

Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Desenvolvimento de um Modelo Computacional para a Simulação de um Dispositivo de Galgamento com Turbina Savonius Acoplada

Dissertação de:
Vinicius Heidtmann Avila

Orientador:
Elizaldo Domingues dos Santos

Coorientador:
Jaifer Corrêa Martins

Maio de 2026

Dissertação - PPGEO – FURG

Vinicius Heidtmann Avila

Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

gov.br Documento assinado digitalmente
CRISTOFER HOOD MARQUES
Data: 13/07/2026 14:55:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Crístofer Hood Marques
Coordenador do PPGEO

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS
Data: 08/06/2026 11:06:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador - FURG/PPGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
JAIFER CORREA MARTINS
Data: 08/06/2026 11:16:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Jaifer Corrêa Martins
Coorientador - FURG/PPGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
LIERCIO ANDRE ISOLDI
Data: 09/06/2026 10:12:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Membro Interno - FURG/PPGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
RAFAEL ADRIANO ALVES CAMARGO GONCALVES
Data: 12/06/2026 08:36:43-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Rafael Adriano Alves Camargo Gonçalves
Membro Interno - FURG/EE

gov.br Documento assinado digitalmente
DANIELA BUSKE
Data: 08/06/2026 17:47:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Daniela Buske
Membro Externo – UFPEL

Rio Grande, 31 de março de 2026.

A958d

Santos, Guilhermino da Cruz dos
Desenvolvimento de um modelo computacional para a simulação de um dispositivo de galgamento com turbina Savonius acoplada / Vinicius Heitmann Avila - 2026.
80f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, 2026.

Orientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Coorientador: Dr.Jaifer Corrêa Martins

1. Engenharia Oceânica. 2. Simulação numérica. 3. Energia das ondas. 4. Dispositivo de galgamento. 5.Turbina Savonius. 6. Modelo de galgamento completo. I.Santos, Elizaldo Domingues dos. II. Martins, Jaifer Corrêa. III. Título.

CDU 62(26)

Catalogação na fonte: Bibliotecária Brenda Sequeira CRB10/1979

Agradecimentos

A Tainã, pelo amor, companheirismo, incentivo e, sobretudo, pela paciência demonstrada ao longo de toda esta trajetória.

À Mirela, minha filha, que ilumina minha vida e dá sentido a cada conquista.

Ao meu orientador, professor Elizaldo Domingues dos Santos, pela dedicação, empatia e constante apoio. Sua excelência profissional, competência acadêmica e comprometimento com a pesquisa foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos, pelo carinho, incentivo e confiança, que sempre me motivaram a seguir em frente e superar os desafios encontrados ao longo desta caminhada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, que possibilitou minha dedicação integral ao programa de pós-graduação durante parte do desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo

Vinicius Heidtmann Avila

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA A SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO COM TURBINA SAVONIUS ACOPLADA

O estudo foca no desenvolvimento, verificação e validação de um modelo computacional completo para simular o desempenho de um dispositivo de conversão de energia das ondas do mar do tipo galgamento (*overtopping*), que integra uma turbina Savonius em seu duto de saída. A investigação justifica-se pela necessidade global de transição para matrizes energéticas limpas, explorando o vasto e persistente potencial das ondas oceânicas. A metodologia emprega a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) baseada no Método dos Volumes Finitos para resolver as equações de transporte de quantidade de movimento e continuidade. Para lidar com a complexidade da interface entre a água e o ar, utilizou-se o modelo *Volume of Fluid* (VOF), enquanto o escoamento turbulento foi tratado com o modelo de fechamento k-ω SST. A geração das ondas no domínio numérico seguiu a Teoria de Stokes de 2ª Ordem, permitindo uma representação realista das condições marítimas. Os resultados obtidos através das simulações numéricas permitiram uma análise detalhada da hidrodinâmica do dispositivo, desde o instante do galgamento sobre a rampa até a passagem do fluido pelo reservatório e posterior descarga. Observou-se que a eficiência de conversão da turbina Savonius é intrinsecamente ligada à razão de velocidade de ponta (TSR), apresentando um desempenho superior em condições específicas de operação. O ponto de máxima eficiência foi identificado em um TSR de aproximadamente 1,59, onde o coeficiente de potência (*Cp*) atingiu seu ápice, validando a capacidade do dispositivo de extrair energia útil de um escoamento pulsante e intermitente. Além disso, a concordância dos dados com estudos experimentais prévios reforça a confiabilidade do modelo para prever o comportamento de sistemas em escala real. Conclui-se que a integração da turbina ao sistema de galgamento é uma solução técnica viável, e o modelo desenvolvido constitui uma ferramenta de engenharia robusta para a otimização geométrica e operacional de conversores de energia oceânica do tipo galgamento, auxiliando no avanço científico de tecnologias que visam a sustentabilidade e a redução da pegada de carbono.

Palavras-chave: Simulação numérica. Energia das ondas. Dispositivo de galgamento. Turbina Savonius. Modelo de Galgamento Completo.

Abstract

Vinicius Heidtmann Avila

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL MODEL FOR THE SIMULATION OF AN OVERTOPPING DEVICE WITH COUPLED SAVONIUS TURBINE

This study focuses on the development, verification, and validation of a comprehensive computational model to simulate the performance of an overtopping wave energy converter integrating a Savonius turbine within its outlet duct. The research is motivated by the global need to transition toward clean energy sources while harnessing the vast and persistent energy potential of ocean waves. The methodology employs Computational Fluid Dynamics (CFD) based on the Finite Volume Method (FVM) to solve the momentum and continuity transport equations. To address the complexity of the air–water interface, the Volume of Fluid (VOF) model was adopted, while turbulent flow was modeled using the k-ω SST turbulence closure model. Wave generation within the numerical domain was based on Second-Order Stokes Theory, enabling a realistic representation of marine conditions.The results obtained from the numerical simulations allowed for a detailed analysis of the device hydrodynamics, from the overtopping process over the ramp to the flow passage through the reservoir and subsequent discharge. It was observed that the energy conversion efficiency of the Savonius turbine is intrinsically related to the Tip Speed Ratio (TSR), exhibiting superior performance under specific operating conditions. The maximum efficiency point was identified at a TSR of approximately 1.59, where the power coefficient (*Cp*) reached its peak, thereby confirming the device's ability to extract useful energy from a pulsating and intermittent flow. Furthermore, the agreement between the numerical results and previous experimental studies reinforces the reliability of the model in predicting the behavior of full-scale systems. It is concluded that the integration of a Savonius turbine into an overtopping wave energy conversion system constitutes a technically viable solution. Moreover, the developed model represents a robust engineering tool for the geometric and operational optimization of overtopping wave energy converters, contributing to the scientific advancement of sustainable energy technologies aimed at reducing carbon emissions and environmental impacts.

Keywords: Numerical simulation. Wave energy. Overtopping device. Savonius turbine. Complete Overtopping Model.

Sumário

Página

Lista de Figuras **X**

Lista de Tabelas **XIII**

Lista de Símbolos **XIV**

Lista de Siglas **XVI**

1| Introdução **1**
1.1 Motivação 1
1.2 Revisão histórica da literatura e estado da arte 2
1.3 Objetivos 12
1.3.1 Objetivos específicos 12

2| Fundamentos de Conversão de Energia das Ondas **14**
2.1 Potencial de Energia das Ondas 14
2.2 Equipamentos de Conversão de Energia das Ondas 15
2.2.1 Dispositivo de galgamento 17
2.3 Teoria das Ondas 22
2.3.1 A Formação das Ondas 22
2.3.2 Teoria de Stokes de 2º Ordem 26
2.4 Turbinas Hidrocinéticas 27
2.4.1 Turbina Savonius 27
2.4.2 Potência de uma Turbina Hidrocinética 28

3| Modelagem Matemática **31**
3.1 Domínio Computacional 31
3.2 Método Volume of Fluid (VOF) 32
3.3 Equacionamento do Modelo Clássico *k-ω SST* 33

4| Modelagem Numérica **34**
4.1 O Método dos Volumes Finitos (MVF) 34
4.1.1 Discretização Temporal das Equações de Conservação 35
4.1.2 Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação 36
4.1.3 Resolução de Equações Aplicando o Método de Solução Segregado 36
4.1.4 Acoplamento Pressão-Velocidade 38
4.1.5 Método *Geo-Reconstruction* 38
4.2 Procedimentos Numéricos 39

4.3 Verificação e Validação do Modelo Numérico _____ 40
4.3.1 Verificação Numérica do Canal de Ondas com o Dispositivo de Galgamento sem Inserção de Turbina _____ 41
4.3.2 Validação e Verificação Numérica da Turbina Savonius em um Túnel de Vento ___ 43

5| Resultados e Discussões 47
5.1 Modelo Computacional do Dispositivo de Galgamento com a Inserção de uma Turbina do Tipo Savonius _____ 47
5.2 Resultados do Modelo Acoplado _____ 50

6| Conclusões 57

Referências 59

Lista de Figuras

Página

Figura 1.1: Ilustração do princípio de funcionamento do dispositivo do tipo galgamento. Fonte: Barros (2020). 2

Figura 1.2: *Wave Dragon*. Fonte: Tedd e Kofoed (2009). 4

Figura 1.3: Esquema do dispositivo de galgamento. Fonte: Liu *et al*. (2008). 4

Figura 1.4: Dispositivo de galgamento circular. Fonte: Nam *et al*. (2008). 5

Figura 1.5: Sea Slot-cone Generator (SSG). Fonte: Margheritini *et al*. (2009). 5

Figura 1.6: Arranjo com 5 dispositivos *Wave Dragon* instalados em um arranjo desalinhado. Fonte: Adaptado de Beels *et al*. (2010). 6

Figura 1.7: Dispositivo de galgamento circular. Fonte: Jin *et al*. (2012). 7

Figura 1.8: Ilustração de um quebra-mar com dispositivo de galgamento. Fonte: Vicinanza *et al*. (2014). 8

Figura 1.9: Dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades. Fonte: Goulart *et al*. (2015). 8

Figura 1.10: Representação esquemática do domínio computacional bidimensional do dispositivo de galgamento acoplado ao obstáculo trapezoidal no canal da onda. Fonte: Barros et al. (2023). 10

Figura 1.11 - Esquema do CROWN em múltiplos níveis. Fonte: Liu e Zhang (2024). 11

Figura 2.1: Potencial de energia das ondas ao redor do mundo em kW/m por frente de onda. Fonte: Ghosh e Prelas (2011). 15

Figura 2.2: Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas. Fonte: López *et al*. (2013). 16

Figura 2.3: Tecnologias de conversores de energia das ondas. Fonte: Goulart (2022). 17

Figura 2.4: Princípio de funcionamento do galgamento. Fonte: Barros (2020). 18

Figura 2.5: Dispositivo Tapchan: a) ilustração do esquema de funcionamento e b) imagem real do equipamento. Fonte: Martins (2016). 18

Figura 2.6: Wave Plane. Fonte: López *et al*. (2013). 19

Figura 2.7: *Wave Dragon*. Fonte: Kofoed *et al*. (2006). 20

Figura 2.8: Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do Wave Dragon vista em corte com as suas dimensões em metros. Fonte: Goulart (2022). 20

Figura 2.9: Ilustração de um dispositivo do tipo SSG: a) vista lateral e b) ilustração da instalação do dispositivo. Fonte: Margheritini *et al*. (2009). 21

Figura 2.10: Vista lateral do projeto de um dispositivo do tipo SSG. Fonte: Adaptado de Goulart (2022). 21

Figura 2.11: Vista frontal do protótipo OBREC instalado no porto de Nápoles. Fonte: Palma *et al*. (2020). 22

Figura 2.12: Elementos de uma Onda. Fonte: Dean e Dalrymple (1991). 23

Figura 2.13: Teoria das ondas. Fonte: Dean e Dalrymple (1991). 25

Figura 2.14: Aplicabilidade das teorias de ondas. Fonte: Barbosa (2016). 25

Figura 2.15: Turbina hidrocinética: a) vista horizontal e b) vista vertical. Fonte: Cavalcante (2024). 27

Figura 2.16: a) Turbina Savonius e b) linhas de corrente. Fonte: Solari (2019). 28

Figura 2.17: Coeficiente de potência (Cp) em função da velocidade de ponta do rotor (λ ou *TSR*) para diferentes modelos de turbinas.: Alam e Iqbal (2010). 30

Figura 3.1: Domínio computacional de um dispositivo de galgamento com uma turbina acoplada. 31

Figura 4.1: Técnica de discretização para o Método dos Volumes Finitos. Fonte: Maliska (2004). 35

Figura 4.2: Algoritmo de solução segregada. Fonte: Goulart (2014). 37

Figura 4.3: Construção de interface através do esquema de Geo-Reconstruction: (a) interface real e (b) interface Geo-Reconstruction. Fonte: Goulart (2014). 39

Figura 4.4: Ilustração do domínio investigado numericamente. Fonte: Martins *et al.* (2018). 41

Figura 4.5: Discretização espacial empregada no dispositivo de galgamento onshore em escala real 42

Figura 4.6: Avaliação da influência do passo de tempo nas simulações realizadas. 42

Figura 4.7: Domínio computacional do túnel de vento com turbina Savonius. Fonte: Santos (2023). 44

Figura 4.9: Malha independente do caso empregado para validação e verificação do escoamento turbulento sobre uma turbina Savonius. 45

Figura 4.10: Região próxima às pás na malha usada para validação e verificação. 45

Figura 4.11: Validação e verificação numérica do coeficiente de potência para turbina Savonius em túnel de vento. 46

Figura 5.1: Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento em escala real com uma turbina inserida. 48

Figura 5.2: Malha empregada para o caso analisado: (a) turbina em um dispositivo de galgamento, (b) detalhe de refinamento da malha das superfícies das pás. 48

Figura 5.3: Posicionamento das linhas de monitoramento no interior do duto de água do dispositivo de galgamento 49

Figura 5.4: Comparação da solução analítica da altura da onda com a solução numéricas do dispositivo de galgamento com a turbina para $\omega = 0{,}20$ rad/s obtida na 1º linha de monitoramento. 50

Figura 5.5: Desempenho da turbina Savonius em termos do coeficiente de potência para diferentes valores de TSR. 51

Figura 5.6: Comportamento instantâneo da vazão da água sobre a turbina Savonius no dispositivo de galgamento. 53

Figura 5.7: Incidência das ondas em função do tempo para os casos sem turbina: (a) $t = 54{,}0$ s, (b) $t = 56{,}0$ s, (c) $t = 58{,}0$ s e (d) $t = 60{,}0$. 55

Figura 5.8: Potência extraída da turbina em função do tempo para $\omega = 0{,}20$. 55

Figura 5.9: Gradiente de pressão do dispositivo de galgamento em função do tempo $\omega = 0{,}20$. 56

Lista de Tabelas

Página

Tabela 4.1: Métodos adotados nas simulações numéricas. 40

Tabela 4.2: Comparação dos valores da superfície livre da onda (η) em 15,0 s para os passos de tempo investigados e suas respectivas variações. 43

Tabela 4.3: Variação entre a massa de água acumulada no reservatório em função do tempo para diferentes razões de H_1/L_1. 43

Tabela 4.4: Teste de convergência de malha para validação numérica da turbina Savonius em um túnel de vento. 44

Tabela 5.1: Valores de desempenho da turbina Savonius para diferentes condições de operação. 51

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

A	Área da seção transversal [m²].
A_T	Área do canal de ondas [m²].
A_R	Área do reservatório [m²].
A_r	Área da rampa [m²].
A_t	Área do trapézio no duto de saída [m²].
C	Corda das pás da turbina Savonius [m].
C_p	Coeficiente de potência [-].
E_c	Energia cinética [J].
F	Função de combinação.
H	Altura da onda [m/s].
H_1	Altura da rampa [m].
H_2	Distância entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque [m].
H_3	Altura do trapézio no duto de saída [m].
H_{SH}	Altura do duto de saída horizontal [m].
H_T	Altura total do canal [m].
L_1	Comprimento da rampa [m].
L_2	Base menor do trapézio no duto de saída [m].
L_3	Base maior do trapézio no duto de saída [m].
L_R	Comprimento do reservatório [m].
L_T	Comprimento total do canal [m].
$\tilde{P}_k$	Termo de produção da energia cinética da turbulência.
P_{abs}	Pressão atmosférica [Pa].
P_{disp}	Potência disponível [W].
P_{turb}	Potência da turbina [W].
R	Raio [m].
Re_D	Número de Reynolds.
S	Sobreposição das pás da turbina Savonius [m].
S_T	Módulo do tensor deformação.
T	Período de onda [s].
U_R	Número de Ursell.
V	Velocidade da correnteza [m/s]
V_∞	Magnitude da velocidade de ar que chega ao domínio [m/s].
a	Amplitude da onda [m].
c	Celeridade da onda [m/s].
d	Diâmetro do rotor da turbina [m].
e	Espessura das pás da turbina Savonius [m].
f	Fração volumétrica.
g	Aceleração do campo gravitacional [m/s²].

h Distância do fundo do mar até o nível médio da água [m].
k Número de onda [m^{-1}].
k_T Energia cinética turbulenta [m^2/s^2].
m Massa do corpo [kg].
p Pressão estática [Pa].
q Vazão volumétrica [m^3/s].
t Tempo [s].
u Velocidade horizontal [m/s].
u_i Velocidade na direção i [m/s].
v Componente de velocidade [m/s].
$\vec{v}$ Vetor velocidade [m/s].
v_t Viscosidade cinemática turbulenta [m^2/s].
w Velocidade vertical [m/s].
x Coordenada espacial [m].
y Coordenada espacial [m].
z Coordenada espacial [m].

Símbolos Gregos

μ_t Viscosidade turbulenta [kg/ms].
ω_t Taxa de dissipação específica.
Δ Variação da componente em relação ao tempo ou ao espaço [-].
η Elevação da superfície livre [m].
λ Comprimento de onda [m].
μ Viscosidade dinâmica [kg/ms].
ρ Massa específica [kg/m^3].
σ Frequência da onda [s^{-1}].
ω Velocidade angular [rad/s].
φ_r Fração de área dada pela razão A_r/A_T
φ_t Fração de área dada pela razão A_t/A_R
ϕ Potencial de velocidade [m^2/s].

Lista de Siglas

CAO	Coluna d'Água Oscilante
CCPS	Condição de Contorno de Pressão de Saída
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
EDP	Equação Diferencial Parcial
FB	*Floating Breakwater*
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volume Finitos
NAE	Nível de Água Estático
OBREC	*Overtopping Breakwater for Energy Conversion*
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PISO	*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*
PRESTO	*Pressure Staggering Option*
RANS	*Reynolds Averaged Navier-Stokes*
RMS	Raiz Média Quadrática.
SIMPLE	*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*
SSG	*Sea Slot-cone Generator*
TSR	*Tip Speed Ratio*
VOF	*Volume of Fluid*

1 Introdução

1.1 Motivação

A demanda por energia projeta-se a crescer em mais de 1,0% ao ano até 2040, acarretando um aumento nas taxas de emissão de gases de efeito estufa (IEA, 2019). Ademais, os custos das commodities para a geração de energia a partir de combustíveis fósseis têm experimentado um incremento significativo, gerando desafios econômicos, riscos para a segurança energética e conflitos geopolíticos globais (Jenniches, 2018). Diante desse cenário, diversas atividades de pesquisa têm sido empreendidas para aprofundar o entendimento sobre o desenvolvimento de tecnologias, a utilização de dispositivos e o impacto econômico de diversas fontes renováveis de energia, como eólica, solar, geotérmica e energia das ondas (Khan *et al.*, 2017; Melikoglu, 2018; Curto *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021).

Segundo Jenniches (2018), uma das principais tendências atuais é a transição do sistema global de energia elétrica para matrizes baseadas em fontes renováveis, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 (energia limpa e acessível) e 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) da Organização das Nações Unidas (ONU). Essa transição não apenas reduz a emissão de gases poluentes do modelo atual, mas também permite a diversificação e descentralização da produção energética. Simultaneamente, de acordo com Reguero *et al.* (2015), a extração de energia das ondas do mar emerge como uma excelente alternativa para atender ao aumento da demanda por energia elétrica, pois o recurso global disponível é de aproximadamente 32.000 TWh/ano em alto mar (Martinez e Iglesias, 2020).

A conversão da energia proveniente dos oceanos em eletricidade é uma fonte significativa de energia renovável com grande potencial, porém pouco explorada globalmente. Dentro dessa categoria, destaca-se a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica. A despeito dos avanços tecnológicos nesse domínio, ainda não existe uma tecnologia dominante para essa conversão de energia. Consequentemente, diversos dispositivos têm sido propostos e estudados, adotando abordagens como absorvedores pontuais, atenuadores, galgamento, placas submersas, placas verticais submersas oscilantes e coluna de água oscilante (Falcão, 2010; Zabihian e Fung, 2011; Liu *et al.*, 2011; López *et al.*, 2013).

A eficiência e a durabilidade dos conversores de energia das ondas são fatores críticos para torná-los mais competitivos e economicamente viáveis (Temiz *et al.*, 2021). Nesse contexto, os dispositivos de galgamento e coluna de água oscilante apresentam vantagens devido à sua maior simplicidade e facilidade de manutenção. Além disso, o dispositivo de galgamento também possui a vantagem de poder ser utilizado como quebra-mar, quando aplicado em terra.

Neste estudo, busca-se desenvolver um modelo computacional de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo galgamento considerando a inserção de uma turbina Savonius. Conforme a Figura 1.1, o dispositivo de galgamento é composto por uma rampa que capta a água da onda com energia suficiente para superar a altura da rampa, conduzindo-a para um reservatório onde é retida a uma elevação superior à média da superfície livre do mar. A energia potencial acumulada nesse reservatório é então convertida em energia elétrica ao passar por uma turbina conectada a um gerador de energia elétrica (Kofoed et al., 2006; Margheritini et al., 2009; Martins et al., 2018).

O desenvolvimento de um modelo computacional para este tipo de dispositivo apresenta vantagens significativas quando comparado às abordagens puramente experimentais. Entre elas, destaca-se a possibilidade de representação de novos cenários operacionais e condições marítimas distintas, permitindo avaliar o comportamento hidrodinâmico do sistema sob diferentes parâmetros de onda. Além disso, o modelo computacional possibilita a proposição e análise de novos elementos construtivos no dispositivo (como a inserção da turbina Savonius) ainda pouco explorados na literatura, com custos substancialmente inferiores aos exigidos por campanhas experimentais em laboratório ou em escala real. Outra vantagem relevante está na capacidade de recomendar novos designs geométricos e configurações operacionais a partir de simulações numéricas, reduzindo o elevado custo associado à investigação experimental e acelerando o processo de otimização e desenvolvimento tecnológico de conversores de energia das ondas.

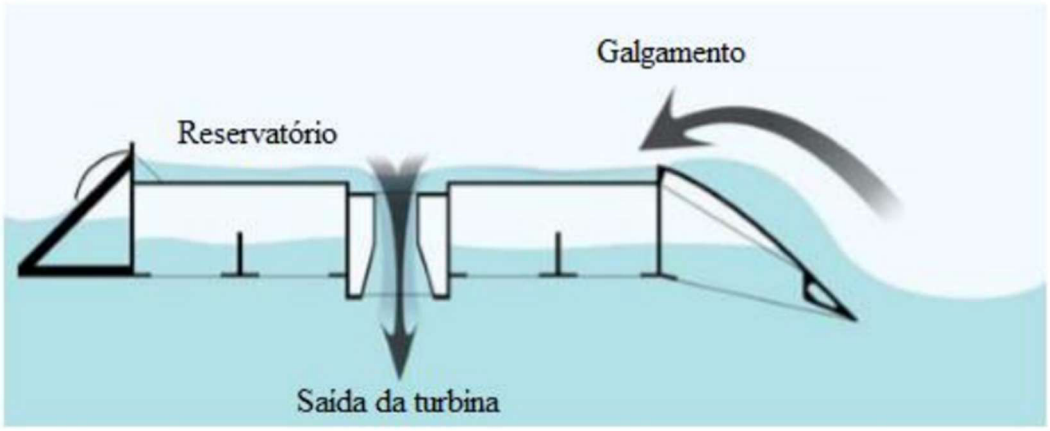


Figura 1.1: Ilustração do princípio de funcionamento do dispositivo do tipo galgamento. Fonte: Barros (2020).

1.2 Revisão histórica da literatura e estado da arte

Estudos experimentais e numéricos têm sido realizados para avaliar os parâmetros construtivos de dispositivos conversores de energia das ondas do tipo galgamento. De acordo com Tedd e Kofoed (2009), a maior parte da literatura sobre dispositivos de galgamento (Overtopping) concentra-se na investigação de escoamentos sobre quebra-mares e barragens. Nesses casos, o princípio adotado exige que a estrutura vertical do dispositivo seja significativamente maior do que a altura da crista das ondas, uma vez que o

objetivo principal é criar barreiras de proteção costeira, minimizando o volume de água do mar que ultrapassa a rampa. Por outro lado, quando o propósito é a conversão da energia das ondas em energia elétrica, o foco se desloca para maximizar a captura da massa de água. Isso torna necessário posicionar o dispositivo em alturas mais baixas, otimizando sua eficiência no aproveitamento da energia das ondas.

Os estudos sobre dispositivos de galgamento voltados para a obtenção de energia elétrica a partir das ondas do mar têm se concentrado, em sua maioria, no desenvolvimento de análises experimentais para a avaliação de parâmetros construtivos. Contudo, observa-se um crescimento significativo no número de pesquisas numéricas nos últimos anos, refletindo o avanço das técnicas computacionais aplicadas à área. A seguir, são apresentados os estudos mais relevantes identificados na literatura.

Kofoed (2002) conduziu um estudo experimental em laboratório para analisar o cálculo das descargas de água no galgamento em diferentes configurações de rampas. O estudo incluiu estruturas com reservatórios individuais e múltiplos, considerando diferenças de nível. Foram avaliados diversos parâmetros geométricos, como a inclinação da rampa, a diferença de altura entre a borda superior da rampa e a superfície livre da água, o design das paredes de orientação e a saída livre da água na descarga do galgamento. Além disso, o efeito do uso de múltiplos reservatórios com diferentes níveis foi quantificado. O autor também investigou a otimização da geometria para maximizar a energia potencial da água acumulada no galgamento. Os resultados experimentais indicaram que a eficiência hidráulica global de conversores de energia das ondas baseados no princípio de galgamento varia entre 20% e 35% para dispositivos com um único reservatório, podendo alcançar até 45% a 50% em estruturas com quatro níveis de reservatórios.

Kofoed *et al*. (2006) realizaram extensivos testes em tanque de ondas entre 1998 e 2001, utilizando um protótipo em escala reduzida de 1:50 na Universidade de Aalborg. Posteriormente, um novo protótipo em escala reduzida de 1:4,5 do dispositivo *Wave Dragon* foi instalado em Nissum Bredning, na Dinamarca, sendo conectado à rede elétrica em maio de 2003, tornando-se o primeiro conversor de energia das ondas offshore do mundo. Entre maio de 2003 e janeiro de 2005, foi conduzido um amplo programa de medições para monitorar diversos parâmetros, incluindo a potência gerada, o clima de ondas, as forças nos sistemas de fixação, as tensões na estrutura e os movimentos do protótipo. Os dados coletados resultaram no desenvolvimento de um plano de estudos voltado para a concepção ideal da estrutura e o planejamento de implantação de uma unidade de produção de energia com capacidade de 4 MW. Uma ilustração da configuração do *Wave Dragon* pode ser vista na figura 1.2.

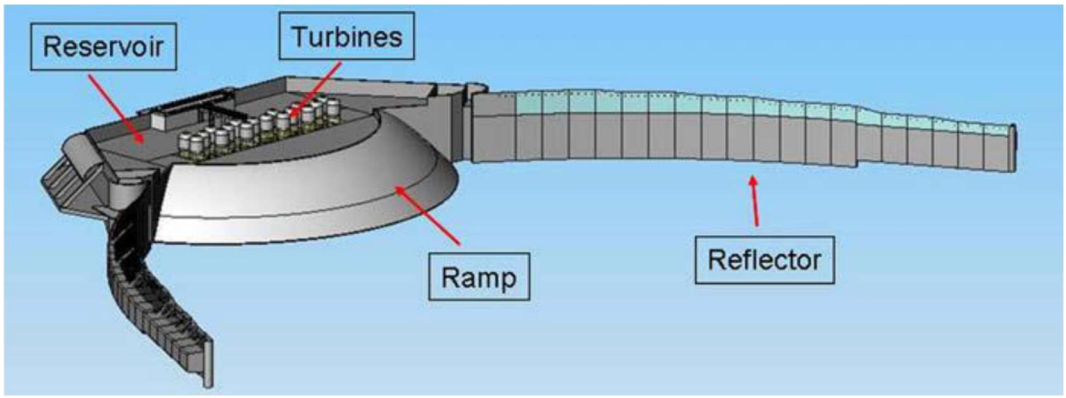


Figura 1.2: *Wave Dragon*. Fonte: Tedd e Kofoed (2009).

Liu *et al*. (2008) apresentaram uma modelagem computacional de um dispositivo de galgamento, utilizando a metodologia VOF (Volume of Fluid) para simular a interação entre o ar e a água no dispositivo. O estudo analisou diferentes geometrias do conversor, empregando modelos computacionais bidimensionais (2D). As equações de conservação foram resolvidas por meio do método VOF, utilizando o software Fluent. Diversas condições de ondas incidentes e configurações geométricas do dispositivo foram avaliadas, resultando em recomendações específicas sobre a inclinação ideal da rampa. Relações fixas entre altura e comprimento da rampa, como 1:1, 1:2 e 2:3, foram investigadas no estudo. Na figura 1.3 é apresentado o esquema do dispositivo.

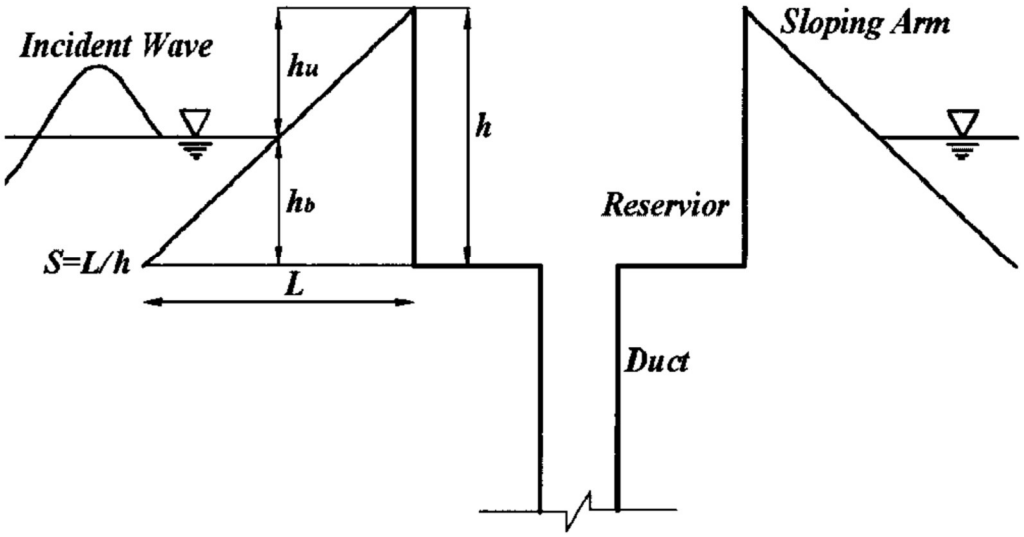


Figura 1.3: Esquema do dispositivo de galgamento. Fonte: Liu *et al*. (2008).

Nam *et al*. (2008) realizaram um estudo numérico sobre um dispositivo de galgamento circular, incorporando aletas igualmente espaçadas na área da rampa para determinar os parâmetros geométricos ideais que maximizassem a quantidade de água galgada. O estudo foi conduzido utilizando o software comercial FLOW3D, com simulações realizadas em modelos 2D e 3D. Nos casos 2D, foram analisados diferentes ângulos e formatos da rampa, buscando identificar as configurações mais eficientes. As simula-

ções 3D, por sua vez, tiveram como objetivo compreender o comportamento do escoamento da água sobre o dispositivo, além de avaliar o impacto da inclusão de aletas na rampa. A figura 1.4 apresenta uma ilustração do dispositivo.

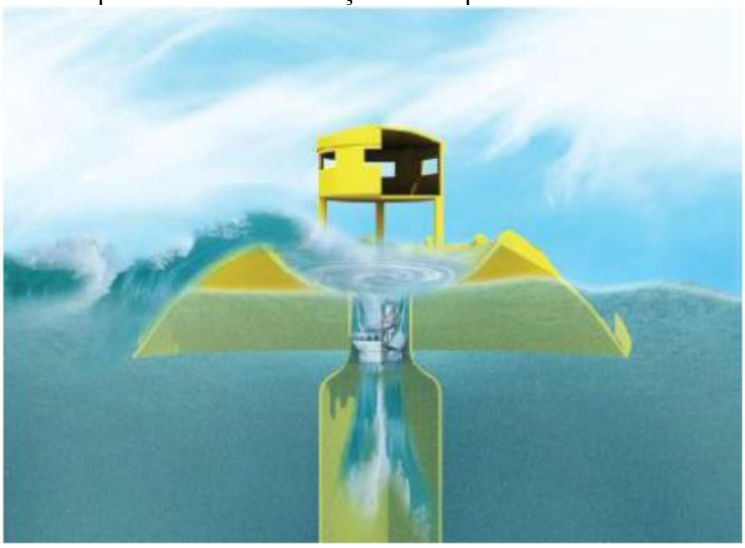


Figura 1.4: Dispositivo de galgamento circular. Fonte: Nam *et al*. (2008).

Margheritini *et al*. (2009) analisaram o Sea Slot-cone Generator (SSG), um dispositivo costeiro (onshore) projetado para conversão da energia das ondas em eletricidade. Ilustrado na figura 1.5, o SSG apresenta vantagens como baixo custo de construção e alta robustez estrutural. O dispositivo funciona captando e armazenando a energia potencial das ondas em múltiplos reservatórios dispostos em níveis sobrepostos. A água armazenada é conduzida através de uma turbina, onde a energia potencial é convertida em energia mecânica de eixo. Essa energia mecânica é então transferida para um gerador elétrico, responsável por transformá-la em energia elétrica e enviá-la à rede de abastecimento. Posteriormente, Margheritini *et al*. (2012) realizaram uma análise de viabilidade para implementação do SSG no porto de Hanstholm, na Dinamarca. Nesse contexto, foi conduzido um estudo numérico para otimização geométrica do dispositivo, utilizando o software WOPSim, desenvolvido pela Universidade de Aalborg especificamente para modelar e determinar parâmetros ideais do SSG.

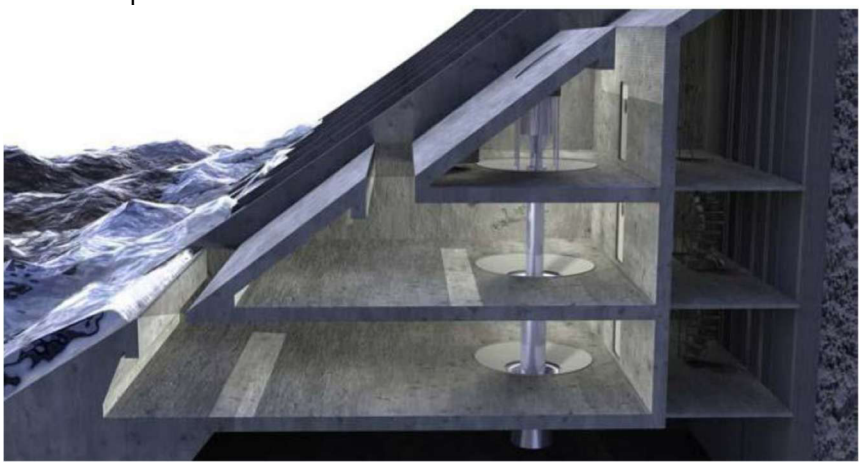


Figura 1.5: Sea Slot-cone Generator (SSG). Fonte: Margheritini *et al*. (2009).

No campo da modelagem numérica, Beels *et al*. (2010) aplicaram um modelo baseado em equações transientes conhecido como *mild-slope* para analisar o desempenho do dispositivo *Wave Dragon* e formações compostas por cinco unidades do equipamento. O estudo explorou diferentes arranjos espaciais, variando as distâncias entre os dispositivos em *D*, *2D* e *3D*, onde *D* representa a distância entre as extremidades do refletor de um *Wave Dragon* (260 m), conforme ilustrado na figura 1.6. Os resultados indicaram que uma fazenda composta por cinco conversores *Wave Dragon*, dispostos em um arranjo desalinhado, oferece maior eficiência no aproveitamento do espaço, além de minimizar interferências no desempenho de cada conversor individual. Essa configuração mostrou-se uma solução viável para otimizar a instalação de múltiplos dispositivos em áreas limitadas.

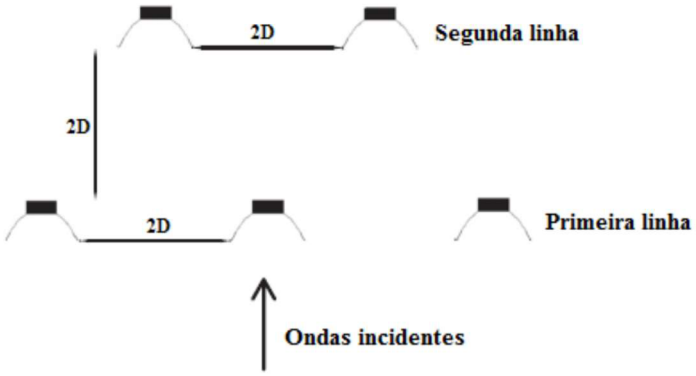


Figura 1.6: Arranjo com 5 dispositivos *Wave Dragon* instalados em um arranjo desalinhado. Fonte: Adaptado de Beels *et al*. (2010).

Iahnke (2010) avaliou a inclinação da rampa de um dispositivo de galgamento em um escoamento bidimensional, considerando um clima de ondas semelhante ao encontrado no sul do Brasil, na cidade de Rio Grande (aproximadamente 32ºS e 52ºW). O estudo revelou que a melhor geometria para o dispositivo foi obtida com uma inclinação de 30º. Vale destacar que a área da rampa variava para cada caso analisado. Como não foi definida uma restrição de área para a rampa, o Design Construtal não foi utilizado para a avaliação das geometrias estudadas, o que pode ter limitado a otimização dos parâmetros geométricos em termos de eficiência e desempenho do dispositivo.

Um dispositivo semelhante ao analisado por Nam *et al*. (2008) foi estudado em Jin *et al*. (2012), com foco exclusivo no efeito do número de aletas sobre o desempenho do conversor. Neste estudo, o software comercial Fluent foi utilizado para realizar as simulações em 3D, conforme ilustrado na figura 1.7. Para modelar os escoamentos turbulentos, as equações médias no tempo foram resolvidas utilizando a metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) com o modelo de fechamento $k - \varepsilon$. A interação entre as fases água e ar foi abordada por meio do modelo multifásico VOF. Os resultados preliminares indicaram que o aumento no número de aletas resulta em um maior volume de água galgado, porém não foi possível determinar um número ótimo de aletas para

maximizar a eficiência do dispositivo. Esse aspecto sugere a necessidade de mais investigações para identificar o arranjo ideal de aletas que proporcione o melhor desempenho no aproveitamento da energia das ondas.

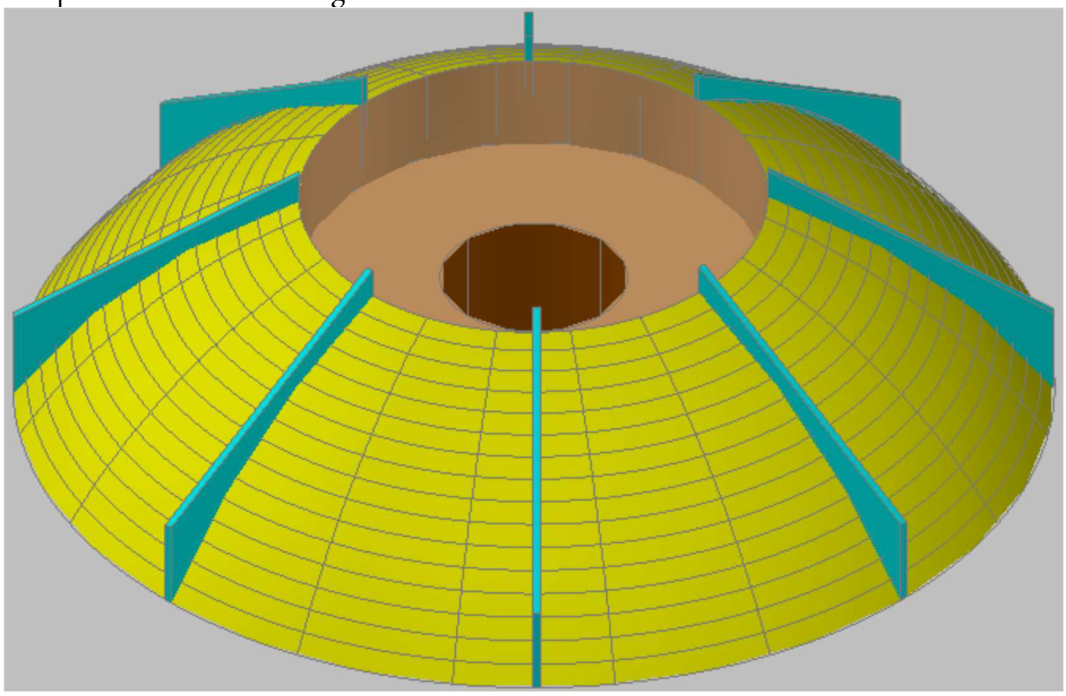


Figura 1.7: Dispositivo de galgamento circular. Fonte: Jin *et al*. (2012).

Vicinanza et al. (2014) realizaram um estudo experimental sobre o aproveitamento de estruturas de quebra-mares para a instalação de dispositivos de galgamento, com o objetivo de aproveitar o acúmulo de água no reservatório para a geração de energia, além de determinar o comportamento hidráulico e as cargas a que o dispositivo está submetido. O esquema do dispositivo testado é ilustrado na figura 1.8. O modelo foi testado em uma escala de 1/30 em relação ao protótipo real, sendo realizado em um canal de 25 m de comprimento e 1,5 m de altura. As ondas geradas durante os testes foram baseadas em três parâmetros do espectro JONSWAP. O modelo foi submetido a dois tipos de configurações, denominadas "baixa" (dw = 2,25 m) e "alta" (dw = 3,75 m), com dimensões relativas ao protótipo. Durante o experimento, parâmetros como a altura e a largura do reservatório, entre outros, foram ajustados para determinar a geometria que mais favorecia a entrada de água no reservatório. Os resultados obtidos foram comparados com um trabalho experimental anterior, resultando no desenvolvimento de novas equações que podem ser utilizadas como recomendações iniciais no projeto de quebra-mares equipados com dispositivos conversores de energia das ondas.

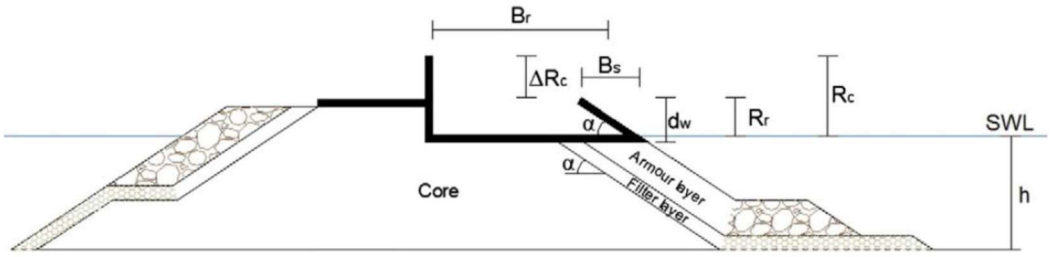


Figura 1.8: Ilustração de um quebra-mar com dispositivo de galgamento. Fonte: Vicinanza *et al*. (2014).

Goulart *et al*. (2015) realizaram um estudo numérico sobre o efeito da geometria da rampa no desempenho de um dispositivo de galgamento onshore em escala real, conforme a configuração apresentada na figura 1.9. O objetivo principal do estudo foi avaliar a razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo, considerando distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do canal de S = 5,0 m e S = 6,0 m. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica (VOF) foram resolvidas utilizando o Método dos Volumes Finitos (MVF). Os resultados indicaram que as melhores geometrias foram obtidas para as menores razões de H_1/L_1. Além disso, foi observado que a diminuição da distância S resultou em um aumento da massa de água máxima que entra no reservatório (mm) e na razão H_1/L_1 ótima $(H_1/L_1)_o$. Esses achados oferecem insights importantes para a otimização do design de dispositivos de galgamento, visando maximizar a eficiência na conversão de energia das ondas.

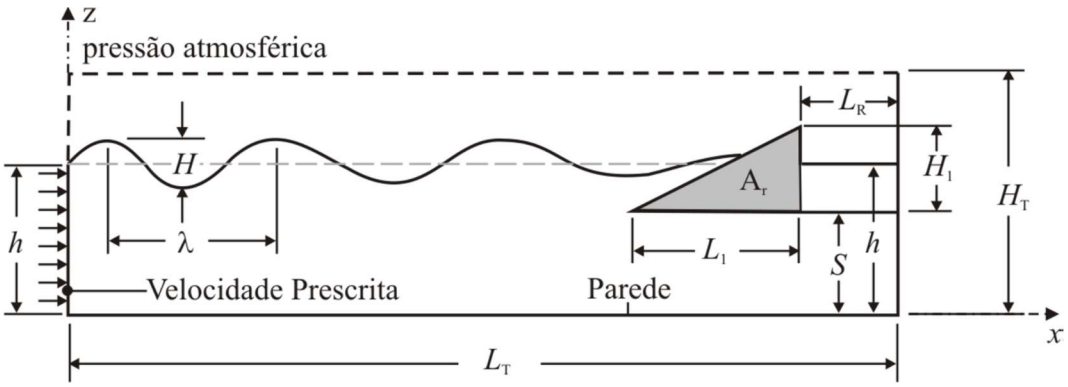


Figura 1.9: Dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades. Fonte: Goulart *et al*. (2015).

Em Martins *et al*. (2018), os autores utilizaram o Design Construtal para avaliar numericamente a influência da configuração geométrica no desempenho de um dispositivo de galgamento onshore em escala real. O foco do estudo foi analisar o efeito da inclinação da rampa e da submersão do dispositivo sobre sua potência disponível. Além disso, foram consideradas três áreas diferentes para a rampa, como uma restrição do problema, o que permitiu investigar a influência da área de construção da rampa no design

do dispositivo, bem como o impacto de duas condições de ondas monocromáticas distintas. Os resultados indicaram que, para magnitudes fixas de submersão, o melhor desempenho foi alcançado para as menores inclinações da rampa. Além disso, em algumas áreas fracionárias, as submergências intermediárias proporcionaram o melhor desempenho. Esses achados destacam a importância da otimização geométrica e da análise de submersão para a melhoria da eficiência dos dispositivos de galgamento na conversão de energia das ondas.

Hubner *et al.* (2022) avaliou a diferença no comportamento fluidodinâmico de um conversor de energia de ondas do tipo galgamento sob a incidência de ondas irregulares, com base em um estado de mar realista, em comparação com a incidência de ondas regulares representativas desse estado de mar. Para isso, foram considerados dados marítimos de três regiões da costa do Rio Grande do Sul, Brasil. O software Fluent foi utilizado para a modelagem computacional, baseada no MVF. A geração numérica das ondas foi realizada por meio da imposição das condições de contorno de velocidade usando valores discretos transientes pela metodologia WaveMIMO. O modelo multifásico VOF foi aplicado para tratar a interação entre água e ar. Os resultados referentes à quantidade de água acumulada no reservatório do dispositivo mostraram que o comportamento fluidodinâmico do conversor de galgamento apresenta diferenças significativas ao comparar as duas abordagens propostas. Foram encontradas diferenças de até 240% na massa de água acumulada no reservatório do dispositivo de galgamento, indicando que os resultados podem ser superestimados quando o dispositivo é analisado sob a incidência de ondas regulares representativas. Além disso, para todos os casos estudados, foi possível aproximar o volume de água acumulado ao longo do tempo no reservatório de galgamento por meio de uma função polinomial de primeiro grau.

Martins *et al.* (2022) realizou um estudo numérico sobre um dispositivo de galgamento com uma e duas rampas incorporado em um quebra-mar real. O método Design Construtal foi aplicado para avaliar os efeitos no escoamento médio de galgamento adimensional dos graus de liberdade do dispositivo com uma e duas rampas. Além disso, foi realizada uma comparação entre as diferentes configurações geométricas do dispositivo de galgamento para determinar qual delas apresenta o melhor desempenho hidrodinâmico. O trabalho utilizou o espectro JONSWAP e o modelo multifásico VOF. Também resolveu as equações de conservação para massa, momento e uma equação para o transporte da fração volumétrica usando o MVF. Os resultados mostraram que um dispositivo com configuração de duas rampas apresentou vazão média de galgamento adimensional 6,48% superior aos obtidos para uma rampa. Também apresentou resultados obtidos utilizando recomendações teóricas do Design Construtal sobre a influência de uma configuração complexa com quatro graus de liberdade no desempenho de um dispositivo de galgamento integrado ao quebra-mar leste da cidade de São José do Norte, Estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil.

Barros *et al.* (2023) realizou um estudo numérico e uma investigação geométrica de um dispositivo de galgamento em escala real com uma estrutura acoplada montada

no fundo do mar através do método Design Construtal, conforme a figura 1.10. O objetivo principal foi investigar a influência do projeto sobre a potência disponível do dispositivo. As áreas da rampa de galgamento (A_r) e da estrutura trapezoidal do fundo do mar (A_t) foram as restrições do problema. Foram estudados dois graus de liberdade, a razão entre a altura e o comprimento da rampa (H_3/L_3) e a razão entre a base superior e inferior do obstáculo trapezoidal (L_1/L_2). A submersão do dispositivo foi mantida constante (H_1 = 3,5 m). As equações de continuidade, momento e transporte da fração volumétrica foram resolvidas com o MVF, enquanto a mistura água-ar foi tratada com o modelo multifásico VOF. Os resultados mostraram que a relação H_3/L_3 apresentou maior sensibilidade que a relação L_1/L_2 sobre a água acumulada no reservatório. Apesar disso, a associação de uma estrutura acoplada à rampa de um dispositivo de galgamento melhorou em 30% o desempenho do conversor em relação a uma condição convencional sem estrutura.

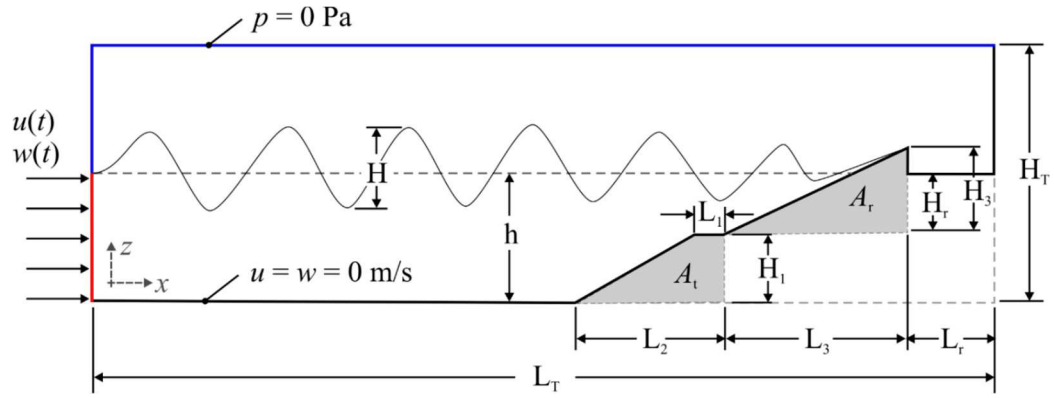


Figura 1.10: Representação esquemática do domínio computacional bidimensional do dispositivo de galgamento acoplado ao obstáculo trapezoidal no canal da onda. Fonte: Barros et al. (2023).

Goulart *et al.* (2024) realizou uma análise numérica e experimental para validar um modelo numérico voltado para escoamentos de ondas em canais sobre dispositivos de galgamento onshore em escala de laboratório, considerando o efeito da geometria no desempenho do dispositivo com o uso do Design Construtal. O modelo numérico foi implementado no Fluent, resolvendo as equações de conservação de massa e quantidade de movimento através do método MVF e utilizando o modelo VOF para tratar a interface água-ar. O experimento foi conduzido no canal de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O estudo investigou a relação entre a razão altura/comprimento da rampa e a profundidade da superfície livre da água para maximizar a quantidade de água acumulada no reservatório do dispositivo de galgamento. O modelo numérico foi validado com dados experimentais, apresentando erros relativos de até 2,92% e demonstrando a capacidade do método design construtal na predição da influência do design e melhores desempenhos do dispositivo, uma aplicação inédita na literatura. A análise também mostrou que menores razões altura/comprimento da rampa geraram melhor desempenho, confirmando resultados anteriores.

Liu e Zhang (2024) desenvolveram um modelo numérico com base no software comercial Fluent para avaliar o desempenho do dispositivo de galgamento de um conversor de energia das ondas do tipo CROWN em múltiplos níveis (figura 1.11), o qual foi cuidadosamente verificado e validado por meio de resultados experimentais. O modelo numérico demonstrou boa precisão e capacidade para prever interações complexas entre ar e água durante os processos de transbordamento. A relação de inclinação e o número de aletas-guia para os reservatórios foram otimizados. Além disso, a menor largura de abertura da boca do reservatório inferior beneficia o desempenho de galgamento do reservatório superior. Os parâmetros de forma otimizados podem ser empregados no projeto prático de um protótipo de dispositivo de transbordamento em múltiplos níveis.

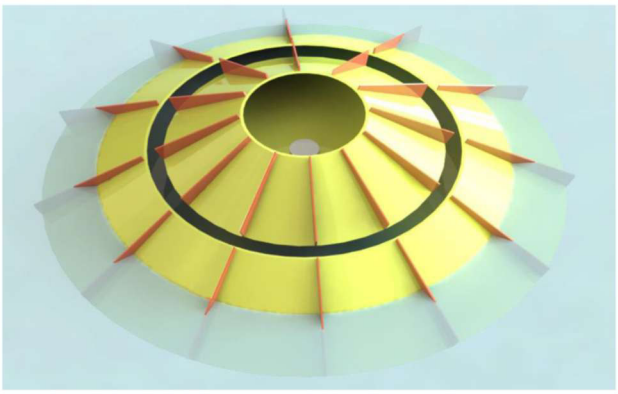


Figura 1.11 - Esquema do CROWN em múltiplos níveis. Fonte: Liu e Zhang (2024).

Sorhabi *et al*. (2024) investigou as características hidrodinâmicas de um quebra-mar flutuante (FB, do inglês floating breakwater) inclinado que pode operar como um conversor de energia das ondas. O FB inclinado foi projetado com um reservatório entre duas partes flutuantes para coletar água. A estrutura aproveita a energia das ondas direcionando a água de galgamento para um reservatório localizado em um nível superior ao nível médio da água. A energia potencial gerada pela água de transbordamento é então convertida em energia elétrica ao direcionar a água do reservatório de volta ao mar por meio de uma turbina de baixa queda. A pesquisa analisou o desempenho de FBs inclinados híbridos com diferentes ângulos de inclinação. FBs com ângulos de inclinação de 40° e 60° foram estudados experimentalmente em ondas regulares e irregulares com diferentes alturas e períodos. Além disso, o software FLOW3D foi utilizado para estudar FBs com outros ângulos de inclinação. Os resultados gerais destacaram o potencial do modelo para geração de energia e eficiência como quebra-mar, oferecendo contribuições valiosas sobre sua viabilidade como uma solução sustentável de conversão de energia das ondas.

Silva *et al.* (2024) avaliou numericamente e geometricamente um conversor de energia das ondas do tipo galgamento por meio do Design Construtal. Foram realizadas 20 simulações no ANSYS Fluent, considerando diferentes ângulos de rampa e condições de ondas representativas de Pontal do Paraná (PR). O objetivo foi analisar a influência

da razão *H1/L1* (razão entre a altura e o comprimento da rampa) na vazão de água captada pelo reservatório. Os resultados mostraram que menores ângulos de rampa proporcionam melhor desempenho, aumentando significativamente a potência disponível do dispositivo e destacando a importância da otimização geométrica.

Paiva *et al.* (2025) realizaram uma avaliação geométrica de um conversor de energia das ondas do tipo galgamento, analisando a influência da razão *H1/L1* (razão entre a altura e o comprimento da rampa do dispositivo) sobre a massa de água captada pelo reservatório. Utilizando simulações numéricas com ondas regulares e irregulares representativas da costa de Rio Grande (RS), o Design Construtal permitiu identificar a geometria ótima do dispositivo, correspondente a *H1/L1* = 0,30. Essa configuração apresentou o melhor desempenho para ambos os casos, maximizando a quantidade de água armazenada e, consequentemente, o potencial de geração de energia.

Paiva *et al.* (2026) avaliaram a influência da geometria da rampa e da condição de contorno de pressão de saída (CCPS) no desempenho do conversor do tipo galgamento, utilizando simulações numéricas no ANSYS Fluent com condições de mar representativas de Rio Grande (RS). Os resultados mostraram que a CCPS não é recomendada por afetar o monitoramento dos resultados. Além disso, a aplicação do Design Construtal permitiu identificar a geometria que maximizou a potência disponível, alcançando desempenho mais de cinco vezes superior ao da pior configuração analisada.

A partir da revisão bibliográfica apresentada, observou-se que o estudo na linha de pesquisa do dispositivo do tipo galgamento está bastante avançado na obtenção de recomendações teóricas acerca da forma geométrica mais adequada considerando a quantidade de água galgada no reservatório como indicador de performance do dispositivo. Contudo, há carências na análise de dispositivos que considerem de forma acoplada a simulação hidrodinâmica, o canal de ondas e o dispositivo de galgamento, considerando o sistema de potência com uma turbina em movimento de rotação.

1.3 Objetivos

Como objetivo geral pretende-se desenvolver um modelo computacional de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo galgamento considerando a inserção de uma turbina Savonius.

1.3.1 Objetivos específicos

- Validar o modelo de escoamento turbulento sobre a turbina Savonius em canal aberto (que possui resultados na literatura);
- Verificar o modelo computacional para reproduzir o escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento, contabilizando o volume de água galgada no reservatório do dispositivo;
- Desenvolver modelo numérico que considere a turbina no conversor quando submetido à incidência de ondas para o galgamento;

- Realizar uma investigação sobre a influência da velocidade de rotação da turbina Savonius;
- Avaliar a influência da inserção da turbina no estudo ao comparar o dispositivo de galgamento sem a inserção da turbina Savonius com o caso do modelo completo acoplado.

2| Fundamentos de Conversão de Energia das Ondas

2.1 Potencial de Energia das Ondas

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2008), o desenvolvimento de um país pode ser medido pelo acesso da população aos serviços de infraestrutura, como saneamento, transporte, telecomunicações e energia. Nesse contexto, investimentos no setor energético, especialmente em fontes renováveis, são fundamentais para o crescimento econômico sustentável, considerando a crescente demanda global por energia. O setor de energia renovável tem atraído atenção, impulsionando pesquisas e desenvolvimento de tecnologias para explorar novas fontes, incluindo o vasto potencial energético dos oceanos.

Segundo Cruz e Sarmento (2004), a energia contida nos oceanos possui diversas origens, o que resulta em diferentes classificações: a energia das marés, resultante da interação entre os campos gravitacionais da lua e do sol; a energia térmica dos oceanos, que provém da radiação solar incidente; a energia das correntes marítimas, que surge dos gradientes de temperatura e salinidade, além da ação das marés; e a energia das ondas, gerada pela ação do vento na superfície oceânica, considerada uma forma concentrada de energia solar. Ondas, após serem criadas, podem viajar grandes distâncias sem perder energia, mas em áreas costeiras, essa energia diminui devido à interação com o fundo do mar. A potência de uma onda é determinada pela sua amplitude e período, sendo que ondas com alta amplitude (cerca de 2 metros) e período longo (de 7 a 10 segundos) podem exceder 50 kW/m de frente de onda (Dean e Dalrymple, 1991).

A exploração energética dos mares é complexa e, segundo estimativas, o potencial de energia disponível nas regiões costeiras mundiais atinge cerca de 2 TW, valor próximo da média de consumo elétrico anual global (Cruz e Sarmento, 2004). Para algumas regiões afastadas da linha do Equador, esse potencial pode variar entre 40 e 100 kW/m por frente de onda, destacando-se especialmente no sul do Brasil, onde estima-se um potencial em torno de 30 kW/m, sugerindo uma possível implementação de tecnologia alternativa de energia marinha (Falcão, 2010). Na figura 2.1, é possível observar a distribuição mundial do potencial energético das ondas, ressaltando a extensa faixa litorânea do Brasil e sua relevância para a exploração energética.

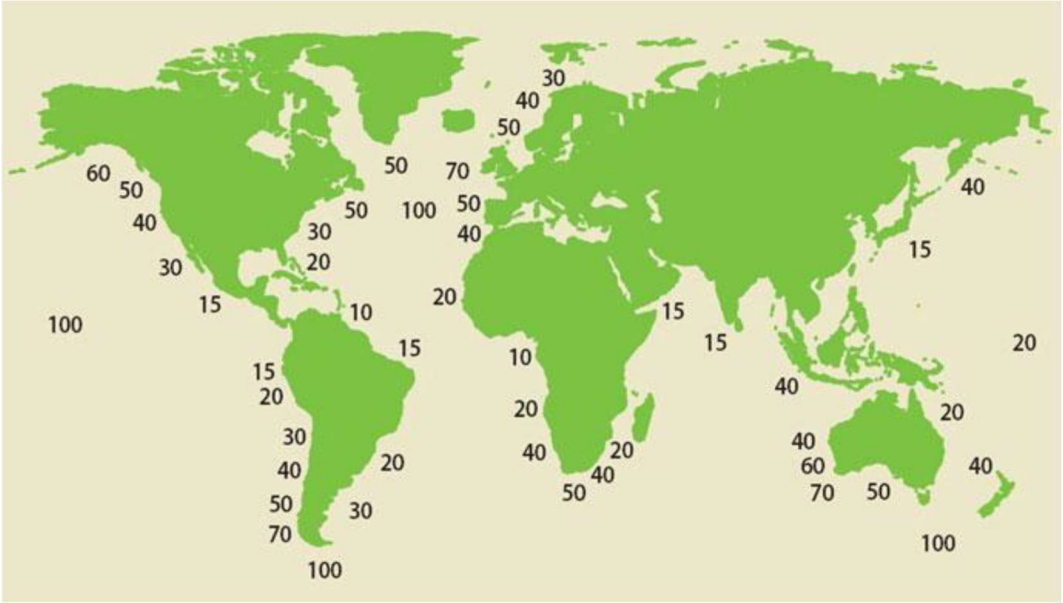


Figura 2.1: Potencial de energia das ondas ao redor do mundo em kW/m por frente de onda. Fonte: Ghosh e Prelas (2011).

Além dos desafios técnicos, a implementação de tecnologias de energia marinha exige consideração sobre os impactos ambientais. Conforme Cruz e Sarmento (2004), os principais efeitos incluem impactos biológicos sobre fauna e flora, alterações nos processos de erosão e transporte de sedimentos, alterações visuais devido à instalação dos dispositivos, ruídos acústicos associados à interação entre fluido e estrutura, efeitos vibratórios que podem afetar a vida marinha, especialmente sistemas de sonar, e impactos socioeconômicos, como os relacionados à pesca.

Em suma, o potencial dos oceanos para a geração de energia elétrica continua a motivar pesquisas e investimentos, com o objetivo de superar os desafios naturais e tecnológicos, e de desenvolver soluções energeticamente eficientes e ambientalmente adequadas para cada região.

2.2 Equipamentos de Conversão de Energia das Ondas

Os dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica são classificados com base na sua localização em relação à costa e no princípio de funcionamento. Segundo Cruz e Sarmento (2004) e Paredes (2008), essa classificação divide-se em três categorias quanto à instalação:

- Dispositivos costeiros (onshore ou shoreline): Também chamados de primeira geração, são instalados na linha de costa e têm acesso por terra, o que facilita a construção, instalação e manutenção. Esses dispositivos podem ser colocados próximos aos centros consumidores, reduzindo perdas na distribuição da energia gerada. No entanto, as ondas que chegam à costa perdem energia ao interagir com o leito oceânico, diminuindo o potencial

energético. Além disso, apresentam impactos ambientais, como dificuldades na proteção da fauna e flora costeira.

- Dispositivos próximos da costa (nearshore): De segunda geração, são instalados em águas de profundidade intermediária, onde o potencial energético das ondas é maior. Aproveitam vantagens de transporte e distribuição de energia, pois ainda estão relativamente próximos da costa, mas podem impactar o ambiente marinho pela sua presença.
- Dispositivos afastados da costa (offshore): Também conhecidos como dispositivos de terceira geração, são instalados em alto mar, onde o potencial energético das ondas é significativamente mais alto. Embora ofereçam grande potencial energético, esses dispositivos enfrentam desafios devido à sua localização, incluindo complexidades de instalação, manutenção, e transmissão da energia gerada para a costa, além de problemas com ancoragem e interferência nas rotas de navegação.

A classificação de acordo com a localização do dispositivo em relação à costa é ilustrada na figura 2.2.

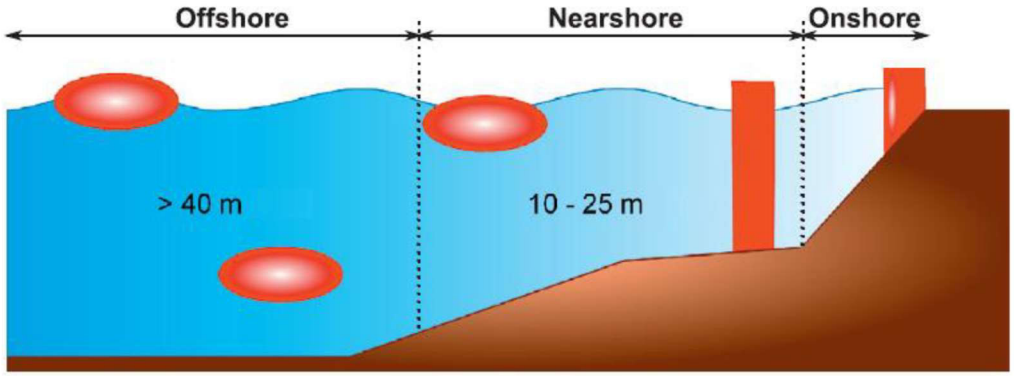


Figura 2.2: Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas. Fonte: López *et al*. (2013).

Além da localização, Cruz e Sarmento (2004) descrevem três principais tecnologias de conversores de energia das ondas:

- Coluna d'Água Oscilante (CAO): Esse dispositivo possui uma estrutura parcialmente submersa onde o movimento das ondas causa variações no nível da água, comprimindo e descomprimindo o ar em seu interior. Esse ar pressurizado aciona uma turbina do tipo Wells, que gera eletricidade ao manter a rotação independentemente do fluxo.
- Corpos Oscilantes (Oscillating Devices): Incluem dispositivos de absorção pontual (point absorbers) e progressivos (surging devices), que convertem o movimento oscilante das ondas em energia. Nos absorvedores pontuais, um flutuador oscila verticalmente ou em torno de um eixo, e, nos dispositivos progressivos, o movimento ocorre ao longo da própria estrutura. Essas oscilações impulsionam sistemas hidráulicos que acionam geradores.

- Galgamento (Overtopping Devices): Utilizam rampas para direcionar as ondas para um reservatório acima do nível do mar. A água acumulada passa por turbinas ao retornar ao oceano, gerando eletricidade de forma semelhante a uma hidrelétrica de baixa queda.

A figura 2.3 apresenta a classificação dos conversores de energia das ondas conforme o princípio de funcionamento.

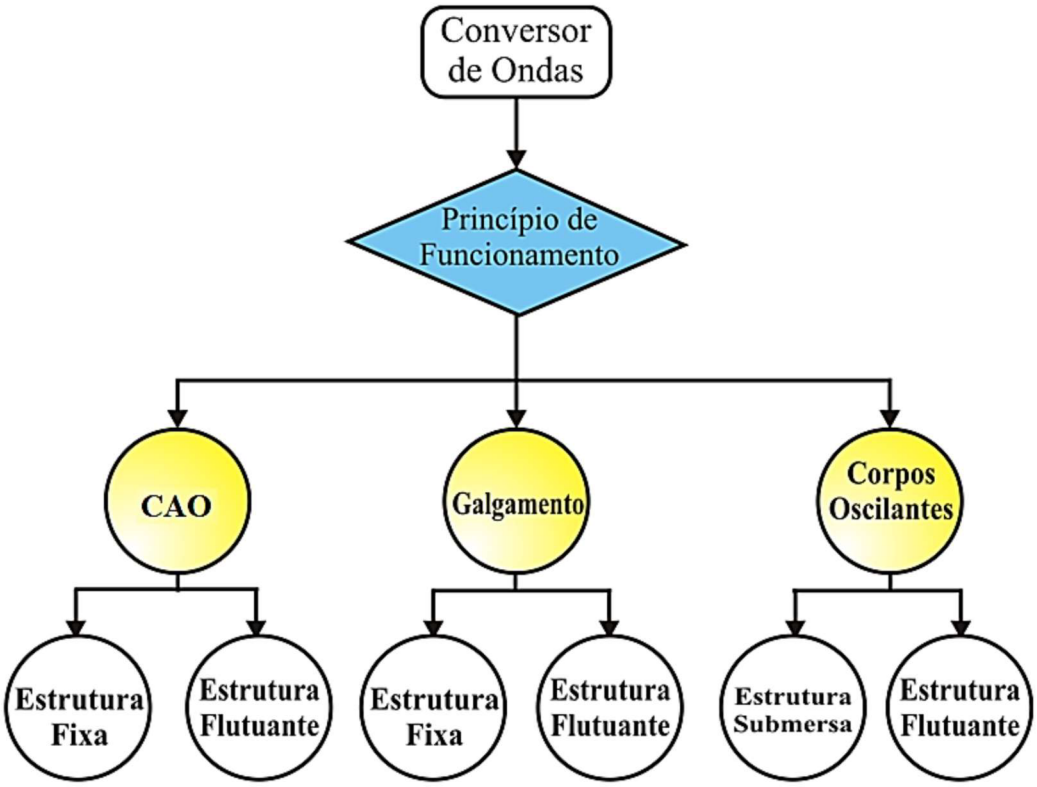


Figura 2.3: Tecnologias de conversores de energia das ondas. Fonte: Goulart (2022).

A escolha do dispositivo ideal depende de uma análise do clima de ondas e das condições locais, permitindo que a tecnologia seja adaptada para maximizar a eficiência e minimizar os impactos ambientais.

2.2.1 Dispositivo de galgamento

Os dispositivos de galgamento, aplicáveis tanto em áreas flutuantes (offshore) quanto fixas (onshore), baseiam-se no princípio de acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície do mar (figura 2.4). A água é acumulada à medida que as ondas galgam uma rampa inclinada acoplada ao reservatório, preenchendo-o. A água acumulada, então, passa por uma turbina hidráulica de baixa queda, como a tipo Kaplan, que aciona um gerador elétrico, gerando eletricidade. Esse processo ocorre devido à transformação gradual da energia cinética das ondas em energia

potencial no reservatório. A devolução da água ao mar ocorre por ação da energia potencial, que impulsiona a turbina hidráulica.

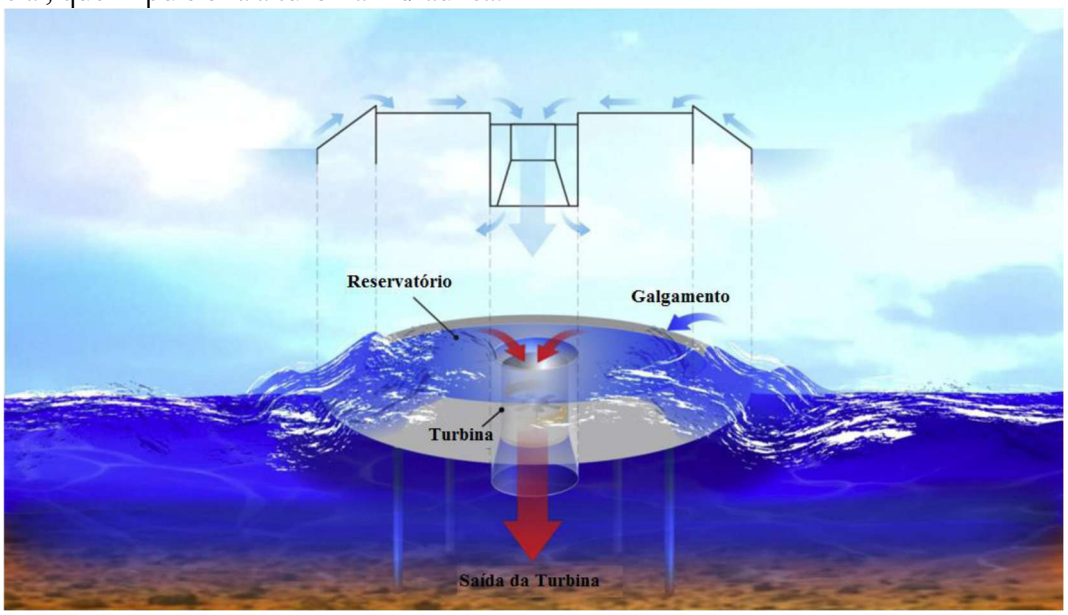


Figura 2.4: Princípio de funcionamento do galgamento. Fonte: Barros (2020).

Os dispositivos que utilizam o princípio de funcionamento baseado no galgamento e que estão em escala real encontram-se em fase de testes ou são protótipos. Os principais exemplos serão apresentados nas seções a seguir.

Tapchan (Noruega – Tapered Chanel Wave Power Device)

O equipamento Tapchan, desenvolvido na Noruega na década de 1980, está instalado na cidade de Toftestallen desde 1985 e possui uma capacidade de 350 kW. O coletor, escavado na rocha, possui um formato que vai se estreitando para concentrar as ondas incidentes, que neste protótipo podem atingir até 3 metros de altura, a altura do reservatório. Com uma área superficial de aproximadamente 8.500 m^2, o reservatório é fundamental para garantir o funcionamento adequado da turbina, que neste caso é do tipo Kaplan (Pereira, 2010). A figura 2.5 (a) apresenta o esquema de funcionamento do equipamento, enquanto a figura 2.5 (b) exibe uma fotografia do Tapchan.



a) b)

Figura 2.5: Dispositivo Tapchan: a) ilustração do esquema de funcionamento e b) imagem real do equipamento. Fonte: Martins (2016).

Wave Plane

O Wave Plane, desenvolvido na Dinamarca, também adota o galgamento como princípio de funcionamento. Sua instalação pode ocorrer tanto em regiões próximas quanto distantes da costa. Trata-se de um dispositivo simples para conversão de energia das ondas em energia elétrica.

O desenvolvimento do dispositivo teve início em 1990, a partir de um conceito criado por Erick Skaarup (figura 2.6). O primeiro teste foi realizado na Irlanda, em 1996, na University College Cork. O primeiro protótipo do Wave Plane, instalado no Grenaa Píer, foi concluído em 2008.



Figura 2.6: Wave Plane. Fonte: López *et al*. (2013).

Wave Dragon

O Wave Dragon é uma tecnologia de grande escala destinada à geração de eletricidade a partir da energia das ondas do oceano. Inventado por Erik Friis-Madsen, seu desenvolvimento contou com o apoio financeiro da União Europeia, da Agência de Desenvolvimento do País de Gales, da Autoridade de Energia Dinamarquesa e do Programa PSO de serviços públicos da Dinamarca.

A quantidade de energia captada pelo dispositivo é gerada por meio de pás refletoras instaladas em ambos os lados do reservatório, que direcionam as ondas para a rampa central. O dispositivo é ancorado de forma flexível, permitindo que ele se posicione na direção predominante das ondas. A água captada pelo reservatório escoa pela ação da gravidade, passando por turbinas hidráulicas de baixa queda localizadas em sua região central, gerando eletricidade (Rosa, 2008).

Um protótipo em escala real foi instalado no mar em 2003 (figura 2.7 e 2.8), sendo considerado o primeiro dispositivo de energia de ondas offshore conectado à rede elétrica mundial. Essa unidade de teste forneceu eletricidade à rede por mais de 20.000 horas, estabelecendo um recorde mundial. Atualmente, está sendo solicitado um projeto de demonstração de 7 MW no País de Gales, e os preparativos para uma matriz de 50 MW em Portugal estão em andamento.



Figura 2.7: *Wave Dragon*. Fonte: Kofoed *et al*. (2006).

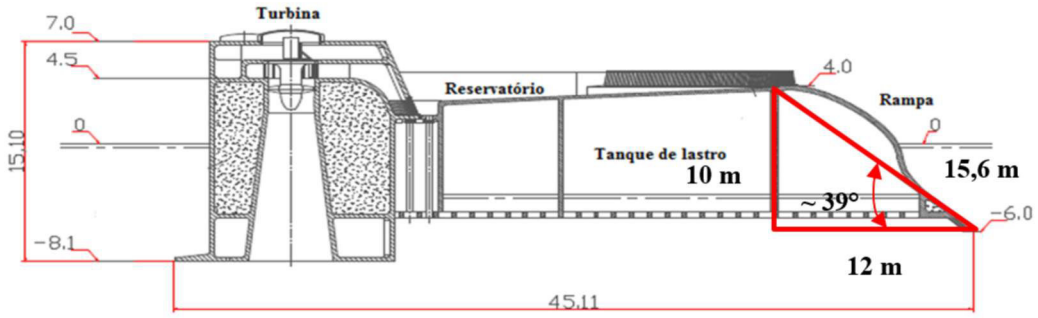


Figura 2.8: Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do Wave Dragon vista em corte com as suas dimensões em metros. Fonte: Goulart (2022).

Seawave Slot-Cone Generator – SSG

Desenvolvido pela Wave Energy AS a partir de 2004, o Sea Slot-cone Generator (SSG) é um dispositivo costeiro (onshore) de galgamento destinado à conversão da energia das ondas em eletricidade, por meio do armazenamento da energia potencial das ondas em múltiplos reservatórios empilhados verticalmente. A água captada passa por uma turbina, convertendo a energia potencial da água em energia mecânica rotacional. Essa energia mecânica é então transmitida a um gerador elétrico, que a converte em energia elétrica, que pode ser utilizada para abastecer a rede.

A figura 2.9 (a) apresenta uma vista lateral em corte do equipamento, enquanto a Figura 2.9 (b) ilustra a possível forma de sua instalação.

O SSG é uma estrutura de concreto equipada com uma turbina axial de múltiplos estágios. No projeto desenvolvido pela Wave Energy, o dispositivo conta com três reservatórios empilhados, permitindo que opere sob diferentes condições de ondas. Essa configuração possibilita um fluxo contínuo de água para a turbina, tornando o dispositivo mais eficiente em comparação com estruturas que possuem apenas um reservatório. O projeto piloto do SSG está instalado na costa da Noruega, na ilha de Kvitsøy, com uma potência aproximada de 150 kW e 10 metros de largura, em um ambiente de ondas com intensidade de 19 kW/m (Frigaard *et al.*, 2006).



a) b)

Figura 2.9: Ilustração de um dispositivo do tipo SSG: a) vista lateral e b) ilustração da instalação do dispositivo. Fonte: Margheritini *et al*. (2009).

A figura 2.10 exibe a vista lateral do projeto de um dispositivo do tipo SSG, incluindo as dimensões da rampa.

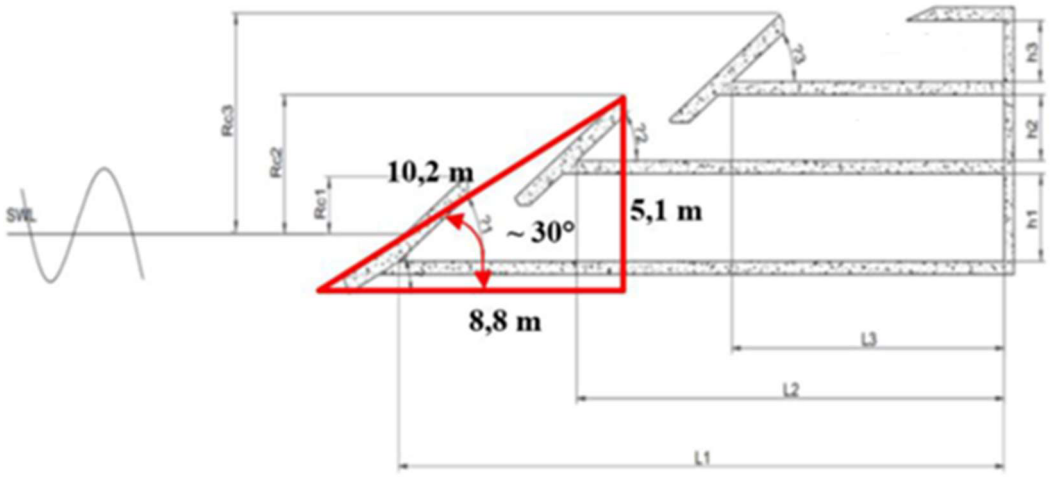


Figura 2.10: Vista lateral do projeto de um dispositivo do tipo SSG. Fonte: Adaptado de Goulart (2022).

Overtopping Breakwater for Energy Conversion – OBREC

Trata-se de um quebra-mar tradicional de enrocamento, incluindo uma estrutura superior de concreto, ou seja, o dispositivo que consiste em uma rampa seguida por um reservatório fechado por uma parede de coroamento. O reservatório está localizado acima do nível da água em repouso e é conectado à sala de máquinas por meio de um tubo que atravessa a parede de coroamento. A energia potencial das ondas de galgamento coletadas no interior do reservatório é convertida em energia por meio de turbinas de baixa queda localizadas na sala de máquinas (Palma *et al*., 2020).

Um protótipo do OBREC foi instalado em 2015 ao longo de 6 metros do quebra-mar de enrocamento de San Vincenzo, no Porto de Nápoles, na Itália (figura 2.11). A área costeira onde o OBREC foi instalado possui uma profundidade de 25 metros e um potencial médio anual estimado de energia das ondas de 2,5 kW/m. A estrutura é multifuncional, com o objetivo de proteger o porto e produzir energia ao mesmo tempo.



Figura 2.11: Vista frontal do protótipo OBREC instalado no porto de Nápoles.
Fonte: Palma *et al*. (2020).

2.3 Teoria das Ondas

2.3.1 A Formação das Ondas

A formação das ondas ocorre pela ação do vento, que resulta do aquecimento desigual da Terra pelo sol. Esse aquecimento varia devido à forma irregular do planeta, aquecendo mais intensamente algumas áreas do que outras. Quando o ar em uma área aquece, ele se torna menos denso e sobe, deixando espaço para o ar mais frio e denso que flui para preencher o vazio. Esse movimento de ar, chamado brisa, ao passar sobre a superfície da água, gera atrito, criando ondulações. À medida que o vento continua a exercer pressão sobre essas ondulações, ocorre um efeito cumulativo, formando ondas maiores. Esse processo pode ser visto como uma transferência de energia solar, do vento para as ondas (Cruz e Sarmento, 2004).

A propagação das ondas está relacionada com a profundidade da água. Em águas profundas dos oceanos, as ondas se movem sem interferência da topografia submarina. Entretanto, ao se aproximarem de águas rasas, a influência do fundo se torna significativa, reduzindo a velocidade de propagação e aumentando a altura das ondas até que ocorra a rebentação, que dissipa grandes quantidades de energia e provoca a emulsão de ar. Além disso, obstáculos como ilhas ou quebra-mares podem alterar a direção e a velocidade das ondas (Dean e Dalrymple, 1991).

A quantidade de energia transferida e a altura das ondas criadas pelo vento dependem não apenas da sua intensidade, mas também da extensão da área de atuação, chamada fetch ou comprimento de geração. Em cada estágio desse processo, a energia se concentra, e níveis de potência solar em torno de 100 W/m podem se transformar em ondas com potência acima de 1000 W/m (Thorpe, 1999).

Segundo Gonçalves (2003), a superfície do mar apresenta irregularidades devido às variações do vento na área de formação das ondas, causadas por flutuações de pressão e tensões tangenciais do vento, formando ondas de diferentes comprimentos e direções.

Essa agitação inicial é chamada de vaga (windsea), enquanto as ondas que se propagam para fora dessa zona são conhecidas como ondulação (swell).

Os modelos para descrever o comportamento das ondas podem ser divididos em teorias de ondas regulares e irregulares. A teoria de ondas regulares assume um comportamento bem definido e constante em cada período, ao contrário das ondas irregulares. Nos modelos de ondas irregulares, as ondas resultam da soma de pequenas ondas regulares com diferentes alturas e períodos, o que melhor representa o estado real do mar em ambientes oceânicos (Gomes, 2010). No entanto, neste trabalho, utilizam-se as ondas regulares para o estudo numérico, visando determinar a melhor forma geométrica de uma estrutura acoplada à rampa principal de um dispositivo de galgamento. A figura 2.12 ilustra as principais características das ondas regulares e os elementos básicos de uma onda oceânica.

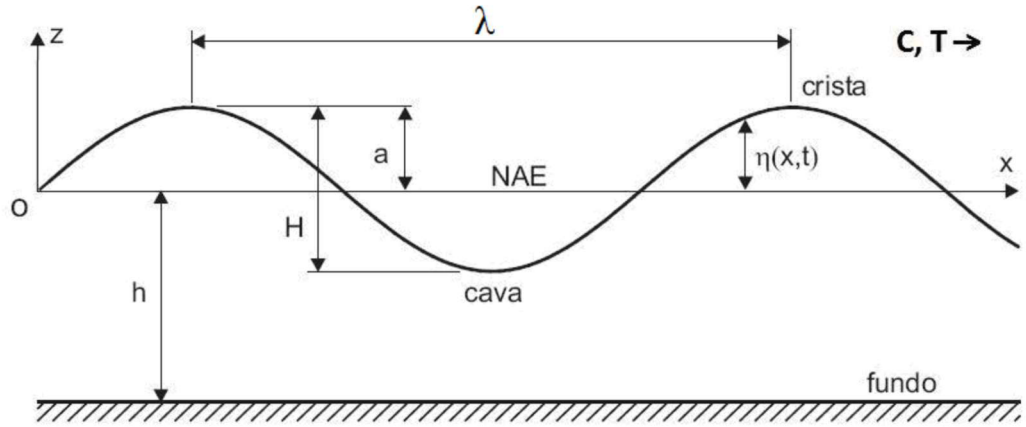


Figura 2.12: Elementos de uma Onda. Fonte: Dean e Dalrymple (1991).

Conforme mostrado na figura 2.12 (Dean e Dalrymple, 1991), os principais elementos de uma onda regular são:

- NAE (Nível de Água Estático): também conhecido como nível médio.
- Crista: o ponto mais alto alcançado pela superfície livre da água em relação ao plano do nível médio.
- Cava: o ponto mais baixo alcançado pela superfície livre da água em relação ao plano do nível médio.
- Profundidade (h): a distância entre o fundo do mar e o nível médio da água (superfície livre).
- Período (T): o tempo necessário para uma oscilação completa ou para que qualquer ponto da onda percorra uma distância equivalente ao comprimento de onda.
- Frequência (σ): o número de oscilações por unidade de tempo.
- Amplitude (a): a distância entre a crista e o nível médio da água ou entre a cava e o nível médio.

- Comprimento de Onda (λ): a distância entre duas cristas ou duas cavas consecutivas.
- Celeridade (c): a velocidade de propagação da onda.
- Altura (H): a distância entre as cristas e as cavas consecutivas.
- Elevação da Superfície Livre (η): a distância instantânea entre a superfície livre e o nível médio da água.

Diversas teorias de ondas já foram desenvolvidas e são amplamente discutidas na literatura, sendo aplicáveis a diferentes situações, de acordo com as condições ambientais. A escolha da teoria mais adequada deve levar em conta fatores como a altura da onda (H), o comprimento da onda (λ) e a profundidade da água (h). Esses fatores são geralmente expressos por meio dos seguintes parâmetros adimensionais:

- Declividade $\left(\frac{H}{\lambda}\right)$
- Profundidade relativa $\left(\frac{h}{\lambda}\right)$
- Altura de onda relativa $\left(\frac{H}{h}\right)$
- Número de Ursell $U_R = \left(\frac{\lambda^2 H}{h^3}\right)$

A teoria de ondas mais básica é a teoria linear, também conhecida como teoria de Airy, recomendada para casos onde a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, ou seja, para ondas de baixa amplitude e pequeno comprimento em águas profundas (Dean e Dalrymple, 1991).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), as teorias não lineares proporcionam uma representação mais realista das ondas, permitindo a análise de ondas mais altas em profundidades menores. A teoria de Stokes, por exemplo, é adequada para ondas de maior altura em águas relativamente profundas. A partir da teoria de segunda ordem, surgem componentes super-harmônicas, ou seja, frequências mais altas que são múltiplas da frequência fundamental, resultando em cristas mais elevadas e cavas mais achatadas. Outro fenômeno observado é o transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que o movimento das partículas deixa de ser uma órbita fechada (Carneiro, 2007).

Conforme exposto por Dean e Dalrymple (1991), as principais abordagens para a teoria de ondas são: Airy, Stokes, Cnoidal e Solitária. A figura 2.13 ilustra a forma da superfície livre da onda para cada uma dessas teorias.

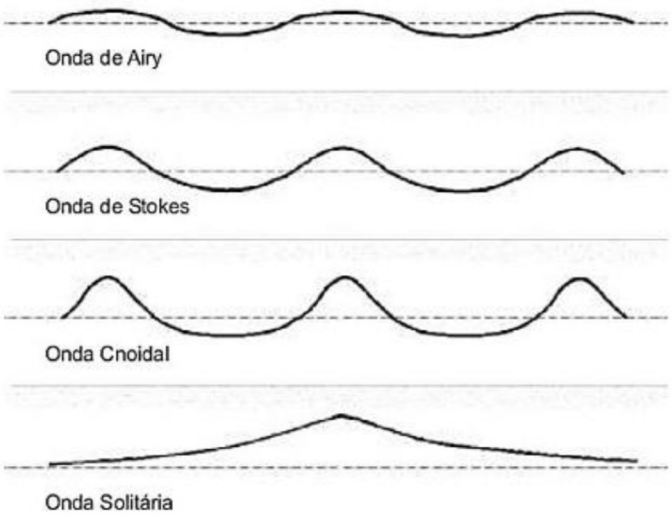


Figura 2.13: Teoria das ondas. Fonte: Dean e Dalrymple (1991).

De acordo com Dean e Dalrymple (1991), a solução de Stokes é aplicável quando $k.h < 1$ e $H/\lambda \leq 1$, em que $k = 2\pi/\lambda$ representa o número de onda. Em termos do número de Ursell, a teoria é limitada a $U_R < 26$. No que se refere à profundidade, valores de $h/\lambda > 0{,}5$ caracterizam águas profundas.

A figura 2.14 apresenta uma comparação dos formatos dos tipos de ondas de gravidade em função do número de Ursell. Com os parâmetros h, H, T, e g (aceleração da gravidade), é possível, com o auxílio do gráfico na figura 2.14, identificar a teoria de ondas mais adequada para cada situação. Nos estudos numéricos, as equações de campo de velocidades definidas por cada teoria são usadas como condições de contorno em canais simulados, para replicar os efeitos de um gerador de ondas e simular o comportamento do escoamento no oceano.

Dadas as características da onda utilizadas neste estudo (período $T = 7{,}5$ s, comprimento de onda $\lambda = 65{,}4$ m, altura $H = 1{,}0$ m e profundidade $h = 10{,}0$ m), a Teoria de Stokes de 2ª ordem proporciona a melhor descrição para este caso.

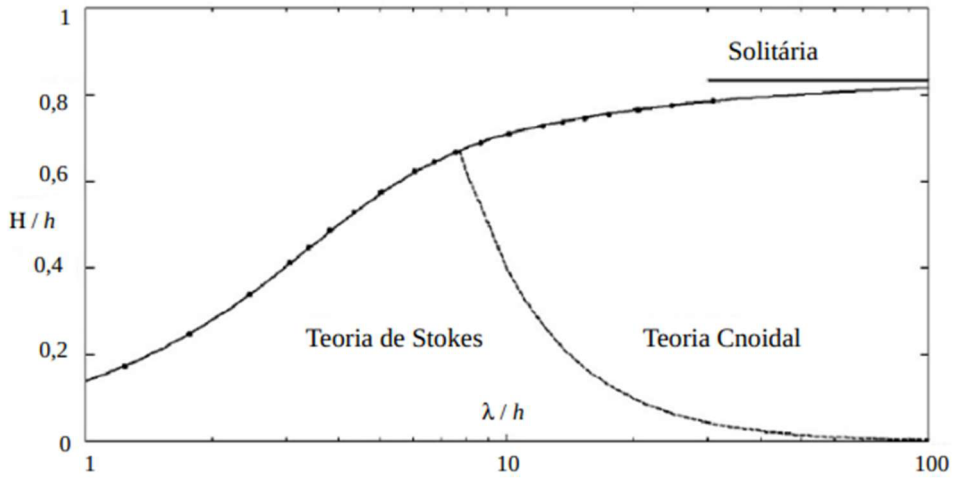


Figura 2.14: Aplicabilidade das teorias de ondas. Fonte: Barbosa (2016).

2.3.2 Teoria de Stokes de 2º Ordem

Segundo Gomes (2010), Stokes, em 1880, desenvolveu uma metodologia de alta ordem para analisar ondas de altura finita, assumindo que as propriedades do movimento ondulatório, como o potencial de velocidades, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações. Quanto mais termos são incluídos na série, mais precisa se torna a aproximação das propriedades da onda.

Neste estudo, foi adotada a teoria de Stokes de 2ª ordem, o que permite uma representação mais fiel das ondas reais, possibilitando a análise de ondas mais altas em profundidades mais rasas. A teoria de Stokes é indicada para ondas de maior altura em águas relativamente profundas. A partir da segunda ordem, surgem componentes harmônicas — frequências multiplicadas por 2, 3,... n vezes a frequência fundamental — o que resulta em cristas mais elevadas e cavas mais achatadas (Carneiro, 2007).

Para essa teoria, as expressões do potencial de velocidades e do deslocamento da superfície livre são dadas, respectivamente, por (Chakrabarti, 2005):

$$\phi = -\frac{Hg}{2\sigma}\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)}\operatorname{sen}(kx-\sigma t) - \frac{3H^2\sigma}{32}\frac{\cosh 2k(h+z)}{\operatorname{senh}^4(kh)}\operatorname{sen} 2(kx-\sigma t) \tag{2.1}$$

$$\eta = \frac{H}{2}\cos(kx-\sigma t) + \frac{H^2\sigma}{16}\frac{\cosh(kh)}{\operatorname{senh}^3(kh)}(2+\cosh 2(kh))\cos 2(kx-\sigma t) \tag{2.2}$$

Após a derivação da equação (2.1) em relação a u e w, são encontradas as respectivas componentes da velocidade (Chakrabarti, 2005):

$$u(x,z) = \frac{Hgk}{2\sigma}\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)}\cos(kx-\sigma t) + \frac{3H^2\sigma}{16}\frac{\cosh 2k(h+z)}{\operatorname{senh}^4(kh)}\cos 2(kx-\sigma t) \tag{2.3}$$

$$w(x,z) = \frac{Hgk}{2\sigma}\frac{\operatorname{senh} k(h+z)}{\cosh(kh)}\operatorname{sen}(kx-\sigma t) + \frac{3H^2\sigma}{16}\frac{\operatorname{senh} 2k(h+z)}{\operatorname{senh}^4(kh)}\operatorname{sen} 2(kx-\sigma t) \tag{2.4}$$

onde, H [m] é a altura da onda, g [m/s^2] gravidade, k [m^{-1}] número de onda, σ [rad/s] frequência angular da onda, t [s] tempo, h [m] profundidade, η [m] elevação da superfície da água, ϕ [m^2/s] potencial de velocidade, x coordenada horizontal, z coordenada vertical, u [m/s] velocidade horizontal e w [m/s] velocidade vertical.

2.4 Turbinas Hidrocinéticas

A energia cinética presente em correntes de água ou ar pode ser transformada em energia mecânica por meio de turbinas, que podem ter eixo horizontal ou vertical, conforme ilustrado na figura 2.15. Para aplicações de pequena escala, as turbinas de eixo vertical são mais indicadas devido à sua capacidade omnidirecional, eliminando a necessidade de alinhamento com a direção do fluido e, consequentemente, dispensando mecanismos de inclinação e direcionamento (Alam e Iqbal, 2010).

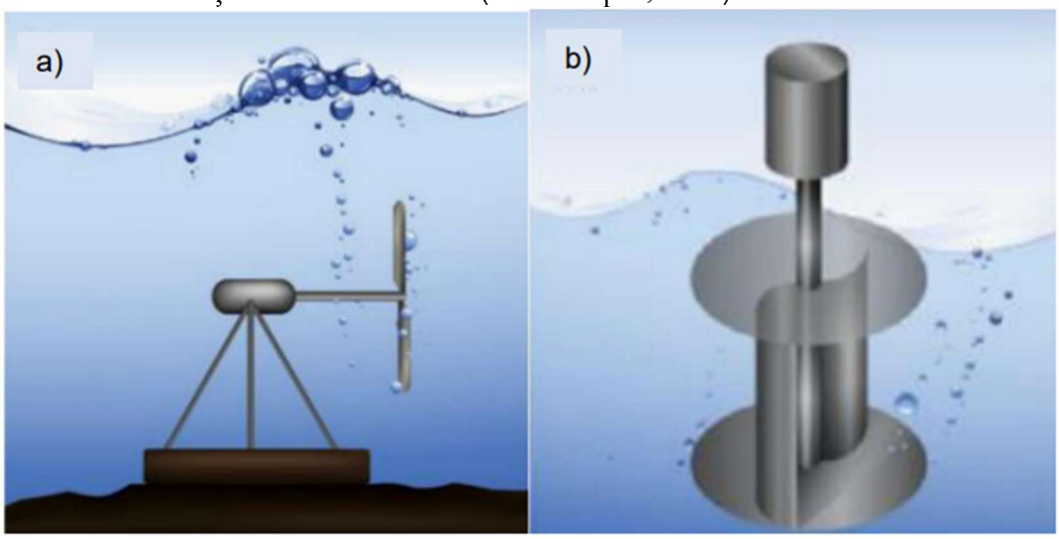


Figura 2.15: Turbina hidrocinética: a) vista horizontal e b) vista vertical. Fonte: Cavalcante (2024).

Um dos desafios ao operar uma turbina é superar o torque inicial de rotação, fenômeno semelhante ao dos motores a diesel, que necessitam de um motor de partida para vencer a inércia inicial (Heard, 2015). Em inglês, o termo *cut-in speed* refere-se à velocidade mínima necessária para que a turbina comece a girar (Alam e Iqbal, 2010). Essa velocidade mínima é essencial para o funcionamento das turbinas, pois, abaixo dela, a força da corrente não é suficiente para superar a inércia das lâminas e iniciar o movimento. Reduzir essa velocidade mínima é um dos principais desafios na geração de energia em correntezas de baixa intensidade.

Nesse cenário, as turbinas do tipo Savonius ganharam destaque entre engenheiros e fabricantes. Elas oferecem alto torque inicial, construção simplificada, baixo custo (Khan; Iqbal; Hinchey, 2007) e são independentes da direção do escoamento de água. Além disso, operam eficientemente em baixas velocidades de correnteza e exigem menos manutenção em comparação às turbinas convencionais, como a Francis e a Kaplan (Alam e Iqbal, 2010).

2.4.1 Turbina Savonius

A turbina Savonius, criada pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius em 1922 e patenteada em 1926, é um dispositivo de eixo vertical projetado para transformar

a força de um fluido em torque em um eixo rotativo. A figura 2.16 a) mostra uma versão inicial do design, composta por um cilindro cortado transversalmente ao longo de seu eixo de simetria, com as duas metades deslocadas (Solari, 2019).

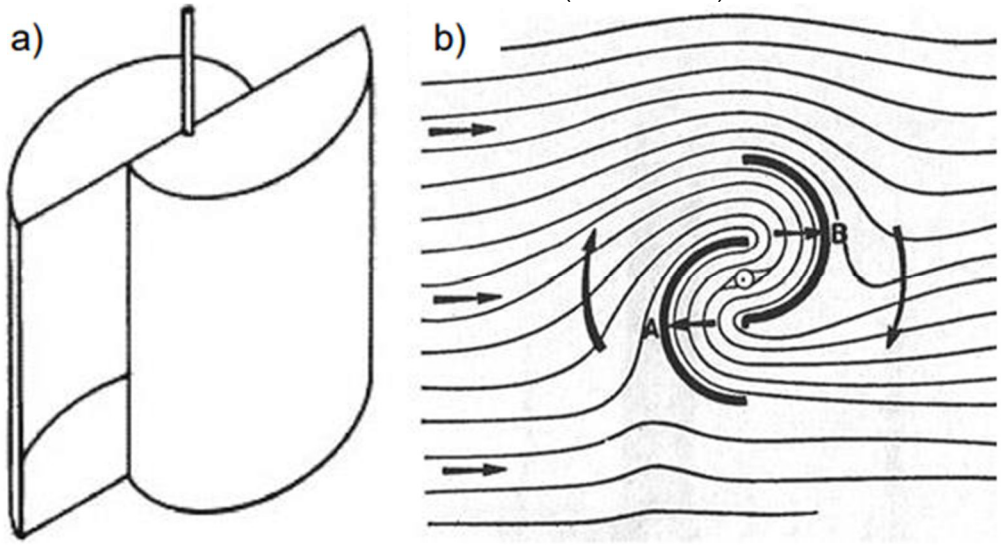


Figura 2.16: a) Turbina Savonius e b) linhas de corrente. Fonte: Solari (2019).

A figura 2.16 b) apresenta uma representação das linhas de corrente que ilustram o funcionamento da turbina Savonius. Cada metade do cilindro é submetida a uma pressão na face frontal e a uma sucção na face traseira. A diferença nas forças resultantes gera um momento de torção que faz a turbina girar em torno de seu eixo. O diferencial dessa turbina é operar predominantemente por arrasto, ao contrário das turbinas de sustentação mais comuns (Solari, 2019).

Entre as vantagens da turbina Savonius estão seus baixos níveis de ruído e sua relativa independência em relação à direção do fluido incidente (Solari, 2019). Embora tenha eficiência menor, destaca-se pela capacidade de capturar energia em correntezas de baixa velocidade e em locais com variações de maré reduzidas (Thermal Engineering, 2021).

Dada essas características, esse perfil foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho.

2.4.2 Potência de uma Turbina Hidrocinética

A energia cinética é a energia associada ao movimento de um corpo. Trata-se de uma grandeza escalar, expressa em Joules, que pode ser determinada utilizando a equação (2.5):

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \tag{2.5}$$

onde E_c representa a energia cinética [J], m é a massa do corpo [kg] e v é a velocidade [m/s]. Em correntezas, a energia cinética das partículas de água pode ser calculada pela mesma fórmula, levando em conta a massa da água em movimento e sua velocidade (Donev, 2015).

A potência disponível (P_{disp}) em uma correnteza de água, considerando a ausência de variações significativas na profundidade ou na elevação, pode ser calculada utilizando a equação (2.6):

$$P_{disp} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \tag{2.6}$$

onde P_{disp} é a potência disponível [W], ρ representa a massa específica do fluido [kg/m^3], A é a área transversal da turbina [m^2] e v é a velocidade do fluido [m/s] (Bahaj, 2011). Com essa equação, é possível estimar analiticamente a potência disponível com base na velocidade do fluido e na área projetada da turbina.

O coeficiente de potência C_p é um parâmetro que relaciona a potência mecânica de saída da turbina com a potência da corrente marinha incidente na área abrangida pelo rotor (Yadav *et al*., 2023). Esse coeficiente é crucial para avaliar a eficiência na captura da energia da corrente, sendo que valores mais altos de C_p indicam maior eficiência e uma conversão mais eficaz da energia disponível em energia útil (Alcorn e O'Sullivan, 2013). O C_p é definido pela equação (2.7).

$$C_p = \frac{P_{turb}}{P_{disp}} \tag{2.7}$$

O estudo de Betz (1926) estabeleceu que existe um limite máximo para o coeficiente de potência C_p, conhecido como a Lei de Betz, que determina que o valor máximo de C_p é 0,593. Atualmente, o coeficiente de potência para turbinas hidrocinéticas típicas varia entre 0,3 e 0,4 (Boretti, 2020). Com isso, a equação (2.7) pode ser representada por:

$$C_p = \frac{P_{turb}}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \tag{2.8}$$

É importante destacar que a utilização da equação (2.8) é válida apenas para a previsão dos coeficientes de potência em turbinas expostas a condições de escoamento aberto. No caso do dispositivo de galgamento, a potência da correnteza no equipamento é afetada pela direção do escoamento da água imposta pelas paredes do duto de saída do conversor, ou seja, a perda de carga no dispositivo deve ser considerada ao determinar o coeficiente de potência C_p.

Dessa forma, ao inserir a turbina na estrutura do dispositivo de galgamento, o coeficiente de potência, conforme indicado por Khaligh e Onar (2010) e Dos Santos *et al.* (2022), é calculado por:

$$C_p = \frac{P_{turb}}{\left(\Delta p + \frac{\rho v^2}{2}\right) q} \tag{2.9}$$

onde q [m^3/s] é a vazão volumétrica da água e Δp [Pa] é a diferença de pressão estática entre a parte a montante e a parte a jusante do rotor.

Um parâmetro adimensional importante em estudos sobre turbinas é a razão de velocidade de ponta do rotor (TSR, do inglês *Tip Speed Ratio*), que relaciona a velocidade angular do rotor com a velocidade do escoamento de ar não perturbado (Menet *et al*., 2001). Essa razão é representada por:

$$TSR = \frac{\omega R}{V} \tag{2.10}$$

onde: ω é a velocidade angular do rotor [rad/s], R é o raio da turbina [m] e V é a velocidade da correnteza [m/s]. A figura 2.17 relaciona o C_p com o TSR. A partir desses dados é possível encontrar a geometria de pá ou rotor que melhor se adequa a situação ambiental a qual a turbina estará exposta (Alam e Iqbal. 2010).

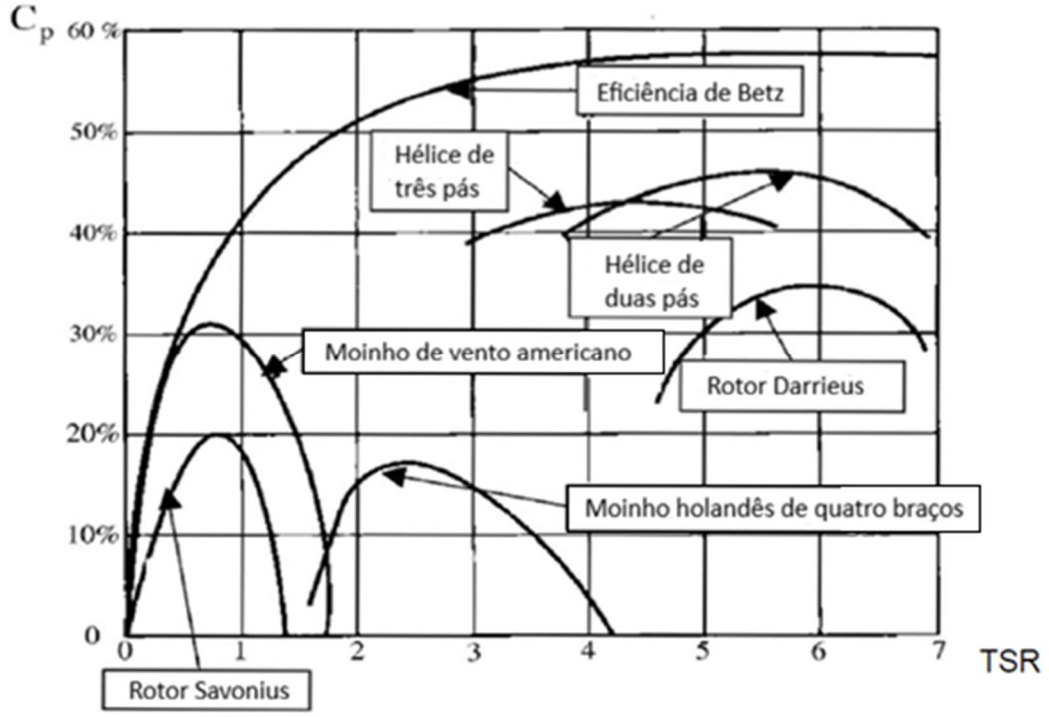


Figura 2.17: Coeficiente de potência (C_p) em função da velocidade de ponta do rotor (λ ou *TSR*) para diferentes modelos de turbinas.: Alam e Iqbal (2010).

A figura 2.17 ilustra como a turbina Savonius é especialmente adequada para baixas velocidades, pois seu TSR varia entre 0,4 e 1 nessa condição, e seu C_p alcança valores elevados nessa faixa de operação. O moinho de vento americano, embora também seja uma solução eficiente, trabalha com um fluido diferente, que é o ar.

3 Modelagem Matemática

3.1 Domínio Computacional

O problema físico analisado consiste de um dispositivo de galgamento bidimensional com uma turbina do tipo Savonius inserida no duto de saída do reservatório. Além disso, é considerado o dispositivo inserido em um canal de ondas, como pode ser visto na figura 3.1. A geração de ondas é causada pela imposição de perfis de velocidade (definido com teoria de Stokes de 2ª ordem) na superfície inferior esquerda do domínio computacional. No lado superior esquerdo e superfícies superiores é imposta a condição de pressão atmosférica ($P_{abs} = 101{,}3$ kPa) e nas demais superfícies do canal (superfície inferior e direita) e do dispositivo, as velocidades são prescritas como nulas, ou seja, foi adotada condição de contorno de não deslizamento e impermeabilidade. Na região da turbina, é imposta uma velocidade angular constante (ω) na região chamada domínio rotacional, simulando o efeito da ação do fluido sobre a turbina. Quanto às condições iniciais, considera-se o problema com uma condição de onda já formada em sua inicialização.

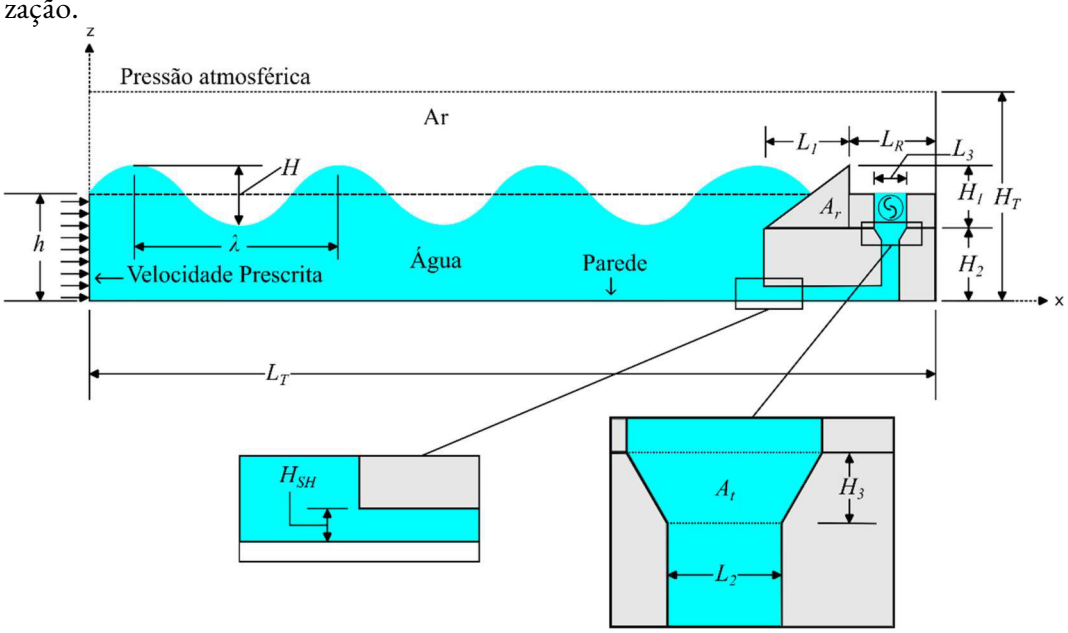


Figura 3.1: Domínio computacional de um dispositivo de galgamento com uma turbina acoplada.

Em relação às dimensões do problema, considera-se uma camada de água de $h = 10$ m, altura e comprimento do canal de onda de $H_T = 20$ m e $L_T = 327$ m. A onda monocromática que se aproxima tem um comprimento de onda de $\lambda = 65{,}4$ m, período de $T = 7{,}5$ s e altura de $H = 1{,}0$ m, parâmetros esses utilizados nos trabalhos de Goulart (2014) e Martins (2016). O problema possui quatro restrições de áreas: área total do canal de onda (A_T), área total do reservatório (A_R), fração de área dada pela razão

entre a área de rampa (A_r) e a área total do canal ($\varphi_r = A_r/A_T = 0{,}012$), fração de área dada pela razão entre a área do trapézio colocado no duto de saída (A_t) e a área total do reservatório ($\varphi_t = A_t/A_R = 0{,}225$). No presente trabalho foram adotadas as proporções obtidas por Martins *et al*. (2018) para o caso onde se obteve a melhor eficiência energética do dispositivo de galgamento ($L_1 \cong 21{,}69$ m e $H_1 \cong 7{,}23$ m). Para o modelo acoplado foram considerados os valores de $L_2 = 0{,}2$ m, $L_3 = 2$ m, $H_2 = 3{,}5$ m e $H_3 = 0{,}8$ m. Além disso, será considerado um reservatório com um comprimento de $L_R = 20{,}0$ m e altura do duto de saída horizontal de $H_{SH} = 0{,}15$ m. O principal objetivo do modelo acoplado e simular numericamente a incidência das ondas no dispositivo de galgamento e o escoamento de água galgada na turbina Savonius ao longo de um período de $t = 60{,}0$ s.

3.2 Método Volume of Fluid (VOF)

Na abordagem do escoamento bifásico, utiliza-se uma equação de transporte para a fração volumétrica (f) com base na metodologia VOF. Conforme Hirt e Nichols (1981), o método VOF é amplamente indicado para problemas envolvendo escoamentos multifásicos e imiscíveis. Este método é amplamente aplicado em estudos relacionados à conversão de energia das ondas oceânicas em energia elétrica, conforme demonstrado em diversas pesquisas, como as de Dos Santos (2018), Gomes *et al*. (2018), Liu *et al*. (2011) e Gomes (2010).

Na metodologia VOF, o somatório das frações volumétricas das fases presentes no sistema (como ar e água) deve sempre ser igual a um. As células computacionais em que a fração volumétrica de água ($f_{água}$) está entre 0 e 1 representam a região de interface entre água e ar. Nessas condições, a fração de ar (f_{ar}) é determinada por $f_{ar} = 1 - f_{água}$. Assim, as células computacionais são completamente ocupadas pela fase ar quando $f_{água} = 0$, o que implica $f_{ar} = 1$.

Ao aplicar o método VOF, são resolvidas as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento. A fração volumétrica de cada fluido é considerada na equação de transporte correspondente. Como descrito por Hirt e Nichols (1981), Liu *et al*. (2011), Gomes *et al*. (2018) e Lima *et al*. (2017), as equações de conservação da massa, da fração volumétrica e da quantidade de movimento são apresentadas da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial (f)}{\partial t} + \nabla \cdot (f \vec{v}) = 0 \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p_e + \nabla(\mu \bar{\bar{\tau}}) + \rho g \tag{3.3}$$

onde t [s] é o tempo, g [m/s^2] é a aceleração da gravidade, ρ [kg/m^3] é a massa específica, μ [kg/ms] é a viscosidade dinâmica, $\vec{v}$ [m/s] é o vetor de velocidade do escoamento, p [Pa] é a pressão estática.

Para estimar a interação entre as duas fases distintas nas células onde ocorre a interface entre água e ar, os valores médios da massa específica e da viscosidade dinâmica são determinados por meio das seguintes expressões:

$$\rho = f_{água} \cdot \rho_{água} + f_{ar} \cdot \rho_{ar} \tag{3.4}$$

$$\mu = f_{água} \cdot \mu_{água} + f_{ar} \cdot \mu_{ar} \tag{3.5}$$

3.3 Equacionamento do Modelo Clássico *k-ω SST*

Conforme detalhado por Menter *et al*. (2003), no modelo de turbulência $k-\omega\ SST$, é incluído um termo de viscosidade turbulenta que correlaciona as tensões de Reynolds com a taxa média de deformação do campo. Essa viscosidade turbulenta, expressa em [kg/ms], é calculada pela seguinte fórmula:

$$\mu_t = \frac{\bar{\rho} \cdot \alpha_1 \cdot k_T}{max(\alpha_1 \omega_T, S_T F_2)} \tag{3.6}$$

onde k_T é a energia cinética turbulenta [m²/s²], $\alpha_1 = 5/9$, ω_T é taxa de dissipação específica [J/kg], S_T é o módulo do tensor deformação e F_2 é uma função de combinação.

Por sua vez, a energia cinética turbulenta é expressa por:

$$\frac{\partial(\rho k_T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i k_T) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + \tilde{P}_k - \beta_T \rho k \omega_T \tag{3.7}$$

onde u_i [m/s] é a componente horizontal da velocidade, $\tilde{P}_k$ é o termo de produção da energia cinética da turbulência que é utilizado para evitar o acúmulo de turbulência em regiões de estagnação, $\beta_T = 0{,}09$ e $\sigma_k = 0{,}85$ são constantes do modelo.

A taxa de dissipação específica é calculada por:

$$\frac{\partial(\rho \omega_T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \omega_T) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\omega_T}}\right)\nabla \omega_T\right]$$
$$+(1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega_2}} \nabla k_T \nabla \omega_T + \alpha_1 \frac{\omega_T}{k_T} \tilde{P}_k - \beta_T \rho \omega_T^2 \tag{3.8}$$

sendo $\sigma_{\omega_T} = 2$, $\sigma_{\omega_2} = 0{,}856$ e F_1 uma função de combinação, assim como F_2.

Estas funções de combinação são dadas, respectivamente, por:

$$F_1 = \tanh\left\{\left\{min\left[max\left(\frac{\sqrt{k_T}}{\beta_T \omega_T y}, \frac{500 v_T}{y^2 \omega_T}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega_2} k_T}{CD_{k\omega} y^2}\right]\right\}^4\right\} \tag{3.9}$$

$$F_2 = \tanh\left\{\left[max\left(\frac{2\sqrt{k_T}}{\beta_T \omega_T y}, \frac{500 v_T}{y^2 \omega_T}\right)\right]^2\right\} \tag{3.10}$$

onde y [m] é a distância em relação à parede, v_T [m²/s] é a viscosidade cinemática turbulenta e $CD_{k\omega}$ é dado pela expressão:

$$CD_{k\omega} = max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega_2} \omega_T} \nabla k_T \nabla \omega_T, 10^{-10}\right) \tag{3.11}$$

4| Modelagem Numérica

Segundo Maliska (2004), os avanços tecnológicos, como computadores mais rápidos e com maior capacidade de armazenamento, têm impulsionado o uso de métodos numéricos para resolver problemas reais em diversas áreas científicas. A simulação numérica ganhou destaque devido à sua flexibilidade e eficiência, utilizando algoritmos que transformam equações diferenciais em sistemas algébricos resolvidos em pontos discretos do domínio, processo conhecido como discretização.

Na engenharia e nas ciências, a precisão dos resultados depende tanto da qualidade do modelo matemático quanto do método numérico empregado. Uma boa discretização aproxima a solução exata, mas aumenta o esforço computacional necessário (Dos Santos, 2011).

Na área de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*), como explicado por Versteeg e Malalasekera (1995), métodos numéricos são aplicados para analisar escoamentos de fluidos, transferência de calor e reações químicas. A CFD reduz custos e tempo em projetos, permitindo o estudo de sistemas complexos e condições arriscadas. Um estudo de CFD segue três etapas:

1. Pré-processamento: definição do problema, geração da malha e especificação de propriedades e condições de contorno;
2. Processamento: aplicação de técnicas numéricas para resolver as equações;
3. Pós-processamento: análise e interpretação dos resultados.

Entre os métodos tradicionais de solução numérica estão o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Volumes Finitos (MVF) e o Método de Elementos Finitos (MEF), que diferem no tratamento das variáveis e na abordagem de discretização (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 2007).

4.1 O Método dos Volumes Finitos (MVF)

O MVF é utilizado para transformar uma Equação Diferencial Parcial (EDP) em uma versão discreta por meio da integração da EDP em uma região específica do espaço, denominada volume de controle. O processo envolve três etapas principais: identificação das fronteiras do domínio onde ocorre o fenômeno, divisão do domínio em volumes de controle, e fixação da variável a ser calculada nos centroides desses volumes, conforme ilustrado na figura 4.1.

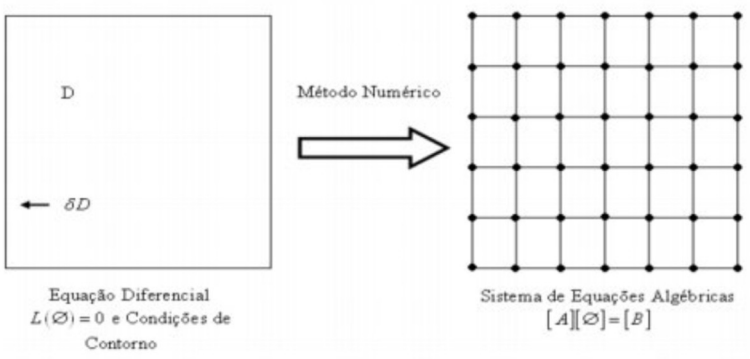


Figura 4.1: Técnica de discretização para o Método dos Volumes Finitos. Fonte: Maliska (2004).

Existem duas abordagens para derivar as equações aproximadas nesse método: a primeira baseia-se no balanço da propriedade de interesse nos volumes de controle, enquanto a segunda realiza a integração da EDP, na forma conservativa, ao longo do volume de controle, considerando o espaço e o tempo (Maliska, 2004).

O desenvolvimento do Método dos Volumes Finitos (MVF) está intrinsecamente relacionado ao conceito de fluxo entre volumes adjacentes, onde o fluxo de uma grandeza, como massa ou energia, corresponde à quantidade que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida dessa grandeza por unidade de tempo é calculada pela integração, nas fronteiras do volume de controle, da diferença entre os fluxos que entram e saem. Esse processo é realizado de forma geral por meio da integração das Equações Diferenciais Parciais (EDPs) (Maliska, 2004; Fortuna, 2000).

Neste trabalho, foi utilizada a análise de CFD. O *software* GMSH foi empregado para definir o domínio do problema, criar as geometrias e gerar as malhas utilizadas. A discretização do domínio foi realizada pelo MVF, implementado no software Fluent, permitindo a solução das equações de conservação do escoamento por meio de balanços elementares de conservação da propriedade envolvida. Assim, os resultados obtidos refletem de forma consistente a fenomenologia física do problema estudado (Maliska, 2004).

As simulações foram realizadas em computadores equipados com processadores Intel® Core™ i7 9700 @ 3.00 GHz de oito núcleos e 16 GB de memória RAM. Para otimizar o tempo de simulação, foi utilizada a técnica de processamento paralelo.

4.1.1 Discretização Temporal das Equações de Conservação

Em escoamentos transientes, é possível determinar com maior precisão as oscilações do coeficiente de torque estático ao longo do tempo, causadas pelo fenômeno de desprendimento de vórtices no escoamento (Fraga, 2013). Para essa análise, é necessário utilizar um esquema de integração temporal, que pode ser classificado como implícito, totalmente implícito ou explícito (Maliska, 2004).

Os esquemas implícitos são inteiramente estáveis e permitem o uso de passos de tempo maiores em comparação com os outros métodos. No entanto, em domínios de

grande dimensão, exigem maior tempo de processamento devido à dificuldade de armazenar as matrizes completas do sistema de equações na memória principal (Reddy e Gartling, 1994; Dos Santos, 2011). Por outro lado, os esquemas explícitos demandam menos espaço na memória, mas o passo de tempo é limitado por restrições de estabilidade numérica (Dos Santos, 2011).

Neste estudo, foi adotado o esquema implícito para avanço temporal. As equações de quantidade de movimento e massa foram resolvidas utilizando uma formulação implícita, com resíduos definidos em 10^{-6} para continuidade, velocidades, k e ω. A convergência foi alcançada quando os resíduos dos cálculos iterativos atingiram valores abaixo desse limite (Silva, 2013), envolvendo 180 iterações por passo de tempo.

4.1.2 Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação

No MVF, a discretização da equação de quantidade de movimento associa valores discretos da variável ao centro de cada volume de controle. Entretanto, a presença de termos advectivos nas equações do escoamento pode gerar instabilidades numéricas significativas quando se utiliza discretizações por diferenças centrais. Essas instabilidades manifestam-se como oscilações inconsistentes nos campos de velocidade, pressão e temperatura, além da geração de coeficientes negativos. A causa principal está relacionada ao tamanho da malha, que, em muitos casos, é insuficiente para lidar com a complexidade do problema sem causar instabilidade. Refinar a malha até garantir a positividade dos coeficientes é impraticável devido ao alto esforço computacional envolvido (Dos Santos, 2011).

Uma solução eficiente para esse problema é a utilização de outra abordagem para aproximar os termos advectivos nas faces dos volumes de controle, como o método *upwind*, que considera apenas um lado do fluxo (Maliska, 2004).

Neste trabalho, foi adotado o esquema de advecção *Upwind* de segunda ordem. Esse método utiliza uma expansão em série de Taylor a partir do centro do volume de controle para calcular as soluções nas faces. Segundo Fraga (2013), esse esquema é mais preciso do que o *Upwind* de primeira ordem, especialmente quando a direção do escoamento não está alinhada com a malha, como ocorre com malhas triangulares, semelhantes às utilizadas neste estudo.

4.1.3 Resolução de Equações Aplicando o Método de Solução Segregado

O Fluent oferece dois métodos numéricos principais: o método segregado (*segregated solver*) e o método acoplado (*coupled solver*). Ambos integram as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento geradas pela discretização, mas diferem na forma de resolver as incógnitas.

No método acoplado, todas as incógnitas são resolvidas simultaneamente. Isso é feito através da criação de uma única matriz que envolve todos os coeficientes, permitindo que as equações governantes para todas as variáveis (como velocidade, pressão e temperatura) sejam resolvidas em todos os volumes de controle ao mesmo tempo. Por

outro lado, o método segregado resolve as equações governantes de forma sequencial, isto é, uma equação de cada vez (por exemplo, quantidade de movimento) em todos os volumes de controle, atualizando os coeficientes a cada passo (Maliska, 2004).

Cada método possui vantagens específicas. O método acoplado, embora eficiente para problemas altamente interdependentes, resulta em matrizes com alto índice de esparsidade, o que demanda maior esforço computacional e memória. Já o método segregado gera matrizes menos esparsas, acelerando a resolução dos sistemas lineares e reduzindo o uso de memória.

Devido às não linearidades das equações governantes, o método segregado (baseado em pressão) exige várias iterações para alcançar a convergência. Cada iteração envolve incrementos sucessivos, como ilustrado na figura 4.2 (Duarte, 2006).

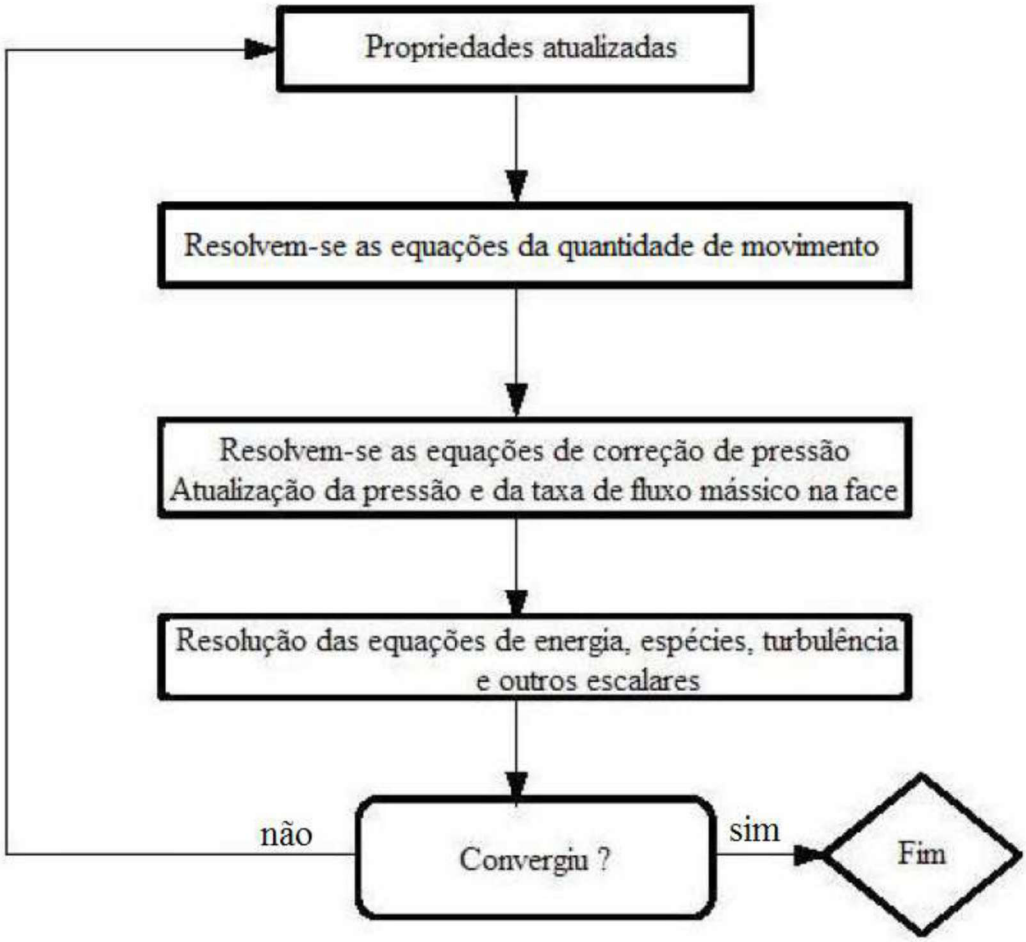


Figura 4.2: Algoritmo de solução segregada. Fonte: Goulart (2014).

Em cada iteração, ocorrem os seguintes passos:

- Atualização das propriedades dos fluidos;
- Solução das equações da quantidade de movimento, utilizando os valores atualizados de pressão e fluxos de massa nas faces;

- Caso as velocidades obtidas em um dado incremento de tempo não satisfaçam a equação de continuidade localmente, é gerada uma equação de correção de pressão. Essa equação é formulada com base na equação de continuidade e nas equações do movimento linearizadas, sendo resolvida para ajustar a pressão, o perfil de velocidade e os fluxos de massa nas faces, até que a continuidade seja atendida.

4.1.4 Acoplamento Pressão-Velocidade

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e da massa, em problemas incompressíveis, enfrenta o desafio do acoplamento entre pressão e velocidade. Para lidar com isso, é necessário um procedimento iterativo e sequenciado (algoritmo) que refine progressivamente a estimativa do campo de pressão, de forma que o campo de velocidades atenda à equação de continuidade na sua forma discretizada (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Enquanto os campos de velocidade podem ser avançados no tempo utilizando a equação de conservação da quantidade de movimento, o campo de pressão não possui uma equação direta para sua evolução temporal. A equação de conservação da massa atua apenas como uma restrição para o campo de velocidades, sem fornecer uma variável diretamente evolutiva no tempo (Dos Santos, 2011; Maliska, 2004).

Neste estudo, utiliza-se o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators).* Similar ao método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), o PISO corrige os campos de pressão e velocidade com base na equação da conservação da quantidade de movimento, mas inclui um passo adicional de correção. Esse passo extra assegura a conservação da massa de forma mais robusta.

4.1.5 Método *Geo-Reconstruction*

Conforme descrito por Gomes (2010), no método de reconstrução geométrica (Geo-Reconstruction), os esquemas padrão de interpolação do Fluent são empregados para calcular o fluxo nas faces dos volumes de controle que estão completamente preenchidos por uma única fase, com a interface representada na figura 4.3. No entanto, quando o volume se encontra próximo à interface entre duas fases, aplica-se o esquema de reconstrução geométrica. Esse método modela a interface entre os fluidos utilizando uma aproximação linear por partes (*piecewise-linear*).

Ainda segundo Gomes (2010), no esquema de reconstrução geométrica, assume-se que a interface entre os dois fluidos apresenta uma inclinação linear dentro de cada célula. Essa inclinação é obtida por meio de uma interpolação linear, sendo utilizada para calcular o fluxo advectivo do fluido através das faces do volume de controle.

O processo é dividido em três etapas:

1. Determinação da posição da interface: Inicialmente, calcula-se a posição da interface linear em relação ao centro do volume de controle parcialmente preenchido, com base na fração volumétrica;
2. Cálculo do fluxo advectivo: Em seguida, determina-se o fluxo advectivo de fluido através de cada face, utilizando informações sobre a distribuição de velocidades nessas faces;
3. Atualização da fração volumétrica: Por fim, calcula-se a fração volumétrica em cada volume de controle, com base no balanço dos fluxos obtidos na etapa anterior.

Esse método permite uma representação mais precisa da interface entre as fases, essencial em simulações que envolvem escoamentos multifásicos.

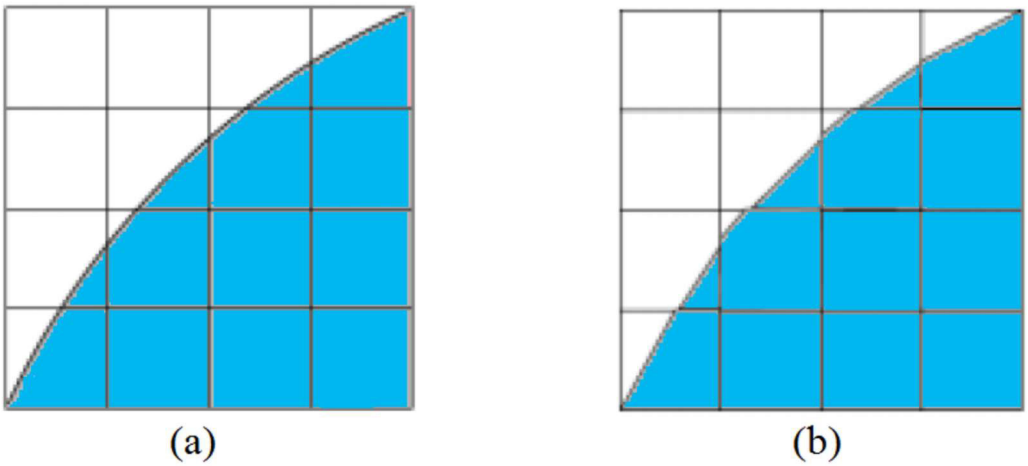


Figura 4.3: Construção de interface através do esquema de Geo-Reconstruction: (a) interface real e (b) interface Geo-Reconstruction. Fonte: Goulart (2014).

4.2 Procedimentos Numéricos

O presente trabalho utilizou o MVF (Versteeg e Malalasekera, 2007) para a solução numérica das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e da equação de transporte de fração de volume. Também foi utilizado o pacote comercial de CFD Fluent. O modelo multifásico VOF (Hirt e Nichols, 1981) foi aplicado para a interação entre ar, água e o dispositivo. Um resumo com os parâmetros numéricos adotados no software comercial Fluent são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Métodos adotados nas simulações numéricas.

Parâmetro		Entrada numérica
Solver		Pressure-based
Acoplamento pressão-velocidade		PISO
Discretização espacial	Avaliação de gradiente	Least Squares Cell Based
	Pressão	PRESTO
	Quantidade de Movimento	Upwind de 2º ordem
	Volume Fraction	Geo-Reconstruct
Esquema de Diferenciação Temporal		Primeira Ordem Implícita
Modelo de Turbulência		$k-\omega\ SST$
Fatores de sub-relaxação	Pressão	0,3
	Quantidade de Movimento	0,4
Resíduo	Continuidade	10^{-6}
	Velocidade-x	
	Velocidade-z	
Método de inicialização de canal aberto		Wavy
Passo de tempo (Δt)		$5{,}00 \times 10^{-3}$ s
Número máximo de iterações por vez passo de tempo		180

4.3 Verificação e Validação do Modelo Numérico

Primeiramente, foi feita a análise do problema bifásico, através do método VOF, no modelo do canal de ondas contendo o dispositivo de galgamento sem a presença da turbina. Nesta verificação o regime de escoamento analisado é $k-\omega\ SST$, a teoria de Stokes de 2º ordem foi aplicada para a geração das ondas no canal e a altura de água acumulada mensurada no reservatório foi comparada com os resultados encontrados por Martins e*t al*. (2018).

Após esta validação, foi realizada a validação numérica do problema da turbina Savonius em um túnel de vento. Nesta validação, o ar foi modelado como um escoamento incompressível e no regime turbulento (modelo $k-\omega\ SST$). Os resultados obtidos foram comparados ao estudo experimental de Blackwell *et al.* (1977) e, também, com o estudo numérico de Akwa (2010) e Akwa *et al.* (2012).

4.3.1 Verificação Numérica do Canal de Ondas com o Dispositivo de Galgamento sem Inserção de Turbina

A partir do estudo de Martins *et al*. (2018), foi realizada a verificação numérica do modelo computacional do dispositivo de galgamento inserido a um canal de ondas, sem a presença de uma turbina. Empregou-se o canal de ondas bidimensional, conforme o esquema apresentado pela figura 4.4, com 327 m de comprimento, 20 m de altura e largura 1 m. Foi adotado a profundidade de lâmina de água $h = 10{,}0$ m e comprimento de onda $\lambda = 65{,}4$ m. As ondas geradas possuem período $T = 7{,}5$ s e altura $H = 1{,}0$ m.

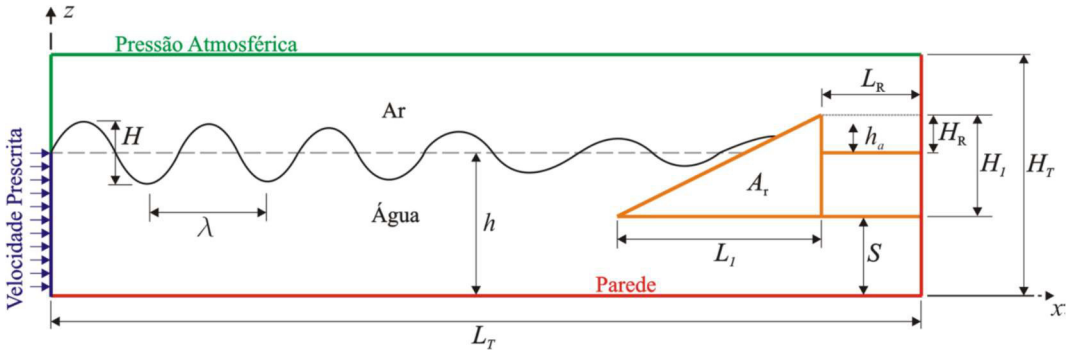


Figura 4.4: Ilustração do domínio investigado numericamente. Fonte: Martins *et al*. (2018).

A figura 4.5 apresenta a malha utilizada neste trabalho. Em Gomes *et al*. (2012), é recomendada a utilização, na região da superfície livre, de elementos com dimensão equivalente a $H/20$ na direção z (perpendicular ao sentido de propagação do escoamento) e de 50 volumes por comprimento de onda (λ) na direção *x*, correspondente à direção principal de propagação do escoamento. Entretanto, no presente estudo, empregou-se um refinamento mais elevado, com elementos de dimensão $H/30$ na direção *z* e 70 volumes por comprimento de onda na direção *x*. Esse refinamento adicional foi necessário em função da interação entre o escoamento da onda e a rampa do dispositivo de galgamento. Além disso, foi adotado um maior refinamento nas proximidades das paredes, devido aos elevados gradientes do campo de velocidades nessas regiões, resultando em aproximadamente 120000 volumes finitos. Esse tipo de malha estruturada, composta por elementos retangulares, foi utilizado pela primeira vez em Goulart (2014). No trabalho de Iahnke (2010), por outro lado, foi empregada malhas irregulares com elementos triangulares, que apresentam maior facilidade de adaptação ao domínio computacional. Contudo, a principal vantagem das malhas regulares com volumes retangulares consiste na redução de efeitos numéricos, como a falsa difusão, sobre a solução das variáveis primárias do problema.

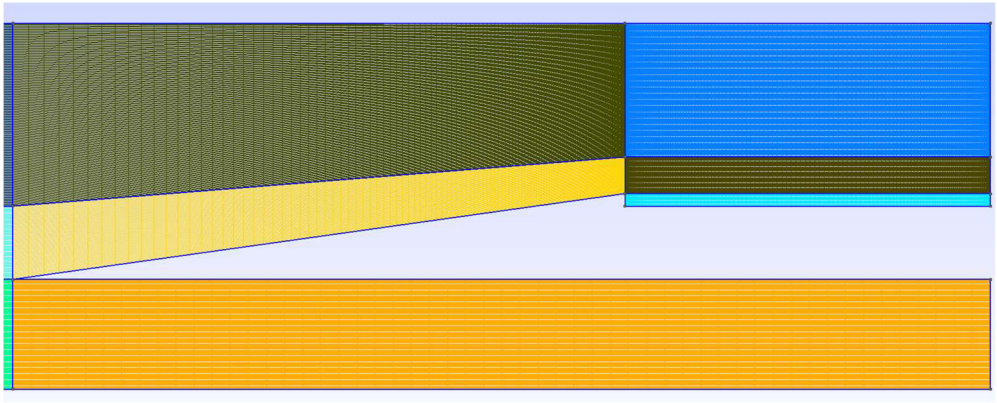


Figura 4.5: Discretização espacial empregada no dispositivo de galgamento onshore em escala real

De maneira semelhante ao estudo desenvolvido por Goulart (2014), realizou-se uma análise de convergência do passo de tempo para definir a discretização temporal adotada, considerando que o problema em questão é de natureza transiente. Para isso, foram executadas três simulações, diferenciando-se apenas pelo valor do passo de tempo, com o objetivo de avaliar sua influência sobre a elevação da superfície livre da onda em um ponto específico do tanque (50,0 m do gerador de ondas). Em todas as simulações, o tempo final considerado foi de $t_f = 65{,}0$ s. Os valores analisados para o passo de tempo foram: $\Delta t = 5{,}0 \times 10^{-3}$ s, $\Delta t = 1{,}0 \times 10^{-2}$ s e $\Delta t = 2{,}0 \times 10^{-2}$ s. A figura 4.6 apresenta a evolução temporal da superfície livre da onda para cada um dos passos de tempo investigados. Observou-se que, para valores de $\Delta t = 2{,}0 \times 10^{-2}$ s os resultados obtidos apresentaram uma diferença relativa pequena em relação aos demais casos, $\Delta t = 5{,}0 \times 10^{-3}$ s e $\Delta t = 1{,}0 \times 10^{-2}$ s. Diante desses resultados, adotou-se o passo de tempo de $\Delta t = 2{,}0 \times 10^{-2}$ s uma vez que esse valor proporcionou soluções consistentes com menor custo computacional em comparação aos passos de tempo mais reduzidos.

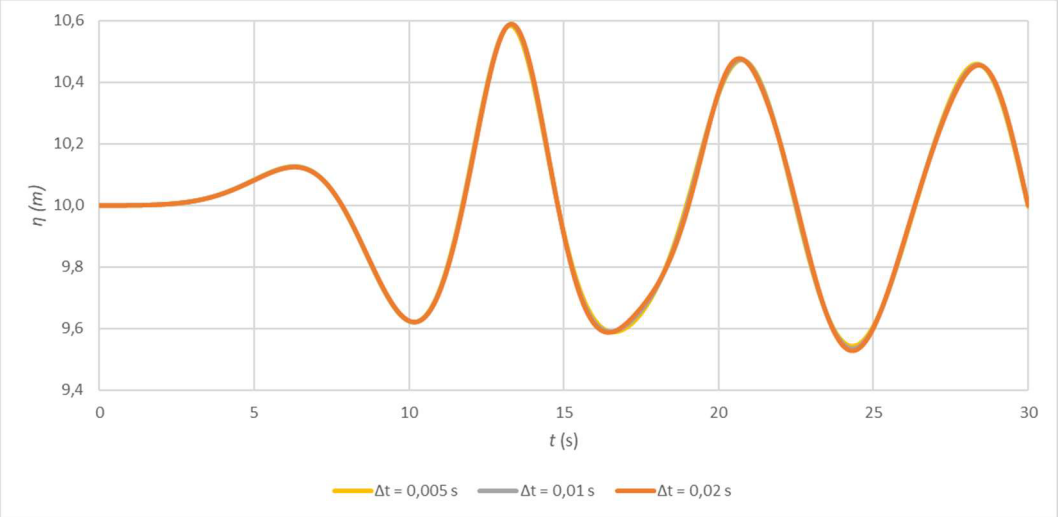


Figura 4.6: Avaliação da influência do passo de tempo nas simulações realizadas.

Na tabela 4.2 são mostrados os valores da elevação da superfície livre da onda (η) no instante de 15 s, além das variações observadas para cada passo de tempo avaliado.

Tabela 4.2: Comparação dos valores da superfície livre da onda (η) em 15,0 s para os passos de tempo investigados e suas respectivas variações.

Δt (s)	η (m)	Variação (%)
0,020	9,906385	-
0,010	9,906829	$4{,}49 \times 10^{-3}$
0,005	9,912546	$5{,}77 \times 10^{-3}$

Após a definição das discretizações espacial e temporal, procedeu-se à verificação do modelo numérico empregado. Para esta tarefa, foi realizada a comparação entre a massa de água acumulada no reservatório em função do tempo obtidos no estudo numérico de Martins *et al*. (2018) e as previsões numéricas obtidas com o atual método computacional. A distância entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque (S) foi de 6,0 m e a razão entre a altura e o comprimento da rampa (H_1/L_1) analisada foi de 0,18. A análise foi limitada ao intervalo de tempo de 65,00 s. Inicialmente, foi adotado um modelo de escoamento laminar, com o objetivo de comparar os resultados obtidos neste estudo com aqueles apresentados por Martins et al. (2018). Em seguida, empregou-se o modelo de turbulência $k-\omega$ *SST*, visando investigar a influência da modelagem da turbulência sobre o fenômeno do galgamento. Essa comparação é apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Variação entre a massa de água acumulada no reservatório em função do tempo para diferentes razões de H_1/L_1.

	Massa Acumulada (kg)	Variação (%)
Martins *et al*. (2018)	924,29	-
Este Trabalho - Laminar	973,91	5,37
Este Trabalho - $k-\omega$ *SST*	997,13	7,88

Com os resultados quantitativos apresentados, a verificação do modelo do canal de ondas com o dispositivo de galgamento sem a presença de turbina foi considerada satisfatória e qualifica o estudo para a investigação do dispositivo de galgamento caso se tenha uma verificação/validação do escoamento na turbina Savonius.

4.3.2 Validação e Verificação Numérica da Turbina Savonius em um Túnel de Vento

Nesta etapa, foi realizada a simulação de um escoamento de ar incompressível e turbulento em um domínio bidimensional que representa um túnel de vento. O estudo considerou um regime transiente com propriedades termofísicas constantes. Dentro do túnel de vento, foi inserido um domínio contendo uma zona rotacional com rotação constante imposta. Nesse domínio, encontra-se o rotor de uma turbina Savonius, que também opera em rotação constante, em conformidade com o estudo experimental de Blackwell *et al*. (1977).

A comparação dos resultados para o coeficiente de potência (C_p), dado pela equação (2.8), foi realizada com base no trabalho experimental de Blackwell *et al*. (1977) e

nos estudos numéricos de Akwa (2010), Akwa *et al*. (2012) e Dos Santos *et al*. (2022), considerando diferentes velocidades de ponta (TSR): 0,75; 1,00; 1,25 e 2,00. O escoamento de ar em corrente livre foi modelado com uma velocidade constante de $V_\infty = 7$ m/s e um número de Reynolds de $Re_D = 867.000$ atravessando o domínio retangular e interagindo com a região da turbina em rotação. As dimensões do domínio analisado, bem como as condições de contorno, estão ilustradas na figura 4.7.

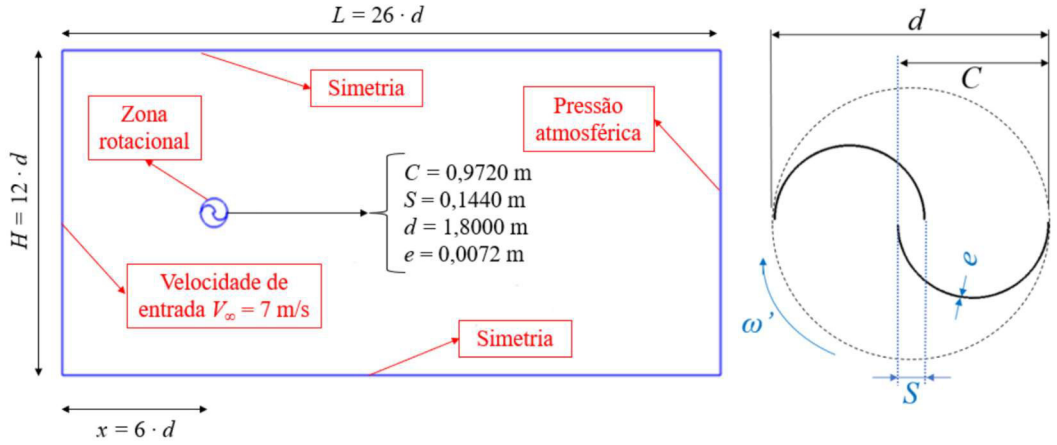


Figura 4.7: Domínio computacional do túnel de vento com turbina Savonius.
Fonte: Santos (2023).

A malha computacional utilizada para a validação foi gerada com o objetivo de se aproximar ao máximo das características dos estudos de Akwa (2010) e Akwa *et al*. (2012). Enquanto esses autores utilizaram o software Star-CCM+, o presente trabalho fez uso do programa GMSH. Para alcançar a melhor aproximação numérica nos resultados da validação, foi realizado um teste de convergência de malha. Nesse processo, foram geradas três malhas diferentes, utilizando o coeficiente de potência como parâmetro de análise. Como a maior interferência do escoamento de ar sobre o equipamento ocorre nos aerofólios da turbina, os refinamentos foram concentrados nos arcos das extremidades das pás e nas curvaturas ao longo de sua estrutura.

A tabela 4.4 apresenta os dados das malhas analisadas.

Tabela 4.4: Teste de convergência de malha para validação numérica da turbina Savonius em um túnel de vento.

Caso	Média C_p	D.R. (%)
Malha 1 (60.466 Volumes)	0.24502	-
Malha 2 (105.797 Volumes)	0.24216	1.167
Malha 3 (230.981 Volumes)	0.24167	0.203

Com base nos resultados apresentados justifica-se a escolha da Malha 3 (230.981 Volumes), pois nota-se que essa malha já está suficiente refinada, permitindo uma solução numérica com boa acurácia. As figuras 4.9 e 4.10 ilustram a malha gerada com o software GMSH para a turbina Savonius livre e um detalhe da malha nas pás da turbina Savonius, respectivamente.

A figura 4.11 ilustra a comparação dos resultados do efeito da razão de velocidade de ponta de pá (TSR) sobre o coeficiente de potência (C_p) do presente trabalho com os trabalhos experimental e numéricos. Aqui, para o cálculo dos parâmetros de média temporal, apenas os resultados no intervalo de tempo 1,75 s $\leq t \leq$ 3,5 s foram usados.

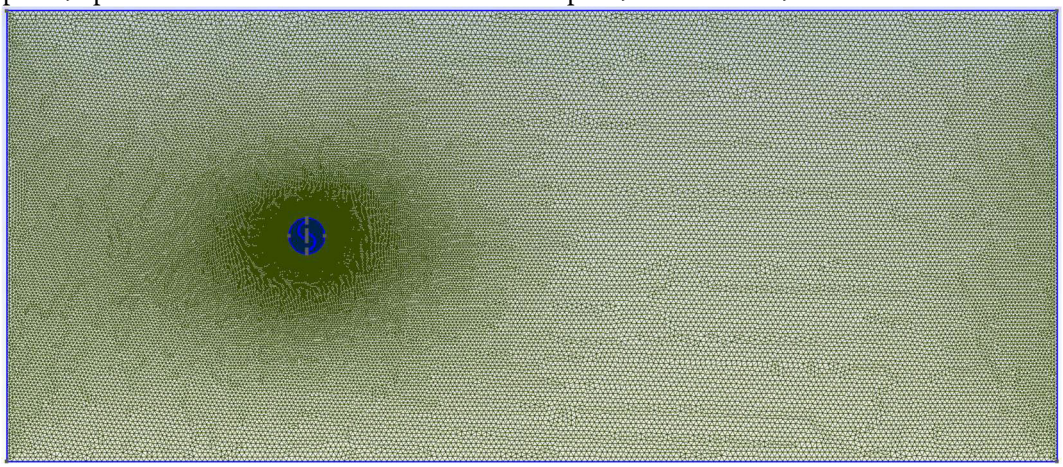


Figura 4.8: Malha independente do caso empregado para validação e verificação do escoamento turbulento sobre uma turbina Savonius.

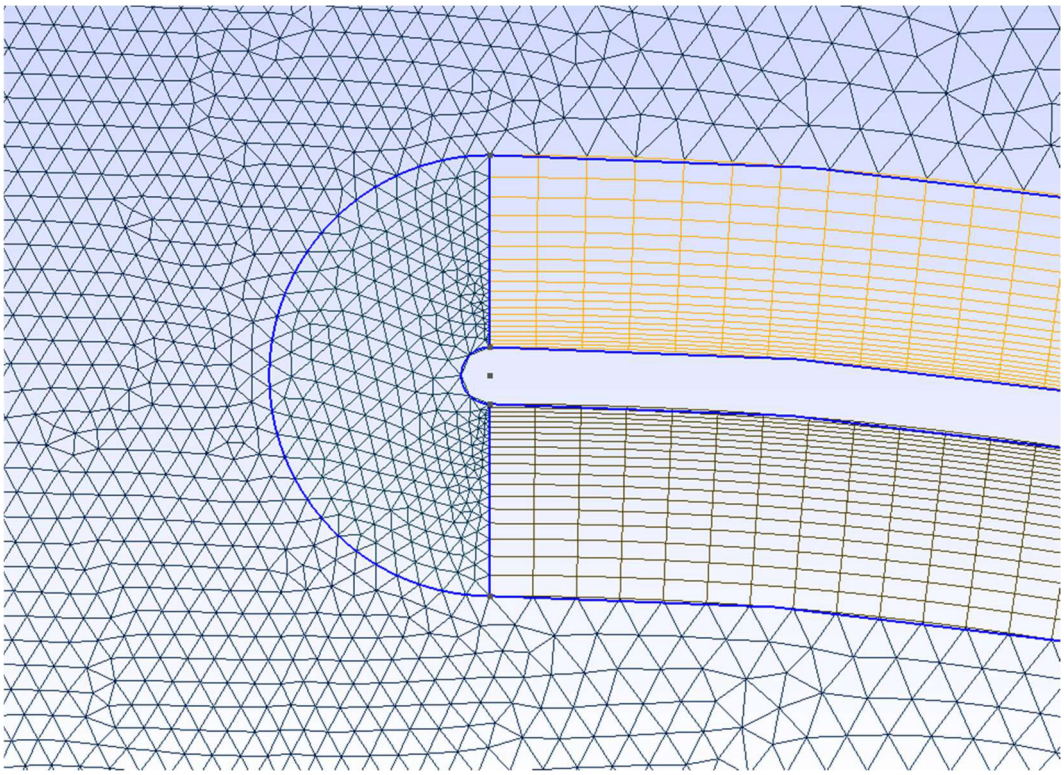


Figura 4.9: Região próxima às pás na malha usada para validação e verificação.

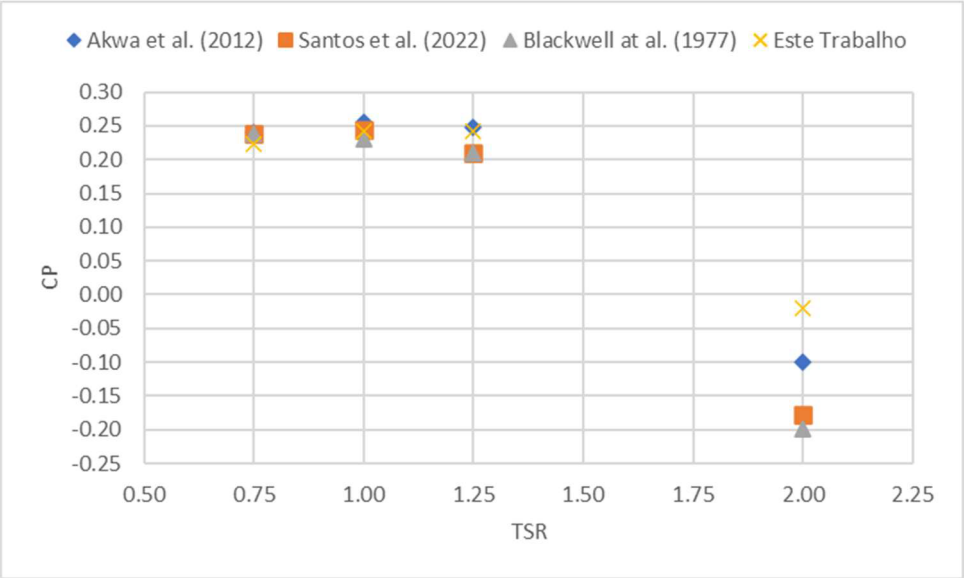


Figura 4.10: Validação e verificação numérica do coeficiente de potência para turbina Savonius em túnel de vento.

Os resultados previstos com o presente método estão em estreita concordância com aqueles obtidos anteriormente na literatura, verificando e validando o método usado aqui. Os resultados indicaram que as maiores magnitudes de C_p foram alcançadas nos menores valores de *TSR*. Com o aumento em *TSR*, a magnitude de C_p teve uma ligeira diminuição na faixa de $1{,}00 \leq TSR \leq 1{,}25$ e uma diminuição gradual para $TSR \geq 1{,}25$. Para *TSR* = 2,00, foram obtidas magnitudes negativas de C_p, indicando que o dispositivo fornece energia para o escoamento do fluido e não o contrário.

Em resumo, os resultados obtidos indicam que a validação e a verificação numérica da turbina Savonius em rotação, simulada em um domínio bidimensional representando um túnel de vento, estão em conformidade com o estudo experimental de Blackwell *et al*. (1977) e os trabalhos numéricos de Akwa (2010), Akwa *et al*. (2012) e Dos Santos *et al*. (2022). Esses resultados são considerados satisfatórios, permitindo o prosseguimento do modelo acoplado proposto neste estudo.

5 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentadas as análises realizadas para a elaboração do trabalho, como por exemplo, desenvolvimento do modelo computacional do dispositivo de galgamento com a turbina Savonius inserida e determinação do coeficiente de potência (C_P).

5.1 Modelo Computacional do Dispositivo de Galgamento com a Inserção de uma Turbina do Tipo Savonius

Após os resultados obtidos nos estudos de verificação e validação do canal de ondas, do dispositivo de galgamento sem turbina e do escoamento turbulento sobre a turbina de impulso do tipo Savonius em domínio aberto, este item apresenta a análise integrada dessas modelagens, reunindo os modelos citados em uma única simulação numérica.

O acoplamento desses modelos possibilita uma análise mais realista de dispositivos de galgamento em condições próximas às reais de operação, tanto no que se refere à fenomenologia do escoamento da água gerado pelo galgamento das ondas sobre a rampa do dispositivo, quanto em relação ao comportamento hidrodinâmico da turbina Savonius em rotação no interior do canal de escoamento. Dessa forma, reduzem-se simplificações frequentemente adotadas nos estudos atuais, permitindo uma representação mais fiel da interação entre o escoamento e a turbina.

O domínio do dispositivo de galgamento no canal de ondas corresponde ao mesmo apresentado no item 3.1 deste trabalho, ilustrado na figura 3.1. Da mesma forma, o modelo da turbina Savonius utilizado nesta análise é o mesmo descrito no item 4.3.2.

Para a geração da onda no canal, foi empregada a teoria de Stokes de segunda ordem. A inicialização do problema ocorreu por meio da sub-rotina “Wavy”, na qual a simulação é iniciada com a onda já completamente formada em todo o domínio computacional, abrangendo desde o gerador de ondas até a parede localizada na extremidade final do canal.

A malha computacional foi construída com base nas técnicas adotadas nos casos de verificação e validação dos estudos numéricos realizados. Após a realização de diferentes testes de refinamento na região interna do duto em que a turbina é inserida no dispositivo de galgamento, obteve-se uma malha composta por 373.181 volumes finitos. As figuras 5.1 e 5.2 ilustram o refinamento da malha na região do reservatório, do duto de saída de água do dispositivo de galgamento e da turbina Savonius.

Nas simulações do modelo acoplado, foram consideradas cinco velocidades angulares constantes para a turbina Savonius, com o objetivo de analisar a hidrodinâmica do dispositivo. Os valores de ω foram definidos de modo a corresponder às velocidades de ponta investigadas no estudo da turbina Savonius em túnel de vento, conforme a Equação (2.10).

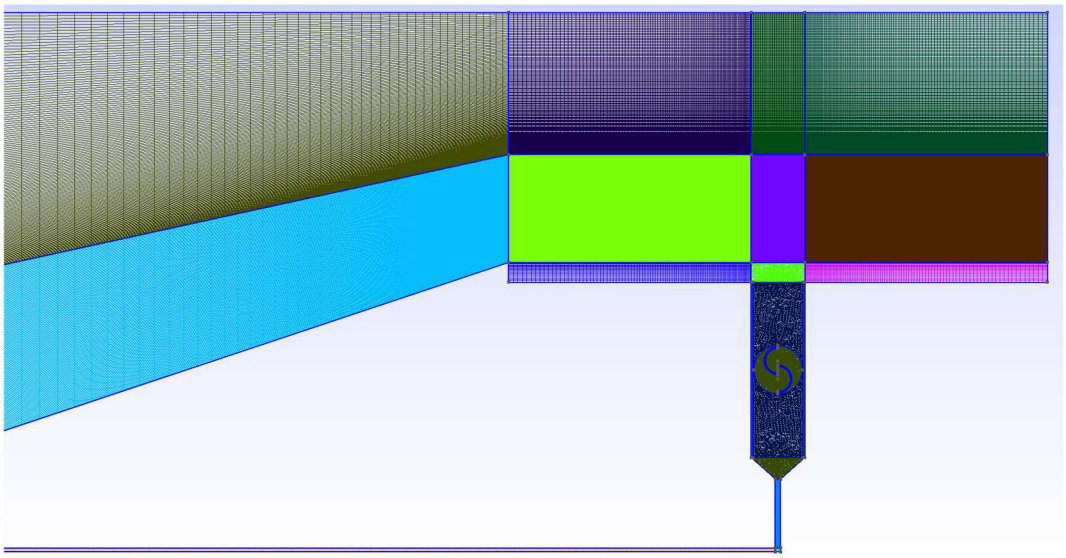
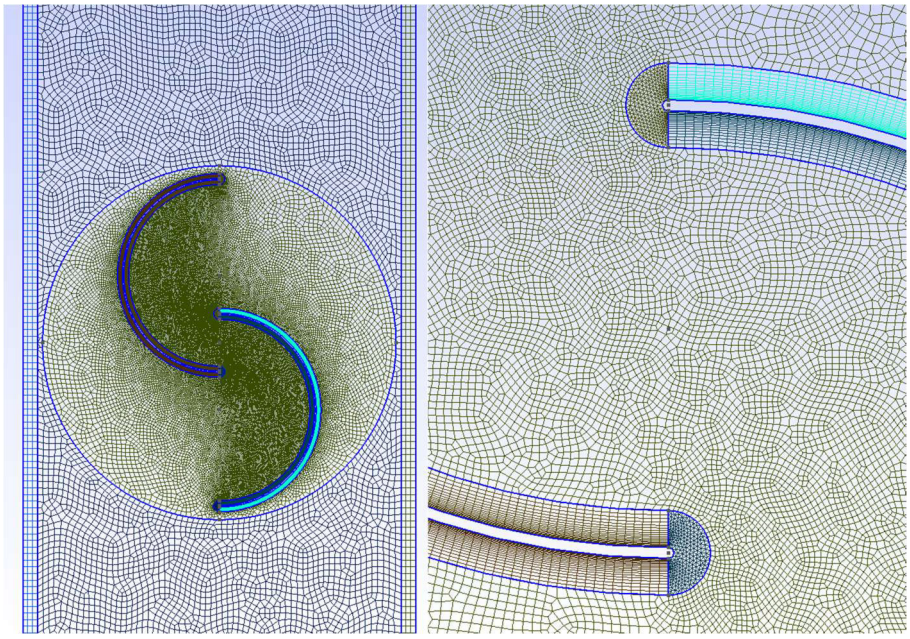


Figura 5.1: Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento em escala real com uma turbina inserida.



(a) (b)

Figura 5.2: Malha empregada para o caso analisado: (a) turbina em um dispositivo de galgamento, (b) detalhe de refinamento da malha das superfícies das pás.

Nessa configuração, adotou-se ω como parâmetro constante, uma vez que a oscilação do sentido do escoamento de água no dispositivo de galgamento provoca variações temporais nos valores de TSR. As velocidades angulares analisadas, em rad/s, foram: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 e 0,25.

Com o objetivo de monitorar a altura da superfície livre da água no canal de ondas, bem como a magnitude da velocidade e a pressão estática da água no interior do duto de saída do dispositivo de galgamento, foram posicionadas linhas de monitoramento.

A 1º linha de monitoramento, posicionada a 50,0 m do gerador de ondas, foi configurada para a análise transiente da elevação da superfície livre da água durante a propagação das ondas no canal. Essa medição permite verificar a concordância entre os resultados numéricos obtidos e a equação da teoria de ondas adotada no estudo.

A 2º e a 3º linhas de monitoramento, localizadas no interior do duto de água do dispositivo de galgamento, antes e após a turbina Savonius, ilustrado na figura 5.3, foram configuradas para captar os valores quantitativos da magnitude da velocidade da água ao longo do duto de saída do dispositivo. Além disso, o posicionamento dessas linhas possibilita a obtenção do diferencial de pressão estática no interior do duto.

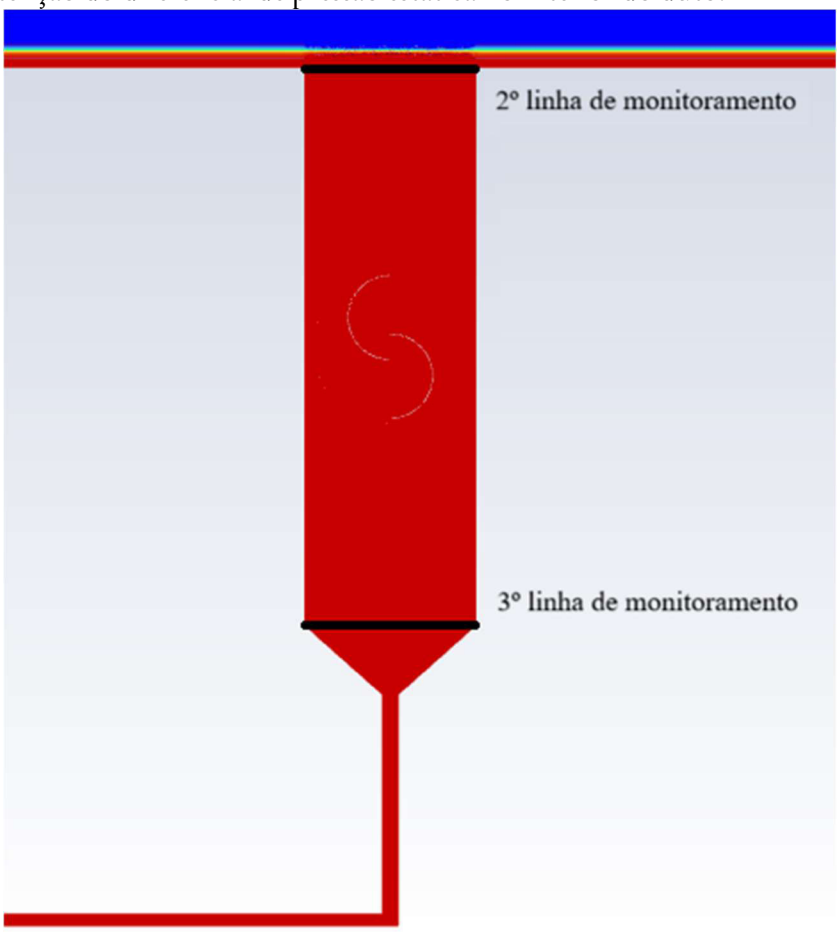


Figura 5.3: Posicionamento das linhas de monitoramento no interior do duto de água do dispositivo de galgamento

A partir dos dados coletados, são determinados o coeficiente de potência C_p e sua média RMS, C_{pRMS}, com o objetivo de avaliar o desempenho da turbina Savonius instalada no equipamento.

5.2 Resultados do Modelo Acoplado

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos para a série de simulações realizadas com o domínio completo, considerando as cinco velocidades angulares descritas anteriormente.

Para o caso de $\omega = 0{,}20$ rad/s, foi realizada, inicialmente, uma comparação entre a solução analítica, obtida por meio da equação (2.2), e os resultados numéricos referentes à elevação da superfície da onda, η, monitorada a 50,0 m de distância do gerador de ondas no canal, correspondente à primeira linha de monitoramento. A figura 5.4 apresenta essa comparação ao longo de 60,0 s de simulação.

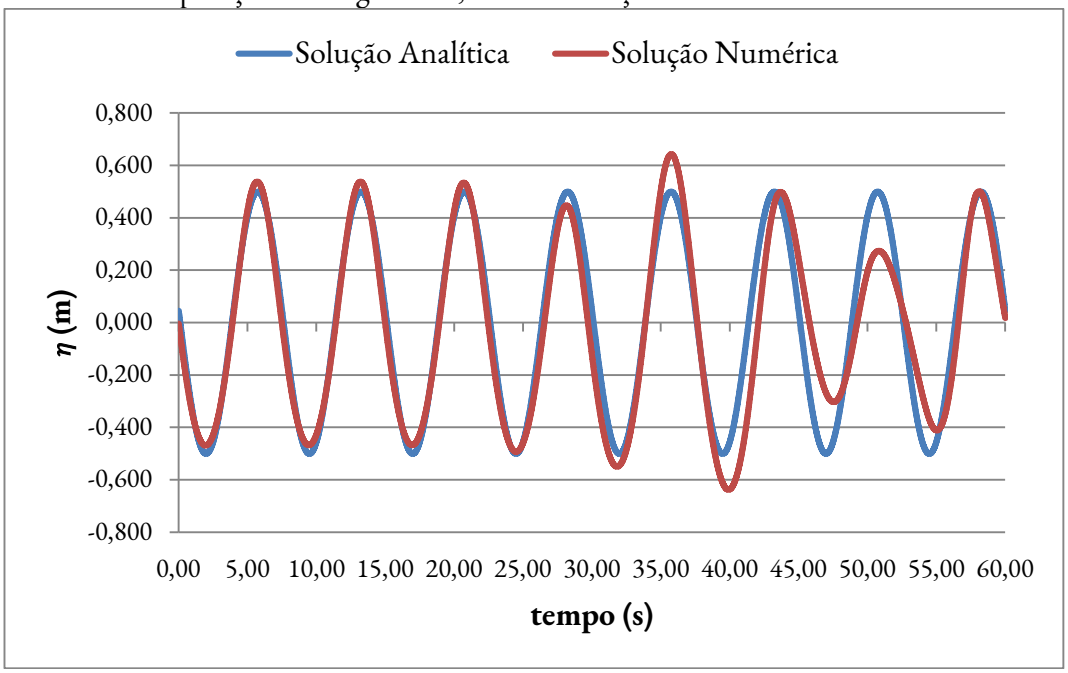


Figura 5.4: Comparação da solução analítica da altura da onda com a solução numéricas do dispositivo de galgamento com a turbina para $\omega = 0{,}20$ rad/s obtida na 1º linha de monitoramento.

A partir dos resultados apresentados na figura 5.4, observa-se uma boa concordância entre as soluções analítica e numérica para a elevação da superfície livre da água ao longo do tempo. Nos instantes iniciais da simulação, as curvas apresentam comportamento bastante semelhante, tanto em amplitude quanto em fase, evidenciando a capacidade do modelo numérico em reproduzir adequadamente a propagação das ondas no canal.

Os pequenos desvios observados nos picos e vales das ondas, principalmente a partir de aproximadamente 30 s de simulação, podem estar associados aos efeitos de reflexão das ondas ao interagirem com as extremidades do domínio computacional e com as estruturas presentes no dispositivo de galgamento. Além disso, tais diferenças também podem ser atribuídas ao fato de a solução analítica não considerar efeitos viscosos e turbulentos, os quais estão presentes na modelagem numérica adotada.

Observa-se ainda que, apesar das diferenças localizadas entre as curvas, a solução numérica mantém comportamento coerente com a solução analítica durante todo o intervalo analisado, preservando a periodicidade e a tendência geral da propagação das ondas. As maiores discrepâncias observadas entre aproximadamente 35.0 s e 55.0 s apresentam, como hipótese mais provável, a influência da reflexão das ondas no domínio computacional, fenômeno que pode alterar localmente a elevação da superfície livre e introduzir perturbações no escoamento. Além disso, tais diferenças também podem estar relacionadas a efeitos numéricos acumulativos, bem como às características da discretização espacial empregada na malha computacional. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o modelo numérico apresenta desempenho satisfatório na representação da dinâmica da superfície livre no canal de ondas.

A tabela 5.1 e a figura 5.5 apresentam os resultados do coeficiente de potência (C_p) em função da razão de velocidade de ponta (TSR) para as diferentes velocidades angulares analisadas da turbina Savonius instalada no dispositivo de galgamento, considerando valores de velocidade angular entre 0,05 rad/s e 0,25 rad/s.

Tabela 5.1: Valores de desempenho da turbina Savonius para diferentes condições de operação.

ω (rad/s)	TSR	C_p
0.05	0.40	0.23
0.10	0.79	0.46
0.15	1.20	0.57
0.20	1.59	0.63
0.25	1.98	0.51

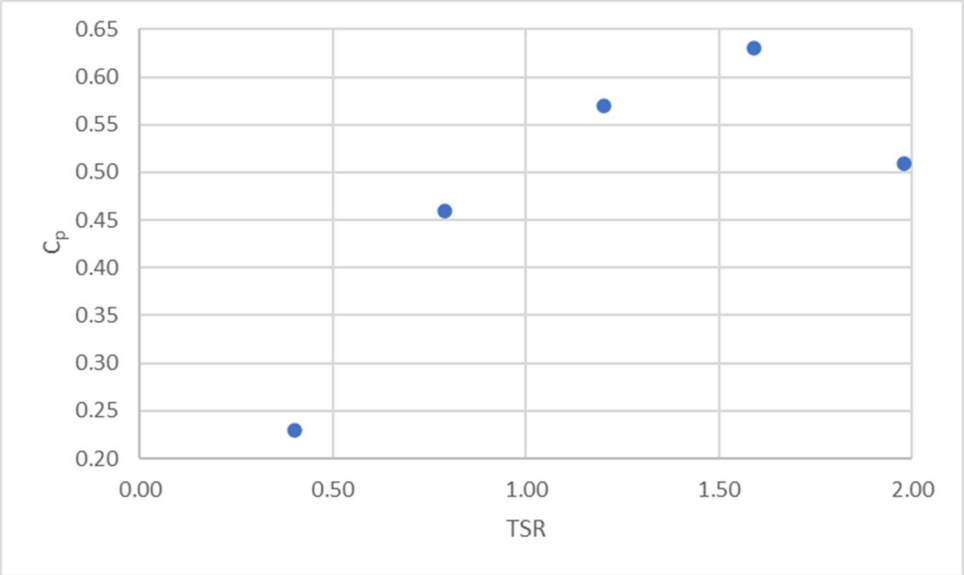


Figura 5.5: Desempenho da turbina Savonius em termos do coeficiente de potência para diferentes valores de TSR.

Observa-se que o aumento da velocidade angular da turbina resulta em um crescimento progressivo da TSR, variando de 0,40 até 1,98. Paralelamente, identifica-se uma tendência geral de aumento do coeficiente de potência, indicando melhora no desempenho da turbina e maior capacidade de conversão da energia do escoamento em potência mecânica.

Para a condição de menor velocidade angular analisada, $\omega = 0{,}05$ rad/s, correspondente a $TSR = 0{,}40$, foi obtido um coeficiente de potência de $C_p = 0{,}23$. Esse resultado evidencia um desempenho reduzido da turbina em baixas rotações, uma vez que a energia cinética disponível no escoamento não é aproveitada de forma eficiente.

À medida que a velocidade angular aumenta, observa-se uma elevação significativa do coeficiente de potência. Para $\omega = 0{,}10$ rad/s e $TSR = 0{,}79$, o valor de C_p alcança 0,46, enquanto para $\omega = 0{,}15$ rad/s e $TSR = 1{,}20$, o coeficiente atinge 0,57. Esse comportamento indica que o aumento da velocidade de rotação favorece a interação hidrodinâmica entre o escoamento e as pás da turbina, ampliando a capacidade de extração de energia.

O maior valor de coeficiente de potência apresentado no gráfico ocorre para $\omega = 0{,}20$ rad/s, correspondente a $TSR = 1{,}59$, em que se obtém $C_p = 0{,}63$. Esse resultado sugere a existência de uma condição operacional mais eficiente da turbina dentro da faixa analisada, caracterizada por melhor aproveitamento energético do escoamento.

Para a condição de $\omega = 0{,}25$ rad/s, equivalente a $TSR = 1{,}98$, observa-se uma redução do coeficiente de potência para $C_p = 0{,}51$. Essa diminuição pode estar associada ao aumento das perdas hidrodinâmicas e turbulentas decorrentes da elevação da velocidade de rotação da turbina, além de possíveis efeitos de recirculação do escoamento no interior do duto do dispositivo de galgamento. Ainda assim, destaca-se que o valor obtido para o coeficiente de potência permanece superior ao limite de Betz, fato que pode ser explicado pela presença do carenamento proporcionado pelo duto do dispositivo, o qual contribui para acelerar e direcionar o escoamento através da turbina, aumentando a capacidade de extração de energia do sistema.

De maneira geral, os resultados demonstram que o desempenho da turbina Savonius apresenta forte dependência da TSR, sendo observado um aumento do coeficiente de potência até uma condição próxima de $TSR = 1{,}59$, seguida de uma redução para valores mais elevados de velocidade angular. Dessa forma, os resultados indicam a existência de uma faixa ótima de operação da turbina para as condições analisadas, na qual ocorre maior eficiência de conversão energética do dispositivo.

A figura 5.6 apresenta o comportamento transiente da vazão de água no duto de saída do dispositivo de galgamento ao longo do tempo de simulação para $\omega = 0{,}20$ rad/s, comportamento similar registrado aos demais casos. Observa-se um aumento gradual da vazão média ao longo do intervalo analisado, associado ao enchimento progressivo do reservatório e ao estabelecimento do escoamento no interior do dispositivo.

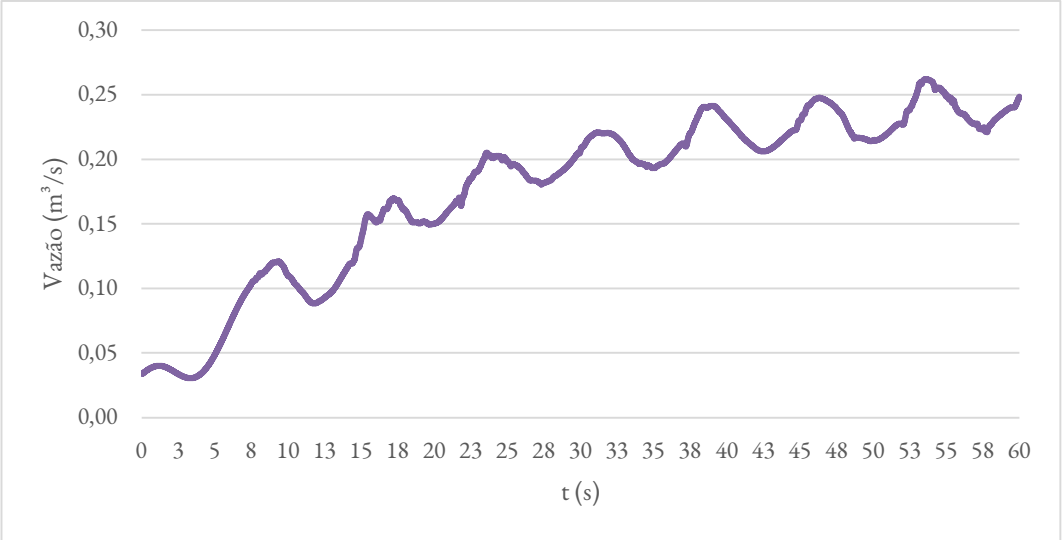
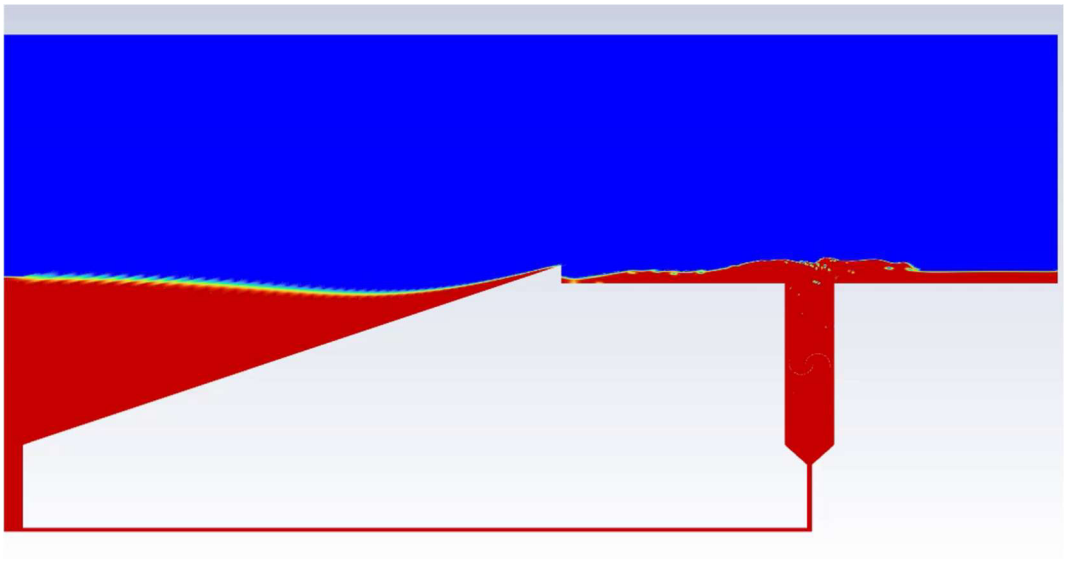


Figura 5.6: Comportamento instantâneo da vazão da água sobre a turbina Savonius no dispositivo de galgamento.

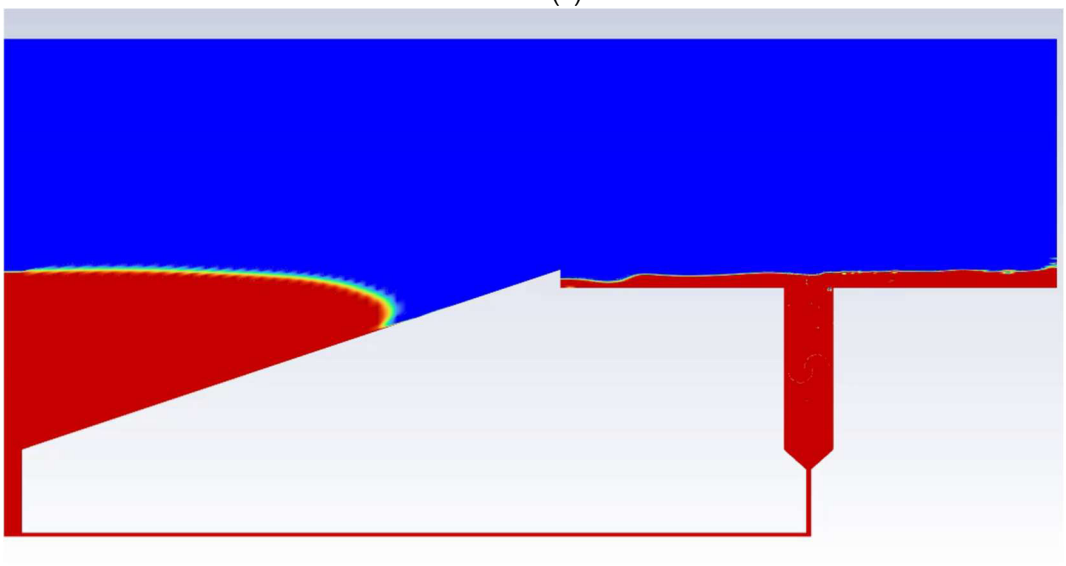
Além da tendência crescente, nota-se a presença de oscilações periódicas na vazão, caracterizando um comportamento pulsante do escoamento. Essas flutuações estão relacionadas à natureza periódica das ondas incidentes e à dinâmica de transbordamento da água sobre o dispositivo, influenciando diretamente o escoamento no interior do duto de saída.

Nota-se ainda que, após aproximadamente 20 s de simulação, o escoamento passa a apresentar oscilações em torno de valores médios mais elevados de vazão, indicando uma condição de operação mais estável do sistema. Esse comportamento também pode estar relacionado à influência da rotação da turbina sobre a dinâmica do escoamento, uma vez que a interação entre o fluido e o rotor tende a modificar localmente os campos de velocidade e pressão no interior do duto. Nesse contexto, a análise das médias de pressão em linhas localizadas a montante e a jusante da turbina pode fornecer informações relevantes acerca das perdas de carga e dos efeitos induzidos pela rotação do rotor no desempenho hidrodinâmico do sistema. Dessa forma, os resultados evidenciam que o comportamento pulsante da vazão pode exercer influência significativa na dinâmica do escoamento e, consequentemente, no desempenho hidrodinâmico do dispositivo de galgamento e da turbina instalada.

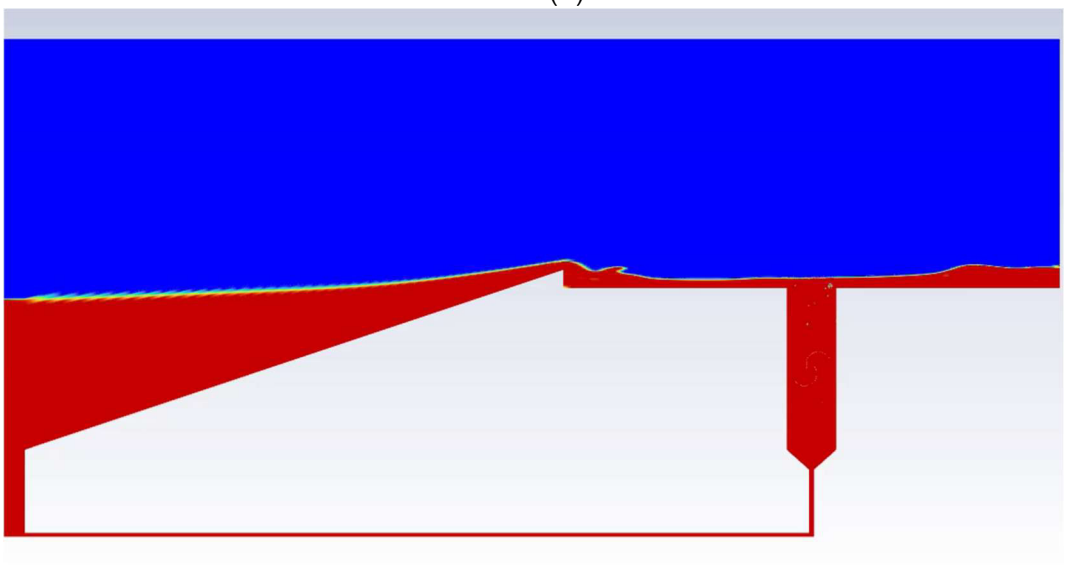
A figura 5.7 mostra a fração volumétrica de água, para o caso com melhor aproveitamento energético do escoamento $\omega = 0{,}20$, no intervalo de tempo 50,0 s $\leq t \leq$ 60,0 s considerando diferentes instantes de tempo: (a) $t = 54{,}0$ s, (b) $t = 56{,}0$ s, (c) $t = 58{,}0$ s e (d) $t = 60{,}0$. De modo geral, as imagens indicam que o dispositivo apresenta funcionamento adequado, conduzindo o volume galgado para o interior do duto onde está instalada a turbina Savonius, evidenciando coerência física nos resultados numéricos obtidos.



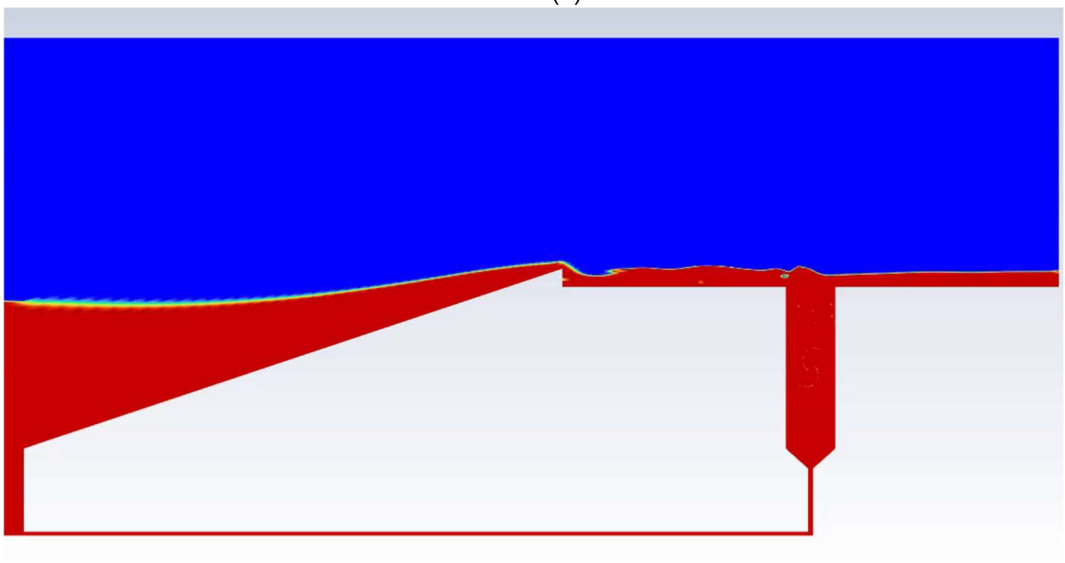
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.7: Incidência das ondas em função do tempo para os casos sem turbina: (a) $t = 54{,}0$ s, (b) $t = 56{,}0$ s, (c) $t = 58{,}0$ s e (d) $t = 60{,}0$.

As figuras 5.8 mostram a potência extraída da turbina, e a figura 5.9 apresenta o gradiente de pressão no duto de saída para $\omega = 0{,}20$. Com base nesses dados, foi possível determinação da média RMS do coeficiente de potência ($C_{P,RMS}$) e da velocidade na ponta da turbina (TSR_{RMS}).

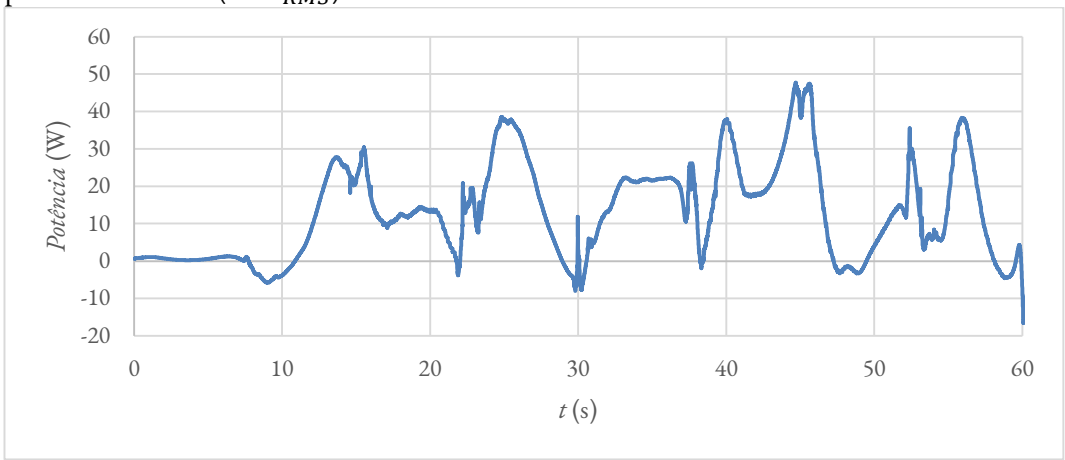


Figura 5.8: Potência extraída da turbina em função do tempo para $\omega = 0{,}20$.

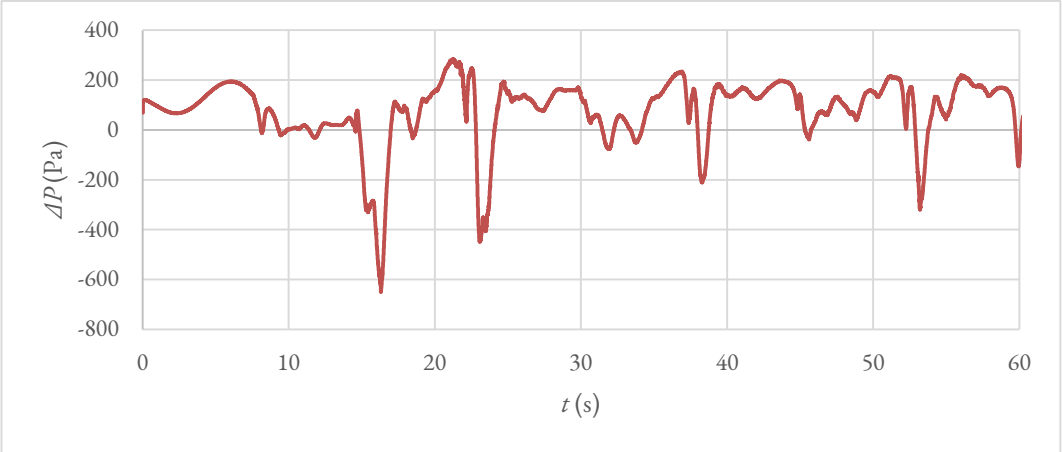


Figura 5.9: Gradiente de pressão do dispositivo de galgamento em função do tempo $\omega = 0{,}20$.

A magnitude positiva de $C_{P,RMS}$ obtida indica que o fluxo de fluido fornece energia para o dispositivo. Sendo assim, o modelo desenvolvido é promissor para futuras investigações do dispositivo de galgamento em uma abordagem mais realista.

6| Conclusões

A presente pesquisa permitiu o desenvolvimento, validação e verificação de um modelo computacional robusto para a simulação de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo galgamento com uma turbina Savonius integrada. Por meio da aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e do Método dos Volumes Finitos (MVF), foi possível observar detalhadamente o comportamento hidrodinâmico do escoamento pulsante e a sua interação com o rotor.

Os resultados demonstram que a eficiência de conversão do sistema é intrinsecamente dependente da razão de velocidade de ponta (TSR). O desempenho máximo da turbina foi identificado em TSR = 1,59, condição na qual o coeficiente de potência (Cp) atingiu seu valor ápice, confirmando a viabilidade técnica da integração de turbinas de eixo vertical em dutos de descarga de dispositivos de galgamento. Além disso, a concordância entre os dados numéricos obtidos e os resultados experimentais da literatura verifica e valida o modelo como uma ferramenta de predição confiável para o projeto de sistemas de energia oceânica.

Em suma, o trabalho cumpre o objetivo de fornecer uma base científica para a análise de conversores de energia das ondas, evidenciando que o aproveitamento do escoamento de água proveniente do galgamento é uma alternativa eficaz para a geração de energia renovável, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a sustentabilidade ambiental.

Destaca-se, como principal contribuição inédita desta pesquisa, o desenvolvimento, pela primeira vez na literatura, de um modelo computacional completo para um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo galgamento. Diferentemente de abordagens numéricas anteriores, o modelo proposto acopla simultaneamente o escoamento em um canal de ondas, o processo de galgamento sobre a rampa, o armazenamento da água no reservatório e o escoamento através do duto contendo uma turbina Savonius em movimento. Essa abordagem integrada permitiu representar de forma mais realista toda a dinâmica hidrodinâmica do sistema, possibilitando a obtenção numérica da potência mecânica convertida pela turbina a partir do escoamento pulsante gerado pelo galgamento. Dessa forma, o trabalho avança significativamente no estado da arte dos conversores de energia das ondas, fornecendo uma ferramenta robusta para análises de desempenho, otimização geométrica e previsão do potencial energético de dispositivos oceânicos.

Para dar continuidade ao desenvolvimento desta tecnologia e ampliar o conhecimento na área, propõem-se as seguintes frentes de pesquisa:

1. Avaliação via Teoria Construtal: Realizar uma avaliação geométrica sistemática dos componentes do dispositivo (como a inclinação da rampa, dimensões do reservatório e diâmetro do duto) utilizando o Método do Design Construtal. O objetivo seria

identificar as formas e estruturas que minimizam as perdas e maximizam o fluxo de energia, buscando a configuração geométrica ótima para diferentes estados de mar.

2. Análise de Diferentes Tecnologias de Turbinas: Ampliar o escopo do estudo para avaliar o desempenho de outros tipos de turbinas (como Wells, Darrieus ou turbinas de fluxo transversal) acopladas ao sistema de galgamento. Um estudo comparativo permitiria identificar qual tecnologia melhor se adapta ao comportamento intermitente e pulsante da descarga de água.

3. Simulações em Condições Mais Realistas: Expandir o modelo computacional considerando condições ambientais mais realistas e variáveis, incluindo diferentes estados de mar, influência de ventos e correntes marítimas, bem como variações sazonais das condições oceânicas, a fim de avaliar o desempenho hidrodinâmico, a durabilidade estrutural e a viabilidade econômica do sistema em longo prazo.

Referências

AKWA, J. V. **Análise aerodinâmica de turbinas eólicas Savonius empregando dinâmica dos fluidos computacional.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

AKWA, J. V.; DA SILVA JÚNIOR, G. A.; PETRY, A. P. Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. **Renewable Energy**, v. 38, p. 141-149, 2012.

ALAM, Md. J.; IQBAL, M. T. A low cut-in speed marine current turbine. **Journal of Ocean Technology**, St. John's, California, v. 5, n. 4, p. 49–61, dez. 2010.

ALCORN, R.; O'SULLIVAN, D. **Electrical design for ocean wave and tidal energy systems.** London: Institution of Engineering and Technology, 2013.

BAHAJ, A. S. Generating electricity from the oceans. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 7, p. 3399–3416, set. 2011.

BARROS, Andréia S. de *et al.* Numerical study and geometrical investigation of an onshore overtopping device wave energy converter with a seabed coupled structure. **Journal of Marine Science and Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 412, 13 fev. 2023.

BARROS, Andréia Sá de. **Avaliação geométrica de uma estrutura acoplada a um conversor de energia das ondas onshore do tipo galgamento aplicando o design construtal.** 2020. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2020.

BEELS, C.; TROCH, P.; DE VISCH, K.; KOFOED, J. P.; DE BACKER, G. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1644–1661, 2010.

BETZ, A. **Wind–energie und ihre ausnutzung durch windmühlen.** Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1926.

BLACKWELL, B. F.; SHEDAHL, R. E.; FELTZ, L. V. **Wind tunnel performance data for two and three-bucket Savonius rotors.** Final Report SAND76-0131. Sandia Laboratories, Albuquerque, 1977.

BORETTI, A. State-of-the-art of MW-level capacity oceanic current turbines. **Nonlinear Engineering**, Germany, v. 9, n. 1, p. 361–369, 21 ago. 2020.

CARNEIRO, M. L. **Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas.** 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CAVALCANTE, Daniel Alves. **Análise experimental do emprego de turbinas hidrocinéticas em baixas correntezas para geração de energia.** 2024. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering.** Vol. 1. Illinois: Elsevier, 2005.

CHEN, L. *et al.* Evolution trend research of global ocean power generation based on a 45-year scientometric analysis. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 218, 2021.

CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais.** Amadora: Instituto do Ambiente, 2004.

CURTO, D.; FRANZITTA, V.; GUERCIO, A. Sea wave energy: a review of the current technologies and perspectives. **Energies**, v. 14, n. 20, p. 6604, 2021.

DA SILVA, Sthefany Amaral; MARTINS, Jaifer Corrêa; DOS SANTOS, Elizaldo Domingues; ROCHA, Luiz Alberto Oliveira; MACHADO, Bianca Neves; ISOLDI, Liércio André; GOMES, Mateus das Neves. Constructal Design Applied to an Overtopping Wave Energy Converter Locate on Paraná Coast in Brazil. **Sustainable Marine Structures**, v. 6, n. 2, p. 1–14, 2024.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists.** Vol. 2. Singapura: World Scientific, 1991.

DONEV, J. **Energy from water.** Disponível em: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy_from_water. Acesso em: 15 nov. 2023.

DOS SANTOS, A. L. *et al.* Development of a computational model for investigation of oscillating water column device with Savonius turbine. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, p. 1–20, 2022.

DUARTE, C. R. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro.** 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 196 p.

FALCÃO, A. F. Wave energy utilization: a review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 899–918, 2010.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos – conceitos básicos e aplicações.** São Paulo: Edusp, 2000.

FRAGA, G. C. **Análise numérica do efeito de bloqueio no escoamento sobre uma turbina Savonius em túnel aerodinâmico.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

FRIGAARD, P. *et al.* 3 years experience with energy production on the Nissum Bredning Wave Dragon Prototype. In: **CA-OE WORKSHOP**, Lisbon, 2006. Aalborg University, 2006.

GHOSH, T.; PRELAS, M. **Energy resources and systems.** v. 2: Renewable resources. Columbia: Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011.

GOMES, M. DAS N. *et al.* Constructal design applied to the geometric evaluation of an oscillating water column wave energy converter considering different real scale wave periods. **Journal of Engineering Thermophysics**, v. 27, n. 2, p. 173–190, 2018.

GOMES, M. DAS N. **Modelagem computacional de um dispositivo coluna d'água oscilante para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica.**

2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2010.

GONÇALVES, A. M. **Utilização de dados de altímetro na avaliação de recursos energéticos das ondas do mar.** Relatório de Estágio Profissionalizante – Portugal, 2003.

GOULART, M. M. **Estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento onshore em escala real empregando constructal design.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2014.

GOULART, M. M. *et al.* Constructal design de um dispositivo de galgamento onshore em escala real para uma profundidade fixa. **Scientia Plena**, v. 11, n. 8, p. 1–10, 2015.

GOULART, M. M. **Validação de um modelo numérico de um dispositivo de galgamento e investigação numérica e experimental da geometria aplicando o método design construtal.** 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2022.

GOULART, M.M. ; MARTINS, J.C. ; GOMES, A.P. ; PUHL, E. ; Rocha, L.A.O. ; ISOLDI, L.A. ; GOMES, M. DAS N. ; dos Santos, E.D. . Experimental and numerical analysis of the geometry of a laboratory-scale overtopping wave energy converter using constructal design. **RENEWABLE ENERGY**, v. 236, p. 121497-121497, 2024.

HEARD, S. A. **Heavy duty equipment technology: a systems approach.** Philadelphia: Pearson Education, 2015.

HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, 1981.

HUBNER, Ricardo G. *et al.* Numerical analysis of an overtopping wave energy converter subjected to the incidence of irregular and regular waves from realistic sea states. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 8, p. 1084, 2022.

IAHNKE, S. L. P. **Estado da arte e desenvolvimento de um modelo de simulação numérica para o princípio de galgamento**. 2010. Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.

IEA – International Energy Agency. **World Energy Outlook 2019.** Paris: OECD/IEA, 2019.

JENNICHES, S. Assessing the regional economic impacts of renewable energy sources – a literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 35–51, 2018.

JIN, J.; LIU, Z.; HYUN, B. S.; HONG, K. 3D numerical investigation on reservoir system for an overtopping wave energy convertor. **Journal of Korean Navigation and Port Research**, v. 36, p. 97–103, 2012.

KHALIGH, A.; ONAR, O. C. **Energy Harvesting – Solar, Wind and Ocean Energy Conversion Systems.** Boca Raton: CRC Press, 2010.

KHAN, M.; IQBAL, M. T.; HINCHEY, M. Sea–floor power generation system. In: **NORTHEAST CLEAN ENERGY COUNCIL**, 17., 2007, St. John's. Proceedings [...]. St. John's: IEEE NECEC, 2007. p. 1–8.

KHAN, N. *et al.* Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 590–604, 2017.

KOFOED, J. P. **Wave overtopping of marine structures: utilization of wave energy**. PhD Thesis, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University, 2002.

KOFOED, J. P.; FRIGAARD, P.; MADSEN, E. F.; SØRENSEN, H. C. Prototype testing of the wave energy converter Wave Dragon. **Renewable Energy**, v. 31, p. 181-189, 2006.

KOFOED, J.O. *et al.* Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. **Renewable Energy**, v. 31, p. 181–189, 2006.

LIMA, Y. T. B. *et al.* Análise numérica e geométrica com Design Construtal da região de transição para um dispositivo do tipo coluna de água oscilante (CAO). **Scientia Plena**, v. 13, n. 4, p. 1–12, 2017.

LIU, Z.; HYUN, B.; HONG, K. Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy converter. **China Ocean Engineering**, v. 25, p. 169–178, 2011.

LIU, Z.; HYUN, B.; JIN, J. Numerical prediction for overtopping performance of OWEC. **Journal of The Korean Society for Marine Environmental Engineering**, v. 11, n. 1, 2008.

LIU, Zhen; ZHANG, Guoliang. Overtopping performance of a multi-level CROWN wave energy convertor: a numerical study. **Energy**, [S.L.], v. 294, p. 130795, maio 2024. Elsevier BV.

LÓPEZ, I. *et al.* Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 413–434, 2013.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2004.

MARGHERITINI, L.; STRATIGAKI, V.; TROCH, P. Geometry optimization of an overtopping wave energy device implemented into the new breakwater of the Hanstholm Port expansion. In: **Twenty-Second International Offshore and Polar Engineering Conference**, p. 593-600, 2012.

MARGHERITINI, L.; VICINANZA, D.; FRIGAARD, P. SSG wave energy converter: design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**, v. 34, p. 1371–1380, 2009.

MARGHERITINI, L.; VICINANZA, D.; FRIGAARD, P. SSG wave energy converter: design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**, v. 34, p. 1371-1380, 2009.

MARTINEZ, A.; IGLESIAS, G. Wave exploitability index and wave resource classification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110393, 2020.

MARTINS, J. C. **Design Construtal de um dispositivo de galgamento onshore em escala real para diferentes áreas de construção e ondas monocromáticas**. 2016. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

BARBOSA, D. V. E. **Análise numérica de dispositivos de extração de energia das ondas do tipo galgamento**. 2016. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

MARTINS, J. C. *et al.* Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter Incorporated in a Breakwater. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, p. 471, 2022.

MARTINS, J. C. *et al.* 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, 2018.

MELIKOGLU, M. Current status and future of ocean energy sources: A global review. **Ocean Engineering**, v. 148, p. 563–573, 2018.

MENET, J. L.; VALDÈS, L. C.; MÉNART, B. A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L–σ criterion. **Renewable Energy**, v. 22, n. 4, p. 491–506, 2001.

MENTER, F. R.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. **Turbulence, Heat and Mass Transfer**, v. 4, p. 625-632, 2003.

NAM, B. W.; SHIN, S. H.; HONG, K. Y.; HONG, S. W. Numerical simulation of wave flow over the spiral-reef overtopping device. In: **The Eighth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium**, 2008.

PAIVA, Maycon da Silveira; MOCELLIN, Ana Paula Giussani; DOS SANTOS, Elizaldo Domingues; ROCHA, Luiz Alberto Oliveira; MACHADO, Bianca Neves; ISOLDI, Liércio André. Avaliação geométrica de um conversor de energia das ondas do tipo galgamento submetido às ondas regulares representativas do estado de mar de Rio Grande-RS. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Paranaguá, v. 11, n. 1, 2026.

PAIVA, Maycon da Silveira; MOCELLIN, Ana Paula Giussani; OLEINIK, Phelype Haron; DOS SANTOS, Elizaldo Domingues; ROCHA, Luiz Alberto Oliveira; ISOLDI, Liércio André; MACHADO, Bianca Neves. Geometrical Evaluation of an Overtopping Wave Energy Converter Device Subject to Realistic Irregular Waves and Representative Regular Waves of the Sea State That Occurred in Rio Grande—RS. **Processes**, v. 13, n. 2, art. 335, 2025.

PALMA, Giuseppina; CONTESTABILE, Pasquale; ZANUTTIGH, Barbara; FORMENTIN, Sara Mizar; VICINANZA, Diego. Integrated assessment of the hydraulic and structural performance of the OBREC device in the Gulf of Naples, Italy. **Applied Ocean Research**, [S.L.], v. 101, p. 102217, ago. 2020. Elsevier BV.

PAREDES, G. M. **Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas**. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

PEREIRA, S. R. V. V. DA S. **Caracterização do sector dos recursos energéticos marinhos para Portugal continental**. 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Portugal.

REDDY, J. N.; GARTLING, D. K. **The finite element method in heat transfer and fluid dynamics**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994.

REGUERO, B. G.; LOSADA, I. J.; MÉNDEZ, F. J. A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term variability. **Applied Energy**, v. 148, p. 366–380, 2015.

ROSA, P. B. G. **Controle e otimização de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica**. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SILVA, R. V. **Estudo da sensibilidade da estimativa de vento no modelo WAsP relativa a rugosidade superficial**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SOHRABI, Sahel; YAGHIN, Mohammad Ali Lotfollahi; MOJTAHEDI, Alireza; AMINFAR, Mohammad Hossein; DADASHZADEH, Mehran. Experimental and numerical investigation of a hybrid floating breakwater-WEC system. **Ocean Engineering**, [S.L.], v. 303, p. 117613, jul. 2024. Elsevier BV.

SOLARI, G. **Wind Science and Engineering: origins, developments, fundamentals and advancements**. Cham, Sweden: Springer Cham, 2019.

TEDD, J.; KOFOED, J. P. Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter. **Renewable Energy**, v. 34, p. 711–717, 2009.

TEMIZ, I.; EKWEOBA, C.; THOMAS, S.; KRAMER, M.; SAVIN, A. Wave absorber ballast optimization based on the analytical model for a pitching wave energy converter. **Ocean Engineering**, v. 240, p. 109906, 2021.

THERMAL ENGINEERING. **Turbinas eólicas de eixo vertical: design urbano e eficiência**. 2020.

THORPE, T. W. A brief review of wave energy. **Harwell Didcot Oxfordshire**, 1999.

VERSTEEG, H. K.; MALALASKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson, 2007.

VICINANZA, D.; CANTESTABILE, P.; NORGAARD, J. Q. H.; ANDERSEN, T. L. Innovative rubble mound breakwaters for overtopping wave energy conversion. **Coastal Engineering**, p. 154-170, 2014. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.02.004.

YADAV, K. P.; KUMAR, A.; JAISWAL, S. A critical review of technologies for harnessing the power from flowing water using a hydrokinetic turbine to fulfill the energy need. **Energy Reports**, v. 9, p. 2102–2117, abr. 2023. Elsevier BV.

ZABIHIAN, F.; FUNG, A. S. Review of marine renewable energies: Case study of Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2461–2474, 2011.