (3D) validado e amplamente utilizado (ALEXANDER; IMBERGER, 2008; LEE et al., 2013; ROMERO, 2003) que simula a distribuição da velocidade, temperatura e salinidade em corpos d'água.

O Delft3D-FLOW é outro exemplo de modelo multidimensional validado e amplamente utilizado (CHANUDET; FABRE; KAAIJ, 2012; WANG et al., 2022; SIQUEIRA, 2018) que resolve as equações de continuidade, transporte e quantidade de movimento horizontal com aproximação de águas rasas. Este modelo é capaz de calcular os fluxos não-estacionários e os fenômenos de transporte de calor e matéria devido às forçantes meteorológicas e de maré.

ELCOM e Delft3D são alguns dos modelos tridimensionais mais conhecidos para simular a dinâmica do sistema de águas rasas, como regiões costeiras, lagos, estuários, lagoas e rios. A onda interna afetada pela rotação da Terra foi amplamente simulada por ELCOM (HODGES et al., 2000; VALERIO et al., 2012) e Delft3D (DISSANAYAKE; HOFMANN; PEETERS, 2019; BUENO; BLENINGER, 2019; KRANENBURG et al., 2020; BARACCHINI et al., 2020). Estudos apontam que os modelos Delft3D e ELCOM são eficientes para simular ondas internas de grande escala em lagos, apresentando boa concordância com medições realizadas no Upper Lake Constance (DISSANAYAKE; HOFMANN; PEETERS, 2019).

Modelos unidimensionais não conseguem descrever as variações horizontais, enquanto modelos tridimensionais são capazes de simular uma grande quantidade de processos em lagos, mas ainda possuem suas simplificações.

3 Métodos

A simulação hidrodinâmica foi realizada utilizando o modelo hidrodinâmico tridimensional Delft3D com a aproximação hidrostática (HYDRAULICS, 2003). Foram realizadas simulações de cenários de diferentes tamanhos de painéis fotovoltaicos flutuantes para um lago hipotético prismático. Com a velocidade temporal e espacial da onda, a energia da onda foi calculada. Adicionalmente, a análise espectral e modelos unidimensionais simplificados foram utilizados para avaliar a frequência das ondas internas geradas.

3.1 Caracterização dos cenários do lago prismático

Inicialmente, a hidrodinâmica e as ondas internas foram avaliadas em um sistema simplificado, excluindo elementos como rios, estruturas de controle de fluxo, batimetria e radiação. Além da simplificação do vento, para condições de período limitado e com valores constantes de direção e intensidade.

Para analisar os efeitos da presença dos painéis no sistema simplificado, simulações para três cenários contendo usinas flutuantes de diferentes tamanhos foram preparadas. Os cenários criados incluíram áreas de cobertura de 20%, 38%, 56%, 67% e 80% da área superficial do lago (Figura 5b) distribuídos de forma transversalmente simétrica centralizados em $y = B/2$ (como ilustrado na Figura 5b), além de um cenário base sem a presença das placas (0%). Essas proporções de cobertura foram selecionadas, a partir da dimensão da grade, para permitir a comparação de diferentes coberturas no lago. A fim de simular a ocorrência de seichas internas, na condição inicial o lago foi estratificado em duas camadas, no qual o epilímnio foi definido com espessura de 5 m e temperatura de 23 °C, enquanto o hipolímnio foi definido com espessura de 7 m e temperatura de 17 °C (Figura 5a).

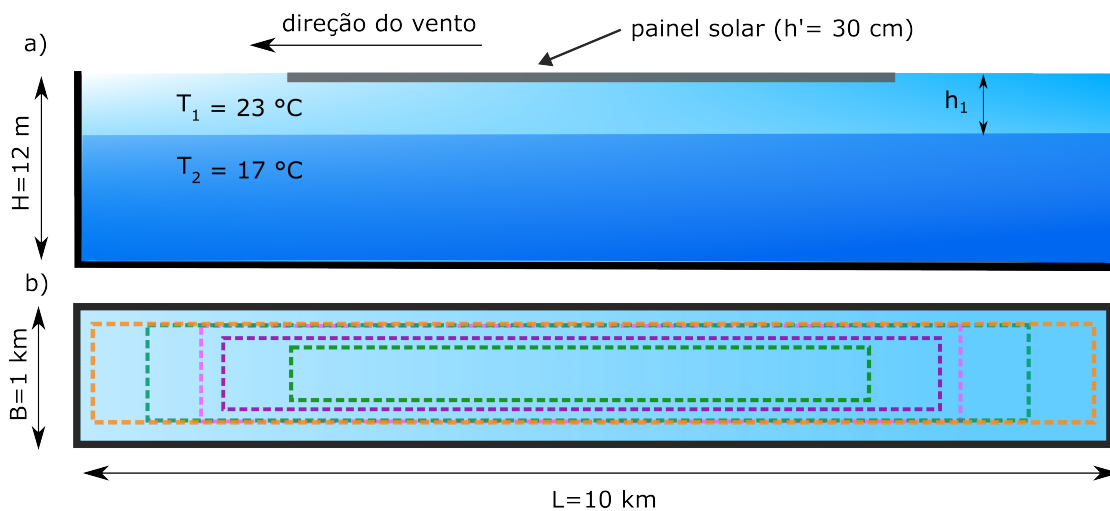


Figura 5 – Lago prismático. a) Dimensão do lago, através da vista lateral. $h_e = 5\text{ m}$ indica a espessura do epilímnio e as cores em azul mostram o sistema termicamente estratificado em duas camadas, o h' é a espessura do painel. b) lago prismático visto cima. Representação dos tamanhos dos painéis para os diferentes cenários. As linhas pontilhadas verde, roxo e rosa, mostram, respectivamente, o limite da área dos painéis para as coberturas 20%, 38%, 56%, 67% e 80%.

A condição do vento nas quatro simulações foi mantida constante, com velocidade de 6 ms^{-1} ao longo do eixo principal (para garantir W próximo a 1) durante as primeiras 5 h de simulação (Figura 6) sem variação espacial apenas na direção longitudinal do lago, conforme Figura 5a).

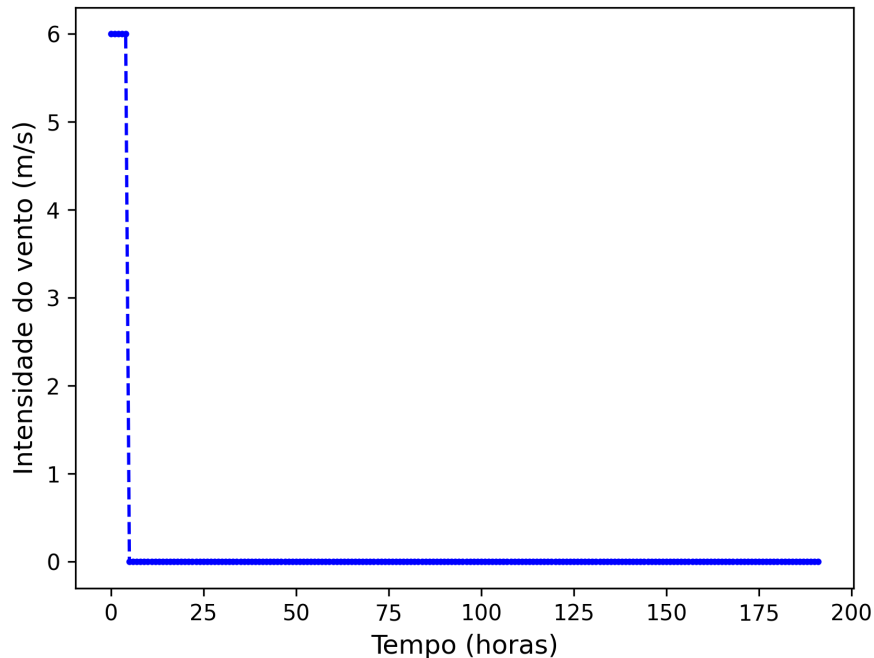


Figura 6 – Intensidade do vento aplicado de forma uniforme longitudinalmente na superfície de todo o domínio.

Com objetivo de isolar apenas a influência dos painéis, foram simplificadas as condições de contorno, não adicionadas as sinuosidades e variações de profundidade, dessa forma foi construído um lago prismático de dimensão de 1 km de largura, 10 km de comprimento e 12 m de profundidade. Uma grade composta por 4000 células de $50 \times 50 \text{ m}$ foi criada, sendo 200 células ao longo do eixo principal e 20 células ao longo do eixo transversal. A profundidade foi dividida em 10 camadas de 1,2 m cada. A espessura escolhida para os painéis flutuantes (h') foi de 30 cm (Figura 5a), baseado na espessura de módulos reais que suportam estes painéis. Para adicionar os painéis no modelo foi retirada a ação do vento na cobertura referente ao painel.

3.2 Modelo numérico para simulações do lago prismático

O modelo Delft3D já é utilizado em muitos estudos para simulação da ocorrência de seichas internas e distribuição térmica, apresentando resultados satisfatórios para lagos (DISSANAYAKE; HOFMANN; PEETERS, 2019; BUENO et al., 2023).

O tempo total de simulação foi de 8 dias, de modo que a resolução numérica foi definida em passos de 10 minutos para garantir a estabilidade numérica através do valor mínimo de Courant ($C < 10$).

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. Não foi considerada força de atrito entre a superfície da água e os painéis, também não foi considerado o possível transporte de calor por aquecimento na região do painel.

3.3 Análise da energia das ondas

Para a análise da estabilidade da estratificação e para a comparação com a amplitude das seichas internas geradas em lagos sem os painéis fotovoltaicos flutuantes (BUENO et al., 2020; SHINTANI et al., 2010a), o número de Wedderburn (Equação 2.3) foi calculado para todos os cenários. O número de Wedderburn (W) representa a razão da força de pressão baroclínica no ponto de afloramento da termocline e a força superficial imposta pela tensão de cisalhamento do vento (IMBERGER; PATTERSON, 1989). Assim como já aplicado em outro estudo, (IMBERGER et al., 1978) a equação 2.3 foi alterada para considerar a área de ação do vento (A) e não somente o comprimento superficial (L) (Equação 3.2), tendo em vista a forma retangular do lago. Assim foi possível comparar os valores de W para diferentes tamanhos de painéis, que variam nas duas dimensões horizontais do lago (Figura 5).

$$W = \frac{g' h_e}{u_*^2 L}, \quad (3.1)$$

em que L é o comprimento de pista do vento do lago que foi adaptado para a área de atuação do vento. Para o cálculo da energia interna $L = \frac{A}{B}$, $L = L$, contudo para o cálculo da eficiência da transferência de energia, o L foi considerado a área de superfície sem painel sendo $L = \frac{A'}{B}$, em que

$$A' = B L * (1 - \text{Área do painel}) \quad (3.2)$$

A energia da onda por unidade de largura ($J m^{-1}$) para cada instante de tempo foi calculada através da energia cinética integrada ao longo das dimensões do lago (Equação 2.6), para uma única seção longitudinal do lago ($y = B/2$, com y sendo o eixo transversal), para as posições x, z (eixo longitudinal e de profundidade, respectivamente) em cada instante de tempo.

Para avaliar a proporção da energia do vento que é transferida para as seichas internas, a energia da seicha interna (Equação 2.6) foi normalizada pela energia do vento na atmosfera (WOOLWAY et al., 2018), segundo a equação 3.3

$$E(t)_{\text{norm}} = \frac{E(t)}{P_{\text{vento}} T_{\text{vento}} \frac{A}{B}}, \quad (3.3)$$

em que P_{vento} é o fluxo de energia ou transferência de quantidade de movimento do vento para a superfície da água (Equação 2.6) e T_{vento} é o tempo de ação do vento.

4 Resultados e Discussões

A análise preliminar das simulações dos cenários foi submetida como resultado em um artigo sobre a influência dos painéis fotovoltaicos flutuantes nas ondas internas¹.

4.1 Amplitude da onda interna

O vento que age nas primeiras 5 h de simulação gera um empilhamento da água no sotavento do lago (margem esquerda da Figura 5). Esse empilhamento é caracterizado pela formação de uma seicha superficial de baixa amplitude, geralmente na ordem de centímetros (CUEVA et al., 2019). 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 7), dando origem ao início do movimento oscilatório característico da seicha interna e ao afloramento da termoclina, caracterizado pela elevação da termoclina na região do barlavento e uma erosão na região do sotavento.

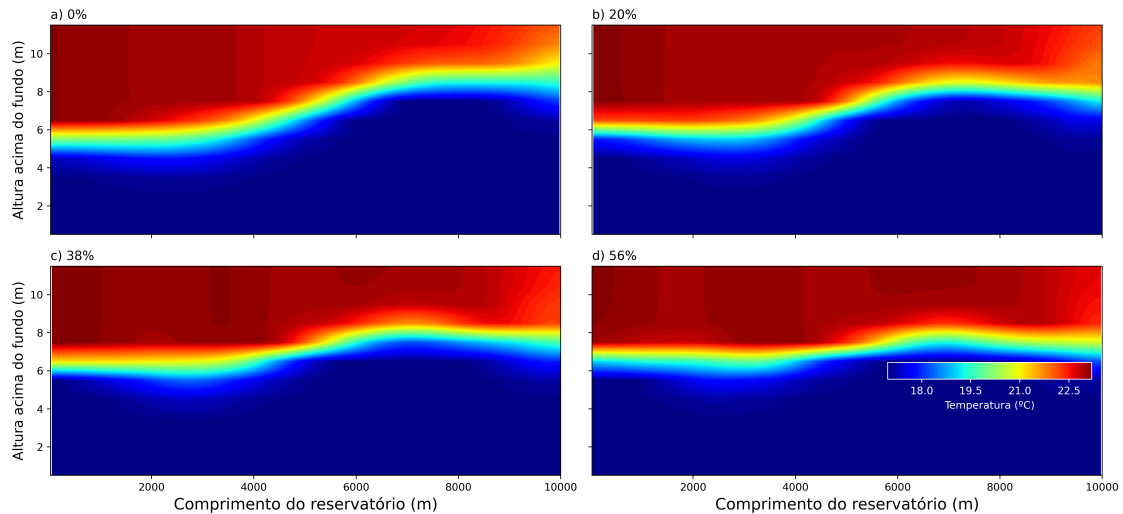


Figura 7 – Comparação entre as maiores amplitudes da onda para cada simulação. A maior amplitude da onda é 5 h após o vento cessar e pode ser percebida pelo movimento oscilatório da camada de mistura entre as porções de água de diferentes massa específica. O vento empilha amassa d'água a direita das imagens

Apesar do sistema inicialmente ser dividido em duas camadas, a ação contínua do vento e a propagação das ondas internas favorecem as instabilidades e a dissipação da energia cinética turbulenta na região da termoclina, aumentando a espessura do metalimnio e proporcionando uma mistura entre camadas. Ao comparar a espessura da camada de mistura ao final da ação do vento, os cenários com painéis maiores que 20% de cobertura superficial apresentaram redução de 25%, indicando influência dos painéis na transferência

¹ Karollyn Larissa de Quadros; Erika Mariellen Ferreira; Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes; Tobias Bleninger & Rafael de Carvalho Bueno - Influência de painéis fotovoltaicos na dinâmica de ondas internas em lagos e lagoas. *XXV Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, 2023.

de energia do vento para o interior do lago. Devido à redução da amplitude da onda, a espessura da camada de mistura diminui, após o fim da simulação, em 16% para o cenário com painel de 38% de cobertura e 29% para os cenários maiores comparado a simulação sem painel. 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. Estes efeitos corroboram com observações realizadas nos lagos (BOCANIOV et al., 2014c). A redução da mistura nos cenários com maiores painéis ocorre principalmente devido à redução da amplitude das ondas internas (Figura 7).

4.2 Energia interna

4.2.1 Energia interna inicial

Analisando a variação da energia cinética da onda normalizada (Figura 8a), obtida através da equação 3.3, foi possível estimar, através dos valores máximos para cada ciclo de energia cinética, o período da onda para cada cenário simulado. De acordo com os resultados (Figura 8a), os painéis não demonstram gerar influência no período da onda. Para a simulação sem painel, o período de 30 h se manteve praticamente constante e próximo ao valor teórico de 29 h 30 min (Equação 2.7), com diferença média de 4%. Para as demais simulações, a média do período das ondas foi de $30 \text{ h} \pm 24 \text{ min}$, diferença máxima de 0,03%, valor próximo ao observado sem a presença dos painéis fotovoltaicos.

Embora uma pequena diferença entre os máximos de energia cinética de cada simulação seja observada ao fim da simulação (defasagem temporal entre as curvas, Figura 8a), a defasagem é resultante de uma variação esporádica, que ocorre em apenas alguns ciclos da onda e não é constante em todo o período simulado. Além disso, a simulação de maior cobertura apresenta uma leve redução do período (1 h 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, o único motivo para esse pequeno aumento seria a acurácia do modelo.

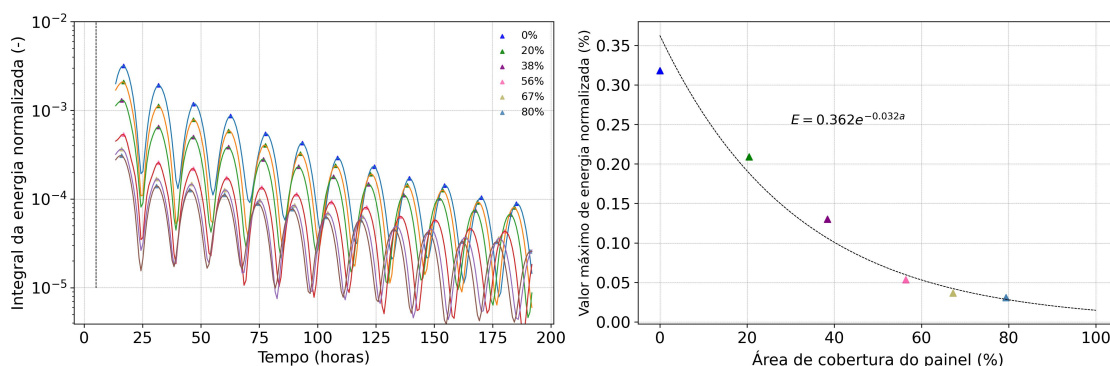


Figura 8 – Energia cinética da onda a) Série temporal da energia cinética da onda normalizada de acordo com a equação 3.2 utilizando L como o comprimento total do lago para cada simulação. b) Valores de energia cinética máxima (inicial) para cada simulação. A equação é o ajuste exponencial do decaimento de energia máxima, onde a é a proporção de área coberta pelo painel

A redução da energia inicial da seicha interna (Figura 8b) é proporcional ao aumento da área de cobertura superficial, seguindo a equação $E = 0,362 e^{-0.032a}$, onde a é a proporção da área coberta pelo painel.

Os cenários com painel de 20%, 38%, 56%, 67% e 80% da área de cobertura apresentaram, respectivamente, redução de sua energia inicial de 34,3%, 59,1% e 83,2%, 88,5% e 95,6% em relação a energia inicial do cenário sem a presença do painel (Figura 8b).

Para a análise da variação de energia interna com a variação dos cenários o número de Wedderburn (W) é calculado com valores constantes, uma vez que, aqui, a área superficial não varia (equação 3.2). O valor de W para esse caso foi de 0,457. Em relação ao intervalo que caracteriza o regime de dominância das seichas internas, no qual, para os cenários criados, deve ocorrer para valores menores que 850,0 (SPIGEL; IMBERGER, 1980a). De acordo com a classificação da mistura de lagos (SPIGEL; IMBERGER, 1980a), nessa condição de W , acima de 0.3 (equação 2.5), é esperado que as ondas internas contribua com o aumento de mistura entre as camadas devido a tenção de cisalhamento.

4.2.2 Eficiência de transferência de energia do vento

A transferência da energia do vento para a onda interna é menos eficiente quanto menor a área disponível (Figura 9). A energia da onda considerando a variação da área de atuação do vento (equação 3.3) apresenta uma redução exponencial quanto maior a área de cobertura dos painéis.

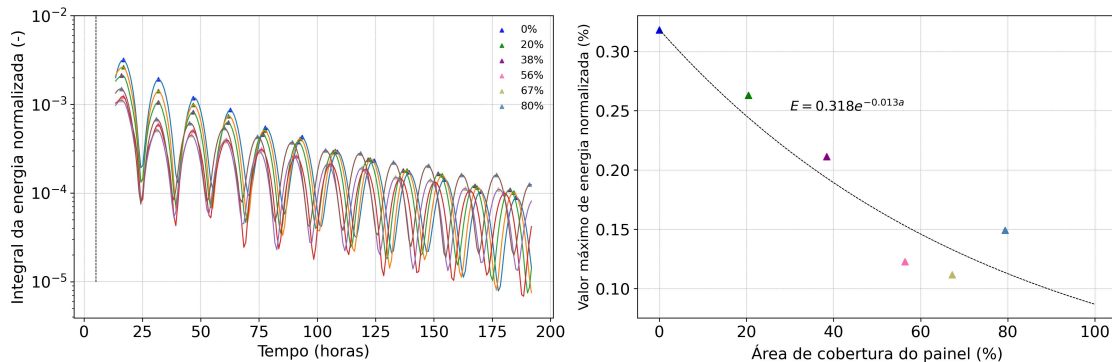


Figura 9 – Eficiência de transferência da energia cinética da onda variando a área de atuação do vento a) Série temporal da energia cinética da onda normalizada de acordo com a equação 3.2 utilizando $L = A/B$ para cada simulação. A linha vertical indica o momento em que o vento para. b) Valores de energia cinética máxima (inicial) para cada simulação. A equação é o ajuste exponencial do decaimento de energia máxima, onde a é a proporção de área coberta pelo painel

A estabilidade entre as camadas que formam a onda interna de cada cenário, pode ser verificada através do número de Wedderburn calculado com área disponível (equação 3.2). A eficiência de transferência de energia reduz com o aumento dos painéis (Figura 9).

O número de Wedderburn (W) com variação da área superficial, para a análise de eficiencia (equação 3.2) (SHINTANI et al., 2010b), é inversamente proporcional à amplitude da onda, conforme observado em outros estudos (BUENO et al., 2020; SPIGEL; IMBERGER, 1980b). Este indicador aumenta levemente com o aumento da área ocupada pelos painéis (Figura 10b), ou seja, a estabilidade do sistema aumenta. Isso ocorre devido a redução da área exposta ao vento (A) na equação 3.2). Para os cenários com cobertura de 0%, 20%, 38%, 56%, 67% e 80% os valores de W são, respectivamente, de 0,057, 0,743, 1,05, 1,39, 2,24 e 2,84. Nesta aplicação, para todas as simulações o valores de W apresentam baixa variabilidade em relação ao intervalo que caracteriza o regime de dominância das seichas internas, no qual, para os cenários criados, deve ocorrer entre 0,7 e 850,0 (SPIGEL; IMBERGER, 1980a).

4.2.3 Dissipação da energia da seicha interna

Observando a energia cinética inicial (Figura 8b), também é possível perceber que o aumento da área de cobertura da superfície do lago, pelos painéis, gera uma redução visível da amplitude inicial das seichas internas. O decaimento dos máximos valores de energia cinética ao longo do tempo (Figura 8a) mostra o amortecimento da energia da onda, apresentando um decaimento exponencial (BUENO et al., 2020), que ocorre por processos dissipativos e/ou não lineares (HORN; IMBERGER; IVEY, 2001a). Os valores de amplitude são proporcionais ao decaimento da onda, diminuindo para as curvas dos cenários com maior área de cobertura de painel. Assim, ondas de maior amplitude apresentam decaimentos mais acentuados (Figura 10a), o que corrobora com resultados observados em outro estudo (BUENO et al., 2020). Conforme observado anteriormente, este efeito está atrelado a um aumento das instabilidades das ondas de maiores amplitudes, que consequentemente, favorecem o aumento da dissipação de energia cinética turbulenta (BUENO et al., 2020).

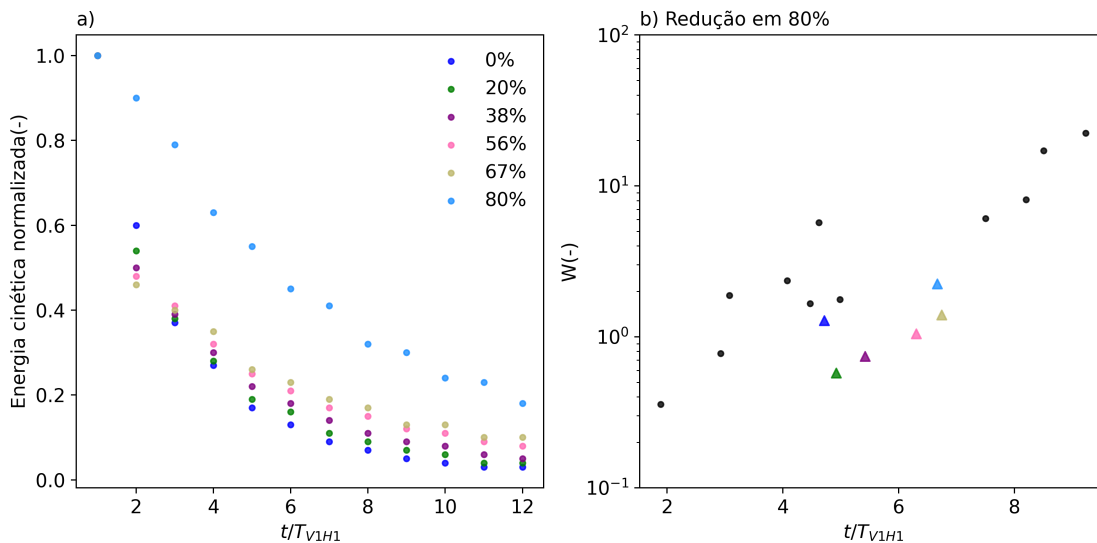


Figura 10 – Decaimento da seichas internas a) Decaimento dos máximos de energia total de cada ciclo ($2t/T$) ao longo do tempo para cada uma das simulações. b) Relação entre o número de Wedderburn e o número de ciclos de onda até que 80% da energia da seicha interna inicial seja dissipada. Pontos pretos indicam experimentos realizado por de (BUENO et al., 2020).

Como observado na Figura 8a, a energia da onda decai ao passar do tempo, pois a onda perde sua amplitude devido processos de degeneração, possivelmente processos viscosos por se tratar de uma onda linear. No entanto, o comportamento inicial do decaimento dos máximos de energia apresentou uma inversão em relação ao decaimento esperado (Figura 10a), onde o cenário de segunda maior cobertura, responsável por gerar as menores seichas internas, apresentou decaimento 25% maior (em relação a sua energia total) do que o caso sem painel. Este padrão inverso se manteve consistente para todos os cenários com painéis menores de 80% durante o primeiro ciclo da onda, indicando uma possível influência causada pela presença dos painéis. Isso não ocorre para o cenário de maior cobertura, indicando que essa onda propagante não foi gerada nesse cenário.

A onda recebe energia através do cisalhamento do vento na superfície. O painel gera a descontinuidade da ação do vento, priorizando a transferência de energia nas bordas, onde não há painéis. Apesar de parte da energia recebida nas bordas ser redistribuída pelo lago, a coluna de água com a superfície livre recebe

energia diretamente favorecendo a formação de ondas de menor comprimentos de onda (Figura 11). Essas ondas menores se propagam como ondas solitárias ao longo do lago em direções opostas e se encontram próximo ao centro do painel contribuindo com a mistura e dissipação da energia da seicha fundamental. Este efeito é semelhante ao observado em estudos de laboratório sobre colisão frontal entre duas ondas solitárias (TERLETSKA et al., 2018; MADERICH et al., 2017), que embora as condições sejam de grande variação de massa específica e os valores do número de Richardsons sejam muito maiores dos obtidos através apenas de estratificação térmica, ainda é possível comprovar a perda de energia da onda em uma colisão desse tipo.

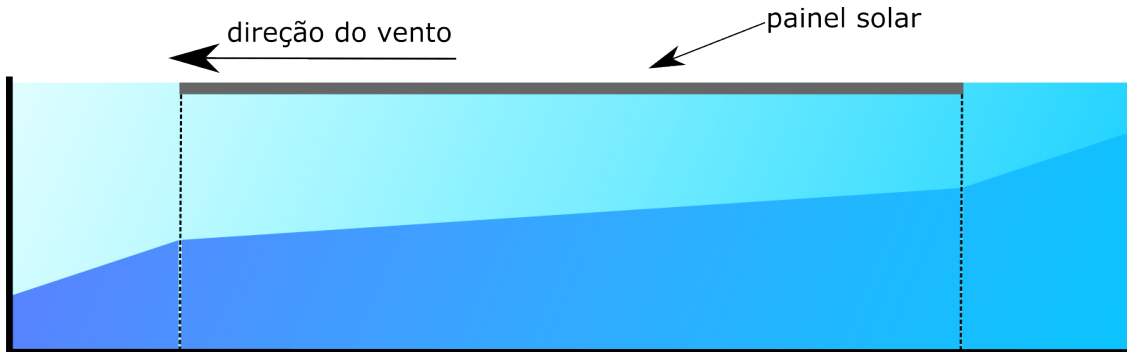


Figura 11 – Desenho esquemático da formação de ondas de maior frequência nas bordas do lago por maior contato com o vento e conseqüentemente maior energia.

A partir do perfil de temperatura da simulação para o cenário com painel cobrindo 56% da superfície do lago, pode ser analisada a formação de duas ondas propagantes nas porções expostas ao vento (Figura 12a, semelhante ao descrito no esquema ilustrado na Figura 11) antes de ser formada a onda principal ($T = 27,7$ h). Enquanto a onda da direita se propaga em direção ao centro do lago, a onda que foi formada no lado esquerdo rebate na borda do lago e volta em fase oposta (Figura 12b). O encontro dessas duas ondas internas propagantes, que ocorre antes do fim do primeiro ciclo de onda, gera uma interferência parcialmente destrutiva (Figura 12c), causando dissipação da energia do sistema. Após a colisão das ondas propagantes a onda interna continua seus ciclos, mas com menos energia, conforme podemos observar a redução da sua amplitude (Figura 12d). Esse efeito pode ter permanecido no sistema e causado o aumento da dissipação da energia da onda interna verificada durante o primeiro ciclo de onda para os casos de ondas de menor amplitude da Figura 8a, uma vez que este processo durou cerca de 10 h depois do fim do vento.

Análise espectral da seicha interna

Para investigar melhor o efeito de dissipação ocorrido nos cenários com painéis, foi analisado o espectro da energia cinética dos cenários modelados.

A análise espectral da velocidade vertical ao longo do tempo e próximo a uma das bordas do lago (Figura 13a) mostra a existência da seicha interna de 27,7 h, através do pico espectral de maior amplitude (acima do nível de significância), localizado com frequência de 10^{-5} Hz (equivalente a um período de 27,7 h).

Além do pico de menor frequência, aparecem outras oscilações de maiores frequências com significância no espectro, mas estas não poderiam representar as ondas propagantes formadas pela descontinuidade do painel, uma vez que estas ondas aparecem também para o cenário sem painel (Figura 13a). Além disso, as ondas formadas pela descontinuidade do vento ocorrem apenas uma única vez e são rapidamente dissipadas após o choque no centro do lago, o que não seria o suficiente para serem detectadas através da análise espectral.

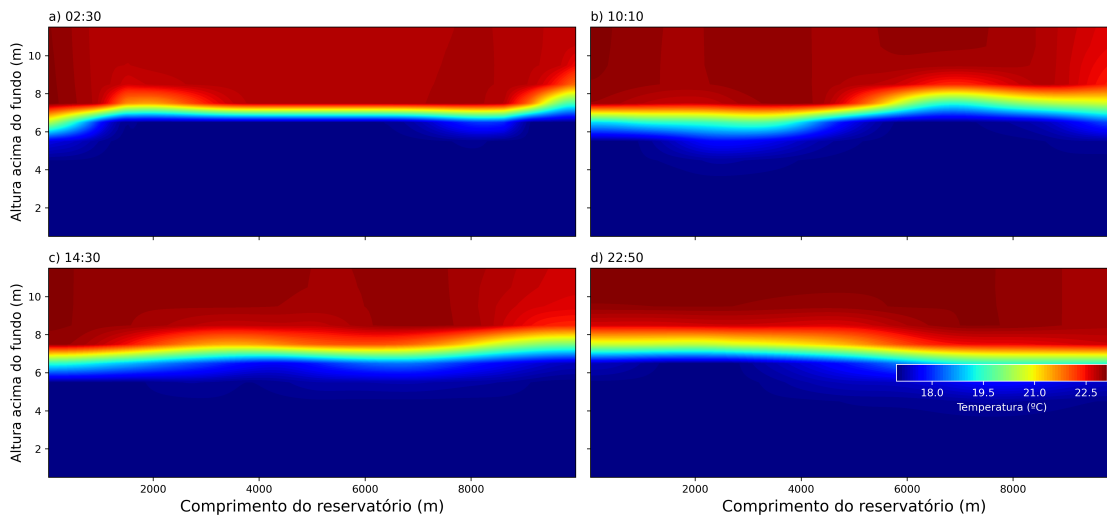


Figura 12 – Formação de ondas de maior frequência observadas através da temperatura do lago para o cenário de painel com 56% da área de superfície coberta. Nas bordas do lago ocorre a formação de ondas solitárias devido maior contato com o vento e conseqüentemente maior energia. A formação, e o progresso da onda pode ser observado pelo horário de ocorrência das figuras.

As ondas detectadas no espectro possuem período entre 5 h e 11 h com ocorrência de até 48 h (Figura 13b). Embora os períodos condizem com um processo de degeneração das seichas internas por efeitos não lineares (HORN; IMBERGER; IVEY, 2001b), geralmente, seichas internas propagantes são observadas apenas depois de alguns ciclos de onda, decorrentes da degeneração das seichas internas por interações não lineares nas ondas longas (LORKE et al., 2002). No entanto, através da análise espectral por ondaleta (Wavelets da série de temperatura (Figura 13b), as ondas internas de maior frequência são geradas ainda nos primeiros ciclos de onda, e dissipada rapidamente, ainda no segundo dia (Figura 13b). Esse tipo de onda pode estar associada as condições de transições de regime supercrítico para subcrítico, observado em condições de fortes ventos e baixo número de Wedderburn (HORN; IMBERGER; IVEY, 2001b). Esse tipo de onda, caracterizado como um ressalto hidráulico, possui escala temporal de aproximadamente meio período da onda fundamental, 27,7 h, o que a torna possível nas condições observadas pelo espectro.

4.3 Decomposição da Energia da Onda

A decomposição da energia cinética foi considerada por apresentar a energia não apenas do modo fundamental, onde ocorrem as maiores ondas, como também dos demais modos verticais e, principalmente, da energia residual. A energia residual é uma energia de fundo que não possui necessariamente padrão oscilatório nem um padrão significativo. Para este caso, toda a energia interna do lago que não está relacionada às seichas internas ($T < 29$ h) foram consideradas energias residuais. A decomposição de energia foi feita através do modelo de decomposição da velocidade horizontal, já utilizada no Lake Constance para a identificação dos diferentes modos verticais das seichas internas (BOEHRER, 2000). A Figura 14 mostra a composição de energia para os diferentes cenários de cobertura. A energia dos modos verticais superiores apresentaram valores muito pequenos, com valor máximo de 0,0017% da energia total do ciclo. Na análise da composição das energia para o primeiros cinco ciclos de onda, a energia dos modos verticais superiores representam contribuição inferior a 0,0098%. Como o sistema é dividido inicialmente em apenas duas camadas, a maior

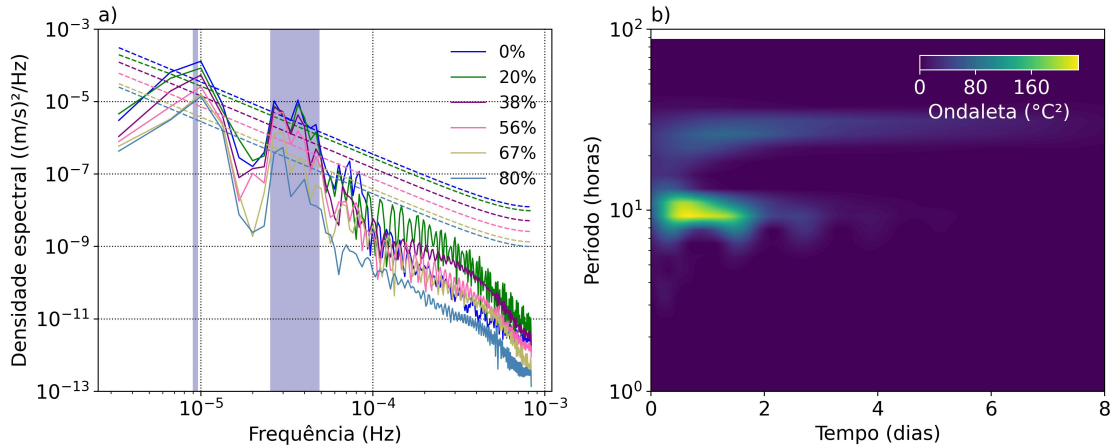


Figura 13 – Análise espectral da simulação de todos os cenários. a) Densidade espectral das ondas (linha contínua) e a curva de significância da densidade (linha tracejada). As curvas apresentam uma densidade significativa de 27,7 h, relacionada a onda longa, e ondas de maiores frequências significativa b) Ondaleta da flutuação de temperatura da termoclina com filtro passa-faixa com frequência de corte entre 1/5, 7 h a 1/11 h.

parte da energia permanece no modo fundamental. Apesar disso, ao longo do tempo, com a propagação das ondas internas do modo fundamental e o aumento da espessura do metalímnio, a composição dos modos verticais superiores aumentam, mas ainda tendem a ser pouco representativos. Dominância dos modos verticais superiores podem ser vistos em sistemas imiscíveis parcialmente divididos em duas camadas apenas quando apresenta batimetria não uniforme (BUENO et al., 2023). Portanto, a energia dos modos verticais foi desconsiderada nos resultados.

Na composição de energia total de cada cenário, relativo ao valor absoluto, para a energia máxima do primeiro ciclo é possível observar não apenas a redução da energia fundamental ao longo do aumento de painéis, mas também o aumento da energia residual a partir do painel com área proporcional a 67% (Figura 14). Isso ocorre devido a transferência de energia da seicha interna para a dinâmica que compõem a energia residual.

Fazendo essa análise para os máximos valores de energia dos primeiros cinco ciclos de onda, é possível observar um padrão, onde a composição da energia do modo fundamental é diretamente proporcional ao tamanho do sistema fotovoltaico flutuante cenários de menores painéis (Figura 15b). Com o passar dos ciclos de onda essa energia vai sendo dissipada e compõem energia residual. Com o aumento dos painéis a energia residual vai aumentando sua contribuição em relação a energia total da onda. Isso ocorre pois não há energia suficiente para formar uma seicha e a onda se dissipa facilmente em ondas menores.

Portanto, a energia interna do lago diminui com o aumento da área superficial coberta por painéis fotovoltaicos flutuantes. Até uma cobertura de 56%, a dinâmica de transporte de larga escala é mantida, apesar da redução significativa da amplitude da onda interna, que rege o processo. A partir desse cenário, com o aumento da área de cobertura dos painéis, a energia da onda interna é rapidamente dissipada, apesar da energia total não diminuir tanto em relação ao cenário de 56% (Figura 8b), a energia interna é distribuída de outra forma (Figura 14). Isso impede a dinâmica de transporte longitudinal de larga escala realizada pelas seichas internas fundamentais, e da espaço para um aumento dos fluxos locais, que podem favorecer a mistura localizada nas margens, onde pode ocorrer arrebenção por ondas propagantes.

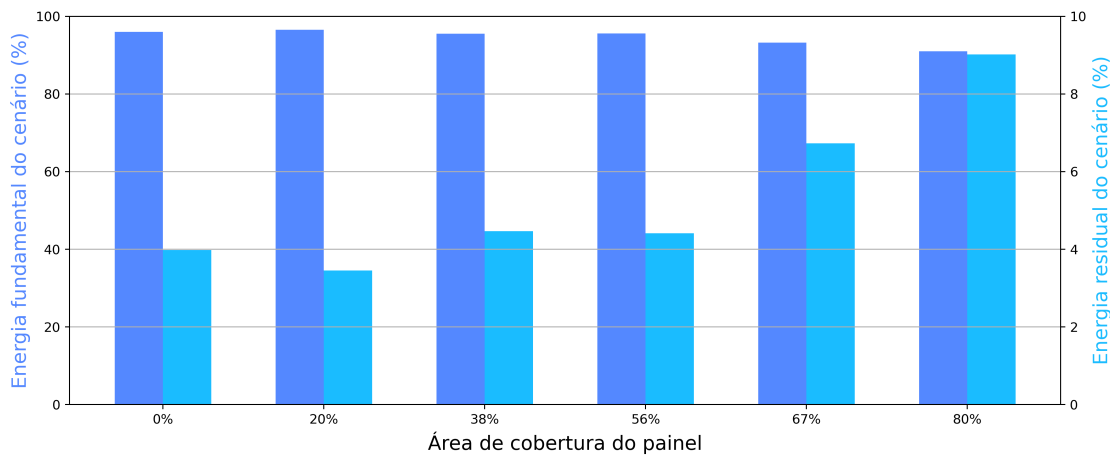


Figura 14 – Composição da energia para os diferentes cenários de cobertura de painel. Os valores são referentes a média da composição para os primeiros cinco ciclos de onda. Note que, os valores de decomposição (fundamental e residual) se complementam para cada cenário, pois a onda é composta basicamente por essas duas formas de energia.

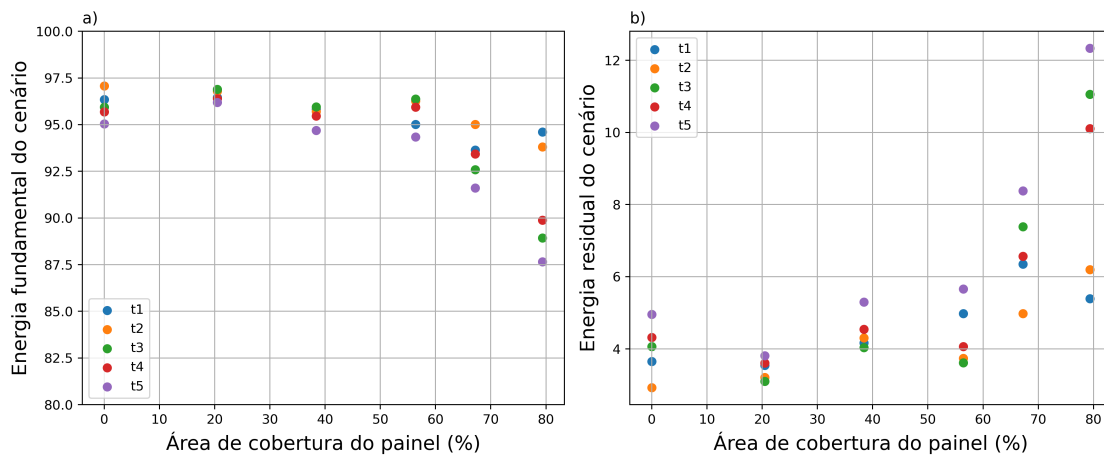


Figura 15 – Percentual da energia de a) fundamental e b) residual do máximo valor do ciclo para cada cenário

4.4 Variação da posição do painel

Com o cenário de 56% reduzindo a energia das ondas, mas mantendo a dinâmica de seicha interna do lago, foi realizada uma análise de como a disposição do painel em relação a direção do vento pode influenciar a dinâmica das ondas e consequentemente a mistura e transporte de massa ao longo do lago.

Na Figura 16, a energia cinética máxima da onda (normalizada pela energia do vento) para o cenário com painel de 56% (eixo y) é obtida para diferentes posições do painel ao longo do eixo transversal sob a superfície do lago. A disposição do painel foi variada cinco vezes longitudinalmente de uma margem a outra do lago mantendo a direção do vento de esquerda para a direita (Figura 5).

A descontinuidade da ação cisalhante do vento sobre a superfície da água, causada pela posição do painel, pode ter influência na energia transferida para o sistema. No caso em que o painel se encontra no centro do lago, o *fetch*, ou seja, a faixa de atuação do vento, é distribuído para as bordas (Figura 11) criando uma descontinuidade que reduz a efetividade de atuação do vento na formação das ondas internas,

onde a energia interna máxima do cenário foi de 0,0054% em relação a energia do vento. Com o painel posicionado em uma das margens do lago, a energia interna aumentou para 0,0085%, indicando um aumento de 64% em relação ao cenário com painel posicionado no centro (Figura 16). Também é possível observar uma pequena influência da posição em relação à direção do vento, onde o cenário de painel posicionado à sotavento apresentou um aumento médio de 3,4%, entre o cenário de painel à margem e posicionado entre o centro e a margem, em relação ao cenário de painel posicionado à barlavento, indicando que o maior efeito na energia transferida para onda decorre da descontinuidade do *fetch* e não da posição do painel em relação ao vento.

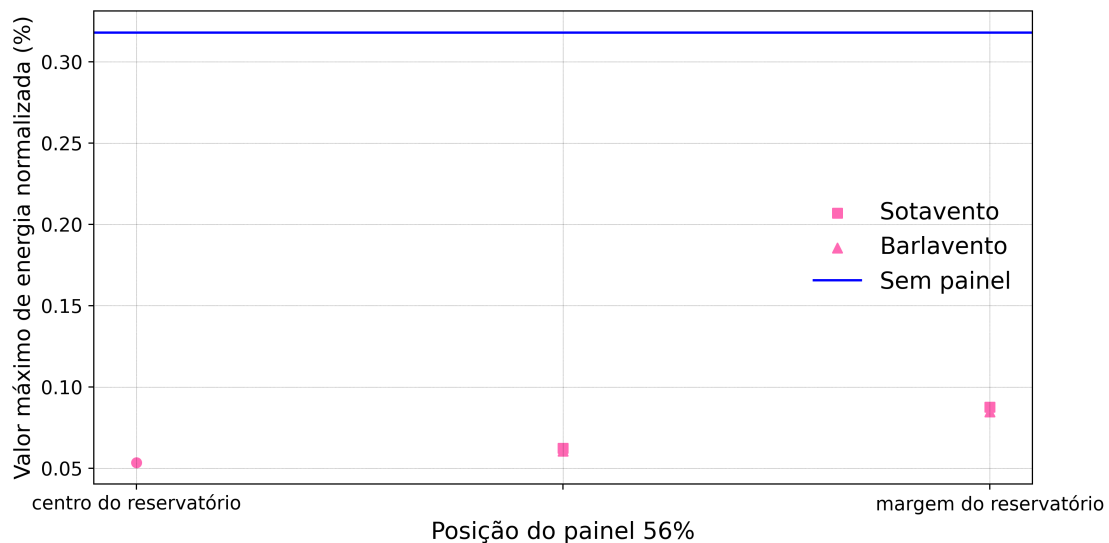


Figura 16 – Energia interna do lago relativa a energia do vento a 10 m acima da superfície. A variação da posição longitudinal do painel em relação a direção do vento

A redução da energia interna também pode estar associada a fatores de resolução numérica do modelo. Uma vez que para adicionar o efeito do painel é gerado um gradiente de velocidade entre a região de atuação do vento na superfície e a região sem atuação do vento, área coberta por painéis. Esse gradiente gerado é menor para o caso do painel nas margens, visto que há esse efeito de borda apenas em um dos lados do painel, enquanto que na posição central o painel recebe alta velocidade de vento em ambas as bordas. Adicionalmente, a presença dos painéis pode gerar gradientes horizontais na velocidade do lago, gerando cisalhamento e mais turbulência e perdas.

4.5 Implicações físicas e ecológicas

O transporte ao longo do eixo longitudinal, causado pela passagem da onda interna, é responsável pela mistura das colunas d'água e diluição de possíveis poluentes e contaminantes (BOEHM; SANDERS; WINANT, 2002). As ondas internas permitem a mistura da água rica em nutrientes da zona anoxia com a massa de água adjacente melhor oxigenada. Em casos de alta concentração de matéria orgânica devido ao processo de inundação, pode ocorrer a mistura das camadas e decomposição aeróbica da matéria orgânica (STANTON ROBERT J. et al., 2011). Estudo no Lake Iseo, comprova que a variação de oxigênio dissolvido a 95m de profundidade variou de 0 a 3mg L^{-1} decorrente da evolução de seichas internas (VALERIO et al., 2019). A ocorrência de seichas internas trás à superfície águas mais profundas e sua composição, como

nutrientes, larvas, CO₂, sedimento, ácidos e baixa oxigenação (WOODSON, 2018). Assim, pode ocorrer diminuição das trocas hipolimnéticas e no transporte longitudinal do lago visto que a energia interna do lago diminui com o aumento dos painéis fotovoltaicos flutuantes.

Quanto ao efeito de mistura sobre a temperatura das camadas, a margem do lago fica exposta a uma alta variação de temperatura devido ao movimento oscilatório da termoclina, principalmente em leitos de alta declividade (COSSU *et al.*, 2017). Essa variação da termoclina, que dura o período da seicha, influencia diretamente em características ecológicas como colonização de população de algas que vivem sobre o substrato próximos a margens (CYR, 2016) bem como em processos biológicos e metabólicos de espécies maiores, como peixes, que quando expostos a variação de temperatura a longo prazo melhoram suas capacidades de natação, fisiológicas e metabólicas por aclimatação ou adaptação, principalmente em fases iniciais de vida (MAGNUSON; CROWDER; MEDVICK, 1979; LUDSIN; DEVANNA; SMITH, 2014). Assim, os efeitos de redução das seichas internas e da ocorrência do afloramento da termoclina, acarreta em menor variação de temperatura nas margens do lago, o que podem levar a um desequilíbrio térmico e prejudicar tanto o ciclo de vida de microorganismos característicos do ambiente, quanto o desenvolvimento de espécies maiores.

Em lagos a propagação de ondas de alta-frequência, formadas pela degeneração da seicha interna ou por não linearidades, gera aumento da mistura próximo as regiões de margem, onde a termoclina interage com a batimetria do lago. A arrebentação dessas ondas pode causar o aumento da ressuspensão de sedimentos e da variação da concentração de clorofila e nutrientes desencadeando o crescimento de fitoplânctons na camada eufótica (Wu; Xue; Chai, 2023). Ondas do tipo Bore podem acarretar aumento da mistura próximo as regiões de margem, onde a termoclina interage com a batimetria do lago, devido à maior probabilidade de arrebentação (WOODSON, 2018). Assim, devido à formação de ondas propagantes, geradas através da descontinuidade do vento, existe uma implicação maior nas marges, com possível aumento da mistura nestas regiões.

5 Conclusão

Esse estudo avança o conhecimento científico a respeito da importância das seichas internas na hidrodinâmica de lagos estratificados e auxilia no entendimento interdisciplinar a respeito da limnologia física e qualidade da água. Para responder as perguntas de pesquisa, cenários com painéis fotovoltaicos de diferentes proporções de cobertura da superfície do lago foram simulados através do modelo hidrodinâmico tridimensional Delft3D em um lago prismático: (1) Com o aumento da cobertura dos painéis foi observado uma redução na amplitude da seicha interna. Como a seicha interna é gerada através da ação do vento, a presença dos painéis reduziu a transferência da energia do vento para a superfície da água causando uma redução na amplitude da seicha interna, apesar do período da onda ser o mesmo para todos os cenários; (2) A centralização da posição do painel sobre a superfície do lago reduziu a taxa de transferência da energia do vento para a onda interna. A diminuição do o *fetch* do vento, ou seja, a distância de atuação do vento, gerou descontinuidade e reduziu a efetividade da transferência de energia do vento, mesmo para casos de igual proporção de área coberta; (4) Apenas variando a posição do painel em relação as margens longitudinais, foi possível observar maior energia interna devido ao maior *fetch* de vento quando o painel esta posicionado na região de margem do lago. Esse resultado também pode acontecer devido aos gradientes de velocidade formado nas bordas do painel.

Contrariando a hipótese inicial, o mecanismo de dissipação de energia da onda não foi como o esperado: (3) o tempo de dissipação da onda interna pode ser maior com o aumento da área de cobertura dos painéis fotovoltaicos flutuantes, para cenários menores que . Apesar da energia da onda e sua amplitude diminuírem com o aumento do tamanho dos painéis, foi observado um decaimento mais acentuado entre o primeiro e segundo ciclo de onda. O decaimento de energia se deve a interferência destrutiva de duas ondas propagantes formadas nas bordas dos painéis pela ação mais intensa da energia do vento nessas colunas d'água. As ondas formadas são do tipo Bore, que se propagam na interface das camadas internas estratificadas devido a transição de regime supercrítico para supercrítico.

Os resultados desse estudo podem ser de grande interesse aos que buscam compreender as implicações da cobertura superficial de lago por painéis fotovoltaicos, uma vez que a alteração na composição da hidrodinâmica do lago pode alterar as características físicas e ecológicas do ambiente. A utilização de painéis fotovoltaicos na superfície do lago pode implicar na diminuição do transporte de massa longitudinal das trocas hipolimnéticas, desfavorecendo a mistura de calor e de substâncias entre a camada superficial e o fundo nas regiões centrais do lago. A descontinuidade do vento, esperada apenas em sistemas fotovoltaicos que ocupe áreas muito grandes, contribui para a formação de ondas propagantes. Estas ondas reduzem a amplitude da onda interna principal e, em lagos reais, a propagação destas ondas pode acarretar aumento da mistura próximo às regiões de margem, onde a termocline interage com batimetria do lago, devido à maior probabilidade de arrebentação.

Referências

- ABDELAL, Q. Floating PV; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 16, n. 3, p. 732–739, 01 2021. ISSN 1748-1317. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab001>><https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab001>.
- ALEXANDER, R.; IMBERGER, J. Spatial distribution of motile phytoplankton in a stratified reservoir: the physical controls on patch formation. *Journal of Plankton Research*, v. 31, p. 101–118, 9 2008. ISSN 0142-7873.
- ANOHN, V. V.; IMBERGER, J.; ROMERO, J. R.; IVEY, G. N. Effect of long internal waves on the quality of water withdrawn from a stratified reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 132, p. 1134–1145, 2006. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:11\(1134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1134))>[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:11\(1134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1134)).
- ANOHN, V. V.; IMBERGER, J.; ROMERO, J. R.; IVEY, G. N. Effect of long internal waves on the quality of water withdrawn from a stratified reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 132, n. 11, p. 1134–1145, 2006. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:11\(1134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1134))>[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:11\(1134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1134)).
- ASSOULINE, S.; NARKIS, K.; OR, D. Evaporation from partially covered water surfaces. *Water Resources Research*, v. 46, p. 2010WR009121, 6 2010. ISSN 0043-1397.
- ASSOULINE, S.; NARKIS, K.; OR, D. Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers. *Water Resources Research*, v. 47, 6 2011. ISSN 00431397.
- BARACCHINI, T.; HUMMEL, S.; VERLAAN, M.; CIMATORIBUS, A.; WÜEST, A.; BOUFFARD, D. An automated calibration framework and open source tools for 3d lake hydrodynamic models. *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, v. 134, p. 104787, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104787>><https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104787>.
- BOCANIOV, S. A.; ULLMANN, C.; RINKE, K.; LAMB, K. G.; BOEHRER, B. Internal waves and mixing in a stratified reservoir: Insights from three-dimensional modeling. *Limnologia*, Elsevier, v. 49, p. 52–67, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.limno.2014.08.004>><https://doi.org/10.1016/j.limno.2014.08.004>.
- BOCANIOV, S. A.; ULLMANN, C.; RINKE, K.; LAMB, K. G.; BOEHRER, B. Internal waves and mixing in a stratified reservoir: Insights from three-dimensional modeling. *Limnologia*, Elsevier, v. 49, p. 52–67, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.limno.2014.08.004>><https://doi.org/10.1016/j.limno.2014.08.004>.
- BOCANIOV, S. A.; ULLMANN, C.; RINKE, K.; LAMB, K. G.; BOEHRER, B. Internal waves and mixing in a stratified reservoir: Insights from three-dimensional modeling. *Limnologia*, v. 49, p. 52–67, 2014. ISSN 0075-9511. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0075951114000565>><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0075951114000565>.
- BOEGMAN, L.; IMBERGER, J.; IVEY, G. N.; ANTENUCCI, J. P. High-frequency internal waves in large stratified lakes. *Limnology and oceanography*, Wiley Online Library, v. 48, n. 2, p. 895–919, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.2.0895>><https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.2.0895>.
- BOEGMAN, L.; IVEY, G.; IMBERGER, J. The degeneration of internal waves in lakes with sloping topography. *Limnology and oceanography*, Wiley Online Library, v. 50, n. 5, p. 1620–1637, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.5.1620>><https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.5.1620>.
- BOEGMAN, L.; IVEY, G. N. The dynamics of internal wave resonance in periodically forced narrow basins. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 117, n. C11, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2012JC008134>><https://doi.org/10.1029/2012JC008134>.

- BOEGMAN, L.; STASTNA, M. Sediment resuspension and transport by internal solitary waves. *Annual review of fluid mechanics*, Annual Reviews, v. 51, p. 129–154, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045049>><https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045049>.
- BOEHM, A. B.; SANDERS, B. F.; WINANT, C. D. Cross-shelf transport at huntington beach. implications for the fate of sewage discharged through an offshore ocean outfall. *Environmental Science & Technology*, v. 36, n. 9, p. 1899–1906, 2002. PMID: 12026969.
- BOEHRER, B. Modal response of a deep stratified lake: western lake constance. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 105, p. 28837–28845, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2000JC900125>><https://doi.org/10.1029/2000JC900125>.
- BOUFFARD, D.; WUEST, A. Mixing in stratified lakes and reservoirs. In: *Mixing and Dispersion in Flows Dominated by Rotation and Buoyancy*. Springer, 2018. p. 61–88. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66887-1_3>https://doi.org/10.1007/978-3-319-66887-1_3.
- BUENO, R. de C.; BLENINGER, T. Lake dynamic during thermal stratified periods: internal seiche formation. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- BUENO, R. de C.; BLENINGER, T.; BOEHRER, B.; LORKE, A. Physical mechanisms of internal seiche attenuation for non-ideal stratification and basin topography. *Environmental Fluid Mechanics*, 6 2023. ISSN 1567-7419.
- BUENO, R. de C.; BLENINGER, T.; LORKE, A. Internal wave analyzer for thermally stratified lakes. *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104950>><https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104950>.
- BUENO, R. de C.; BLENINGER, T.; YAO, H.; RUSAK, J. A. An empirical parametrization of internal seiche amplitude including secondary effects. *Environmental Fluid Mechanics*, Springer, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10652-020-09767-1>><https://doi.org/10.1007/s10652-020-09767-1>.
- BUENO, R. de C.; BLENINGER, T. B. Wind-induced internal seiches in vossoroça reservoir, pr, brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, 2018. ISSN 23180331.
- CHANUDET, V.; FABRE, V.; KAAIJ, T. van der. Application of a three-dimensional hydrodynamic model to the nam theun 2 reservoir (lao pdr). *Journal of Great Lakes Research*, v. 38, p. 260–269, 6 2012. ISSN 03801330.
- COSSU, R.; RIDGWAY, M.; LI, J.; CHOWDHURY, M.; WELLS, M. Wash-zone dynamics of the thermocline in lake simcoe, ontario. *Journal of Great Lakes Research*, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 689–699, 2017.
- CUEVA, D. A.; MONZÓN, C. O.; FILONOV, A.; TERESHCHENKO, I.; COVARRUBIAS, P. L.; GONZÁLEZ, J. R. G. Natural frequencies of seiches in lake chapala. *Scientific reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 9, n. 1, p. 11863, 2019.
- CUYPERS, Y.; VINÇON-LEITE, B.; GROLEAU, A.; TASSIN, B.; HUMBERT, J.-F. Impact of internal waves on the spatial distribution of planktothrix rubescens (cyanobacteria) in an alpine lake. *The ISME journal*, Nature Publishing Group, v. 5, p. 580, 2011.
- CYR, H. Wind-driven thermocline movements affect the colonisation and growth of achnanidium minutissimum , a ubiquitous benthic diatom in lakes. *Freshwater Biology*, v. 61, 07 2016.
- DISSANAYAKE, P.; HOFMANN, H.; PEETERS, F. Comparison of results from two 3d hydrodynamic models with field data: Internal seiches and horizontal currents. *Inland waters*, Taylor & Francis, v. 9, n. 2, p. 239–260, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1580079>><https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1580079>.
- FORSYTHE, K. W.; MARVIN, C. H. Analyzing the spatial distribution of sediment contamination in the lower great lakes. *Water Quality Research Journal*, IWA Publishing, v. 40, p. 389–401, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wqrj.2005.043>><https://doi.org/10.2166/wqrj.2005.043>.

- GOUDSMIT, G.-H.; BURCHARD, H.; PEETERS, F.; WÜEST, A. Application of $k-\epsilon$ turbulence models to enclosed basins: The role of internal seiches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 107, n. C12, p. 23–1, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2001JC000954>><https://doi.org/10.1029/2001JC000954>.
- HAAS, J.; KHALIGHI, J.; FUENTE, A. de la; GERBERSDORF, S. U.; NOWAK, W.; CHEN, P.-J. Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. *Energy Conversion and Management*, v. 206, p. 112414, 6 2020. ISSN 01968904.
- HASSAN, H.; YOUSEF, M. S.; FATHY, M.; AHMED, M. S. Assessment of parabolic trough solar collector assisted solar still at various saline water mediums via energy, exergy, exergoeconomic, and enviroeconomic approaches. *Renewable Energy*, v. 155, p. 604–616, 8 2020. ISSN 09601481.
- HINGSAMER, P.; PEETERS, F.; HOFMANN, H. The consequences of internal waves for phytoplankton focusing on the distribution and production of planktothrix rubescens. *PloS one*, Public Library of Science, v. 9, p. e104359, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104359>><https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104359>.
- HINGSAMER, P.; PEETERS, F.; HOFMANN, H. The consequences of internal waves for phytoplankton focusing on the distribution and production of planktothrix rubescens. *PloS one*, Public Library of Science, v. 9, n. 8, p. e104359, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104359>><https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104359>.
- HIPSEY, M.; BRUCE, L.; HAMILTON, D. Glm-general lake model: Model overview and user information. *Perth (Australia): University of Western Australia Technical Manual*, 2014.
- HODGES, B. R.; IMBERGER, J.; SAGGIO, A.; WINTERS, K. B. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and oceanography*, Wiley Online Library, v. 45, n. 7, p. 1603–1620, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.7.1603>><https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.7.1603>.
- HORN, D.; IMBERGER, J.; IVEY, G. The degeneration of large-scale interfacial gravity waves in lakes. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 434, p. 181–207, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/S0022112001003536>><https://doi.org/10.1017/S0022112001003536>.
- HORN, D. A.; IMBERGER, J.; IVEY, G. N. The degeneration of large-scale interfacial gravity waves in lakes. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 434, p. 181–207, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/S0022112001003536>><https://doi.org/10.1017/S0022112001003536>.
- HU, F.; BOLDING, K.; BRUGGEMAN, J.; JEPPESEN, E.; FLINDT, M. R.; GERVEN, L. van; JANSE, J. H.; JANSSEN, A. B. G.; KUIPER, J. J.; MOOIJ, W. M.; TROLLE, D. Fabm-pclake – linking aquatic ecology with hydrodynamics. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 2271–2278, 7 2016. ISSN 1991-9603.
- HUBER, A. M.; PEETERS, F.; LORKE, A. Active and passive vertical motion of zooplankton in a lake. *Limnology and Oceanography*, Wiley Online Library, v. 56, n. 2, p. 695–706, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.2.0695>><https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.2.0695>.
- HUTTULA, T. Stratification in lakes. In: _____. *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 743–747. ISBN 978-1-4020-4410-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_12>https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_12.
- HYDRAULICS, W. D. *User Manual of Delft3D-FLOW—Simulation of Multi-dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments*. [S.l.], 2003.
- IMBERGER, J. *Physical processes in lakes and oceans*. American Geophysical Union, 1998. v. 54. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/CE054>><https://doi.org/10.1029/CE054>.
- IMBERGER, J. *Physical processes in lakes and oceans*. American Geophysical Union, 1998. v. 54. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/CE054>><https://doi.org/10.1029/CE054>.

- IMBERGER, J. *Flux Paths in a Stratified Lake*. American Geophysical Union (AGU), 2013. 1-17 p. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/CE054p0001>><https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/CE054p0001>.
- IMBERGER, J. *Flux Paths in a Stratified Lake*. American Geophysical Union (AGU), 2013. 1-17 p. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/CE054p0001>><https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/CE054p0001>.
- IMBERGER, J.; LOH, I.; HEBBERT, B.; PATTERSON, J. Dynamics of reservoir of medium size. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 104, p. 725–743, 6 1978. ISSN 0044-796X.
- IMBERGER, J.; PATTERSON, J. C. Physical limnology. *Advances in applied mechanics*, Elsevier, v. 27, p. 303–475, 1989. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70199-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70199-6)>[https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70199-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70199-6).
- IMBODEN, D. M. The motion of lake waters. *The Lakes Handbook*, Wiley Online Library, v. 1, p. 115–152, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9780470999271>><https://doi.org/10.1002/9780470999271>.
- IVEY, G.; WINTERS, K.; SILVA, I. D. Turbulent mixing in a sloping benthic boundary layer energized by internal waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 418, p. 59–76, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/S0022112000008788>><https://doi.org/10.1017/S0022112000008788>.
- KRANENBURG, W.; TIESSEN, M.; VEENSTRA, J.; GRAAFF, R. de; UITTENBOGAARD, R.; BOUFFARD, D.; SAKINDI, G.; UMUTONI, A.; WALLE, J. Van de; THIERY, W. et al. 3d-modelling of lake kivu: Horizontal and vertical flow and temperature structure under spatially variable atmospheric forcing. *Journal of Great Lakes Research*, Elsevier, v. 46, n. 4, p. 947–960, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.012>><https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.012>.
- LEE, H.; CHUNG, S.; RYU, I.; CHOI, J. Three-dimensional modeling of thermal stratification of a deep and dendritic reservoir using elcom model. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 7, p. 124–133, 6 2013. ISSN 15706443.
- LORKE, A.; UMLAUF, L.; JONAS, T.; WÜEST, A. Dynamics of turbulence in low-speed oscillating bottom-boundary layers of stratified basins. *Environmental Fluid Mechanics*, Springer, v. 2, p. 291–313, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1020450729821>><https://doi.org/10.1023/A:1020450729821>.
- LUDSIN, S. A.; DEVANNA, K. M.; SMITH, R. E. Physical–biological coupling and the challenge of understanding fish recruitment in freshwater lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 71, n. 5, p. 775–794, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0512>><https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0512>.
- MADERICH, V.; JUNG, K. T.; TERLETSKA, K.; KIM, K. O. Head-on collision of internal waves with trapped cores. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 24, n. 4, p. 751–762, 2017. Disponível em: <<https://npg.copernicus.org/articles/24/751/2017/>><https://npg.copernicus.org/articles/24/751/2017/>.
- MAGNUSON, J.; CROWDER, L.; MEDVICK, P. Temperature as an ecological resource. *Integrative and Comparative Biology*, v. 19, 02 1979.
- MÜNNICH, M.; WÜEST, A.; IMBODEN, D. M. Observations of the second vertical mode of the internal seiche in an alpine lake. *Limnology and oceanography*, Wiley Online Library, v. 37, n. 8, p. 1705–1719, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1705>><https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1705>.
- PANNARD, A.; BEISNER, B. E.; BIRD, D. F.; BRAUN, J.; PLANAS, D.; BORMANS, M. Recurrent internal waves in a small lake: Potential ecological consequences for metalimnetic phytoplankton populations. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, Wiley Online Library, v. 1, p. 91–109, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1215/21573698-1303296>><https://doi.org/10.1215/21573698-1303296>.
- PEETERS, F.; STRAILE, D.; LORKE, A.; LIVINGSTONE, D. M. Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate. *Global Change Biology*, v. 13, p. 1898–1909, 9 2007. ISSN 1354-1013.

- RAGOTZKIE, R. A. *Heat Budgets of Lakes*. [S.l.]: Springer New York, 1978. 1-19 p.
- ROGET, E.; SALVADÉ, G.; ZAMBONI, F. Internal seiche climatology in a small lake where transversal and second vertical modes are usually observed. *Limnol. Oceanogr.*, Wiley Online Library, v. 42, n. 4, p. 663–673, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.4.0663>><https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.4.0663>.
- ROMERO, J. I. Effect of a flood underflow on reservoir water quality: Data and three-dimensional modeling. *Archiv für Hydrobiologie*, v. 157, p. 1–25, 5 2003. ISSN 0003-9136.
- SAHU, A.; YADAV, N.; SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 815–824, 6 2016. ISSN 13640321.
- SANCHEZ, R. G.; KOUGIAS, I.; MONER-GIRONA, M.; FAHL, F.; JÄGER-WALDAU, A. Assessment of floating solar photovoltaics potential in existing hydropower reservoirs in africa. *Renewable Energy*, v. 169, p. 687–699, 5 2021. ISSN 09601481.
- SHINTANI, T.; FUENTE, A. D. L.; NIÑO, Y.; IMBERGER, J. Generalizations of the wedderburn number: Parameterizing upwelling in stratified lakes. *Limnology and Oceanography*, American Society of Limnology and Oceanography Inc., v. 55, p. 1377–1389, 2010. ISSN 00243590.
- SHINTANI, T.; FUENTE, A. de la; FUENTE, A. de la; NIÑO, Y.; IMBERGER, J. Generalizations of the wedderburn number: Parameterizing upwelling in stratified lakes. *Limnology and Oceanography*, Wiley Online Library, v. 55, n. 3, p. 1377–1389, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.1377>><https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.1377>.
- SIMON, A. *Turbulent mixing in the upper layer of lakes*. [S.l.]: Erdgenössische Technische Hochschule., No. 12272, Zürich,, Switzerland, 1997.
- SIMPSON, J.; WILES, P.; LINCOLN, B. Internal seiche modes and bottom boundary-layer dissipation in a temperate lake from acoustic measurements. *Limnology and oceanography*, Wiley Online Library, v. 56, n. 5, p. 1893–1906, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.5.1893>><https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.5.1893>.
- SIQUEIRA, M. F. M. F. . E. A. Y. A. G. Delft3d morphological modeling downstream of sergio motta reservoir dam. In: UNIVERSITY KENT, O. U. D. o. G. K. S. (Ed.). [S.l.: s.n.], 2018. p. 17–24.
- SNORTHEIM, C. A.; HANSON, P. C.; MCMAHON, K. D.; READ, J. S.; CAREY, C. C.; DUGAN, H. A. Meteorological drivers of hypolimnetic anoxia in a eutrophic, north temperate lake. *Ecological Modelling*, v. 343, p. 39–53, 1 2017. ISSN 03043800.
- SPIGEL, R. H.; IMBERGER, J. The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size. *Journal of physical oceanography*, v. 10, p. 1104–1121, 1980. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010%3C1104:TCOMLD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010%3C1104:TCOMLD%3E2.0.CO;2)>[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010%3C1104:TCOMLD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010%3C1104:TCOMLD%3E2.0.CO;2).
- SPIGEL, R. H.; IMBERGER, J. The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size. *Journal of physical oceanography*, v. 10, n. 7, p. 1104–1121, 1980. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<1104:TCOMLD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<1104:TCOMLD>2.0.CO;2)>[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010<1104:TCOMLD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010<1104:TCOMLD>2.0.CO;2).
- STANTON ROBERT J., J.; JEFFERY, D. L.; HOUSTON; GUILLEMETTE, R. N. Oxygen Minimum Zone and Internal Waves as potential Controls on Location and Growth of Waulsortian Mounds (Mississippian, Sacramento Mountains, New Mexico). SEPM Society for Sedimentary Geology, 01 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.2110/sepmfg.12.215>><https://doi.org/10.2110/sepmfg.12.215>.
- STEVENS, C.; LAWRENCE, G.; HAMBLIN, P.; CARMACK, E. Wind forcing of internal waves in a long narrow stratified lake. *Dynamics of atmospheres and oceans*, Elsevier, v. 24, n. 1-4, p. 41–50, 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0377-0265\(95\)00409-2](https://doi.org/10.1016/0377-0265(95)00409-2)>[https://doi.org/10.1016/0377-0265\(95\)00409-2](https://doi.org/10.1016/0377-0265(95)00409-2).

- STEVENS, C. L. Internal waves in a small reservoir. *J Geophys Res Oceans*, Wiley Online Library, v. 104, p. 15777–15788, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/1999JC900098>><https://doi.org/10.1029/1999JC900098>.
- TERLETSKA, K.; JUNG, K.; MADERICH, V.; KIM, K. Frontal collision of internal solitary waves of first mode. *Wave Motion*, v. 77, p. 229–242, 2018. ISSN 0165-2125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165212517301567>><https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165212517301567>.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, v. 79, n. 1, p. 61–78, 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)>[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
- VALERIO, G.; PILOTTI, M.; LAU, M. P.; HUPFER, M. Oxycline oscillations induced by internal waves in deep lake iseo. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, n. 3, p. 1763–1777, 2019. Disponível em: <<https://hess.copernicus.org/articles/23/1763/2019/>><https://hess.copernicus.org/articles/23/1763/2019/>.
- VALERIO, G.; PILOTTI, M.; MARTI, C. L.; IMBERGER, J. r. The structure of basin-scale internal waves in a stratified lake in response to lake bathymetry and wind spatial and temporal distribution: Lake iseo, italy. *Limnology and Oceanography*, Wiley Online Library, v. 57, n. 3, p. 772–786, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.3.0772>><https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.3.0772>.
- VIDAL, J.; CASAMITJANA, X.; COLOMER, J.; SERRA, T. The internal wave field in sau reservoir: Observation and modeling of a third vertical mode. *Limnol. Oceanogr.*, Wiley Online Library, v. 50, n. 4, p. 1326–1333, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.4.1326>><https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.4.1326>.
- WANG, L.; XU, B.; ZHANG, C.; FU, G.; CHEN, X.; ZHENG, Y.; ZHANG, J. Surface water temperature prediction in large-deep reservoirs using a long short-term memory model. *Ecological Indicators*, v. 134, p. 108491, 1 2022. ISSN 1470160X.
- WATSON, E. Movements of the waters of loch ness, as indicated by temperature observations. *The Geographical Journal*, JSTOR, v. 24, n. 4, p. 430–437, 1904.
- WELCH, P. 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*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>><https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>.
- WETZEL, R. *Limnology Lake and River Ecosystems*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2001. v. 6. -1024 p.
- WOODSON, C. The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, v. 10, n. 1, p. 421–441, 2018. PMID: 28796571.
- WOOLWAY, R. I.; SIMPSON, J. H.; SPIBY, D.; FEUCHTMAYR, H.; POWELL, B.; MABERLY, S. C. Physical and chemical impacts of a major storm on a temperate lake: a taste of things to come? *Climatic Change*, v. 151, p. 333–347, 11 2018. ISSN 0165-0009.
- Wu, M.; Xue, H.; Chai, F. Asymmetric chlorophyll responses enhanced by internal waves near the Dongsha Atoll in the South China Sea. *Journal of Oceanology and Limnology*, v. 41, n. 2, p. 418–426, mar. 2023.
- WÜEST, A.; LORKE, A. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of fluid mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 35, n. 1, p. 373–412, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220>><https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220>.
- WÜEST, A.; PIEPKE, G.; SENDEN, D. C. V. Turbulent kinetic energy balance as a tool for estimating vertical diffusivity in wind-forced stratified waters. *Limnology and Oceanography*, Wiley Online Library, v. 45, n. 6, p. 1388–1400, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1388>><https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1388>.

XU, Z.; GODREJ, A. N.; GRIZZARD, T. J. The hydrological calibration and validation of a complexly-linked watershed-reservoir model for the occoquan watershed, virginia. *Journal of Hydrology*, v. 345, p. 167–183, 10 2007. ISSN 00221694.

ZELJKOVIĆ, S.; PANJETA, N.; AJKUNIĆ, E.; AVDAKOVIĆ, S. Floating photovoltaic power plant and estimation of potential in bosnia and herzegovina. *BH Electrical Engineering*, v. 17, p. 1–7, 05 2023.