

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CAMPUS LITORAL NORTE
DEPARTAMENTO INTERDISCIPLINAR
ENGENHARIA DE GESTÃO DE ENERGIA

LENON AUDIBERT CISCO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA POTÊNCIA DISPONÍVEL DE UM
CONVERSOR DE GALGAMENTO SUBMETIDO AO ESTADO DE
MAR DA REGIÃO COSTEIRA DE TRAMANDAÍ-RS**

Tramandaí

2020

LENON AUDIBERT CISCO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA POTÊNCIA DISPONÍVEL DE UM
CONVERSOR DE GALGAMENTO SUBMETIDO AO ESTADO DE
MAR DA REGIÃO COSTEIRA DE TRAMANDAÍ-RS**

Este trabalho foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da atividade de ensino “Trabalho de Conclusão de Curso”, do Departamento Interdisciplinar e aprovado em sua forma final pelo(a) Orientador(a) e pela Banca Examinadora.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Bianca Neves Machado, UFRGS.

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Liércio André Isoldi, FURG.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Flavio Vanderlei Zancanaro Júnior, UFRGS.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Amir Roberto De Toni Junior, UFRGS.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Coordenadora Substituta COMGRAD-EGE:

Profa. Dra. Gabriela Pereira da Silva Maciel



Tramandaí-RS, 02 de dezembro de 2020.

ANÁLISE NUMÉRICA DA POTÊNCIA DISPONÍVEL DE UM CONVERSOR DE GALGAMENTO SUBMETIDO AO ESTADO DE MAR DA REGIÃO COSTEIRA DE TRAMANDAÍ-RS

Lenon Audibert Cisco – lenon.cisco@ufrgs.com

Bianca Neves Machado – bianca.machado@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento Interdisciplinar

Resumo. O presente trabalho propõe um estudo numérico a respeito de geração de ondas e incidência de ondas irregulares em um conversor de energia das ondas do tipo galgamento. O princípio operacional do dispositivo de galgamento consiste em uma estrutura que utiliza uma rampa para direcionar as ondas incidentes para um reservatório. A água armazenada retorna ao oceano após a passagem por uma turbina que está acoplada a um gerador de energia elétrica. O objetivo do presente estudo é a utilização da modelagem computacional para avaliação do potencial energético contido nas ondas do mar no município de Tramandaí através de um dispositivo de galgamento. Para isso, são geradas ondas irregulares realísticas que representam o estado de mar mais frequente em Tramandaí entre os anos de 2018 e 2019, e a potência teórica obtida é avaliada quando um conversor de energia das ondas de galgamento é submetido a este estado de mar. Para a análise numérica do princípio físico de funcionamento do dispositivo foi considerado um modelo computacional bidimensional, onde o conversor está inserido em um canal de ondas. As soluções das equações de conservação e da equação para o transporte da fração volumétrica foram realizadas com o código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional Fluent, baseado no Método de Volumes Finitos. O modelo multifásico Volume of Fluid foi utilizado para o tratamento da interação ar-água. Os resultados indicaram que o Fluent representou adequadamente a série de elevações da superfície livre oriunda do software Spec2Wave, que converte o estado de mar realístico em séries de elevações de superfície livre. Além disso, na avaliação da potência teórica do dispositivo de galgamento foram obtidos 471,6 W, que após avaliação de uma geração mensal deste dispositivo, representa 100% do consumo de uma escola da cidade de Tramandaí. Demonstrando assim, que a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica pode contribuir com a demanda energética municipal.

Palavras-chave: Modelagem Computacional, Ondas Irregulares Realísticas, Dispositivo de Galgamento.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com IPCC (2013), a humanidade está na iminência de uma crise climática anunciada e comprovada através de medições e predições da temperatura média do planeta, que aumenta a uma taxa acelerada nos últimos 50 anos. Ações, no sentido de ampliar o setor de energia com fontes renováveis e distribuídas de acordo com potencialidades locais, são fundamentais para redução do impacto das atividades humanas no planeta. A geração distribuída de energia é uma alternativa, pois minimiza perdas de transmissão no setor elétrico, gera empregos locais e incentiva a qualificação da mão de obra local, o que impacta positivamente nos três pilares do desenvolvimento sustentável: ambiental, social e econômico (ABGD, 2020). Neste cenário, a energia proveniente dos oceanos pode ser aproveitada, pois é uma fonte alternativa e renovável de energia.

O oceano pode ser comparado a um reservatório de energia inexplorada e, apesar de sua energia ser distribuída de forma dispersa, diversos dispositivos podem ser projetados com distintos princípios físicos de funcionamento e potencial para o aproveitamento das diferentes formas de energia do oceano: energia das ondas, energia das marés, gradientes de temperatura e de salinidade, assim como, energia das correntes marítimas (Lima, 2010; Fleming, 2012).

Estimativas indicam que a energia contida nas ondas do mar tem magnitude em torno de 10 TW (Estefen, 2006). E, segundo Cruz e Sarmento (2004), para realizar a conversão desta fonte de energia em energia elétrica, destacam-se os princípios físicos de Coluna de Água Oscilante, CAO (do inglês: OWC – *Oscillating Water Column*); Corpos Flutuantes, podendo ser de Absorção Pontual (*Point Absorbers*) ou Progressivos (*Surging Devices*) e Galgamento (*Overtopping Devices*). Estes conversores, podem ser classificados de acordo com sua localização em relação a costa como: dispositivos costeiros (*onshore*), dispositivos próximos da costa (*nearshore*) e dispositivos afastados da costa (*offshore*).

O objetivo do presente estudo é a utilização da modelagem computacional para avaliação, através de um dispositivo de galgamento, do potencial energético contido nas ondas do mar no município de Tramandaí, localizado no Litoral Norte do estado do Rio Grande do Sul, onde é encontrado o *campus* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) Litoral. Para tal, em um primeiro momento, estudou-se numericamente ondas irregulares realísticas e regulares representativas do estado de mar apresentado no município no dia 07 de abril de 2019 das 12:30 às 13:30 h. Um conjunto de ondas regulares, consiste em ondas obtidas através da solução da teoria linear de ondas, já as ondas realísticas consistem em um espectro de ondas cujo comportamento é irregular, apesar de apresentar característica ondulatória e contínua. Enquanto, em um segundo momento, realizou-se a simulação numérica do princípio físico de funcionamento do conversor de galgamento, a fim de avaliar seu desempenho quando submetido as ondas irregulares realísticas. Por fim, comparou-

se a potência teórica obtida pelo conversor de galgamento a dados reais de consumo energético de uma escola localizada no município.

A obtenção dos dados para geração das ondas regulares representativas e irregulares realísticas deu-se através do software *Spec2Wave* (Oleinik, 2019), baseado no modelo de ondas TOMAWAC (parte do sistema de modelagem Open TELEMAC-Mascaret – www.opentelemac.org), onde o software *Spec2Wave* lê um banco de dados com os estados de mar produzidos pelo TOMAWAC, convertendo-os em uma série de elevações de superfície livre e de velocidades orbitais, que posteriormente serão introduzidos como condição de contorno no Fluent. Na primeira etapa do estudo, realizou-se a verificação da geração das ondas regulares representativas; na segunda etapa, verificou-se a geração das ondas irregulares realísticas, a qual se dá impondo dados discretos transientes das velocidades orbitais de propagação das ondas como condição de contorno de entrada; na terceira e última etapa, o conversor de energia das ondas do tipo galgamento é acoplado ao canal de ondas irregulares, onde é avaliado o potencial energético do mesmo.

Destaca-se que, não foram encontrados na literatura estudos numéricos de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo galgamento considerando o estado de mar presente no município de Tramandaí. Porém, estudos numéricos do dispositivo de galgamento submetido a ondas regulares podem ser encontrados em: Machado (2016) que realizou avaliação geométrica de um dispositivo de galgamento tridimensional através do Design Construtal, Goulart (2014) que realizou uma avaliação de geometria buscando definir a razão ótima entre as dimensões da rampa do dispositivo, Lu *et al.* (2007) realizaram a simulação do dispositivo de galgamento utilizando refletores para conduzir a água para a rampa do dispositivo, Martins *et al.* (2018) também realizaram uma avaliação geométrica utilizando Design Construtal e Wan *et al.* (2019) que estudaram a simulação de um dispositivo de galgamento multi-nível, entre outros.

Quanto ao estudo numérico de dispositivos de galgamento submetidos a ondas irregulares, Martins *et al.* (2017) realizaram a comparação entre a incidência de uma onda monocromática e de um espectro de ondas para um dispositivo de galgamento, Rodrigues (2017) avaliou a potência produzida por um dispositivo de galgamento do tipo *Wave Dragon* submetido a ondas irregulares, Hubner *et al.* (2019) realizaram a comparação entre o comportamento de um dispositivo de galgamento submetido a ondas regulares e irregulares, encontrando resultados que indicam uma maior vazão de água no interior do reservatório para ondas irregulares. Por fim, em relação ao estudo da geração de ondas numéricas irregulares, Jacobsen *et al.* (2012) estudaram a utilização do software *OpenFoam* para a simulação fluidodinâmica de ondas irregulares, Higuera *et al.* (2013) estudaram a simulação de ondas irregulares utilizando o software *OpenFoam* considerando um modelo numérico tridimensional, Wang *et al.* (2015) simularam diversos parâmetros da propagação de ondas irregulares em canais de ondas e, por fim, Shen e Wan (2015) estudaram a geração numérica de ondas irregulares através de softwares de código aberto, comparando os resultados com dados reais de estado de mar.

2. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional, utilizada no presente estudo, viabiliza a simulação de sistemas, possibilitando previsão de comportamentos e otimização de geometrias, entre outras aplicações. O avanço na capacidade de processamento e armazenamento dos computadores permite a aplicação em larga escala de técnicas numéricas para a solução de problemas de engenharia (Maliska, 2004). Vale destacar que a utilização da simulação numérica, através da modelagem computacional, não substitui a pesquisa experimental e, sim, auxilia na previsão de resultados e reduz o tempo de desenvolvimento de sistemas e produtos.

A modelagem computacional é um campo multidisciplinar que envolve engenharia, matemática e ciência da computação, a fim de simular diversos fenômenos físicos descritos por sistemas de equações diferenciais e discretizados a partir de métodos numéricos. Por fim, a resolução destes métodos se dá através de algoritmos que solucionam os sistemas de equações, fornecendo os resultados (Devloo, 2005). A Fig. 1 ilustra o processo de solução de um problema físico utilizando a modelagem computacional, apresentando a sequência lógica que envolve os campos do conhecimento já mencionados.

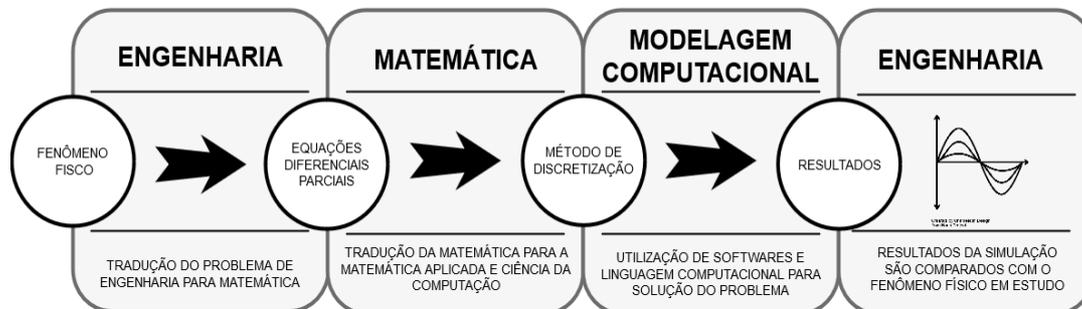


Figura 1 - Resolução de um problema através da modelagem computacional.

De uma maneira geral, a modelagem computacional realizada em softwares comerciais ou em códigos computacionais desenvolvidos, é dividida em três etapas principais. O pré-processamento é a primeira etapa, onde é definida a geometria, gerada a malha, selecionado o fluido e suas propriedades, imposta condição de contorno e condição

inicial. Enquanto, a segunda etapa, definida como solução ou processamento, ocorre em cada célula de malha e é a etapa mais importante da modelagem computacional, consistindo na resolução de um sistema de equações algébricas obtidos da equação diferencial que define o problema físico. Por fim, a etapa de pós processamento é onde se analisa o resultado, o que pode ser realizado através de planilhas de dados, obtenção de coeficientes e/ou ferramentas de visualização gráfica do fenômeno abordado, como por exemplo, imagens de topologias de campo de velocidades, pressões, fases, e, inclusive, animações (Versteeg e Malalasekera, 1995; Tannehil *et al.*, 1997).

O código que realiza as etapas da solução de um problema de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) segue estritamente as leis de conservação da física. E, conforme mencionado anteriormente, o software utilizado neste estudo é o Fluent, que é capaz de realizar uma variedade de simulações, envolvendo escoamentos, turbulência, transferência de calor e reações químicas, com possibilidades de uso acadêmico e industrial (ANSYS, 2020). Baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), o Fluent se utiliza de malhas estruturadas e não estruturadas para resolver os mais diversos tipos de simulações numéricas.

O MVF, por sua vez, é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é obtido pela integração das EDPs (Bortoli, 2000; Fortuna, 2000).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 Teoria de ondas

Ondas geradas em corpos líquidos, como oceanos, podem ser originadas a partir de diferentes forças. As ondas superficiais, são uma das formas de energia disponíveis no oceano, formadas, majoritariamente, pela interação entre o vento e a superfície de água. As forças de gravidade e de tensão superficial atuam de forma restauradora, mantendo o nível da superfície do fluido e gerando os diversos formatos e tipos de ondas, além de viabilizarem a sua propagação (Dean e Dalrymple, 1991).

A fim de entender e modelar o comportamento de uma onda, foram desenvolvidos modelos e teorias de ondas. Segundo Dean e Dalrymple (1991), estes modelos podem ser divididos entre teorias de ondas regulares e irregulares, também conhecidos como determinísticos ou aleatórios. A teoria de ondas regulares apresenta ondas com comportamentos bem definidos e constantes no tempo e no espaço, diferente do que ocorre com ondas irregulares. As principais características de uma onda estão dispostas na Fig. 2, a seguir:

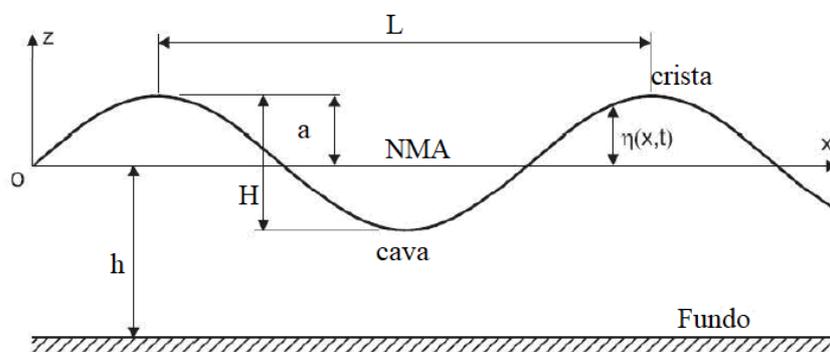


Figura 2 - Características da onda (Carneiro, 2007).

Na Figura 3 NMA é o nível médio de água, ou seja, a superfície livre do fluido em repouso (m); crista é o ponto mais alto alcançado pela onda acima do NMA; cava é o ponto mais baixo alcançado pela onda abaixo do NMA; profundidade (h) é a distância entre o fundo e o NMA (m); período (T) é o tempo que a onda leva para realizar um ciclo completo (s); amplitude (a) é a distância entre a crista e o NMA (m); altura (H) é a distância vertical entre a crista a cava (m); e, por fim, comprimento de onda (L) é a distância horizontal entre duas cristas ou duas cavas consecutivas (m).

A abordagem elementar da teoria de ondas superficiais de gravidade é a Teoria Linear de ondas ou Teoria de Airy, que pode ser aplicada em condições específicas de ondas que não se encontram na natureza (Carneiro, 2007). Nesta teoria, uma série de simplificações são assumidas, onde as principais são: o fluido é considerado incompressível; profundidade da água constante, sua amplitude é muito pequena quando comparada ao seu comprimento de onda; desconsideração de turbulência, viscosidade e tensão superficial; escoamento bidimensional e irrotacional.

A solução da teoria se concentra em encontrar os resultados para a elevação da superfície livre, obtida a partir da equação (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (1)$$

onde: x é a coordenada horizontal (m) e t o tempo (s). Além disso, os parâmetros número de onda (k) e frequência de onda (σ) são obtidos das seguintes relações:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

A utilização da teoria de ondas na modelagem do problema no Fluent, é dada através da imposição, como condição de contorno, das velocidades orbitais de propagação da onda nas direções horizontal e vertical, obtidas da derivada direcional da elevação da superfície livre em relação aos eixos ordenados. Dessa forma, as equações de velocidade de propagação da onda, quando considerada a teoria linear são:

$$u = \frac{gHk}{2\sigma} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (4)$$

$$w = \frac{H\sigma}{2} \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad (5)$$

onde: u é a componente horizontal da velocidade (m/s), w é a componente vertical da velocidade (m/s), g a aceleração da gravidade na superfície (m/s²) e z a coordenada vertical (m). Vale destacar que, conforme mencionado, existem diversas teorias de ondas, porém, neste trabalho é apresentada somente a Teoria Linear de ondas por ser a única utilizada.

3.2 Volume of Fluid (VoF)

O método *Volume of Fluid* (VoF), é utilizado para solução de sistemas de escoamentos multifásicos considerando fluidos imiscíveis. O VoF foi proposto por Hirt & Nichols (1981) e sua principal contribuição foi a introdução da fração volumétrica nas equações de movimento. Posteriormente, o método foi aprimorado e é hoje utilizado em diversos campos do conhecimento, incluindo na avaliação energética das ondas do mar (Gomes *et al.*, 2012).

A fração volumétrica (α) identifica o fluido presente em cada célula da malha, a fim de avaliar a superfície livre do escoamento. Neste estudo, foram consideradas duas fases: ar e água, portanto, quando $\alpha = 0$ o volume de controle contém apenas ar, quando $\alpha = 1$ o volume de controle contém apenas água e quando $0 < \alpha < 1$ existe uma mistura ar e água no volume de controle. Fato este, que ocorre devido à soma da fração volumétrica dentro de um volume de controle ser unitária.

O método consiste na resolução das equações da conservação da massa e quantidade de movimento para mistura, e uma equação adicional para o transporte de cada fase. As equações do modelo VoF (Schlichting, 1979; Ling *et al.*, 2001) são descritas a seguir.

Equação da conservação da massa para a mistura ar e água

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (6)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido (kg/m³) e \vec{v} é a velocidade vetorial de escoamento (m/s). A equação da conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} + S \quad (7)$$

onde $\vec{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m²), p é a pressão estática (Pa), e, por fim, S é o termo fonte que representa a dissipação de energia quando aplicada a metodologia de praia numérica. Por fim, a equação do transporte para cada uma das fases é definida por

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{\text{água}} \vec{v}) = 0 \quad (8)$$

Destaca-se que as equações de conservação da massa e quantidade de movimento são resolvidas para mistura, portanto, a viscosidade e massa específica para a mistura podem ser descritas como:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha\rho_{\text{água}} + (1-\alpha)\rho_{\text{ar}} \\ \mu &= \alpha\mu_{\text{água}} + (1-\alpha)\mu_{\text{ar}} \end{aligned} \quad (9)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/ms).

3.3 Demais Procedimentos

Para realização das simulações numéricas através do Fluent, foi considerado o problema transiente, o esquema de advecção *upwind* de primeira ordem para tratamento dos termos advectivos. A discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO (*Pressure Staggering Option*), método que utiliza o balanço discreto da continuidade para um volume de controle inercial sobre a face para computar a pressão (Gomes, 2010). Para o tratamento da fração volumétrica utilizou-se o método GEO-RECONSTRUCTION (Gomes, 2010; Machado, 2016). O acoplamento pressão-velocidade foi resolvido através do método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) (Versteeg e Malalasekera, 1995). Além disso, empregaram-se fatores de sub-relaxação para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0.3 e 0.7, respectivamente. Por fim, foram consideradas as seguintes condições de operação: aceleração da gravidade de 9.81m/s^2 , pressão atmosférica de 1 atm, massa específica do ar de 1.225 kg/m^3 e massa específica da água 998.2 kg/m^3 .

4. OBTENÇÃO DAS ONDAS REGULARES REPRESENTATIVAS E IRREGULARES REALÍSTICAS

Conforme mencionado, o objetivo deste estudo é a avaliação, através de um dispositivo de galgamento, do potencial energético contido nas ondas do mar no município de Tramandaí, localizado no Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul, onde se encontra o *campus* da UFRGS Litoral. Para tal, utilizou-se o programa *Spec2Wave* na obtenção dos dados da costa de Tramandaí no ponto de longitude $-50^\circ 6' 6.86''$ e latitude $-29^\circ 59' 53.38''$ (vide ponto P na Fig. 3), que possui uma profundidade de 12.967 m e está localizado a 2391.983 m da costa.

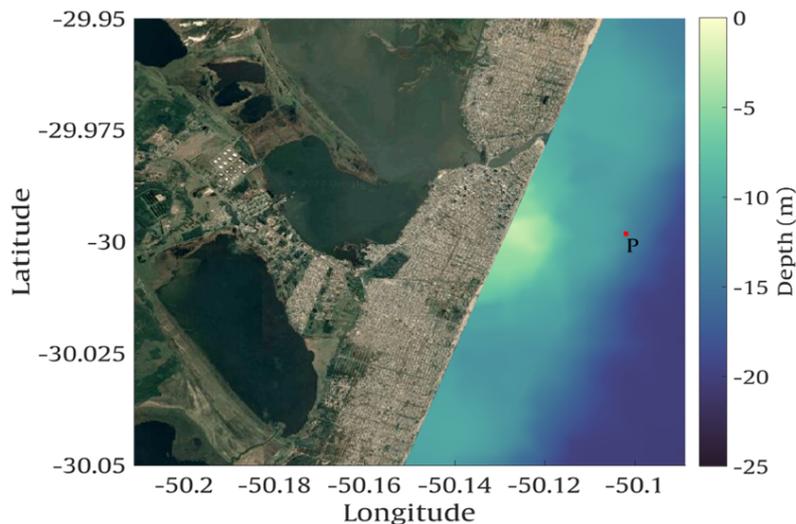


Figura 3 - Imagem de satélite com a localização do ponto onde os dados foram coletados.

O *Spec2Wave* é um programa, em fase de publicação, que lê o banco de dados de estados de mar simulados com o TOMAWAC, coleta as informações necessárias e transforma os dados espectrais do banco de informações em séries temporais de elevação da superfície livre e velocidades orbitais de propagação das ondas (Oleinik, 2019). Com isso, o *Spec2Wave* viabiliza a simulação de estados de mar realísticos através do Fluent.

O TOMAWAC, por sua vez, é um software de código aberto capaz de simular precisamente o estado de mar de uma determinada região. O programa se utiliza do Método dos Elementos Finitos (MEF) e considera ondas geradas por vento, refração do fundo, refração gerada pelas correntes e dissipação por quebra de onda, podendo calcular diversos parâmetros de interesse que permitem descrever de forma completa um estado de mar realístico (TELEMAC, 2020). Porém, no

TOMAWAC não é possível a realização de simulações de dispositivos conversores de energia das ondas. Na Fig. 4 é apresentado um resumo do processo que envolve a utilização destes softwares.

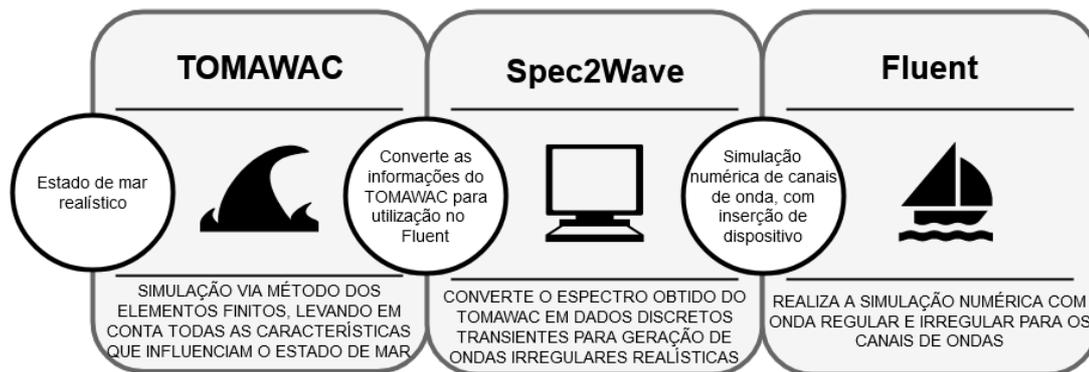


Figura 4. Processo de obtenção das ondas irregulares realísticas.

O banco de dados obtido do TOMAWAC corresponde ao litoral do estado do Rio Grande do Sul e parte do litoral do estado de Santa Catarina, compreendendo o período entre 01 de janeiro de 2018 e 31 de maio de 2019, foi utilizado como entrada no programa *Spec2Wave* (Oleinik, 2019), onde foram extraídas séries temporais de altura significativa e período médio do ponto ilustrado na Fig. 3 e denominado “Boia de Tramandai”. A definição da realização do estudo nesta localização deu-se devido à existência de um ondógrafo¹ nestas coordenadas geográficas.

Segundo Tavares (2019), objetivando que o estudo possua máxima representatividade e devido ao fato da modelagem de ondas exigir demasiado esforço computacional, se faz necessária a determinação de um curto intervalo de tempo para análise e que, a mesma, represente adequadamente as características do estado de mar da região. Dessa forma, realizou-se a análise estatística, com o intuito de estimar o estado de mar mais frequente na região em questão. Para tal, elaborou-se um histograma bivariado para determinação da combinação mais frequente de altura significativa H_s e período médio T_m das ondas. Dessa forma, a Fig. 5 apresenta a recorrência dos estados de mar ao longo do período abordado, onde pode ser observado, cerca de 2700 vezes, a ocorrência do estado de mar com $H_s \approx 0.42 \text{ m}$ e $T_m \approx 3.90 \text{ s}$.

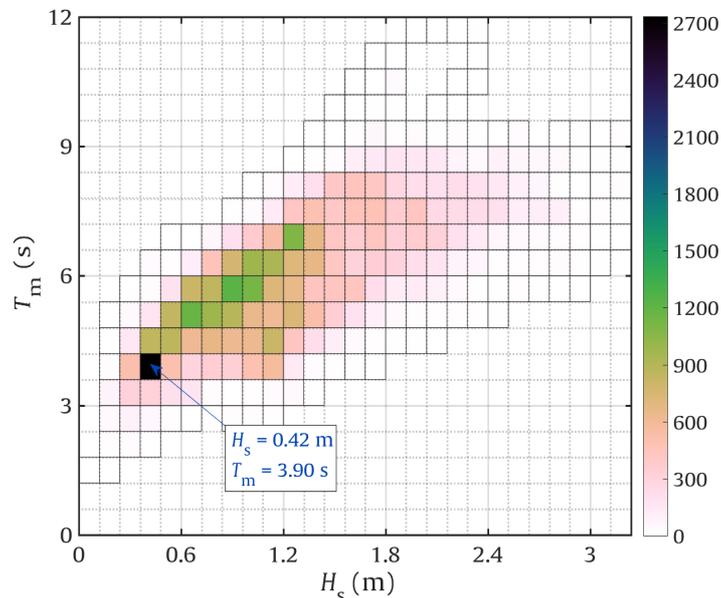


Figura 5 - Histograma identificando o clima de ondas mais frequente durante o ano de 2019.

Logo após, foram observados os espectros de variância dentro do intervalo pré-selecionado e, então, optou-se por um espectro com característica unimodal, representado na Fig. 6, com ocorrência no dia 07 de abril do ano de 2019, às 12:30 h. Vale destacar, que este espectro foi utilizado para determinação das características das ondas regulares representativas deste estado de mar apresentado na Tabela 1.

¹ <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-dos-ondografos/ondografos-lista>.

Tabela 1 - Características das ondas regulares representativas do estado de mar de Tramandaí.

Característica	Medida
Período (s)	3.9
Profundidade (m)	12.967
Altura de onda (m)	0.42
Comprimento de onda (m)	23.686

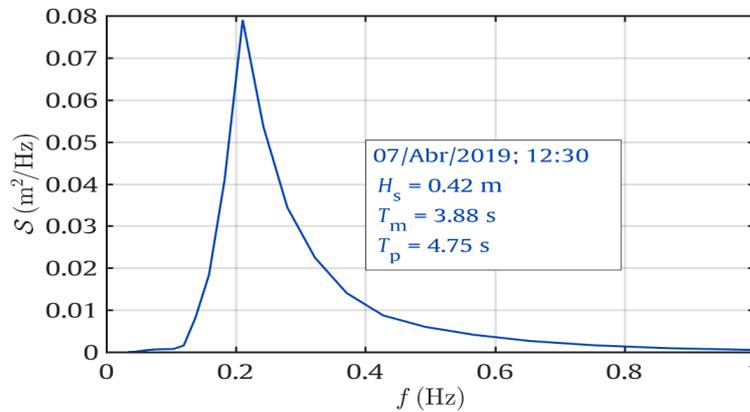


Figura 6 - Espectro de variância unimodal do estado de mar representativo.

Na sequência, o espectro de estado de mar é transformado em série de elevação da superfície livre através do programa *Spec2Wave*, aplicando a transformada inversa de Fourier no espectro do estado de mar (Rienecker e Fenton, 1982). Maiores detalhes acerca desta metodologia podem ser encontrados em Oleinik (2019). Na Fig. 7, pode ser observada a série de elevações da superfície livre ou, ainda, as ondas irregulares realísticas obtidas a partir do espectro de variância unimodal, ocorrida no município de Tramandaí em 07/04/2019. Por fim, de modo a viabilizar a simulação numérica no Fluent, considerou-se o período de uma hora.

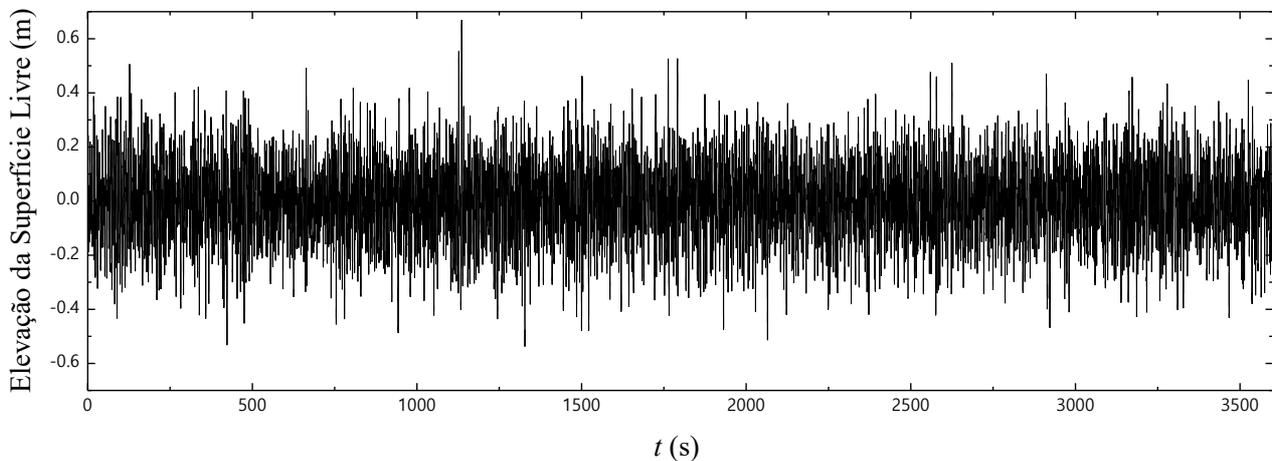


Figura 7 – Ondas irregulares realísticas ocorridas no município de Tramandaí em 07/04/2019 das 12:30 às 13:30 h.

A fim de replicar o estado de mar no Fluent se faz necessária a conversão da série de elevação da superfície livre em um perfil de velocidades orbitais de propagação da onda nos sentidos vertical e horizontal, procedimento este, que também ocorre através do programa *Spec2Wave*. Segundo Tavares (2019), essa transformação é fundamental, visto que a elevação obtida é válida apenas na superfície e a análise do modelo fluidodinâmico (Fluent) percorre integralmente a coluna de água na simulação, por conseguinte, a informação sobre as características do comportamento da água abaixo da superfície estaria incompleta. As velocidades orbitais das partículas de água são obtidas através das Eqs. (4) e (5) e impostas como condição de contorno no software Fluent para geração das ondas irregulares realísticas.

5. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS

Conforme já mencionado, o objetivo deste trabalho é, através da modelagem computacional, avaliar o potencial de energia das ondas do mar disponível para conversão em energia elétrica no município de Tramandaí através de um dispositivo de galgamento. Para isso, se faz necessário identificar o clima de ondas vigente nesta localidade, objetivando que os resultados possuam a maior fidelidade possível. Para tal, este estudo é subdividido em três momentos: no primeiro, é realizado o estudo das ondas regulares representativas, onde foi avaliada a qualidade da malha e do passo de tempo. Destaca-se que, neste caso, a verificação se dá através da comparação da onda obtida numericamente com a expressão analítica da Teoria Linear (Eq. 1) para a elevação da superfície livre; no segundo momento, propõe-se a verificação da geração de ondas irregulares realísticas que representam o estado de mar encontrado no município. Neste caso, a verificação dá-se através da comparação, na região de imposição da onda, da elevação da superfície livre obtida no Fluent com a elevação obtida no *Spec2Wave*; por fim, no terceiro momento, realizou-se um teste do princípio físico de funcionamento de um dispositivo para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. O dispositivo escolhido foi do tipo galgamento, para o qual será determinada a potência teórica disponível.

5.1 Verificação das Ondas Regulares Representativas

Neste estudo apresenta-se um modelo numérico bidimensional de um canal de ondas em escala real. As dimensões do mesmo seguem as recomendações de Gomes (2014b). Com isso, o canal de ondas apresenta comprimento $L_c = 5L$, profundidade de $h = 12.967$ m, a qual é encontrada na região, e altura total aproximada, $H_c = 15.39$ m. A Fig. 8, ilustra o domínio computacional utilizado na geração das ondas regulares representativas do estado de mar.

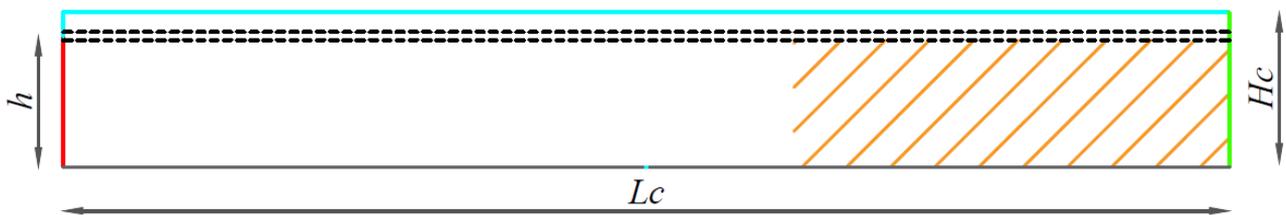


Figura 8 - Ilustração do domínio computacional para simulação das ondas regulares representativas.

No que tange as condições iniciais, considera-se que o fluido está em repouso e que a superfície livre de água possui altura h . Quanto às condições de contorno, na parede esquerda do canal (linha vermelha) tem-se a velocidade de entrada, gerada pela imposição de um campo de velocidades dado através das Eq. (4) e (5). Com relação às demais condições de contorno, na região superior da parede esquerda do canal, assim como na superfície superior do mesmo (linha azul), tem-se a condição de contorno de saída de pressão; na superfície inferior do canal as velocidades são prescritas como nulas, ou seja, foi adotada a condição de contorno de não deslizamento e impermeabilidade. Por fim, na parede final do canal de ondas (linha verde) é imposta a condição de perfil hidrostático (saída de pressão), este contorno recebe uma nomenclatura distinta pois atuará na condição de praia numérica (hachura em laranja).

A utilização da praia numérica dá-se através da inserção do termo fonte, que representa um sumidouro na equação da conservação da quantidade de movimento, Eq. (7), em uma região definida do canal do ondas (ver Fig. 8). De acordo com Lisboa (2016), esta metodologia tem como objetivo reproduzir o efeito de amortecimento e dissipação das ondas que ocorre em praias quando as mesmas se aproximam da costa e interagem com o fundo. No caso da simulação de canais de ondas, a inserção da praia numérica evita a reflexão das ondas que chegam no final do mesmo, minimizando erros e possibilitando a realização de um maior tempo de simulação.

O termo fonte é representado pela equação (Lisboa, 2016):

$$S = -\left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|\right] \left(1 - \frac{z - z_{fs}}{z_e - z_{fs}}\right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s}\right)^2 \quad (10)$$

onde: C_1 é denominado coeficiente de resistência linear, C_2 coeficiente de resistência quadrática, V a velocidade do fluido no ponto (m/s) e z_{fs} , z_e , x_e e x_s são os pontos iniciais e finais do domínio da praia numérica (m). Destaca-se que são utilizadas recomendações de Lisboa (2016) quanto aos coeficientes $C_1 = 20$ e $C_2 = 0$, assim como, quanto ao comprimento da praia numérica, definido em $2L$.

Com relação à discretização espacial, utilizou-se uma malha do tipo *stretched*, recomendada por Barreiro (2009) e Gomes *et al.* (2012), que aplica maior refinamento na região da superfície livre. Sendo assim, o domínio computacional foi dividido verticalmente em três regiões e horizontalmente em uma região. Quanto à discretização vertical, a região acima da superfície livre, que contém somente ar, foi subdividida em 20 volumes de malha; a região da superfície livre, que contém a interface ar-água, subdividida em 20 volumes por H ; a região abaixo da superfície livre, que contém apenas

água, subdividida em 60 volumes. Enquanto, referente à discretização horizontal, foram utilizados 50 volumes por L . A discretização do domínio computacional é apresentada na Fig. 9.

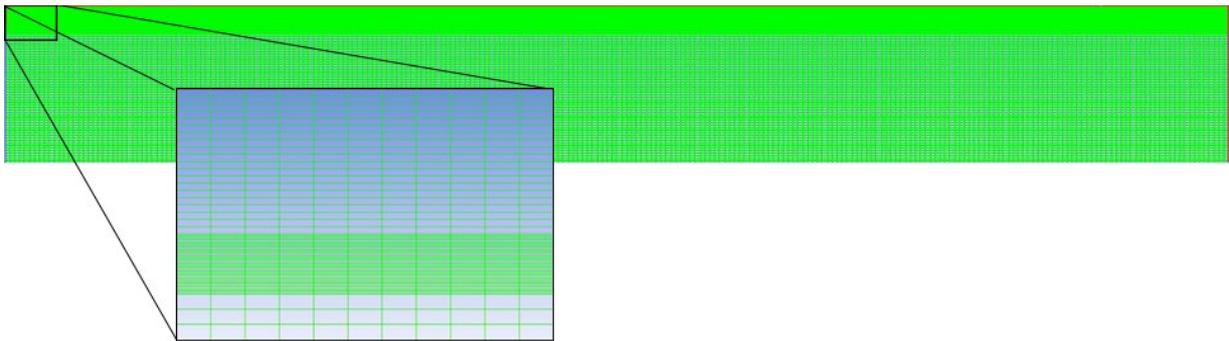


Figura 9 - Ilustração da malha com maior refinamento na região de interesse.

5.2 Verificação da Geração das Ondas Irregulares Realísticas

O estudo de verificação da geração das ondas irregulares realísticas também se utiliza de um modelo numérico bidimensional de um canal de ondas em escala real. Porém, neste caso, a batimetria encontrada na região é considerada no fundo do canal (vide Fig. 11). Além disso, conforme Machado *et al.* (2017), o modelo apresenta a necessidade de discretizar a região de imposição da condição de contorno de velocidade de entrada (vide Fig. 10 - pontilhado amarelo e vermelho), viabilizando assim, que dados discretos transientes de velocidades orbitais de propagação das ondas sejam impostos como contorno de entrada.

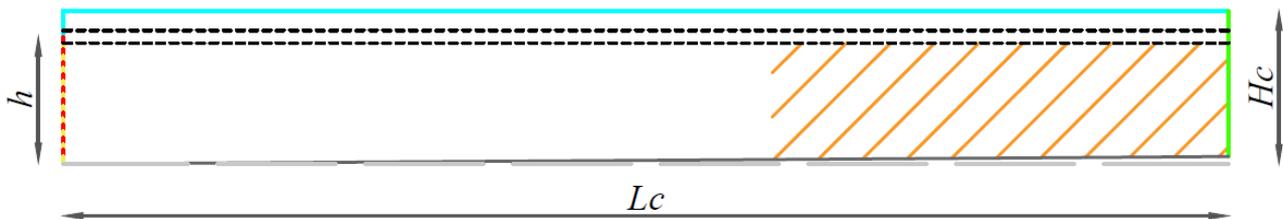


Figura 10 - Ilustração do domínio computacional para simulação das ondas irregulares realísticas.

Vale destacar que, neste estudo, esta região foi discretizada em 20 subregiões com 0.64 m, o que representa aproximadamente, a altura da maior onda encontrada na série temporal. Este procedimento foi adotado devido à recomendação, para utilização de malha *stretched*, da região de maior refino de malha correspondente a uma altura de onda acima (+ H) e uma abaixo (- H) do NMA. Quanto às condições de contorno, destaca-se que são análogas às apresentadas na seção 5.1.

Com relação às outras características do canal de ondas (Fig. 11) manteve-se as dimensões adotadas no modelo numérico apresentado anteriormente. Conforme mencionado, para este estudo considerou-se a batimetria do local, que apresenta um desnível de 0.79 m entre a profundidade inicial e a profundidade final do canal. Quanto à discretização espacial, também se utilizou de uma malha *stretched*, assim como no domínio anterior. Para tal, a discretização vertical na região da superfície livre foi baseada na altura das ondas regulares representativas, ou seja, empregou-se 20 volumes de malha cada 0.64 m.

5.3 Potência Teórica Obtida por um Dispositivo de Galgamento

Neste estudo objetiva-se avaliar a potência obtida por um dispositivo de galgamento (vide Fig. 11) quando submetido ao estado de mar realístico apresentado no município de Tramandaí. Dispositivo este, cujo princípio de funcionamento baseia-se em um reservatório sobrelevado em relação ao NMA, onde as ondas incidem em uma rampa e, devido a sua energia, galgam a mesma transportando massa de água para o reservatório. A massa de água acumulada, quando devolvida ao mar, aciona turbinas hidráulicas de baixa queda acopladas a geradores elétricos. Dessa forma, o dispositivo realiza a conversão da energia cinética das ondas em energia elétrica (Relatório WavEC, 2004).

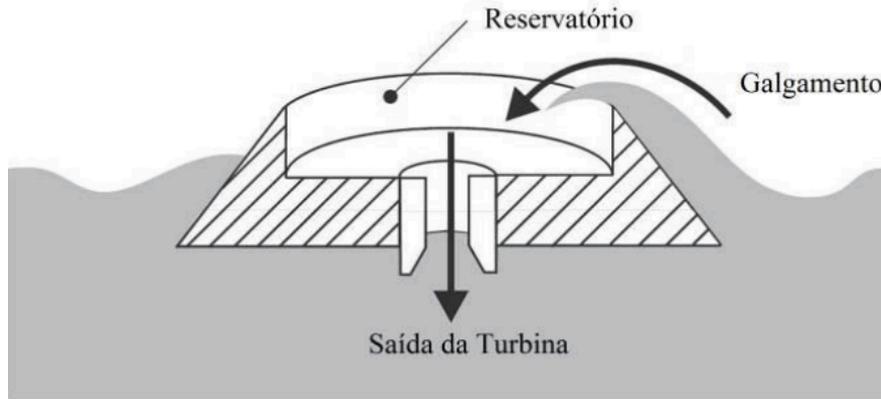


Figura 11 - Princípio físico do dispositivo de galgamento (Machado, 2016).

A determinação da potência teórica disponível no conversor de energia das ondas do tipo galgamento, pode ser obtida a partir de (Martins, 2016):

$$P_d = \frac{mgh_a}{t_f} \quad (11)$$

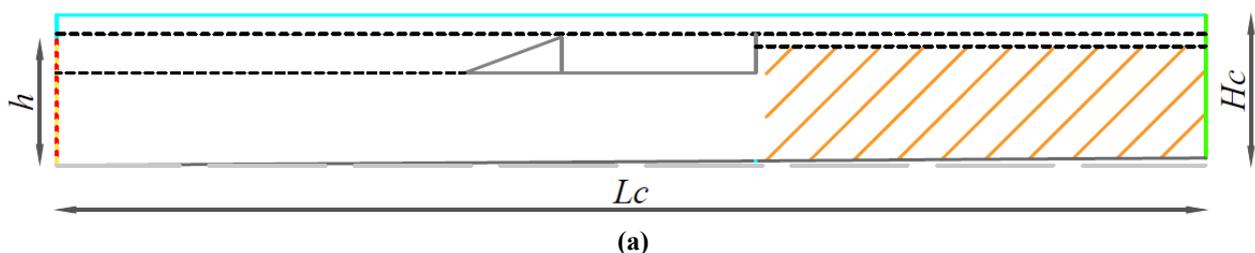
onde, P_d é a potência disponível (W), m é a massa de água no reservatório (kg) (obtida a partir da relação entre a massa específica da água e o volume de água no interior do reservatório), h_a a altura de água no reservatório (m) e t_f é o intervalo de tempo do estudo (s). Já a energia teórica gerada através deste dispositivo, pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$E = \frac{P_d t_{total}}{3.6 \times 10^6} \quad (12)$$

onde E é a energia teórica gerada (kWh) e t_{total} é o período de tempo analisado (s).

O domínio computacional, assim como nos casos anteriores, consiste em um canal de ondas bidimensional com comprimento total $L_c = 5L$, $H_c = 18,39 \text{ m}$ (a altura do tanque foi elevada para a inserção do dispositivo) e $h = 12,967 \text{ m}$. A região da imposição do contorno de entrada foi discretizada como no estudo de geração da onda irregular, a condição de praia numérica empregada no final do canal e a batimetria do local foi considerada. A geometria do dispositivo foi adaptada a partir dos resultados obtidos por Goulart (2014), onde a razão ótima entre a altura do reservatório (H_1) e a base da rampa (L_1) é $\frac{H_1}{L_1} = 0,34$. Mantendo esta razão como parâmetro para adaptação das dimensões do dispositivo de galgamento, foi aplicada a relação de proporcionalidade e o parâmetro escolhido foi a altura de onda. No estudo de Goulart (2014), a onda utilizada contém $H = 1 \text{ m}$. Sendo assim, a razão entre as alturas de onda resulta em 2.38.

Desta forma, as dimensões propostas por Goulart (2014) para o dispositivo de galgamento foram reduzidas em 2.38 vezes, o que viabilizou a construção da geometria tendo como base a razão $\frac{H_1}{L_1}$ otimizada. Assim, as dimensões do dispositivo de galgamento simulado neste estudo são $L_1 = 9,1147 \text{ m}$, $L_R = 20 \text{ m}$ e $H_1 = 3,098 \text{ m}$. Além disso, vale destacar que o dispositivo está localizado no canal de forma que logo após seu reservatório inicia o comprimento de $2L$ para imposição da condição de praia numérica. Com relação às condições de contorno, são impostas as mesmas do estudo anterior, com exceção da condição de não deslizamento e impermeabilidade imposta ao dispositivo de galgamento. Na Fig. 12, é possível visualizar o domínio computacional utilizado contendo o dispositivo de galgamento.



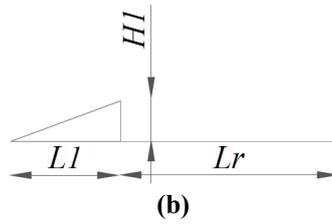


Figura 12 - Ilustração do domínio computacional para ondas irregulares realísticas: (a) canal de ondas irregulares com o dispositivo de galgamento inserido; (b) dispositivo de galgamento com dimensões.

6. RESULTADOS

6.1 Estudo de Verificação das Ondas Regulares Representativas do Estado de Mar

Para verificar as ondas regulares representativas obtidas através da metodologia utilizada, empregou-se a estratégia de comparação da solução numérica com a onda analítica para a movimentação da superfície livre da água obtida através da Eq. (1), que consiste em gerar a onda no canal e observar a variação na posição da superfície livre. Vale destacar que, a onda gerada analiticamente possui as mesmas características da onda numérica, as quais podem ser observadas na Tab. 1.

Visto que se trata de um problema transiente e visando obter maior precisão dos resultados, realizou-se estudos de avaliação da qualidade do passo de tempo. Para avaliação da qualidade de passo de tempo foram testadas as razões: $T/39$, $T/49$, $T/78$, $T/390$ e $T/500$, onde, a última razão é apresentada em Gomes *et al.* (2014a) e indicada para estudos de geração de ondas regulares. Para comparação entre os resultados numéricos e analíticos foram utilizadas as médias MAE (*Mean Absolute Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), de acordo com as equações a seguir (Chai, Draxler 2014):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i|^2} \quad (14)$$

Os resultados obtidos são dispostos na Tab. 2, onde foram calculadas as médias considerando a posição $x = 25$ m no canal de ondas. Os tempos de processamento para cada um dos casos também são apresentados. Para todas as simulações o tempo total foi $t = 180$ s.

Conforme pode-se observar na Tabela 2, para todos os passos de tempo analisados as diferenças MAE e RMSE foram de aproximadamente 1%. Destaca-se que o passo de tempo $T/500$ foi o que apresentou o menor valor, porém o tempo total de processamento deste caso foi o maior entre os estudados, sendo de 56.78 h. Enquanto, para o passo de tempo $T/390$ o tempo total de simulação foi reduzido em aproximadamente 31% e as médias MAE e RMSE não apresentaram variação significativa em relação às obtidas para o passo de tempo $T/500$. Portanto, visto a redução do tempo total de processamento, ou seja, a diminuição do esforço computacional, optou-se por utilizar o passo de tempo $T/390$.

Tabela 2 - Comparação dos passos de tempo analisados.

Passo de tempo (s)	MAE (m)	RMSE (m)	Tempo de processamento (h)
$T/39$	0.01447	0.01694	3.83
$T/49$	0.01351	0.01595	4.23
$T/78$	0.01255	0.01487	8.96
$T/390$	0.01091	0.01291	38.93
$T/500$	0.01075	0.01272	56.78

Na Figura 13, apresenta-se a comparação da onda numérica gerada neste estudo com a onda analítica predita pela Eq. (1) na posição $x = 25$ m. Para análise do fenômeno vale considerar duas faixas temporais no gráfico. Na primeira, $0 \leq t \leq 15$ s, observa-se que o escoamento da onda parte do repouso e, em função da inércia do mesmo, as primeiras cristas e cavas geradas no canal são mais amortecidas, o que leva a desvios consideráveis quando comparadas aos resultados analíticos. Posteriormente, para $t > 15$ s, a altura da superfície livre da onda assume um comportamento cíclico

estável, onde MAE é de 0.01091 m e RMSE de 0.01167 m. De uma forma geral, observa-se que, ao considerar o passo de tempo $T/390$ o modelo numérico utilizado neste estudo representa de forma satisfatória a geração da onda.

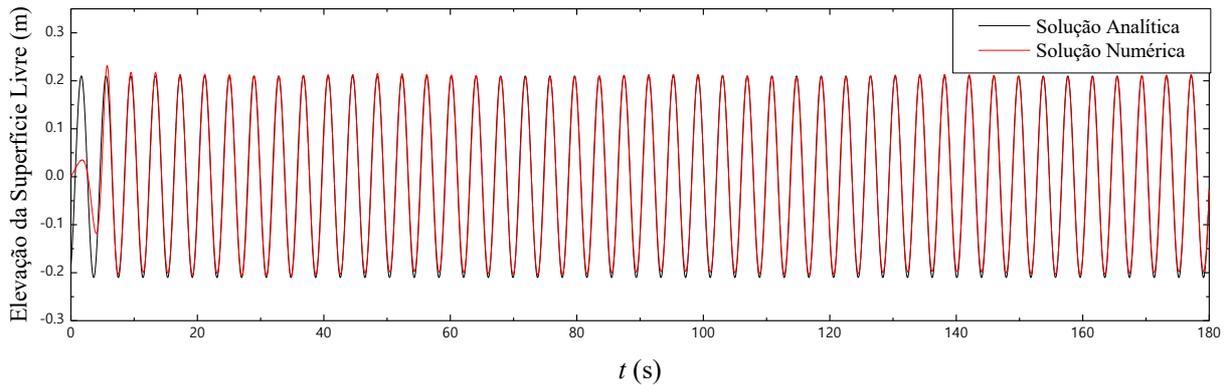


Figura 13 – Verificação das ondas regulares representativas.

6.2 Estudo de Verificação da Geração das Ondas Irregulares Realísticas

Para verificar a metodologia de geração das ondas irregulares realísticas, utilizou-se a estratégia de comparação da elevação da superfície livre obtida através do *Spec2Wave* com a solução numérica. Neste caso, conforme mencionado anteriormente, a geração da onda dá-se através da imposição de velocidades orbitais verticais e horizontais de propagação da onda considerando as discretizações da região de imposição do contorno de entrada. A Fig. 14 apresenta a comparação qualitativa da série de elevações da superfície livre gerada através do *Spec2Wave* com a série obtida através no Fluent. Vale destacar que, ambas as séries foram obtidas na posição $x = 0$ m do canal de ondas.

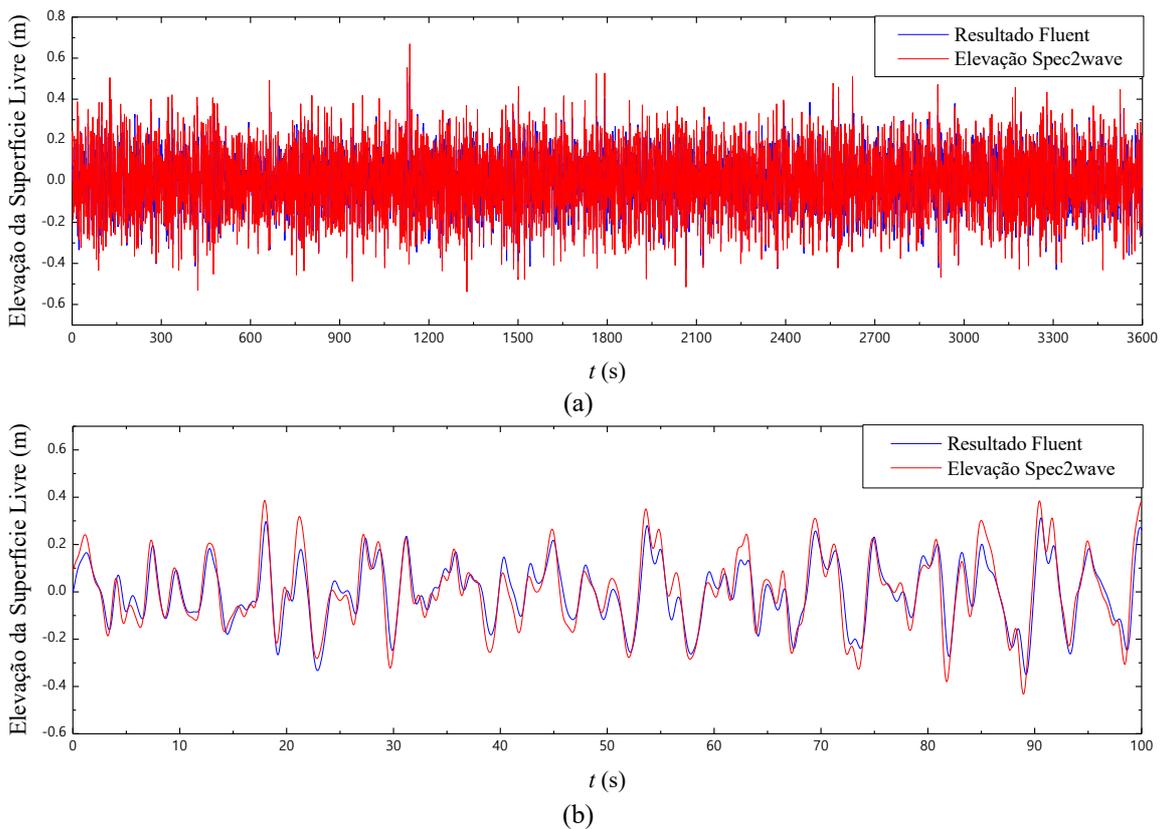


Figura 14 – Verificação de geração das ondas irregulares realísticas através da comparação das séries de elevação da superfície livre obtidas no *Spec2Wave* e no Fluent: (a) considerando os 3600 s e (b) considerando os primeiros 100 s de simulação.

Conforme pode-se observar, a Fig. 14 (a) apresenta a série de elevações da superfície livre ao longo dos 3600 s de simulação. Enquanto, a Fig. 14 (b), apresenta os primeiros 100 s de simulação, possibilitando visualizar que onda gerada no Fluent apresenta uma atenuação na elevação da superfície livre quando comparada à série oriunda do *Spec2Wave*. De modo a realizar a análise quantitativa desta diferença entre as séries, os valores de MAE = 0.0534 m e RMSE = 0.0675

m, foram determinados pelas Eqs. (13) e (14), respectivamente. Vale destacar que, estas diferenças ocorrem devido às simplificações realizadas na transformação da série de elevação da superfície livre em perfis de velocidades orbitais da onda. E, além disso, devido à condição inicial de repouso imposta ao fluido no Fluent. Apesar destas pequenas diferenças, é possível observar na Fig. 14 (b) que as ondas irregulares geradas no Fluent apresentam, qualitativamente, a mesma tendência de elevação de superfície livre do *Spec2Wave*. Em outras palavras, o modelo hidrodinâmico reproduz de maneira adequada as ondas irregulares do estado de mar realístico da região de estudo.

6.3 Determinação da Potência Teórica Obtida por um Dispositivo de Galgamento

Este estudo consiste em analisar numericamente a massa de água incidente no reservatório do dispositivo de galgamento inserido em um canal de ondas realísticas, ou seja, ondas irregulares que representam a elevação da superfície livre existente no município de Tramandaí – RS no dia 7 de abril de 2019 das 12:30 às 13:14. Conforme já mencionado, o objetivo deste estudo é a avaliação da potência teórica obtida por este dispositivo, para tal, foram considerados 2673 s de simulação, tendo em vista que, a partir deste instante o reservatório do dispositivo transborda, o que pode ser observado na Fig. 15.

Inicialmente, foi analisada a vazão mássica (kg/s) incidente no reservatório do dispositivo de galgamento ao longo do tempo. Destaca-se que, o monitoramento da massa de água incidente no reservatório ocorre através de uma sonda horizontal localizada na entrada do mesmo. Conforme pode-se observar na Fig. 15, para os primeiros instantes de simulação não houve galgamento, isso ocorre devido à geração das primeiras ondas no canal e ao tempo necessário para que incidam e galguem a rampa do dispositivo. A partir de $t = 34$ s inicia-se o fenômeno de galgamento. Posteriormente, para os demais tempos de simulação, o galgamento ocorre de forma cíclica e intermitente. Destaca-se, ainda, que o maior pico de vazão mássica ocorre em aproximadamente 630 s e o menor em aproximadamente 2200 s. Por fim, ao final dos 2673 s de simulação observou-se uma vazão média de água de 320.9 kg/s.

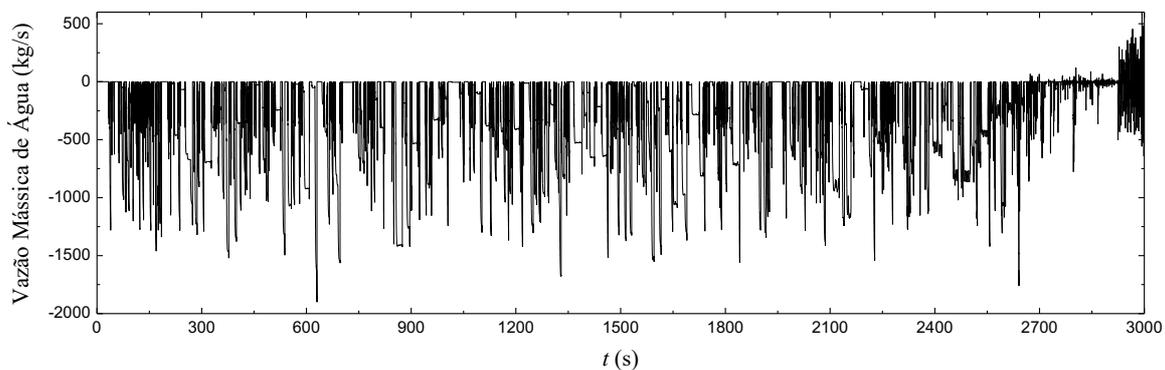


Figura 15 - Vazão mássica instantânea em função do tempo considerando 3000 s.

Na Figura 16 é apresentado o comportamento transiente da série de ondas irregulares realísticas geradas no canal de ondas numérico, onde é possível observar a fase água (em azul) e a fase ar (em vermelho). Vale destacar que, as topologias das fases em função do tempo são obtidas para os seguintes instantes de tempo: $t = 0$ s, 630 s, 2200 s e 2673 s. Para o instante inicial, Fig. 16 (a), é possível visualizar a condição inicial e verificar que o reservatório do dispositivo não contém água. Já na Fig. 16 (b), instante aproximado da ocorrência da maior descarga de galgamento, é possível notar massa de água se acumulando no interior do reservatório. Na Fig. 16 (c), tempo aproximado no qual ocorre a menor descarga de galgamento é possível visualizar a incidência da onda na rampa de dispositivo e uma maior massa de água no reservatório. Por fim, na Fig. 16 (d), pode-se observar o instante em que o reservatório do dispositivo transborda devido ao volume de água.

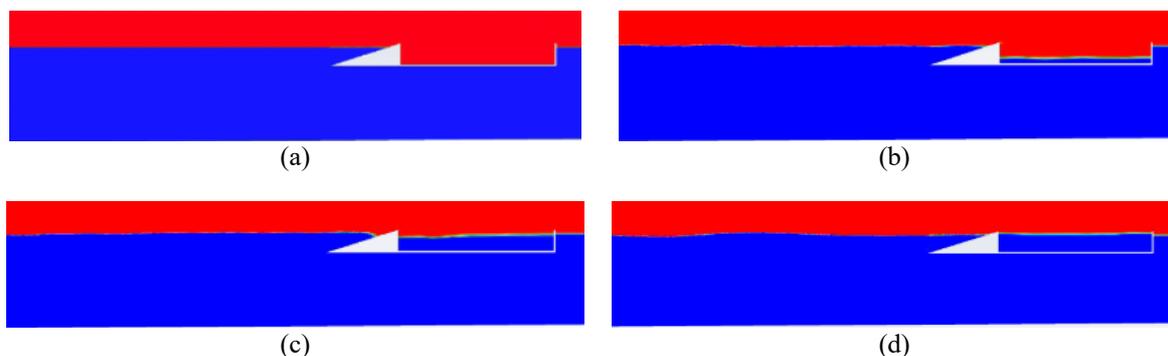


Figura 16 - Comportamento transiente das ondas irregulares realísticas para os instantes de tempo: (a) $t = 0$ s; (b) $t = 630$ s; (c) $t = 2200$ s e (d) $t = 2673$ s.

A fim de determinar a potência teórica disponível, dada pela Eq. (11), realizou-se a medição do nível de água no interior do reservatório do dispositivo de galgamento. Para isso, utilizou-se três sondas verticais: a primeira, a 5 m de sua parede esquerda; a segunda, localizada no centro do reservatório; e, a terceira, a 5 m da parede direita do mesmo. Observou-se, então, o nível de água captado por cada sonda ao final dos 2673 s de simulação, com o objetivo de calcular a altura média de água no interior do reservatório. Calculou-se, também, a média entre as três sondas ao longo do tempo de simulação, vide Fig. 17.

Na Figura 17, observa-se uma tendência linear da elevação do nível de água no interior do reservatório, ou seja, um indicativo que a quantidade de água galgada apresenta um comportamento cíclico nos primeiros 2000 s de simulação. Assim, o nível médio de água no interior do reservatório pode ser descrito pela Eq. 15, com um fator de ajuste $R^2 = 0.994$,

$$H_{Int} = 0.0009 t + 0.1344 \quad (15)$$

onde H_{Int} é a altura de água no interior do reservatório (m).

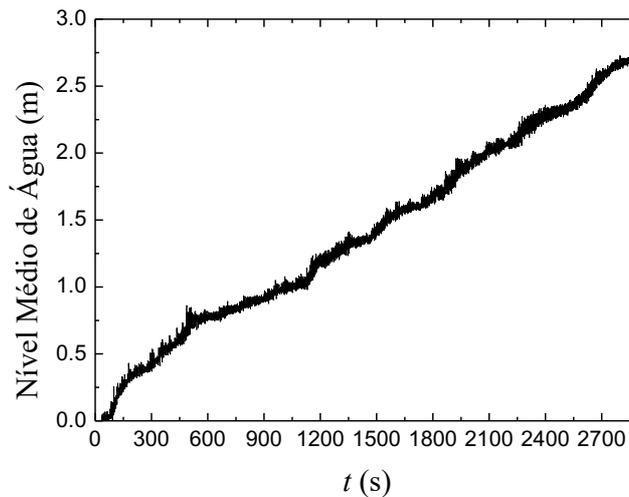


Figura 17- Nível médio de água no interior do reservatório em função do tempo de simulação.

De posse da altura média de água no interior do reservatório, $h_a = 2.52$ m, obteve-se uma massa de água acumulada, ao longo dos 2673 s, igual a $m = 50327.05$ kg. O intervalo tempo t_f considerado para o cálculo da potência disponível compreende o momento que ocorre o primeiro galgamento, $t_1 = 34$ s, até o momento onde o nível no reservatório começa a interferir na sonda, apresentando o retorno da massa de água incidente, $t_r = 2673$ s, causando interferência nos dados. Com base nestes valores e através da Eq. (11), encontra-se a potência teórica disponível $P_d = 471.6$ W no dispositivo de galgamento analisado.

Com o objetivo final de comparar a potência obtida pelo dispositivo de galgamento a dados de consumo da Escola Cândido Osório da Rosa, localizada no município de Tramandaí, foram levantados dados de consumo energético da mesma, compreendidos entre os meses de dezembro de 2017 e dezembro de 2018, vide Anexo 1. Com base nestas informações, pode-se então, calcular o consumo mensal médio da escola de 318 kWh.

Para que seja possível a comparação dos dados da potência teórica disponível com a energia consumida por esta unidade educacional, considera-se que o dispositivo atue de forma contínua durante um mês sob as ondas irregulares realísticas utilizadas neste estudo. Nestas condições, a energia gerada ao longo do mês, calculada através Eq. (12), é $E = 339,56$ kWh. Portanto, a geração teórica mensal encontrada, seria suficiente para suprir 100% da demanda energética mensal da Escola Municipal Cândido Osório da Rosa no intervalo avaliado. Vale destacar que este potencial de geração é teórico e não são consideradas eficiências de equipamentos e nem perdas de transmissão e distribuição desta energia.

7. CONCLUSÕES

No presente trabalho realizou-se estudos numéricos de geração das ondas regulares representativas, geração das ondas irregulares realísticas e avaliação da potência teórica de um dispositivo de galgamento submetido ao estado de mar ocorrido no município de Tramandaí, estado do Rio Grande do Sul, no dia 07 de abril de 2019. Para tal, foi resolvido o escoamento transiente de uma mistura ar-água considerando o regime laminar. A solução numérica das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e fração volumétrica foi obtida através do MVF. O método VoF foi empregado no tratamento da interação entre as fases ar e água, permitindo a geração de ondas regulares e irregulares no canal de ondas e a análise da incidência das ondas irregulares sobre o dispositivo de galgamento.

A primeira análise realizada diz respeito à geração das ondas regulares representativas do estado de mar. Para tal, realizou-se a avaliação da qualidade de passo de tempo. Concluiu-se que, os passos de tempo avaliados não influenciaram de forma significativa na acurácia dos resultados, apresentando, entre o maior e o menor passo de tempo, diferenças MAE igual 0.0037 m e RMSE igual 0.0042 m.

Na segunda análise, avaliou-se a geração das ondas irregulares realísticas. Foi possível concluir que a simulação numérica da série irregular de elevações da superfície livre realizada no Fluent representa de maneira satisfatória a série temporal obtida do *Spec2Wave*. Destaca-se que, qualitativamente, foram representadas adequadamente cristas e cavas apresentadas nas ondas irregulares realísticas impostas e, quantitativamente, encontrou-se MAE e RMSE de aproximadamente 0.0534 m e 0.0675 m, respectivamente.

Para a análise final, o dispositivo de galgamento foi inserido no canal de ondas e submetido às ondas irregulares realísticas. A observação do comportamento transiente demonstrou que o dispositivo se comporta de maneira adequada. As ondas incidentes realizam o galgamento de forma intermitente, permitindo o acúmulo de água no reservatório. Conclui-se que, o dispositivo de galgamento analisado no presente estudo obtêm potência teórica disponível de 471.6 W, o que, baseado no consumo médio mensal e supondo uma geração constante sob essas condições, supriria as necessidades energéticas da Escola Municipal Cândido Osório da Rosa ao longo do ano de 2018.

De uma forma geral, os resultados deste trabalho foram promissores e encorajam a realização de novos estudos na área. Entre estes, sugere-se: comparar a potência teórica obtida pelo dispositivo de galgamento sujeito às ondas regulares representativas e comparar com os resultados deste estudo; comparar as ondas irregulares realísticas com dados de estado de mar obtidos através do ondógrafo; realizar o estudo de otimização geométrica de um dispositivo de galgamento considerando o estado de mar realístico; e, avaliar a potência teórica obtida por um dispositivo de Coluna de Água Oscilante submetido a incidência das ondas irregulares realísticas.

Agradecimentos

Este trabalho foi produzido ao longo do ano de 2020, durante o período da pandemia do Coronavírus-19, ano em que o isolamento social modificou de forma significativa e (até agora) permanente, a rotina de todos. Tendo isso em mente, primeiro agradeço a minha orientadora, Bianca Neves Machado, que além de ter me guiado, compartilhado seu conhecimento comigo, dedicado tanto tempo para me atender e por quem desenvolvi grande carinho, tornou este trabalho real ao me conceder acesso ao seu computador para realizar as simulações necessárias. Também agradeço a minha família, que me recebeu novamente como residente de Carlos Barbosa durante este ano, onde aprendemos a viver juntos novamente. Temo me estender se citar o nome de todos que contribuíram diretamente com este trabalho, mas não posso deixar de mencionar diretamente Andrei, Arthur e Guilherme, que me ajudaram com as figuras, conselhos e apoio. Sou muito grato a cada professora e a cada professor com quem estudei, e a todo o Campus Litoral, por todas as experiências ao longo destes 5 anos de graduação. Com este trabalho, encerro um importante ciclo de minha vida.

*“A utopia está lá no horizonte.
Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos.
Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos.
Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei.
Para que serve a utopia?
Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar.”*
Fernando Birri, citado por Eduardo Galeano, 1994.

REFERÊNCIAS

- ABGD (São Paulo). Associação Brasileira de Geração Distribuída. 2020. Geração distribuída: Conceitos e Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável. Elaborada por ABGD. Disponível em: <http://www.abgd.com.br/portal/>. Acesso em: 07 nov. 2020.
- ANSYS. Fluent: Flow Modeling & CFD Simulation. 2020. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. Acesso em: 21 maio 2020.
- Barreiro, T. G.; 2009. Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 87 p.
- Carneiro, M. L. , 2007 Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.
- Chakrabarti, S. K. 2005. Handbook of offshore engineering. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos.
- Bortoli, A. L. 2000. Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional, Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- D. V. E. Barbosa, A. L. G. Santos, E. D. dos Santos, J. A. Souza, 2019. Overtopping device numerical study: Openfoam solution verification and evaluation of curved ramps performances, International Journal of Heat and Mass Transfer 131 411–423.
- Chai, T., Draxler, R. R. 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, Maryland USA, v. 7, n. 3, p. 1247-1250. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Cruz, J.; Sarmiento, 2004. A. Energia das Ondas – Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. Instituto do Ambiente.
- D’Aquino, Carla de Abreu; Scharlau, Cesar Cataldo; Vecchia, Leonardo Casagrande dalla. 2019. Evaluation of the energy extraction of a small-scale wave energy converter. Rbrh, Florianópolis, v. 24, Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.241920180030>.
- Dean, R. G., Dalrymple, R.A. 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists. vol. 2, World Scientific, Singapura.
- Devloo, P. R. B. 2005 Simulação numérica. Multi Ciência: A Linguagem da Ciência, n. 4.
- Estefen, S. F. 2006. Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar. Disponível em: <http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=833>.
- Fleming, F. P. 2012 “Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Fortuna, A.O. 2000. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos. São Paulo: Edusp.
- Gomes, M. N. 2010. Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d’ água Oscilante para Conversão da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS.
- Gomes, M. N.; Nascimento, C. D.; Bonafini, B. L.; Santos, E. D.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O., 2012, Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter in laboratory scale”. Engenharia Térmica, v. 11, pp. 30-36.
- Gomes, M. N.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D.; Rocha, L. A. O. 2014a. Numerical Simulation of Regular Wave Propagation In Tanks. In: Luiz Alberto Oliveira Rocha E Mateus Das Neves Gomes. (Org.). Wave Propagation. 1ed. Cheyenne: Academicpublish.Org (Publishing Services Llc), V., P. 115-134.
- Gomes, M. N. 2014b. Constructal Design de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna d’água oscilante. 2014. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Goulart, M. M. 2014. Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design. 2014. 126 F. Dissertação (Mestrado) - Curso De Modelagem Computacional, Universidade Federal Do Rio Grande (FURG), Rio Grande.
- Hirt, C. W. and Nichols, B.D. 1981 Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics, 39, 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Higuera, P.; Lara, J. L.; Losada, I.J. 2013. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®. Coastal Engineering, v. 71, p. 102-118. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2012.07.002.
- Hübner, R. G. ; Oleinik, P. H. ; Marques, W. C. ; Gomes, M. N. ; Santos, E. D. Dos ; Machado, B. N. ; Isoldi, L. A. 2019. Numerical Study Comparing the Incidence Influence Between Realistic Wave and Regular Wave Over an Overtopping Device. Engenharia Térmica, V. 18, P. 46-49.
- IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacobsen, N. G. Fuhrman, D. R. Fredsøe, J. A 2011 wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®, Int. J. Numer. Meth. Fluids 70 1073–1088.

- Lima, J. A. O. 2010 Gerador de Baixa Rotação para Aproveitamento de Energia das Ondas. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Ling, L.; Yongcan, C.; Yuliang, L. 2001 Volume of Fluid (VOF) Method for Curved Free Surface Water Flow in Shallow Open Channel. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China.
- Lisboa, R. D. C.; Teixeira, P. R. D. F.; Didier, E. E. 2016. “Simulação da Propagação de Ondas Regulares e Irregulares em um Canal Bidimensional com Praia Numérica”. Em: Anais do VII SEMENGO. Rio Grande, pp. 258–266.
- Lu, Y.; Liu, H.; Wu, W.; Zhang, J. 2007. Numerical simulation of two-dimensional overtopping against seawalls armored with artificial units in regular waves. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, Volume 19, Issue 3, p. 322-329. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(07\)60065-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(07)60065-1).
- Machado, B. N. 2016. Estudo Numérico Tridimensional de um Dispositivo de Galgamento para Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica Aplicando o Método Constructal Design. 2016. 143 F. Tese (Doutorado) - Curso De Engenharia, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre.
- Maliska, C. R. 2004. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Rio de Janeiro: LTC.
- Martins, J. C. 2016. Design Construtal de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real para Diferentes Áreas de Construção e Ondas Monocromáticas. 2016. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande.
- Martins, J. C.; Goulart, M. M.; Gomes, M. N.; Souza, J. A.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; Santos, E. D. 2017. Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento Onshore Comparando a Influência de uma Onda Monocromática e de Um Espectro de Ondas. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, [S.L.], V. 6, N. 3, P. 472-488, 2 Jun. 2017. Universidade Federal do Parana. <http://Dx.Doi.Org/10.5380/Rber.V6i3.52993>.
- Martins, J. C.; Goulart, M. M.; Gomes, M. N.; Souza, J. A.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D. 2018. Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design. *Renewable Energy*, v. 118, p. 727-741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.061>
- Oleinik, H. P., W. C. Marques E E. D. P. Kirinus., 2016. “Simulação de Ondas Oceânicas na Costa Sul-Sudeste Brasileira Para Análise do Potencial Energético”. Em: *Vetor*, Rio Grande, v. 26, n. 2, p. 39-50, 2016.
- Oleinik, P. H. 2019. O programa Spec2Wave Manual do usuário, 20 p.
- Relatório do Wavec. 2004. Potencial e Estratégia de Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal. Wave Energy Center.
- Rienecker, M. M. and Fenton, J. D. 1982. A Fourier method for solving nonlinear water-wave problems: application to solitary-wave interactions. *Journal of Fluid Mechanics* 118, pp. 411–443.
- Rodrigues, I. A. Estudo do galgamento em conversor de ondas oceânicas. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017. Dissertação de mestrado.
- Schlichting, H. 1979. *Boundary Layer Theory* 7th edn. Mc Graw-Hill, Nova York, Estados Unidos, 817 p.
- Shen, Z.; Wan, D. 2015. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver. *China Ocean Engineering*, v. 30, p. 177–192. DOI: 10.1007/s13344-016-0010-1
- Tavares, G. 2019. Estudo Numérico Comparativo da Potência Disponível entre Ondas Regulares e Irregulares — Estudo de Caso de um Dispositivo de Conversão de Energia CAO na Costa de Rio Grande – RS. 2019. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande.
- TELEMAC-MASCARET. TOMAWAC: Free-surface Flow Solvers. 2020 Disponível em: <http://www.opentelemac.org/>. Acesso em: 21 maio 2020.
- Vargas, G. F. 2018 Modelagem Numérica da Hidrodinâmica e Geração de Energia dos Dispositivos Oscilantes por Translação De Ondas.. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Iph, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- Versteeg, H K; Malalasekera, W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method*. 2. ed. Harlow, England: Pearson Education Limited. 517 p.
- Wan, Z. Yao, T. Song, J. Chen, 2018. Hydrodynamic characteristics of the multilevel overtopping wave power device, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 38 1314–1326. U
- Wang, L.; Li, J.; Li, S. 2015. Numerical Simulation of Freak Wave Generation in Irregular Wave Train. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1044-1050. DOI: 10.4236/jamp.2015.38129

Anexo 1



CEEE
DISTRIBUIÇÃO

COMPANHIA ESTADUAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
- Av. Joaquim Porto Vilagova, nº 201, Prédio A Sala 721 - CEP 91415-400 Porto Alegre - RS
CNPJ: 08.487.115/0001-88 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 096/3156659
NOTA FISCAL / CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA

Nota Fiscal - Série U - 082 483 897 FAT 01-201841326792574-68

Reservado ao Fisco
5979.78C9.47B0.2576.D799.4257.C00C.1511

litinoids

Educação

Cliente e UC (Unidade Consumidora)
PREFEITURA MUNICIPAL DE TRAMANDAÍ

RUA BARÃO DO RIO BRANCO, 144,
Bairro CENTRO
TRAMANDAÍ - RS Fase: TRFASICO
Cpl: 80771001000180
Classe de Consumo Anel: PODER PUBLICO - Poder Publico Municipal

Número da UC
Código para débito em conta corrente
39688445
Bandeira Vigente: Bandeira Verde

Medição

Nº do Medidor: 32913005
Fator de Multiplicação: 1
Leitura 06/12/2018: 10301
Leitura 07/11/2018: 9907
Consumo*: 394

*Leitura Efetiva

Perdas de Transformações (%): 0,00
Fator de Potência:
Período Fiscal: 01/12/2018
Emissão: 07/12/2018
Apresentação: 17/12/2018
Próxima Leitura Prevista: 08/01/2019

Consumo	Faturamento	Vencimento	Total em Reais
394 kWh	12/2018	13/01/2019	R\$ 314,43

Descrição	Quantidade	Preço	Valor R\$
Consumo	394 kWh	0,782411	308,27
Adicional Band. Amarela			4,83
Total - Preço (1)			312,90
Serviço Postal Endereço Alternativo			1,53
Total - Outros (2)			1,53

Composição da Fatura

Distribuição	41,19
Enc. Salariais	34,35
Energia	99,41
Transmissão	19,74
Tributos	102,06
Perdas	16,15

Consumos Faturados em kWh

Mês	Consumo kWh	Consumo em kWh
2018 Dez 28	304	13,58
Nov 26	348	11,53
Out 23	312	8,75
Sep 30	321	10,70
Ago 22	265	8,28
Jul 29	294	10,13
Jun 30	312	10,40
Mai 32	357	17,40
Abr 28	454	15,65
Mar 28	381	13,48
Fev 30	230	7,86
Jan 32	350	10,83
2017 Dez 30	443	14,78

Tributos (Valores incluídos no preço)

ICMS	Base de Cálculo(R\$) 312,90	Alíquota 30,00%	R\$ 93,87
PIS/PASEP	Base de Cálculo(R\$) 312,90	Alíquota 0,65720%	R\$ 1,46
COFINS	Base de Cálculo(R\$) 312,90	Alíquota 7,15160%	R\$ 6,73

- As tarifas de energia elétrica da CEEE Distribuição tiveram reajuste médio de 8,32% para os consumidores do grupo "B", a partir de 22/11/2018, conforme Resolução Homologatória nº 2.454 da ANEEL. O não pagamento da CIP na leitura de energia não ocasiona a suspensão do fornecimento. Para tanto, o consumidor deverá procurar a Prefeitura ou postos de atendimento da CEEE-D e solicitar a exclusão da cobrança de CIP, sem prejuízo da sua cobrança diretamente pelo próprio Município. Períodos Band Tarif.: Amarela 08/11-30/11 Verde 01/12-06/12



UC: 39688445
Fatura de Energia Elétrica do Mês de Janeiro/2019

FAT: 01-201841326792574-68

Valor a pagar R\$ 314,43

83680000033

144300060007

001012018410

326792574682



Mês/Ano
12/2018

Vencimento
13/01/2019

WAVE ENERGY HARVESTING: ENERGETIC POTENTIAL ASSESSMENT IN THE CITY OF TRAMANDAÍ

Abstract. *The present work proposes a numerical study regarding the generation and incidence of irregular waves onto an overtopping device. The operational principle of an overtopping device consists in a structure that uses a ramp to guide the incoming waves to a reservoir. The stored water returns to the ocean after going through a turbine, which is coupled to an electricity generator. The goal of the present study is to employ computational modeling to evaluate the energetic potential of the waves available on the coast of Tramandaí through a overtopping device. To this end, an irregular realistic waves are generated, which represents the most frequent sea state in Tramandaí between the years of 2018 and 2019, and the theoretical power output is evaluated when an overtopping wave energy device is subject to this sea state. For the numerical analysis of the physical working principle of the device, a two-dimensional computational domain was considered, where the device is attached to a wave channel. The solutions to the conservation and volume fraction transport equations were obtained using the commercial Computational Fluid Dynamics software Fluent, based on the Finite Volume Method. The multiphase model Volume of Fluid was used to model the water-air interface interaction. The results indicate that Fluent adequately represented the input time series of free surface elevation from Spec2Wave software, which converts the realistic sea state into series of free surface elevations. Beyond that, in the overtopping device's theoretical power evaluation, 471,6 W were obtained, that after assessment of a monthly generation of this device represents 100% of the consumption of a school in Tramandaí city. Thus showing that the sea wave energy conversion into electrical energy can contribute to the city's energy demand.*

Keywords: *Computational Modeling, Realistic Irregular Waves, Overtopping Device.*