

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

ANÁLISE NUMÉRICA DA EFICIÊNCIA DE DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA
DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE ACOPLADO EM UM QUEBRA-
MAR

por

Guilherme Ferreira Wiener

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, dezembro, 2020

ANÁLISE NUMÉRICA DA EFICIÊNCIA DE DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA
DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE ACOPLADO EM UM QUEBRA-
MAR

Por

Guilherme Ferreira Wiener
Bacharel em Engenharia Civil

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 necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Marítima

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Eric Lionel Didier

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Luis Braun



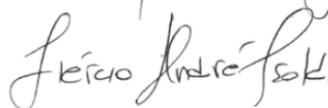
PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos



PPGEO/FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi

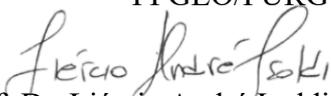


PPGEO/FURG

Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira



PPGEO/FURG



Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 18, dezembro de 2020

Ficha Catalográfica

W647a Wiener, Guilherme Ferreira.

Análise numérica da eficiência de dispositivos conversores de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante acoplado em um quebra-mar / Guilherme Ferreira Wiener. – 2020.

84 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2020.

Orientador: Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira.

Coorientador: Dr. Eric Lionel Didier.

1. Energia das Ondas 2. Coluna de Água Oscilante 3. Turbina Wells 4. Simulação Numérica I. Teixeira, Paulo Roberto de Freitas II. Didier, Eric Lionel III. Título.

CDU 551.466:620.92

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, avós e namorada pelo apoio e incentivo, tanto no período do mestrado quanto antes dele.

Ao meu orientador de mestrado Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira pela orientação, dedicação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À FURG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica pela formação de qualidade.

À CAPES pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

RESUMO

Com o advento da tecnologia nos tempos modernos, a demanda por energia elétrica é crescente ao longo dos anos. Em contrapartida, a maioria dos métodos de produção de energia utilizam recursos não renováveis, impactando o meio-ambiente e aumentando o custo de compra. Perante isto, diversos estudos abordam o tema de fontes renováveis de energia, em que uma das fontes é a das ondas. Um dos dispositivos de conversão de energia das ondas muito difundido é o de Coluna de Água Oscilante (CAO), em que uma câmara de ar fechada acima do nível da superfície livre e uma turbina acoplada são capazes de produzir eletricidade, sendo destaque em diversos trabalhos analíticos e experimentais. No presente trabalho, são realizadas análises numéricas para determinar as dimensões ótimas de turbinas do tipo Wells e câmaras de dispositivos de CAO inseridos em um quebra-mar hipotético, funcionando em paralelo, a uma profundidade de 14 m na costa Sul do Brasil. O estado de mar é representado pela ocorrência de ondas regulares para uma faixa de períodos e alturas características da região. Assim, são calculadas as potências médias anuais de diferentes combinações de diâmetros e rotações de turbina e de comprimento e largura da câmara do conversor CAO para determinar o dispositivo mais eficiente para a região. Para a realização das simulações numéricas, emprega-se o software FLUENT[®], baseado no modelo *Reynolds Averaged Navier-Stokes equations* e a técnica *Volume of Fluid (RANS-VoF)*, resolvidas numericamente pelo Método de Volumes Finitos, e o modelo simplificado TDO (*Turbine Diameter Optimization*) generalizado, desenvolvido neste trabalho. O modelo TDO modificado é calibrado pelo FLUENT[®] para cada onda incidente e considera o movimento oscilatório da superfície livre dentro da câmara como o de um pistão e o ar dentro da câmara sofrendo uma transformação adiabática. O diâmetro ótimo da turbina e o comprimento e largura do dispositivo que geram a maior eficiência são escolhidos considerando o estado de mar da região e dispositivos com 16 m de altura (10 m estão submersos) com uma parede frontal submersa de 2.5 m. Como resultado final, encontrou-se a maior eficiência (50.69%) em um dispositivo de 15x15 m e diâmetro de turbina de 3.00 m, sendo 17.35% mais eficiente que o dispositivo de 5x5 m e diâmetro de 1.25 m (33.34%).

Palavras-chaves: Energia das ondas, Coluna de Água Oscilante, turbina Wells, simulação numérica.

ABSTRACT

With the advent of technology in modern times, the demand for electricity is increasing over the years. In contrast, most methods of energy production use non-renewable resources, impacting the environment and increasing its costs. In view of this, several studies address the topic of renewable energy sources, in which one of the sources is wave energy. One of the widespread wave energy conversion devices is the Oscillating Water Column (OWC), in which a closed air chamber above the level of the free surface and a coupled turbine are capable of producing electricity, being highlighted in several analytical and experimental works. In the present work, numerical analyzes are carried out to determine the optimal dimensions of Wells type turbines and chambers of OWC devices inserted in a hypothetical breakwater, operating in parallel, at a depth of 14 m on the southern coast of Brazil. The sea state is represented by the occurrence of regular waves for a range of periods and heights characteristic of the region. Thus, the average annual powers of different combinations of diameters and rotational speeds and the length and width of the OWC device chamber are calculated to determine the most efficient device for the region. To perform the numerical simulations, the FLUENT[®] software is used, based on the Reynolds Averaged Navier-Stokes equation, solved by the Finite Volume Method and Volume of Fluid technique (*RANS-VOF*), and the simplified model modified TDO (Turbine Diameter Optimization), developed in this work. The modified TDO model is calibrated by FLUENT[®] for each incident wave and considers the oscillatory movement of the free surface inside the chamber as that of a piston and the air inside the chamber undergoing an adiabatic transformation. The optimum diameter of the turbine and the length and width of the device that generate the greatest efficiency are chosen considering the sea state of the region and devices with a height of 16 m (10 m are submerged) with a submerged front wall of 2.5 m. As a final result, the highest efficiency (50.69%) was found in a 15x15 m device and a 3.00 m turbine diameter, being 17.35% more efficient than the 5x5 m device and 1.25 m turbine diameter (33.34%).

Keywords: Wave energy, Oscillating Water Column, Wells turbine, Numerical simulation

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação.....	18
1.2. Objetivos	19
1.2.1. Objetivo geral.....	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
2. ESTADO DA ARTE.....	21
2.1. Trabalhos de pesquisadores de outros grupos de pesquisa	21
2.2. Trabalhos do grupo de pesquisa	23
3. REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1. Equações governantes do escoamento de fluidos	24
3.2. Características das Ondas.....	25
3.2.1. Divisão de profundidades.....	26
3.3. Teoria linear de Airy.....	27
3.3.1. O problema de valor de contorno.....	27
3.3.2. Equações regentes de ondas progressivas	28
3.4. Dispositivo Coluna de Água Oscilante	30
3.5. Turbina Wells	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1. Estudo de caso.....	36
4.2. Modelo Matemático	40
4.2.1. Software FLUENT®	40
4.2.2. Discretização da malha	42
4.2.3. Modelo de Otimização do Diâmetro da Turbina (<i>TDO</i>).....	43
4.3. Desenvolvimento do modelo <i>TDO generalizado</i>	47
4.3.1. Definição dos pontos de <i>kt</i> utilizados no ajuste de curva	49
5. RESULTADOS	52
5.1. Análise de comportamento hidrodinâmico do dispositivo Coluna de Água Oscilante.....	52
5.2. Análise da aplicabilidade do modelo <i>TDO original</i>	55
5.3. Análise de comportamento do fator de amplitude composta	57
5.4. Curvas de ajuste do <i>CAF</i>	62
5.5. Aplicação do modelo <i>TDO generalizado</i> às ondas de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m e $T = 7$ s e $H = 1.5$ m	65

5.6. Análise da máxima eficiência do dispositivo CAO para diferentes tamanhos de câmaras e turbinas na costa sul do Rio Grande do Sul	71
6. CONCLUSÃO	74
7. REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICE A – Resultados de eficiências anuais para as diferentes câmaras e ondas estudadas na região Sul do Brasil.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vista traseira do dispositivo CAO de Pico, Portugal (Fonte: Cruz, 2008).....	17
Figura 1.2 – Quebra-mar de Mutriku com dispositivos CAO acoplados.....	18
Figura 3.1 - Esquema de uma onda em um canal e suas propriedades (Fonte: Dean e Dalrymple, 2000)	26
Figura 3.2 - Esquema do problema de valor de contorno da propagação de onda em um canal (Fonte: Adaptado de Dean & Dalrymple, 1991)	27
Figura 3.3 - Esquema do vetor de velocidades em uma onda progressiva (Fonte: Adaptado de Dean & Dalrymple, 1991)	29
Figura 3.4 - Esquema de funcionamento de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante em duas fases (Fonte: Adaptado de Neill & Hashemi, 2018)	31
Figura 3.5 - Turbina Wells (a) sem guias (b) com guias (Fonte: Falcão & Henriques, 2016).....	32
Figura 3.6 - Curva de coeficiente de vazão em função do coeficiente de pressão para turbina Wells. (Fonte: Falcão & Justino, 1999).....	33
Figura 3.7 - Curva de coeficiente de potência em função do coeficiente de pressão para turbina Wells (Fonte: Falcão & Justino, 1999).....	34
Figura 4.1 - (a) Região de estudo e (b) Distribuição de energia média anual em São José do Norte (Fonte: Lisboa et al., 2017)	36
Figura 4.2 - Esquema do domínio computacional do canal utilizado em simulações (Fonte: Adaptado de Lisboa et al., 2018).....	38
Figura 4.3 - Esquema do domínio computacional em três dimensões.....	39
Figura 4.4 - Condições de contorno aplicadas no problema	41
Figura 4.5 - Canal de estudo com a inserção de sondas (Fonte: Adaptado de Lisboa et al., 2018) ...	42
Figura 4.6 - Zonas de uma malha de volumes finitos, para uma câmara de 10 x 10 m e uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, (a) no início do canal e (b) no final do canal e dentro da câmara de CAO	43
Figura 4.7 - Esquema de dispositivo CAO adotado no conceito do modelo TDO (Fonte: Torres et al., 2018)	44
Figura 4.8 - Etapas de execução do modelo de Otimização do Diâmetro da Turbina (TDO)	46
Figura 4.9 - Etapas de execução do modelo TDO generalizado	48
Figura 5.1 - Magnitude de velocidade do escoamento em m/s em nove instantes durante um período de onda para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, $k_t = 530$ Pa.s/m ³ e uma câmara de 5x5 m	52
Figura 5.2 - Magnitude de velocidade do escoamento em m/s em nove instantes durante um período de onda para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, $k_t = 530$ Pa.s/m ³ e uma câmara de 30x30 m.....	53
Figura 5.3 - Série temporal de elevação da superfície livre de um caso de $T = 10$ s, $H = 1.5$ m e $k_t =$ 530 Pa.s/m ³ , para câmaras de 5x5 m e 30x30 m.....	54
Figura 5.4 - Série temporal de pressão de um caso de $T = 10$ s, $H = 1.5$ m e $k_t = 530$ Pa.s/m ³ , para câmaras de 5x5 m e 30x30 m.....	54
Figura 5.5 - Série temporal de potência pneumática de um caso de $T = 10$ s, $H = 1.5$ m e $k_t = 530$ Pa.s/m ³ , para câmaras de 5x5 m e 30x30 m.....	55
Figura 5.6 - Curvas de k_t x CAF para diferentes câmaras com uma onda incidente de $T = 10$ s e $H =$ 1.5 m.....	58
Figura 5.7 - Curvas de k_t x CAF para diferentes câmaras com uma onda incidente de $T = 7$ s e $H =$ 1.5 m.....	59
Figura 5.8 - Resultados de CAF x k_t nas ondas incidentes de $T = 7$ s e $T = 10$ s, ambas com $H = 1.5$ m.....	63

Figura 5.9 - Resultados de $CAF \times k_t$ para as ondas de (a) 5 s e 1.0 m, (b) 6 s e 1.0 m, (c) 8 s e 1.5 m, (d) 9 s e 1.0 m, (e) 11 s e 1.5 m e (f) 12 s e 2.0 m.....	64
Figura 5.10 - Curvas de potência média P_t versus velocidade de rotação N para uma onda incidente com $T = 10$ s e $H = 1.5$ m para diferentes diâmetros de turbina D e dimensões de câmara ($b \times W$): (a) 5x5 m, (b) 10x10 m, (c) 15x15 m, (d) 20x20 m, (e) 25x25 m, (f) 30x30 m.....	66
Figura 5.11 - Curvas de potência média P_t versus velocidade de rotação N para uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m para diferentes diâmetros de turbina D e dimensões de câmara ($b \times W$). (a) 5x5 m, (b) 10x10 m, (c) 15x15 m, (d) 20x20 m, (e) 25x25 m.....	67
Figura 5.12 - Curvas de potência do modelo TDO generalizado e FLUENT® para (a) $T = 7$ s, $H = 1.5$ m, $b \times W = 15 \times 15$ m, $D = 3.00$ m e (b) $T = 10$ s, $H = 1.5$ m, $b \times W = 15 \times 15$ m, $D = 3.00$ m	70
Figura 5.13 - Eficiência anual versus diâmetro da turbina para cada dimensão de câmara.....	72
Figura 5.14 - Eficiências anuais em função do período T e altura de onda H para cada dimensão do dispositivo CAO equipado com a turbina Wells otimizada. (a) 5x5, (b) 10x10, (c) 15x15, (d) 20x20, (e) 25x25 e (f) 30x30 m	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Ocorrência de ondas em porcentagem para um estado de mar em SJN na costa sul do Brasil (Fonte: Lisboa et al., 2018).....	37
Tabela 4.2. Porcentagem de potência por T e H para um estado de mar em SJN na costa sul do Brasil (Fonte: Lisboa et al., 2018).....	38
Tabela 4.3. Comprimento das ondas para cada período a profundidade de 14 m.....	39
Tabela 4.4. Metodologias de solução adotadas no FLUENT.....	41
Tabela 4.5. k_t usados nas simulações numéricas para a aferição da curva de ajuste.....	51
Tabela 5.1. Resultados de maior eficiência encontrados pelo modelo TDO original a partir de $k_t = 100$ Pa.s/m ³ para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m.....	56
Tabela 5.2. Resultados de maior eficiência encontrados pelo modelo TDO original a partir de $k_t = 100$ Pa.s/m ³ para uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m.....	57
Tabela 5.3. Fator de amplitude composta (CAF), CAF médio (CAF _m), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para diferentes relações características de turbina (k_t) e dimensões de dispositivo CAO para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m.....	60
Tabela 5.4. Fator de amplitude composta (CAF), CAF médio (CAF _m), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para diferentes relações características de turbina (k_t) e dimensões de dispositivo CAO para uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m.....	60
Tabela 5.5. Fator de amplitude composta (CAF), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para relações características de turbina (k_t) maiores e menores que 100 Pa.s/m ³ com uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m.....	61
Tabela 5.6. Fator de amplitude composta (CAF), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para relações características de turbina (k_t) maiores e menores que 100 Pa.s/m ³ com uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m.....	62
Tabela 5.7. Resultados de CV para as ondas mais energéticas do estado de mar da costa Sul do Brasil.....	65
Tabela 5.8. Resultados de eficiência para cada dimensão do dispositivo CAO e diâmetro de turbina Wells, para uma onda de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m.....	68
Tabela 5.9. Resultados de eficiência para cada dimensão do dispositivo CAO e diâmetro de turbina Wells, para uma onda de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m.....	68
Tabela 5.10. Resultados de maior eficiência e características do caso encontrados pelo modelo TDO generalizado para a onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m.....	69
Tabela 5.11. Resultados de maior eficiência e características do caso encontrados pelo modelo TDO generalizado para a onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m.....	70
Tabela A.1. Resultados de eficiências anuais das diferentes ondas da região Sul do Brasil, para alguns diâmetros de turbina estudados e uma câmara de 5x5 m.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Algarismos Romanos

a	Amplitude da onda [m]
a_c	Amplitude da superfície livre [m]
a_p	Amplitude de pressão [Pa]
a_t	Amplitude de oscilação total [m]
a_w	Amplitude da onda incidente [m]
A	Largura da onda incidente [m]
b	Comprimento da câmara do dispositivo [m]
C	Celeridade da onda [m/s]
CV	Coefficiente de variação [%]
D	Diâmetro da turbina [m]
E	Energia de onda por área de frente de onda [J/m ²]
g	Componente da aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Profundidade do canal [m]
H	Altura de onda [m]
H_e	Altura característica da onda [m]
k	Número de onda [m ⁻¹]
k_t	Relação característica da turbina [Pa.s/m ³]
K	Parâmetro da turbina Wells [-]
L	Comprimento de onda [m]
N	Velocidade de rotação da turbina [rad/s]
p	Pressão [Pa]
p_o	Pressão atmosférica [Pa]
P_p	Potência pneumática [W]
P_t	Potência da turbina [W]

P_w	Potência média da onda [W]
Q_t	Vazão mássica da turbina [kg/m ³]
t	Tempo [s]
T	Período de onda [s]
T_e	Período característico da onda [s]
u	Componentes de velocidade no eixo x [m/s]
v	Componentes de velocidade no eixo y [m/s]
V	Volume de ar [m ³]
\dot{V}	Taxa de volume de ar [-]
v_t	Velocidade tangencial [m/s]
w	Componentes de velocidade no eixo z [m/s]
W	Largura da câmara do dispositivo [m]
x, y, z	Coordenadas cartesianas [-]

Símbolos Gregos

α_q	Fração volumétrica de fase [-]
δ_{ij}	Componentes do Delta de Kroenecker [-]
Δp	Amplitude de pressão da câmara [Pa]
ε	Eficiência [%]
ε_t	Taxa de dissipação de turbulência [J/kg.s]
η	Elevação da superfície livre [m]
κ	Energia cinética turbulenta [J/kg]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
μ_t	Viscosidade turbulenta [Pa.s]
Π	Coefficiente adimensional de potência [-]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m ³]
σ	Frequência angular [rad/s]

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Constantes para fechamento do modelo de turbulência [-]
τ_{ij}	Componentes do Tensor de Reynolds [-]
Φ	Coefficiente adimensional de fluxo [-]
Φ_p	Função potencial de velocidade [m ² /s ²]
Ψ	Coefficiente adimensional de pressão [-]
Ψ_f	Função de fluxo [-]
ω	Frequência angular [Hz]

Super Índices e Sub Índices

0	Em águas profundas
n	Novo valor
p	Fase p
q	Fase q

LISTA DE ABREVIATURAS

CAF	<i>Compound Amplitude Factor</i>
CAO	Coluna de Água Oscilante
CAS	Cassino
CCL	Condição de Contorno Lateral
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
QUE	Querência
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
SJN	São José do Norte
TDO	<i>Turbine Diameter Optimization</i>
UDF	<i>User-Defined Function</i>
FVM	<i>Finite Volume Method</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

1. INTRODUÇÃO

Em setembro de 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) reuniu os chefes de estado e governo de todo o mundo e então decidiram sobre os novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável globais para serem rediscutidos em 2030, nomeando este documento de Agenda 2030. Dentre os 17 objetivos estabelecidos, o objetivo 7 diz: “Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos”. O seu segundo item é definido como: “Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global”, como complemento. O terceiro item deste mesmo objetivo diz: “Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética” (Nations, 2015). Estas citações mostram o quanto a sociedade necessita de novos métodos de geração de energia, sendo estes imprescindivelmente extraídos de uma forma não agressiva ao meio-ambiente.

Ning et al. (2016) explica que o tópico de energias renováveis tem atraído grande atenção, pois é uma forma de produzir altas quantidades de potência elétrica com um menor índice de poluição. Teixeira et al. (2013) ressalta a alta capacidade de geração de energia por meio do movimento das ondas, tendo um maior destaque nas áreas costeiras de alta latitude. Mørk et al. (2010) estima que o globo possui aproximadamente 3.7 TW de energia que pode ser extraída das ondas. Desta quantidade total, a América do Sul é detentora de 531 GW, representando pouco mais de 14% da energia disponível global.

Existem diversos dispositivos conversores de energia das ondas estudados no mundo, porém Ning et al. (2016) explica que o tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), por ser um equipamento de simples entendimento, o torna destaque como objeto de pesquisa, já possuindo estudos numéricos, experimentais e protótipos produzidos (Torres et al., 2018). Seu funcionamento consiste em uma estrutura disposta à beira-mar, com uma parede frontal submersa e uma turbina acoplada. Dentro da câmara, a oscilação das ondas gera uma diferença de pressão, causando um escoamento alternado de ar, capaz de rotacionar a turbina e então produzir energia elétrica (Mahnamfar e Altunkaynak, 2017).

Gaspar et al. (2020) explica que diversos protótipos de CAO foram construídos em países como a Índia, China, Noruega, Portugal e Reino Unido. Um dos exemplos mais famosos é o dispositivo instalado em Pico, Portugal, com uma potência nominal de 400 kW. A Figura 1.1 representa uma imagem deste equipamento.



Figura 1.1 - Vista traseira do dispositivo CAO de Pico, Portugal (Fonte: Cruz, 2008)

O CAO de Pico foi construído em 1999, mas por diversos problemas técnicos só foi testado em 2005. Em fevereiro de 2016, os diretores responsáveis pelo dispositivo, considerando que o objetivo do mesmo foi alcançado, decidiram encerrar a pesquisa. Por interesse do governo português, esta decisão foi revogada em 2017, mas com o colapso parcial da estrutura do CAO em abril de 2018, o projeto foi descontinuado no mesmo mês (WavEC, 2018).

Outros conversores do mesmo modelo foram instalados em diferentes regiões, como os de Sakata (Japão) com potência de 60 kW e Tofteshallen (Noruega) de 500 kW, o que indica a credibilidade da tecnologia (Falcão & Henriques, 2016). Em contrapartida, o modelo de conversor de ondas ainda não é aplicado comercialmente, visto que com as atuais metodologias empregadas, seu custo-benefício ainda não atraiu as empresas do setor.

Por conta do alto custo de protótipos do modelo, as atuais pesquisas utilizam modelos numéricos para simular situações reais de funcionamento destes dispositivos. A partir de modelos teóricos avançados e com alta acurácia, é possível prever com fidelidade como o escoamento se comporta e qual a eficiência dos dispositivos estudados, mas com o grande diferencial de que os custos para tais simulações são muito menores que a construção física de um protótipo.

Uma proposta de alguns autores é de acoplar várias câmaras de CAO em quebra-mares. Boccotti et al. (2007) fizeram testes experimentais, dispondo nove dispositivos funcionando paralelamente, a fim de compreender como o sistema funciona. A Figura 1.2 mostra a planta de Mutriku, conhecida por acoplar dispositivos CAO em um quebra-mar.



Figura 1.2 – Quebra-mar de Mutriku com dispositivos CAO acoplados
(Fonte: Enciso et al., 2009)

Uma das maiores dificuldades para a implementação e construção de uma tecnologia destas é encontrar, das diversas possibilidades, o dispositivo mais eficiente em função de sua geometria e tamanho da turbina. Perante isto, este trabalho tem como ideia principal realizar simulações numéricas de dispositivos de Coluna de Água Oscilante inseridos em um quebra-mar localizado na costa sul do Brasil, com o intuito de encontrar a geometria de câmara e turbina que proporcionem a maior eficiência.

1.1. Motivação

Alguns pesquisadores, tais como Teixeira et al. (2013), promoveram estudos numéricos que avaliaram as diferenças na potência gerada por equipamentos CAO em função de variações nas suas dimensões usando modelos baseados nas equações de Navier-Stokes. No entanto, estes modelos

requerem uma alta demanda computacional, o que dificulta um estudo completo de sensibilidade à variação de parâmetros que envolvem o problema.

Sendo assim, Torres et al. (2018) elaboraram o modelo de Otimização do Diâmetro da Turbina, ou *Turbine Diameter Optimization (TDO)*, capaz de encontrar a melhor relação entre diâmetro e velocidade de rotação de uma turbina para uma onda incidente a partir de uma única simulação com um modelo baseado na média de Reynolds das equações de Navier-Stokes (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e a técnica de *Volume of Fluid (RANS-VOF)*, diminuindo o tempo computacional gasto em níveis consideráveis.

Dando continuação ao trabalho de Torres et al. (2018), Lisboa et al. (2018) aplicaram o modelo *TDO* ao estado de mar de Rio Grande, onde a câmara de CAO possui comprimento x largura de 10 x 10 m, para diferentes ondas incidentes, sendo estas relacionadas com a ocorrência da costa sul do Brasil. Como resultado final, os autores encontraram a média anual da potência extraída e diâmetro da turbina do tipo Wells que proporcionou a melhor eficiência.

Este estudo visa a extensão da investigação de Lisboa et al. (2018), que considerou as dimensões da câmara fixas, propondo a determinação simultânea das dimensões da câmara e do diâmetro da turbina Wells que proporcionam a maior eficiência para um grupo de dispositivos do tipo CAO inseridos em um quebra-mar localizado na costa sul do Brasil.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Analisar numericamente as dimensões de câmara e o diâmetro de uma turbina Wells que proporcionam a maior eficiência de dispositivos de conversão de ondas do tipo Coluna de Água Oscilante em um estado de mar da costa sul do Rio Grande do Sul.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Verificar o modelo de otimização do diâmetro da turbina (*Turbine Diameter Optimization – TDO*) para dimensões do dispositivo CAO diferentes de comprimento x largura de 10x10 m;
- b) Generalizar a metodologia do modelo *TDO* para que seja aplicado em diferentes tamanhos de CAO;
- c) Determinar o conjunto de diâmetro e rotação de turbina com maior eficiência para um estado de mar da costa sul do Rio Grande do Sul;

- d) Relacionar a eficiência de cada diâmetro de turbina em cada seção do dispositivo (comprimento x largura) para um estado de mar da costa sul do Rio Grande do Sul.

2. ESTADO DA ARTE

Como parte do embasamento teórico deste trabalho, é necessário ter conhecimento em pesquisas relacionadas ao tópico em destaque. Embasado nesta necessidade, o tópico de estado da arte elabora o resumo de diferentes artigos que tenham maior proximidade ao tema deste projeto, separando entre trabalhos realizados por pesquisadores de outros grupos de pesquisa e os do grupo de pesquisa ao qual este estudo está inserido.

2.1. Trabalhos de pesquisadores de outros grupos de pesquisa

Diversos trabalhos têm sido publicados com o objetivo de encontrar as características do dispositivo CAO que proporcione a máxima eficiência ou que apliquem o mesmo a quebra-mares. O problema é complexo, pois esta análise depende do estudo de vários parâmetros simultaneamente, tais como os relacionados com as dimensões da câmara, com as características da turbina e ao controle do sistema de conversão. A seguir, são destacados alguns trabalhos que visam a busca de uma melhor performance da CAO.

Falcão e Justino (1999) estudaram a performance de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) equipado com uma turbina Wells e válvulas para o alívio de pressão na câmara de ar. A partir de uma abordagem analítica do comportamento hidrodinâmico e aerodinâmico dentro da câmara, os autores elaboraram coeficientes adimensionais que regem o comportamento da pressão, vazão e potência da turbina. Seus resultados mostraram que o uso de válvulas de alívio para o controle da vazão de ar é benéfico para a eficiência do dispositivo, mesmo que este opere abaixo do limite de pressão exercida na turbina, sendo que em ondas mais energéticas, o sistema é mais expressivo.

Falcão e Rodrigues (2002) investigaram, através de modelos analíticos, a potência extraída por um dispositivo conversor de ondas do tipo Coluna de Água Oscilante com uma turbina Wells acoplada, considerando a ação de ondas aleatórias. Neste trabalho, foi mostrada a influência do controle da rotação e da atuação da válvula de alívio de pressão de ar na performance do dispositivo.

Falcão (2004) estudou a solução ótima para o dispositivo CAO equipado com uma turbina do tipo Wells, considerando os aspectos de otimização de produção de energia, via modelagem analítica, e de custo-benefício, que envolvem desde a sua instalação até a operação. Seus resultados apontaram que, diferentemente do critério de máxima produção de energia elétrica anual, o critério que leva em conta o custo-benefício indica o uso de turbinas de menores diâmetros e, por consequência, com produção mais baixa.

Perdigão e Sarmiento (2003) estudaram a eficiência de dispositivos CAO sob a aplicação de ondas monocromáticas em um domínio de duas dimensões, por meio de um método analítico. Seus resultados mostraram diferentes comportamentos da turbina Wells em função das amplitudes de ondas, mostrando como afeta na eficiência do CAO.

Dizadji e Sajadian (2011) analisaram experimentalmente diferentes geometrias de CAO, em busca de otimizar a eficiência do dispositivo. A geometria é alterada tanto em dimensões quanto na angulação da parede frontal. Seus resultados mostraram uma melhor eficiência de 32%.

Elhanafi et al. (2016) analisaram numericamente o balanço de energia de forma numérica por meio de um código RANS baseado em dinâmica dos fluidos computacional, verificando este em seu artigo. Os autores estudaram diversas alturas de ondas e amortecimentos de turbina. Suas conclusões mostraram os efeitos nas alterações destes dois parâmetros, indicando que alturas de onda muito grandes afetam negativamente a extração de energia.

Falcão, Henriques e Gato (2017) analisaram, com modelos numéricos baseados nas teorias lineares das ondas, a potência extraída por uma turbina Wells instalada em um dispositivo CAO de Pico sujeito a ação de ondas aleatórias. Os autores buscaram entender a influência da velocidade de rotação e diâmetro da turbina na performance de conversão de energia.

Simonetti et al. (2017) estudaram os efeitos da geometria de um CAO e o amortecimento da turbina em um modelo 3D incompressível e bifásico por meio de simulações numéricas. O modelo está em escala reduzida em que as paredes da câmara não vão até o fundo e a parede frontal tem comprimento menor do que a posterior. Os autores encontraram a melhor proporção de dimensões da câmara e de amortecimento de turbina para diversos estados de mar.

Ashlin et al. (2018) elaboraram experimentos físicos de dispositivos CAO instalados em quebra-mares, estudando os efeitos de diferentes espaçamentos entre os mesmos. Seus resultados compararam a performance destes diversos casos, concluindo que o modelo com maior espaçamento obteve os melhores resultados.

Windt et al. (2018) escreveram um artigo de revisão sobre simulações numéricas de escoamento de fluidos, dando ênfase para sistemas de conversão de energia das ondas, abordando diferentes aspectos e técnicas do assunto. O artigo mostrou aplicações, conceitos básicos e avançados e métodos utilizados.

Howe et al. (2020) buscaram a eficiência de dispositivos CAO implementados em um quebra-mar flutuante *offshore*, por meio de experimentos em laboratório, aplicando diferentes espaçamentos entre as câmaras. Em termos de eficiência, os melhores resultados foram obtidos quando inseridos

apenas dois dispositivos no quebra-mar, com o maior espaçamento possível. É notado que, quanto menor é a distância entre as câmaras, menor é a eficiência dos mesmos.

2.2. Trabalhos do grupo de pesquisa

Teixeira et al. (2013) compararam o modelo Fluinco, baseado nas equações de Navier-Stokes, com o software FLUENT® e empregando o método de elementos finitos para análises da ação de diferentes ondas incidentes regulares em dispositivos de Coluna de Água Oscilante onshore equipado com uma turbina Wells. Os resultados foram comparados com os obtidos pelo software FLUENT®, com muito boa concordância. Os fenômenos hidrodinâmicos e aerodinâmicos foram estudados para diferentes dimensões de uma CAO e de relação característica da turbina a fim de entender como estes parâmetros afetam a potência do mesmo.

Torres et al. (2018) elaboraram uma metodologia, chamada de *Turbine Diameter Optimization (TDO)*, que determina o diâmetro e velocidade de rotação ideais de uma turbina Wells em um dispositivo de Coluna de Água Oscilante onshore com dimensões da câmara de 10 x 10 m. O objetivo é minimizar o tempo computacional gasto em simulações, visto que é possível calcular as potências extraídas pelo conjunto a partir de uma única simulação da interação fluido-estrutura realizada por modelos RANS, por exemplo, em que o tempo computacional é muito maior. Os autores validaram seu modelo aplicando-o a um canal com diferentes ondas incidentes regulares e comparando os resultados com os do software Fluinco. Como parte de seus resultados, os autores também obtiveram curvas de potência para diferentes diâmetros e rotações de turbina Wells em diferentes ondas incidentes no canal.

Lisboa et al. (2018) estudaram a potência extraída por um dispositivo CAO *onshore* hipoteticamente localizado na costa sul do Rio Grande do Sul, com uma câmara de 10 x 10 m, com diferentes tamanhos de turbina Wells e para o estado de mar caracterizado por Lisboa et al. (2017). O modelo computacional considera um canal com a CAO inserida em um quebra-mar. As simulações numéricas são feitas com o software FLUENT® e o modelo *TDO*. Foram determinados o diâmetro e a rotação que proporcionam a melhor eficiência para a região, considerando a frequência de ocorrência de cada onda incidente que compõe o estado de mar. Os autores encontraram que uma turbina Wells com diâmetro de 2.25 m proporciona o melhor desempenho, atingindo uma potência média anual de 36.48 kW para a câmara de largura e comprimento de 10 x 10 m.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Equações governantes do escoamento de fluidos

Os problemas físicos que envolvem escoamentos de fluidos consideram que em seu sistema existe conservação de massa. A Eq. (3.1) apresenta a equação da conservação da massa, também conhecida como equação da continuidade, aplicada aos escoamentos incompressíveis (Schlichting e Gersten, 2017):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

onde u_i são as componentes de velocidade do vetor segundo as dimensões dos eixos cartesianos x_i .

Já as equações que governam a quantidade de movimento de fluidos viscosos são denominadas Equações de Navier-Stokes. Considerando um escoamento incompressível e um fluido Newtoniano, as Eqs. (3.2) e (3.3) expressam as Equações de Navier-Stokes para um domínio em duas dimensões (Pope, 2002):

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

onde $i, j = 1, 2$, ρ é a massa específica do fluido, t é o tempo, g_i são as componentes do vetor de aceleração da gravidade, p é a pressão, τ_{ij} são as componentes do tensor de tensões viscosas e μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica.

Uma forma de abordar o problema do escoamento de fluidos em regimes turbulentos é considerar que a velocidade é uma composição da velocidade média com uma velocidade flutuante (Pope, 2002):

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}' + \bar{\mathbf{u}} \quad (3.4)$$

onde $\bar{\mathbf{u}}$ é o valor médio, \mathbf{u}' é o valor flutuante e \mathbf{u} é o valor instantâneo. Inserindo estas variáveis na equação de Navier-Stokes da Eq. (3.2), obtém-se as chamadas Equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\tau_{ij}}) + \overline{\rho g_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (3.5)$$

na qual surge o tensor de Reynolds, dado por:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}(\rho \kappa) \delta_{ij} \quad (3.6)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta, κ é a energia cinética turbulenta e δ_{ij} são as componentes do delta de Kronecker.

Existem algumas propostas de modelos de turbulência que propõem equações de fechamento para o problema. Um deles é o modelo de duas equações k - ε , adotado neste estudo, que consiste em equações de transporte para energia cinética de turbulência k e a sua taxa de dissipação ε Launder e Spalding (1974). Ambos termos são solucionados a partir das equações de transporte, expressas pelas Eq. (3.7) e (3.8).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.8)$$

onde G_k é a energia cinética gerada pelos gradientes de velocidade, G_b é a geração de energia por flutuação, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes e σ_k e σ_ε são os números de turbulência de Prandtl (Launder e Spalding, 1974).

3.2. Características das Ondas

As propagações das ondas no mar são manifestações de forças, como as da gravidade e produzidas pelas tensões superficiais, que juntas agem para manter um nível de superfície estacionário (Dean & Dalrymple, 1991). As principais características de uma onda regular em propagação são apresentadas na Fig. 3.1.

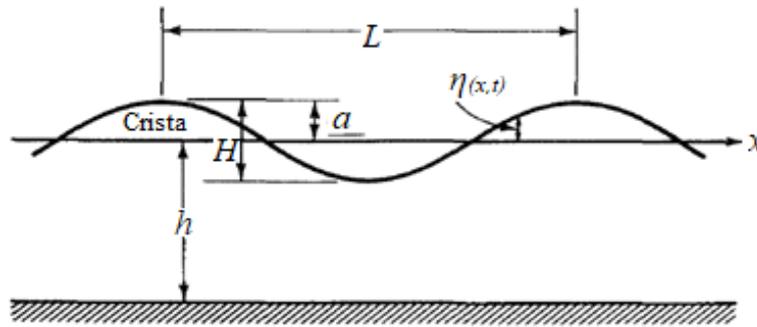


Figura 3.1 - Esquema de uma onda em um canal e suas propriedades (Fonte: Dean e Dalrymple, 2000)

O comprimento de onda L é a distância entre dois pontos de altura máxima da onda, chamado de crista. Já a altura H é determinada pela diferença entre o ponto mais alto (crista) e o ponto mais baixo (cava) da superfície livre. A profundidade do canal h é a distância entre o fundo do mesmo e a superfície livre em repouso. A amplitude a é, em ondas de pequena amplitude, a metade da altura da onda, o que corresponde à distância entre a superfície de repouso e a crista ou a cava. E η é a posição da superfície livre em relação à linha de repouso, determinada pela posição x em função do tempo t .

Além das características apresentadas pela Fig. 3.1, duas propriedades importantes devem ser apresentadas: o período e a celeridade. O período T é entendido como o tempo gasto para que duas cavas ou cristas da onda passem pelo mesmo ponto. Já a celeridade C é a velocidade da onda, definida como a razão entre o comprimento L e o período T (Holthuijsen, 2007).

3.2.1. Divisão de profundidades

Segundo Dean e Dalrymple (2000) as ondas podem encontrar-se em três diferentes zonas, de acordo com a profundidade relativa h/L . São elas as águas rasas, profundas e intermediárias. A zona de acordo com as profundidades, dita diversas características da teoria aplicada e diferentes equações regentes são estabelecidas para cada uma. Vê-se tal divisão segundo as Eqs. (3.9), (3.10) e (3.11).

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2} \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2} \quad (3.10)$$

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20} \quad (3.11)$$

onde a Eq. (3.9) aplica-se a águas profundas, Eq. (3.10) funciona para águas intermediárias e Eq. (3.11) serve para águas rasas.

3.3. Teoria linear de Airy

A teoria linear de Airy é a formulação matemática básica para ondas progressivas, porém só pode ser aplicada em casos em que a altura da mesma é pequena em relação a seu comprimento e profundidade (Reeve et al., 2018). Esta teoria é também conhecida como teoria linear ou teoria de ondas de primeira ordem.

3.3.1. O problema de valor de contorno

A propagação de uma onda monocromática em um canal é estudada como um problema de valor de contorno, cujo esquema com as condições de contorno está mostrado na Fig. 3.2.

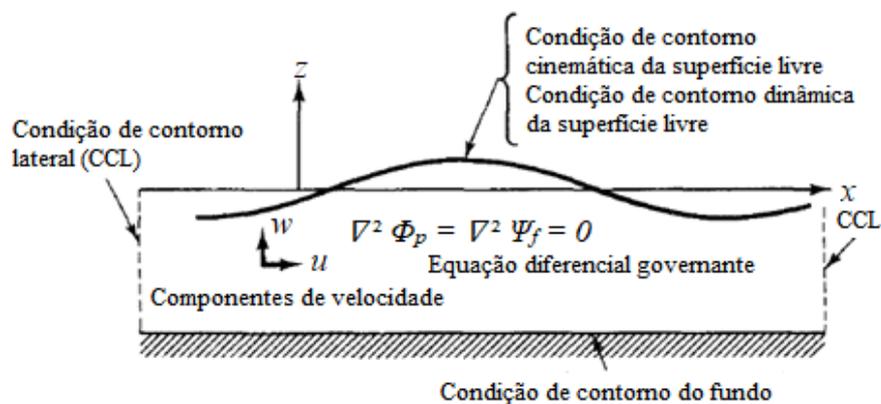


Figura 3.2 - Esquema do problema de valor de contorno da propagação de onda em um canal (Fonte: Adaptado de Dean & Dalrymple, 1991)

onde Φ_p é a função potencial de velocidade e Ψ_f é a função de fluxo.

Segundo Sorensen (1978), as hipóteses assumidas para a análise do problema são a de que a água é um fluido homogêneo, o escoamento é incompressível e irrotacional (tensões cisalhantes insignificantes). Tais circunstâncias fazem com que a equação governante da equação da continuidade, expressa em função da função potencial de velocidade Φ , deva satisfazer a equação de Laplace, segundo a Eq. (3.12).

$$\frac{\partial^2 \Phi_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_p}{\partial z^2} = 0 \quad (3.12)$$

Outra hipótese é a de que o fundo deve ser considerado impermeável e perfeitamente horizontal. Já na superfície livre, os fenômenos reais da ação dos ventos ocorrem aleatoriamente. Visto que prever tais comportamentos seria um processo muito complexo, utiliza-se a condição de que a pressão atmosférica é distribuída por toda a superfície de uma maneira igual. Nos fechamentos laterais do domínio, são consideradas condições de periodicidade no tempo e no espaço da solução.

3.3.2. Equações regentes de ondas progressivas

As equações que regem as ondas progressivas segundo a teoria de Airy são obtidas a partir da aplicação da metodologia de separação de variáveis para a solução da equação de Laplace da função potencial de velocidade e da aplicação das condições de contorno (Dean & Dalrymple, 1991). Nesse processo de solução, surge a frequência angular σ .

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (3.13)$$

Também o número de onda k é expresso pela Eq. (3.14).

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.14)$$

A solução do problema resulta na equação da elevação da superfície livre η :

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.15)$$

Segundo esta equação, entende-se que a elevação da superfície de uma onda progressiva depende tanto de sua posição no espaço quanto de seu instante no tempo, sendo estes dois relacionados à altura da onda. Utilizando as considerações feitas por Dean & Dalrymple (1991), encontra-se a forma final da função potencial de velocidade Φ , dado pela Eq. (3.16).

$$\phi_p = -\frac{Hg \cosh k(h+z)}{2\sigma \cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.16)$$

A solução do problema também estabelece uma dependência entre o número de onda e a frequência angular, dada pela equação de dispersão, que é expressa por:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (3.17)$$

As componentes de velocidades u e w são expressas nas Eqs. (3.18) e (3.19).

$$u = -\frac{\partial \Phi_p}{\partial x} = \frac{H\sigma \cosh k(h+z)}{2 \sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.18)$$

$$w = -\frac{\partial \Phi_p}{\partial z} = \frac{H\sigma \sinh k(h+z)}{2 \sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.19)$$

Tais componentes representam a velocidade nas direções x e z , respectivamente. A Figura 3.3 mostra esquematicamente os comportamentos ao longo da profundidade e da direção de propagação da onda do vetor de velocidades.

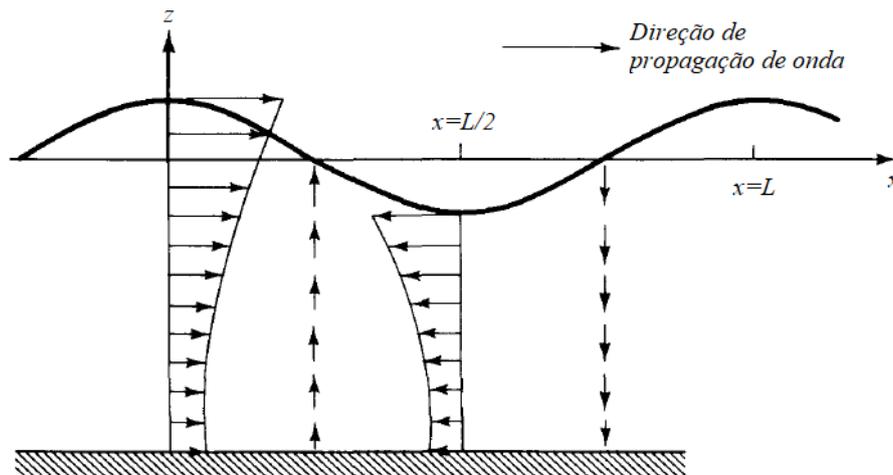


Figura 3.3 - Esquema do vetor de velocidades em uma onda progressiva (Fonte: Adaptado de Dean & Dalrymple, 1991)

Dean & Dalrymple (1991) apontam que as equações (3.18) e (3.19) estão em uma defasagem de 90° , onde a velocidade horizontal tem seu valor máximo quando a elevação da superfície é máxima, seja na crista ou na cava da onda, e a velocidade vertical é maximizada em pontos em que a superfície está em repouso. As direções das componentes de velocidade são alteradas por conta das funções trigonométricas incluídas nas equações, explicando o movimento oscilatório. Em ambos os casos, as componentes possuem os valores mínimos no fundo do canal. Na teoria linear, cada partícula movimenta-se em torno de um eixo próprio, descrevendo uma trajetória elíptica.

A energia devido à uma onda progressiva é a soma da energia potencial e da energia cinética (Dean & Dalrymple, 1991). Reeve et al. (2018) afirmam que ambas as formas de energia se equivalem, e que a equação final que expressa a soma entre elas resulta na Eq. (3.20).

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (3.20)$$

onde E é a energia por unidade de área.

A média temporal do fluxo de energia (potência) de uma onda progressiva linear na direção de propagação é dada por (Dean & Dalrymple, 1991):

$$P_w = \left(\frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \right) \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) A \tanh kh \quad (3.21)$$

onde P_w é a potência média da onda e A é a largura frontal de incidência da onda.

3.4. Dispositivo Coluna de Água Oscilante

Mahnamfar e Altunkaynak (2017) apontam que atualmente os dispositivos conversores de energia das ondas estão divididos em quatro grupos: Atenuadores, absorvedores pontuais, dispositivos de galgamento e dispositivos de coluna de água oscilante (CAO).

Neill e Hashemi (2018) definem o dispositivo de coluna de água oscilante como uma estrutura oca e parcialmente submersa, onde um de seus lados é aberto a oceanos ou mares e dentro de sua câmara existe ar aprisionado. As elevações da superfície livre geradas por ondas causam oscilações dentro do dispositivo, agindo como um pistão, e que tal movimento gera uma diferença de pressão de ar, capaz de rotacionar a turbina acoplada, gerando energia elétrica. A Figura 3.4 ilustra simplificada o funcionamento do aparelho.

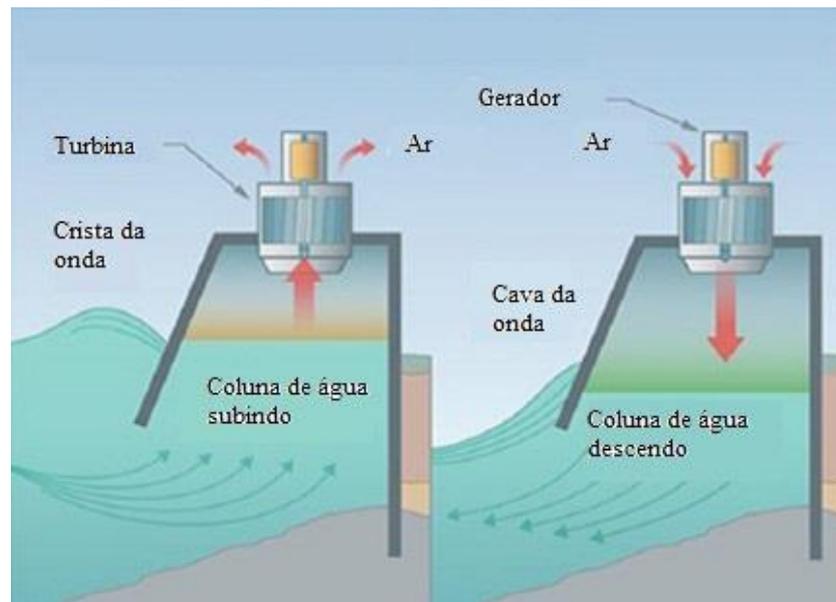


Figura 3.4 - Esquema de funcionamento de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante em duas fases (Fonte: Adaptado de Neill & Hashemi, 2018)

Falcão et al. (2017) listam diversos protótipos espalhados pelo mundo, como em: Pico, Portugal (400 kW), Sakata, Japão (60 kW) e Tofteshallen, Noruega (500 kW), mostrando que a credibilidade do dispositivo é suficiente para que testes *in situ* sejam realizados.

Segundo Teixeira et al. (2013), a média temporal da Potência Pneumática (P_p) dentro de uma câmara de ar da CAO é dada por:

$$\bar{P}_p = \frac{1}{T} \int_T Q_t (p - p_o) dt \quad (3.22)$$

onde Q_t é a vazão da turbina, T é o período de onda, p é a pressão de ar dentro da câmara neste instante t e p_o é a pressão atmosférica.

3.5. Turbina Wells

Segundo Falcão et al. (2017), os dispositivos CAO operam com turbinas auto retificadoras, pois estas independem da direção da corrente de ar para seu funcionamento. Os dois tipos mais comuns deste grupo são a turbina Wells e a turbina de impulso.

A turbina Wells possui modelos com ou sem guias. O modelo sem guias possui hélices onde um de seus lados é arredondado e o outro não. Já a versão com guias possui duas camadas de várias hélices muito próximas e todas curvadas para um lado, envolvendo a turbina Wells na mesma forma do outro modelo. Ambas versões tendem a rotacionar para um único sentido, porém o modelo com

guias é mais atual e eficiente que o anterior (Falcão & Henriques, 2016). A Figura 3.5 mostra estes dois tipos de turbinas.

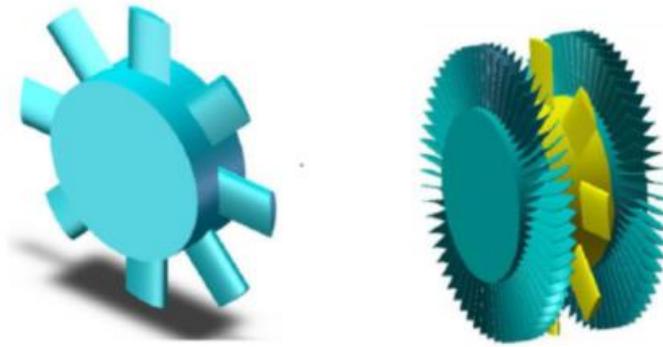


Figura 3.5 - Turbina Wells (a) sem guias (b) com guias (Fonte: Falcão & Henriques, 2016)

A velocidade de rotação N de uma turbina é predeterminada, ou seja, uma turbina deve operar a uma velocidade constante. Torres et al. (2018) estipularam uma velocidade tangencial v_t máxima, sendo essa o resultado de $ND/2$, limitado em 150 m/s, a fim de evitar danos por ressonância do equipamento.

Falcão et al. (1999) utilizaram a lei da similaridade das turbomáquinas e coeficientes adimensionais para fluxo, pressão e potência de turbinas Wells, relacionando propriedades do dispositivo, como diâmetro, velocidade de rotação, vazão de massa e potência. Tais coeficientes são expressos por:

$$\Phi = \frac{Q}{\rho ND^3} \quad (3.23)$$

$$\Psi = \frac{p - p_0}{\rho N^2 D^2}, \quad (3.24)$$

$$\Pi = \frac{P_t}{\rho N^3 D^5} \quad (3.25)$$

onde estes são os coeficientes adimensionais de vazão, pressão e potência da turbina, respectivamente. Sobre as variáveis envolvidas, ρ é uma massa específica de referência, Q é a vazão mássica que passa pela turbina, p é a pressão dentro da câmara, p_0 é a pressão atmosférica e P_t é a

potência gerada pela turbina. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram curvas que relacionam estes coeficientes para uma turbina Wells (Falcão e Justino, 1999).

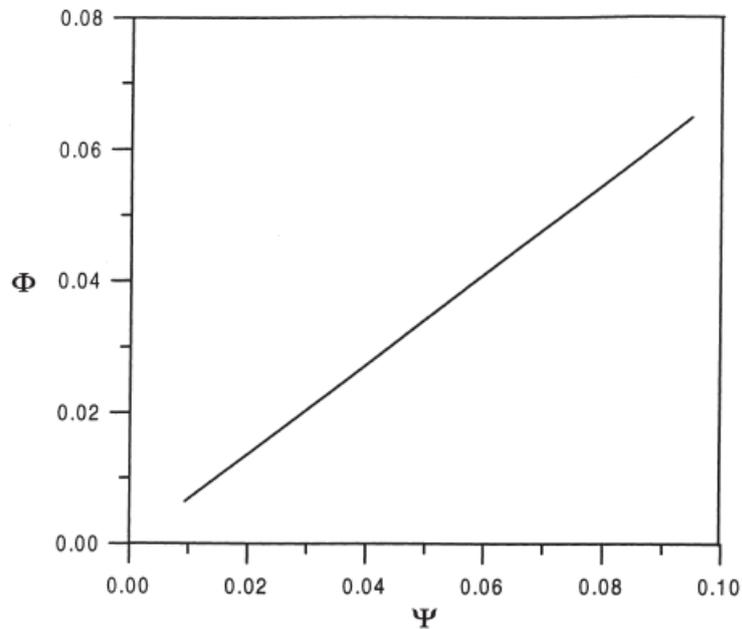


Figura 3.6 - Curva de coeficiente de vazão em função do coeficiente de pressão para turbina Wells. (Fonte: Falcão & Justino, 1999)

A Figura 3.6 mostra a curva que relaciona o coeficiente de vazão Φ e o coeficiente de pressão Ψ de uma turbina Wells. Analisando seu resultado, Falcão e Justino (1999) concluíram que a relação entre os dois parâmetros é linear, sendo $K = \Phi/\Psi = 0.6803$. Os autores também relacionaram a potência e a pressão na turbina mostrada na Fig. 3.7. Nota-se que a relação é não-linear, onde existe um ponto em que o coeficiente de potência sofre uma diminuição abrupta, sendo então considerado o valor crítico do coeficiente de pressão Ψ , tendo um valor próximo de 0.067. Entende-se que o dispositivo deve operar em valores abaixo deste, deixando de entrar nesta zona e maximizando a potência gerada.

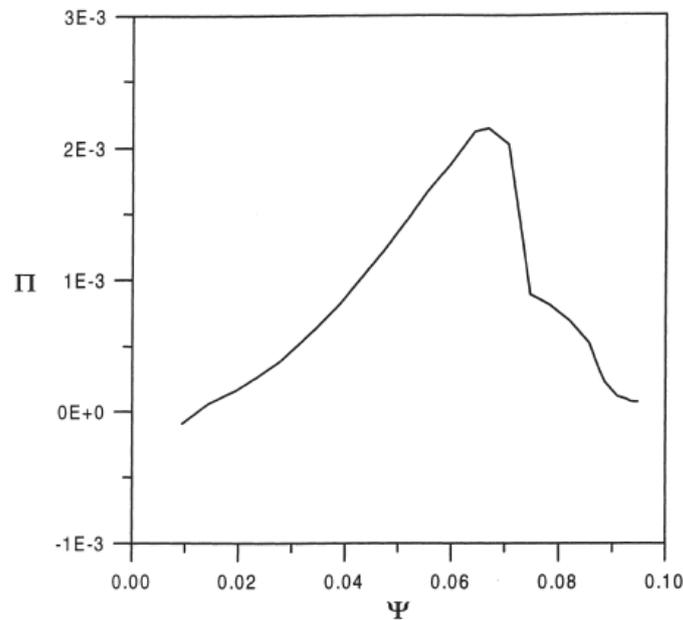


Figura 3.7 - Curva de coeficiente de potência em função do coeficiente de pressão para turbina Wells (Fonte: Falcão & Justino, 1999)

A turbina Wells tem como característica a relação linear entre vazão e diferença de pressão na turbina. A constante que relaciona ambas é conhecida como relação característica da turbina k_t (Josset e Clément, 2007):

$$k_t = \frac{p - p_0}{Q_t} \quad (3.26)$$

onde p é a pressão na turbina, p_0 é a pressão atmosférica e Q_t é a vazão volumétrica da turbina.

Segundo Falcão e Justino (1999), inserindo a Eq. (3.26) nos coeficientes adimensionais da turbina (Eq. (3.25)), o parâmetro k_t pode ser redefinido como:

$$k_t = \frac{\rho N}{KD} \quad (3.27)$$

onde N e D são a velocidade de rotação e o diâmetro da turbina, respectivamente. Tal equação mostra que duas turbinas com diâmetros e velocidades de rotação diferentes podem ter o mesmo k_t . Finalmente, a média temporal da potência da turbina é expressa como (Falcão e Justino, 1999):

$$\bar{P}_{t,m} = \frac{1}{T} \int_T P_t dt \quad (3.28)$$

do qual $P_{t,m}$ é a potência da turbina encontrada pelas Eqs. (3.25) e T é o período da onda.

Como o principal critério deste trabalho é analisar a eficiência dos dispositivos, a mesma pode ser expressa por:

$$\varepsilon = \frac{P_t}{P_w} \quad (3.29)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Estudo de caso

Lisboa et al. (2017) estudaram o potencial energético da costa Sul do Brasil, nas regiões da Querência (QUE), Cassino (CAS) e São José do Norte (SJN), como mostra a Fig. 4.1a, replicando dados de ondas incidentes previstos pelo *Wave Watch III*, modelo de previsão e reconstituição. As informações são disponibilizadas pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Aplicando os dados coletados no software *Mike 21 SW*, responsável pela simulação de geração, propagação e transformação de ondas espectrais, o autor faz a aferição e verificação de seu modelo matemático por meio de comparações com resultados de outras pesquisas.

Lisboa et al. (2017) reconstituíram um estado de mar dos anos de 1997 a 2006, e buscaram a região com maior potencial energético a 14 m de profundidade, apontando São José do Norte (SJN) como a área de maior influência. A Figura 4.1b mostra a distribuição de energia do local.

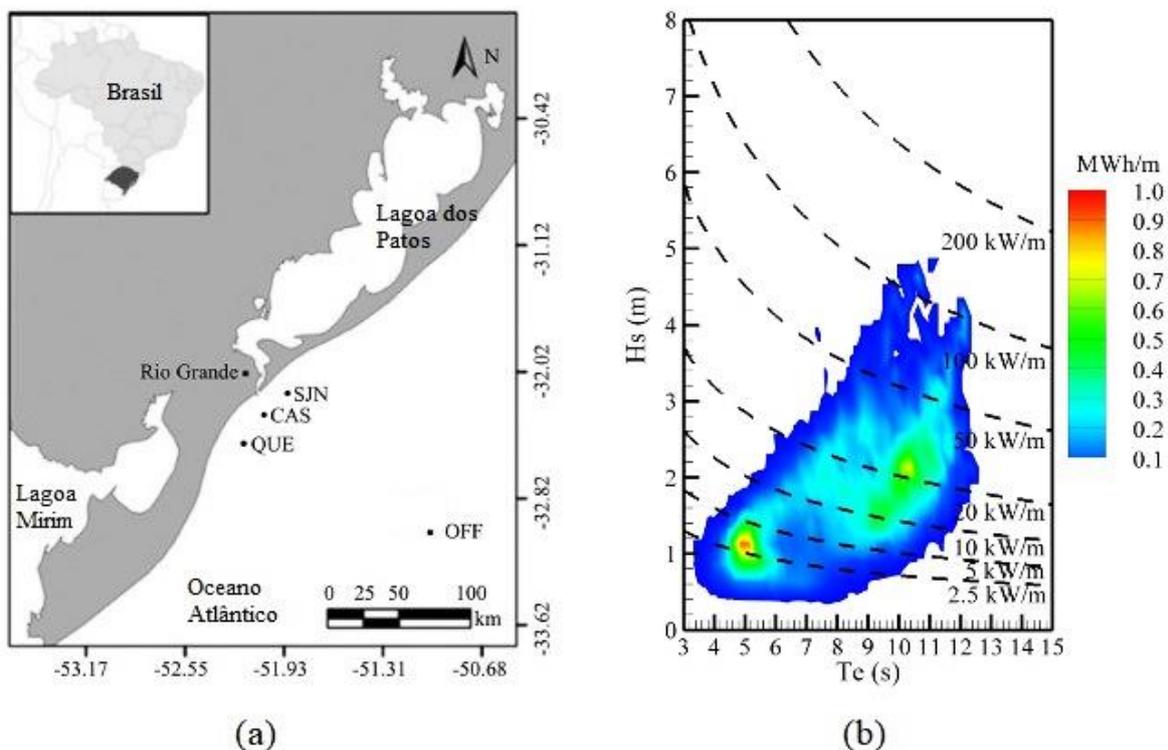


Figura 4.1 - (a) Região de estudo e (b) Distribuição de energia média anual em São José do Norte (Fonte: Lisboa et al., 2017)

A Figura 4.1b ilustra a distribuição de energia média anual de ondas incidentes, com os eixos equivalentes ao período de energia T_e e altura significativa da onda H_s , em São José do Norte. A fim de transformar as ondas irregulares em monocromáticas, Lisboa et al. (2018) adaptaram as mesmas, inferindo que uma onda monocromática possui um fluxo de energia equivalente ao de uma irregular quando $T = T_e$ e $H = H_{rms}$, sendo que:

$$H_{rms} = \frac{H_s}{2} \quad (4.1)$$

onde H_{rms} é a altura média quadrática.

Os autores apresentaram as porcentagens de ocorrência de ondas incidentes regulares, que seriam todas as ondas estudadas do período de 1997 a 2006, transformando-as em ondas monocromáticas, como mostra a Tab. 4.1.

Tabela 4.1. Ocorrência de ondas em porcentagem para um estado de mar em SJN na costa sul do Brasil (Fonte: Lisboa et al., 2018)

$H(m) \backslash T(s)$	5	6	7	8	9	10	11	12
0.5	16.84	12.89	7.46	3.99	1.58	0.48	0.07	0.00
1	10.73	7.17	3.33	3.81	4.89	3.38	0.91	0.07
1.5	0.06	0.60	1.62	2.12	1.65	2.70	1.86	0.35
2	0.00	0.00	0.08	0.46	0.71	0.53	0.76	0.26
2.5	0.00	0.00	0.01	0.02	0.07	0.13	0.15	0.10
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.03	0.05

Os autores também elaboraram a Tab. 4.2 para mostrar a porcentagem de potência associada à cada onda. Estas porcentagens de potências seriam o quanto cada onda influencia na potência total do estado de mar. Nota-se que a onda de $T = 5$ s e $H = 0.5$ m tem a maior ocorrência (16.84% na Tab, 1), mas quando é associada à sua potência, não demonstra uma grande porcentagem do total (2.95% na Tab, 2). Também se vê que a onda de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m compõe a maior porcentagem quando relacionada à potência (8.94%), mas sua ocorrência não é tão relevante (2.7%). Estes dois casos ressaltam a importância de expor tanto a ocorrência das ondas quanto o percentual de potência destas.

Tabela 4.2. Porcentagem de potência por T e H para um estado de mar em SJN na costa sul do Brasil (Fonte: Lisboa et al., 2018)

$T(s)$ \ $H(m)$	5	6	7	8	9	10	11	12
0.5	2.95	3.16	2.04	1.25	0.54	0.18	0.03	0.00
1	7.51	7.02	3.64	4.77	6.72	4.97	1.41	0.11
1.5	0.09	1.32	3.99	5.97	5.11	8.94	6.48	1.27
2	0.00	0.00	0.35	2.30	3.91	3.12	4.71	1.67
2.5	0.00	0.00	0.07	0.16	0.60	1.20	1.45	1.01

Lisboa et al. (2018) analisaram a potência extraída por um conversor de ondas do tipo CAO, com uma câmara de 10 x 10 m e equipado com uma turbina Wells, inserido em um quebra-mar hipotético. O domínio computacional consistiu em um canal com o dispositivo CAO em seu extremo direito. No presente trabalho, é imposto o mesmo modelo matemático com domínio computacional mostrado na Fig. 4.2. Diferentemente do estudo de Lisboa et al. (2018), em que o comprimento e a largura da câmara são fixos (10 x 10 m), aqui se busca a composição ótima das dimensões da câmara (comprimento e largura) e das características da turbina Wells. Para limitar o número de casos estudados, o comprimento e a largura da câmara são iguais. O canal possui um talude com declividade de 1:7.5 m para garantir a estabilidade do solo. L é o comprimento da onda incidente e b é o comprimento da câmara do dispositivo. A profundidade do canal é de 14 m, porém esta passa a ser 10 m ao final do aclave. A câmara tem uma altura fixa de 6 m e uma parede frontal submersa de 2.5 m, valores ideais encontrados por Teixeira et al. (2013), e no topo desta CAO encontra-se a turbina Wells.

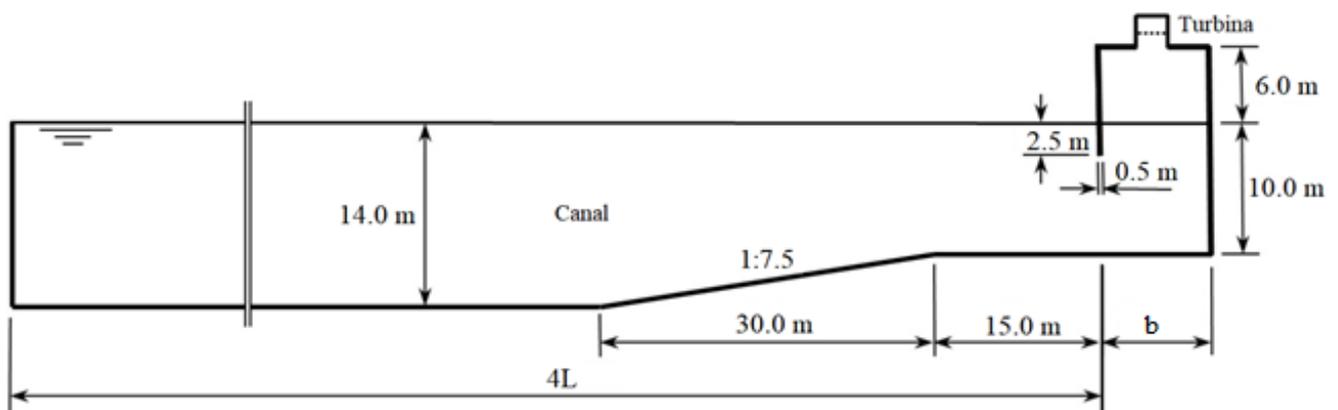


Figura 4.2 - Esquema do domínio computacional do canal utilizado em simulações (Fonte: Adaptado de Lisboa et al., 2018)

O comprimento das ondas para cada período para a profundidade de 14 m, obtido segundo a teoria linear das ondas (Dean e Dalrymple, 1991), está mostrado na Tab. 4.3.

Tabela 4.3. Comprimento das ondas para cada período a profundidade de 14 m

T (s)	5	6	7	8	9	10	11	12
L (m)	38.25	55.42	66.40	79.98	93.20	106.07	118.86	131.42

Em complemento a Fig. 4.2, a Fig. 4.3 mostra o domínio computacional utilizado, mas em três dimensões. Nesta figura, pôde-se ver melhor as dimensões variáveis do trabalho, onde b é o comprimento e W é a largura da câmara do dispositivo.

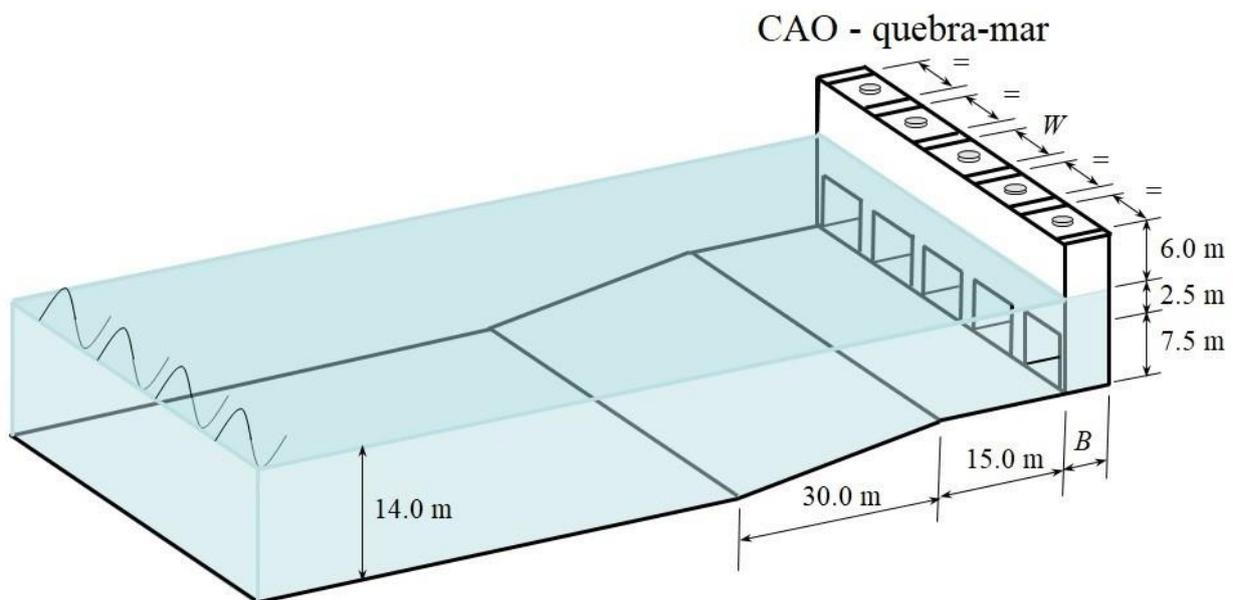


Figura 4.3 - Esquema do domínio computacional em três dimensões

Neste trabalho, aplica-se a metodologia de determinação da eficiência do dispositivo CAO ao estado de mar no sul do Rio Grande do Sul (Tab. 4.2). As ondas com porcentagens de ocorrência na potência média anual abaixo de 1% não foram consideradas neste estudo. Assim, aproximadamente 98% da energia presente no estado de mar participaram desta análise, que é quase que a totalidade da energia.

4.2. Modelo Matemático

As simulações da hidrodinâmica, da incidência de onda sobre a estrutura e da aerodinâmica dentro da câmara do dispositivo CAO são realizadas pelo software FLUENT[®] e pelo algoritmo *TDO*, elaborado por Torres et al. (2018). Esta seção tem o propósito de explicá-los.

4.2.1. Software FLUENT[®]

O software FLUENT[®] usa o método dos volumes finitos para discretizar as equações da média de Reynolds de Navier-Stokes, mostradas na Eq. (3.5). Neste trabalho, o modelo de turbulência usado é o *k-ε*, cujas equações regentes são apresentadas nas Eqs. (3.7) e (3.8).

O método *Volume of Fluid* (VoF) é usado para tratar o escoamento com dois fluidos (ar e água) (Hirt e Nichols, 1981). Neste método, a fração volumétrica, representada por α , tem o valor 0 para a fase do ar e 1 para a água, e qualquer valor entre 0 e 1 representa uma proporção das duas fases naquele volume. O valor que localiza a posição da superfície livre é $\alpha = 0.5$. O valor de α é calculado pela equação de transporte (Hirt e Nichols, 1981):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (4.2)$$

As condições de contorno aplicadas estão mostradas na Fig. 4.4. No início do canal, aplica-se a condição de um batedor numérico com absorção ativa. O batedor numérico impõe a cada instante de tempo a elevação da superfície livre e as componentes de velocidade u e w , conforme a teoria linear de Airy. Já o batedor ativo funciona para que as ondas refletidas pelas paredes do dispositivo não possam incidir novamente no canal. No contorno superior do domínio, é imposta a condição de pressão atmosférica, da qual se adota a pressão de 101325 Pa. No fundo do canal e nas paredes da CAO, impõe-se a condição de não deslizamento. No topo da câmara, é imposta a pressão da turbina, em função do kt proposto no caso e da vazão que passa pelo contorno.

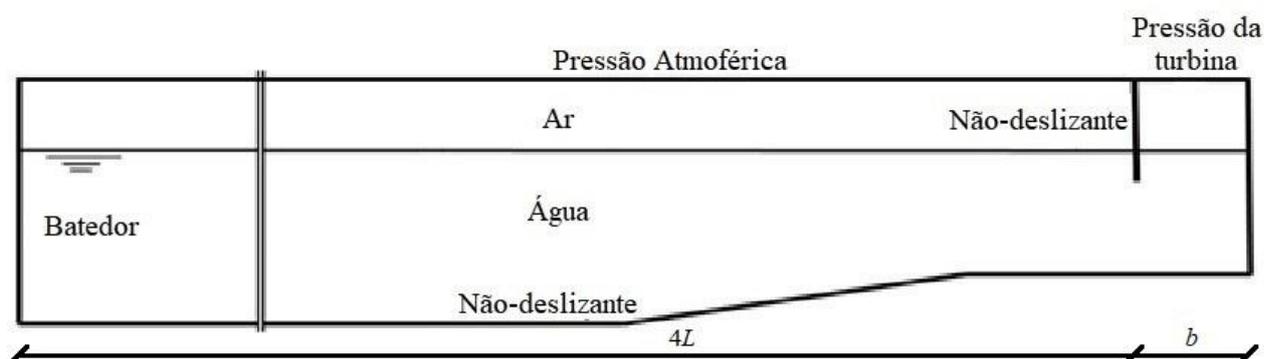


Figura 4.4 - Condições de contorno aplicadas no problema

Tanto para a imposição da pressão na turbina quanto para a geração das ondas incidentes e a absorção ativa utiliza-se o recurso do FLUENT[®] de *User-Defined Functions* (UDF), que são códigos escritos na linguagem C, capazes de inserir equações e variáveis definidas pelo próprio usuário. Para a geração de ondas, são impostas as componentes de velocidade u e w (Eqs. (3.18) e (3.19)) e elevação da superfície da onda (Eq. (3.15)). A imposição da pressão na turbina depende do parâmetro k_t . Conforme o k_t é alterado, a pressão e a vazão da turbina também são alteradas, conforme mostra a Eq. (3.26). O cálculo de vazão da turbina é feito iterativamente a cada instante de tempo (Teixeira et al., 2013). As metodologias de solução adotadas no software FLUENT[®] estão descritas na Tab. 4.4.

Tabela 4.4. Metodologias de solução adotadas no FLUENT

Configuração de simulação	Método adotado
Acoplamento entre pressão e velocidade	SIMPLEC
Gradiente	<i>Least Squares Cells Based</i>
Pressão	PRESTO!
Quantidade de movimento	<i>Third-Order MUSCL</i>
Fração de volume	HRIC modificado
Energia cinética de turbulência	<i>Third-Order MUSCL</i>
Taxa de dissipação da energia cinética da turbulência	<i>Third-Order MUSCL</i>
Formulação de transição	Implícita de Segunda Ordem

É importante ressaltar que as condições de contorno e os métodos de solução adotados neste trabalho foram aplicados a estudos anteriores, como Gonçalves et al. (2020), Gaspar et al. (2020), Lisboa et al. (2018) e Teixeira et al. (2013).

A Figura 4.5 mostra a localização das sondas usadas nas simulações para o monitoramento das variáveis do escoamento. A sonda 1 é disposta a 1 metro do batedor e a sonda 2 encontra-se a $L/2$ do batedor. As sondas 3, 4, 5 e 6 são dispostas ao longo da rampa, espaçadas igualmente. A sonda 7 é colocada junto à parte externa da parede frontal da CAO, a 8ª é colocada junto à parte interna da mesma parede e a sonda 9 encontra-se junto à parede posterior. A sonda 10 monitora o volume de água da CAO ao longo do tempo e a sonda 11 monitora a pressão média de ar dentro da câmara.

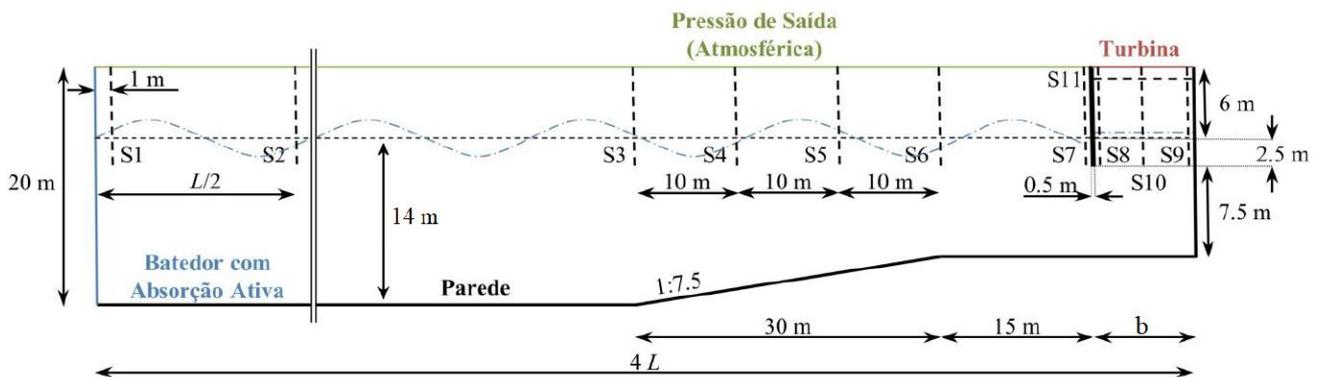


Figura 4.5 - Canal de estudo com a inserção de sondas (Fonte: Adaptado de Lisboa et al., 2018)

O tempo de cada simulação é estipulado em $36 * T$ de cada onda como critério arbitrário. Já o passo de tempo (*Time step*) é de $T/640$, valor utilizado por trabalhos anteriores, como o de (Gaspar, Teixeira e Didier, 2020). O comprimento b e a largura W da câmara mantêm-se como $b = W$ para todas as câmaras estudadas. Seus valores são de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 m.

4.2.2. Discretização da malha

O software FLUENT® adota o método de Volumes Finitos (*Finite Volume Method - FVM*) e, neste trabalho, malhas de células retangulares foram construídas através do software GMSH®. A Figura 4.6 mostra duas zonas de uma malha como exemplo.

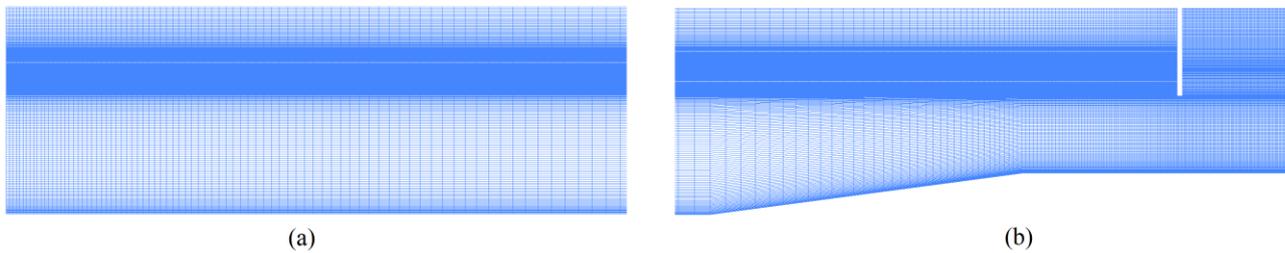


Figura 4.6 - Zonas de uma malha de volumes finitos, para uma câmara de 10 x 10 m e uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, (a) no início do canal e (b) no final do canal e dentro da câmara de CAO

As discretizações horizontal e vertical seguem alguns critérios. Na direção horizontal, o 1º metro é dividido em 3 partes para que se tenha uma linha vertical a frente do contorno do gerador de onda (Fig. 4.3a), que serve como uma sonda necessária para a aplicação da metodologia de absorção ativa (Didier et al., 2017). Assim como o trabalho de Didier et al. (2017), ao longo da propagação da onda no canal, consideram-se 70 células para cada comprimento de onda, sendo que o primeiro comprimento de onda serve como uma zona de transição entre os tamanhos de células. Na zona da câmara da CAO (Fig. 4.6b), a parede frontal é dividida em 4 partes iguais no sentido x , onde cada célula tem 0.125 m de comprimento, e dentro da câmara do dispositivo, todas as células possuem este mesmo comprimento.

Quanto à discretização vertical, a zona de propagação da onda é dividida em 50 células de mesma altura. Na zona superior a esta, entre esta mesma zona e a atmosfera, as células aumentam exponencialmente. Já na zona inferior, as células tornam-se menores quando próxima do fundo.

4.2.3. Modelo de Otimização do Diâmetro da Turbina (*TDO*)

O modelo de Otimização do Diâmetro da Turbina (*Turbine Diameter Optimization – TDO*), desenvolvido por Torres et al. (2018), tem o propósito de determinar a potência da turbina Wells para diferentes velocidades de rotação e diâmetros de turbina, demandando um menor tempo computacional quando comparado a um programa baseado no modelo RANS, como o software FLUENT®.

O modelo numérico assume que a oscilação da superfície livre dentro da câmara é harmônica e tem um efeito de pistão, seguindo como (Teixeira et al., 2013):

$$\eta_c = a_c \text{ sen } \omega t \quad (4.3)$$

onde η_c é a elevação da superfície livre dentro da câmara de CAO e a_c é a amplitude da oscilação e ω é a frequência angular.

Com isso, tem-se o volume de ar deslocado V dentro da câmara a cada instante de tempo, calculado pela Eq. (4.4):

$$V = (h_c - \eta_c)A \quad (4.4)$$

sendo A a área da seção transversal da câmara e $h_c = 6$ m (Fig. 4.2) a altura da câmara a partir da linha de repouso. A Figura 4.7 mostra um esquema da câmara adotado no modelo *TDO*.

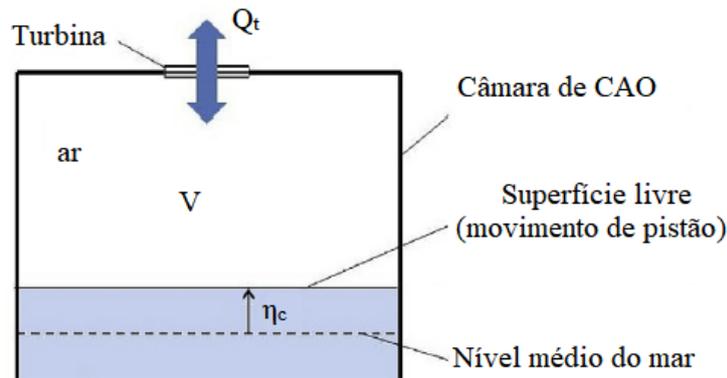


Figura 4.7 - Esquema de dispositivo CAO adotado no conceito do modelo *TDO* (Fonte: Torres et al., 2018)

O modelo *TDO* considera o sistema aberto com um gás ideal que sofre uma transformação isentrópica, cuja equação da pressão dentro da câmara é dada pela (Teixeira et al., 2013):

$$\frac{p(t)}{\dot{p}(t)} = \gamma \left[\frac{Q_t(t)}{V(t)} \left(1 - \varepsilon \frac{\rho(t) - \rho_0}{\rho(t)} \right) - \frac{\dot{V}(t)}{V(t)} \right] \quad (4.5)$$

onde p e \dot{p} são a pressão e sua taxa, γ equivale a 1.4 para o ar, Q_t é a vazão de ar que passa pela turbina, V e \dot{V} são o volume de ar dentro da câmara e sua taxa, ε resulta em 0 quando o ar está saindo da câmara e 1 quando está entrando e ρ e ρ_0 são a massa específica do ar dentro e fora da câmara, respectivamente. Além desta equação, ainda se sabe que (Torres, Teixeira e Didier, 2018):

$$Q_t = \frac{(p - p_0)}{k_t} \quad (4.6)$$

para uma turbina do tipo Wells. Como última hipótese, o efeito de compressão é calculado segundo a transformação isentrópica abaixo (Teixeira et al., 2013):

$$p(t)\rho(t)^{-\gamma} = p_0\rho_0^{-\gamma} \quad (4.7)$$

É aplicada uma discretização temporal de primeira ordem na Eq. (4.4) e, em conjunto com as Eqs. (4.6) e (4.7), pode-se calcular a pressão dentro da câmara a partir de um valor arbitrário de a_c , explicado posteriormente pela Fig. 4.8.

Torres, Teixeira e Didier (2018) mostraram que existe uma relação aproximadamente constante denominada de Fator de Amplitude Composta (*Compound Amplitude Factor – CAF*), definido por:

$$CAF = \frac{a_t}{a_w} \quad (4.8)$$

onde as componentes a_t e a_w expressam a amplitude de oscilação total e a amplitude da onda incidente, respectivamente. A amplitude de oscilação total é a soma da amplitude da superfície livre a_c com a amplitude de oscilação de pressão a_p , dada por:

$$a_p = \frac{\Delta p}{g\rho_w} \quad (4.9)$$

sendo Δp a variação de pressão do ar dentro da câmara, ρ_w a massa específica da água e g é a aceleração gravitacional. Assim, mesmo que a relação característica da turbina seja alterada (que depende da velocidade de rotação e do diâmetro da turbina), o *CAF* mantém-se aproximadamente constante. Dessa forma, pode-se obter a resposta do dispositivo via FLUENT® para uma determinada onda incidente e uma relação característica da turbina e determinar o valor do *CAF*. Com este valor fixo, pode-se explorar a resposta do dispositivo para diferentes valores de relação característica da turbina (velocidade de rotação e diâmetro) com o modelo *TDO*.

Alguns parâmetros de cálculo foram estipulados antes de utilizar o algoritmo. Neste trabalho, os diâmetros de turbina variam de 0.50 m a 5.00 m, com intervalos de 0.25 m. A velocidade de rotação varia de $150/D$ a $300/D$, com intervalos de 5 rad/s. A Figura 4.8 descreve os passos que o modelo *TDO* executa para cada onda e dimensão da câmara.

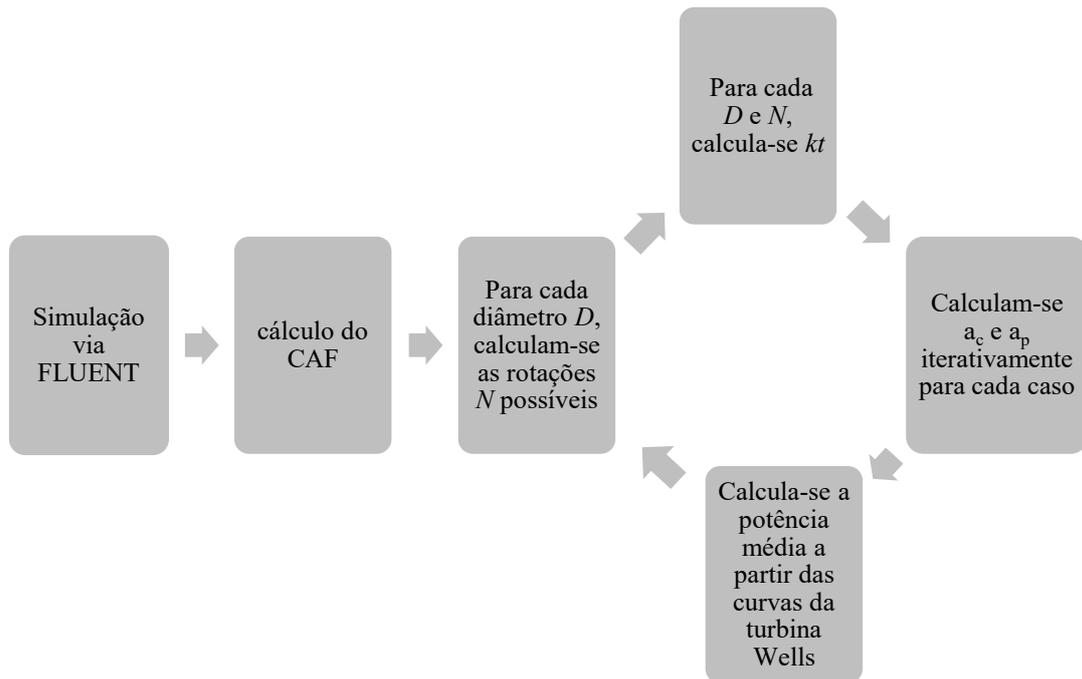


Figura 4.8 - Etapas de execução do modelo de Otimização do Diâmetro da Turbina (TDO)

Explicando cada etapa do modelo:

- a) Etapa 1: O caso é simulado para cada dimensão de câmara e onda incidente através do software FLUENT[®], considerando uma relação característica da turbina k_t arbitrária;
- b) Etapa 2: É calculado o valor do CAF seguindo a Eq. (4.8);
- c) Etapa 3: Para cada diâmetro de turbina, são calculadas as velocidades de rotação N possíveis para o caso selecionado, aplicando a condição de que a velocidade tangencial da turbina opere entre 50% e 100% da velocidade tangencial máxima ($ND/2$) e simulando controle de pressão do ar dentro da câmara por válvulas de alívio, de acordo com o valor crítico de Ψ , como explicado na seção 3.5. ;
- d) Etapa 4: Para cada par de diâmetro e rotação da turbina, é calculada a relação característica kt pela Eq. (3.27);
- e) Etapa 5: Calculam-se os valores de a_c e a_p iterativamente, seguindo as Eqs. (4.3), (4.5) e (4.7), de modo que resulte em um CAF próximo ao do caso calculado na etapa 2;
- f) Etapa 6: Calcula-se a potência mecânica da turbina P_t , através da curva de potência da turbina (Fig. 3.7). O processo retorna à etapa 3 até que os diâmetros e rotações de turbina possíveis sejam esgotados.

4.3. Desenvolvimento do modelo *TDO generalizado*

O primeiro passo para analisar as potências de cada dispositivo, foi o de verificar se a metodologia adotada pelo modelo *TDO original*, aplicada para câmaras de dimensões 10 x 10 m, também é válida para outras dimensões de câmaras. Para isso, o modelo *TDO original* foi usado para analisar os resultados de duas ondas incidentes: $T = 7$ s e $H = 1.5$ m e $T = 10$ s e $H = 1.5$ m e dimensões de dispositivos de 5 x 5 m, 10 x 10 m, 15 x 15 m, 20 x 20 m, 25 x 25 m e 30 x 30 m, sempre com $k_t = 100$ Pa.s/m³.

Após observar algumas inconsistências nos resultados, novas análises foram feitas para avaliar se o comportamento do *CAF* permaneça aproximadamente constante para diferentes valores de k_t e diferentes dimensões de câmara. Para isso, valores do *CAF* foram calculados a partir das simulações com o FLUENT[®] para diferentes valores de k_t .

Os resultados mostraram que o *CAF* pode variar significativamente ao longo de k_t e com comportamentos diferentes conforme a onda incidente e o tamanho da câmara são alterados. Para tornar a metodologia aplicável a diferentes dimensões de câmaras, é desenvolvido neste trabalho o modelo *TDO generalizado*, cuja diferença em relação ao *TDO original* é de que o *CAF* não é considerado mais constante e sim variável, definido por uma técnica de ajuste de curva incorporada à ferramenta. Para criar esta curva, devem-se inserir diferentes pontos de k_t x *CAF*, onde os resultados são encontrados por meio de novas simulações numéricas, com o auxílio do software FLUENT[®].

Após alguns testes de tipos de curvas de ajustes com o auxílio do software MATLAB[®], observou-se que a que melhor se ajusta aos pontos amostrados se dá pela curva exponencial expressa pela Eq. (4.10):

$$f(x) = ax^b + c \quad (4.10)$$

onde $f(x)$ representa a função, denominada de *CAF-TDO*, x representa o k_t e a , b e c são coeficientes de natureza da equação, sendo estes calculados e otimizados iterativamente pelo próprio software.

Com o propósito de verificar os resultados encontrados pela metodologia proposta, compararam-se os valores amostrados do *CAF* obtidos através do FLUENT[®] (*CAF-FLUENT*) aos encontrados pela curva (*CAF-TDO*) para os casos de ondas incidentes $T = 7$ s e $H = 1.5$ m e $T = 10$ s e $H = 1.5$ m e para diferentes valores de k_t , como mostra o item 5.4. .

Após essa verificação, chegou-se à conclusão de que o ajuste de curva do *CAF* tem resultados com acurácia satisfatória usando 4 pontos de k_t x *CAF* obtidos através do FLUENT[®]. Essa é a diferença entre o modelo *TDO original* e o *TDO generalizado*. No caso do *TDO original*, é necessária apenas uma simulação do FLUENT[®] para determinar o *CAF*, enquanto que o *TDO generalizado*

necessita de 4 simulações do FLUENT[®]. Embora essa mudança demande um maior custo computacional, ainda assim, a metodologia é viável se for comparada com uma análise baseada apenas nas simulações do FLUENT[®], que seria proibitivo. As etapas do modelo estão esquematizadas na Fig. 4.9.

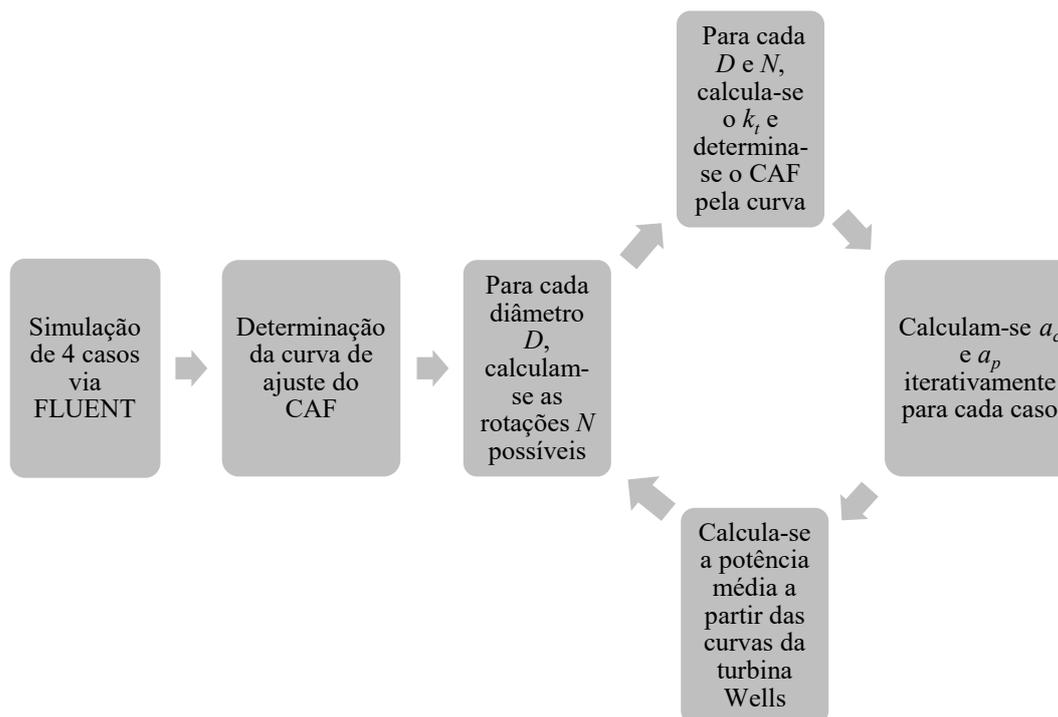


Figura 4.9 - Etapas de execução do modelo *TDO generalizado*

As etapas do modelo são descritas a seguir:

- a) Etapa 1: Para cada onda incidente e dimensão do dispositivo CAO, são simulados os 4 casos necessários para compor a curva de ajuste, definindo os k_t estipulados conforme o item 4.3.1. e calculando os valores de *CAF-FLUENT* segundo a Eq. (4.8);
- b) Etapa 2: É calculada a função *CAF-TDO* por ajuste de curva;
- g) Etapa 3: Para cada diâmetro de turbina, são calculadas as velocidades de rotação N possíveis para o caso selecionado, aplicando a condição de que a velocidade tangencial da turbina opere entre 50% e 100% da velocidade tangencial máxima ($ND/2$);
- c) Etapa 4: Para cada par de diâmetro e rotação da turbina, é calculada a relação característica kt pela Eq. (3.27) e determina-se o valor do *CAF-TDO*;

- d) Etapa 5: Calculam-se os valores de a_c e a_p iterativamente, seguindo as Eqs. (4.3), (4.5) e (4.7), de modo que resulte em um CAF próximo ao do caso calculado na etapa 4;
- e) Etapa 6: Calcula-se a potência mecânica da turbina P_t através da curva de potência da turbina (Fig. 3.7). O processo retorna à etapa 3 até que os diâmetros e rotações de turbina possíveis sejam esgotados.

4.3.1. Definição dos pontos de kt utilizados no ajuste de curva

Em estudos preliminares, constatou-se que a curva de ajuste tem boa acurácia quando esta se baseia em pelo menos quatro pontos de k_t versus CAF para os casos em estudo. Porém são abordados diferentes tamanhos de câmara, devendo-se então estimar os limites de k_t para cada caso. Considerando-se que a velocidade tangencial da turbina é $v_t = ND/2$, pode-se reescrever a Eq. (3.25) para k_t da forma:

$$k_t = \frac{2\rho v_t}{KD^2} \quad (4.11)$$

Os limites inferior e superior de k_t estão relacionados a uma faixa de atuação da turbina em que a potência da mesma seja significativa. Esta faixa pode ser estimada através das curvas de performance da turbina Wells (Falcão e Justino, 1999). A partir da curva de potência versus pressão, ilustrada pela Fig. 3.7, observa-se que o coeficiente de pressão deve estar entre 0.01 e 0.09 para que haja uma potência significativa. Considerando a relação entre o coeficiente de vazão e de pressão ($\Phi = K.\Psi$), estima-se, portanto, que os limites do coeficiente de vazão são $\Phi_{min} = 0.006803$ e $\Phi_{max} = 0.06123$.

O coeficiente de vazão da turbina é dado pela Eq. (3.25) que, em função da vazão de volume ($Q_t = Q/\rho$), fica:

$$\Phi = \frac{Q_t}{ND^3} \quad (4.12)$$

O módulo da vazão de volume Q_t pode ser estimado considerando a oscilação harmônica de um pistão, calculado conforme a seguinte equação:

$$|Q_t| = Aa_c\omega \quad (4.13)$$

onde ω é a frequência angular de oscilação (mesma da onda incidente, ou seja, $\omega = 2\pi/T$). Portanto, o módulo do coeficiente de vazão, considerando $N = 2v_t/D$, pode ser escrito da forma:

$$|\Phi| = \frac{\pi a_c}{T v_t D^2} A \quad (4.14)$$

Juntando a Eq. (4.11) com a Eq. (4.15), tem-se uma nova expressão para k_t :

$$k_t = \frac{2\rho v_t^2 T |\Phi|}{\pi K a_c A} \quad (4.15)$$

Assim, os valores mínimo e máximo de k_t são estimados pela Eq. (4.11). O $k_{t,min}$ é obtido adotando $v_{tmin} = 75$ m/s, $\Phi_{min} = 0.006803$, uma onda com o menor período estudado ($T = 5$ s) e a maior amplitude de elevação de superfície livre dentro da câmara. Esta amplitude é estimada considerando a profundidade do *lip* (tamanho da parede frontal da câmara), que é igual a 2.5 m e, portanto, adota-se como limite: $a_c = 2.5$ m. Além disso, se considera a maior largura da câmara permitida neste estudo, seja de 30 m ($A = 30b$). Assim, o $k_{t,min}$ pode ser estimado pela expressão:

$$k_{t,min} = \frac{3}{b} \quad (4.16)$$

Alguns testes preliminares mostraram que a potência extraída para os valores abaixo de 15 Pa.s/m³ é insignificante, independentemente do comprimento da câmara. Por isso, foi adotado o valor de $k_{t,min} = 15$ Pa.s/m³ para todos os casos.

O $k_{t,max}$ é obtido adotando $v_{tmax} = 150$ m/s, $\Phi_{max} = 0.06123$, uma onda com o maior período estudado ($T = 12$ s) e a menor amplitude de elevação de superfície livre dentro da câmara, estimada em $a_c = 0.5$ m. Além disso, se considera a menor largura da câmara permitida neste estudo, que é de 5 m ($A = 5b$). Assim, a equação de $k_{t,max}$ fica:

$$k_{t,max} = \frac{14975}{b} \quad (4.17)$$

Dos 4 pontos usados para aferir as curvas de ajuste está aquele em que $k_t = 100$ Pa.s/m³, pois observou-se que, em todos os casos, próximo deste ponto ocorre uma mudança de comportamento da curva. Portanto, os pontos a serem usados para aferir a curva de ajuste são: $k_{t,min}$, $k_t = 100$ Pa.s/m³, $k_{t,med}$, $k_{t,max}$. Sendo $k_{t,med}$ a média entre $k_t = 100$ Pa.s/m³ e $k_{t,max}$.

A Tabela 4.5 mostra os valores de k_t que servem como referência para a aferição das curvas de ajuste em função do comprimento da câmara. Para $k_{t,max}$, adotou-se um valor 20% maior que o obtido pela Eq. (4.17) por segurança.

Tabela 4.5. k_t usados nas simulações numéricas para a aferição da curva de ajuste

b (m)	k_t (Pa.s/m ³)			
	$k_{t,min}$	$k_t = 100$	$k_{t,med}$	$k_{t,max}$
5	15	100	1550	3600
10	15	100	850	1800
15	15	100	550	1200
20	15	100	400	900
25	15	100	300	700
30	15	100	250	600

Mesmo que esta nova metodologia necessite de maior tempo computacional (quatro simulações via FLUENT[®] ao invés de uma, para cada onda e dimensão de câmara), o algoritmo consome muito menos tempo quando comparado com simulações de escoamento do fluido. Caso o algoritmo *TDO generalizado* não fosse utilizado, deveriam ser feitas mais de 73000 simulações numéricas, visto que o modelo *TDO generalizado* também varia as características da turbina, onde cada uma destas simulações é realizada em um período de 24 h, com o uso de um processador Intel[®] Core[™] i7-3930 K 3.20 GHz, o que tornaria este estudo inviável. Já com a utilização do modelo *TDO generalizado*, a partir das quatro simulações numéricas para encontrar o *CAF-FLUENT*, são consumidos apenas 10 min para cada onda e dimensão de câmara, mostrando uma diferença significativa entre as metodologias.

5. RESULTADOS

5.1. Análise de comportamento hidrodinâmico do dispositivo Coluna de Água Oscilante

A alteração das dimensões da câmara do dispositivo Coluna de Água Oscilante é a proposta principal do trabalho e para compreender melhor o comportamento fluidodinâmico para diferentes tamanhos de CAO, analisam-se dois casos com o mesmo período e altura de onda e relação característica de turbina, mas com diferentes tamanhos de câmaras. A Figura 5.1 mostra a magnitude de velocidade do escoamento em nove diferentes instantes, até completar um período de onda quando o escoamento está em regime permanente. O primeiro caso a ser estudado tem uma onda de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, $k_t = 530$ Pa.s/m³ e uma câmara de 5x5 m.

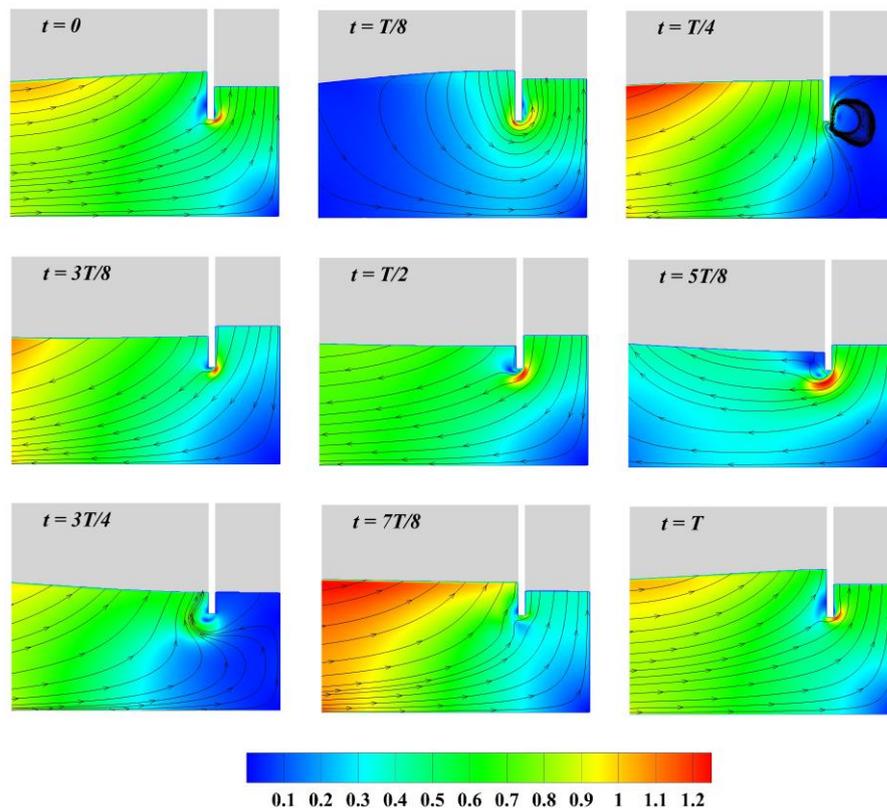


Figura 5.1 - Magnitude de velocidade do escoamento em m/s em nove instantes durante um período de onda para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, $k_t = 530$ Pa.s/m³ e uma câmara de 5x5 m

O instante $t = 0$ marca a aproximação da onda ao dispositivo e a condição de zero-ascendente na elevação da superfície livre dentro da câmara, onde a velocidade abaixo da parede frontal é alta, assim como em $t = T$. Em $t = T/4$, o sentido do escoamento está invertendo-se, o que cria um vórtice

dentro da câmara. Tal inversão pode ser notada quando se comparam os instantes $t = T/8$ e $t = 3T/8$, visto que as linhas de corrente estão com sentidos opostos. Analisando o escoamento como um todo, nota-se a tendência de que as maiores velocidades estejam abaixo da parede frontal da câmara. Já no canto inferior do dispositivo, as velocidades são próximas a zero.

Na Figura 5.2 são observados os mesmos instantes e parâmetros de onda e turbina, mas com uma câmara de 30x30 m. Neste caso, as velocidades dentro da câmara são muito baixas, ao contrário do exterior. Nota-se também que a elevação da superfície livre oscila menos com a incidência da onda no dispositivo.

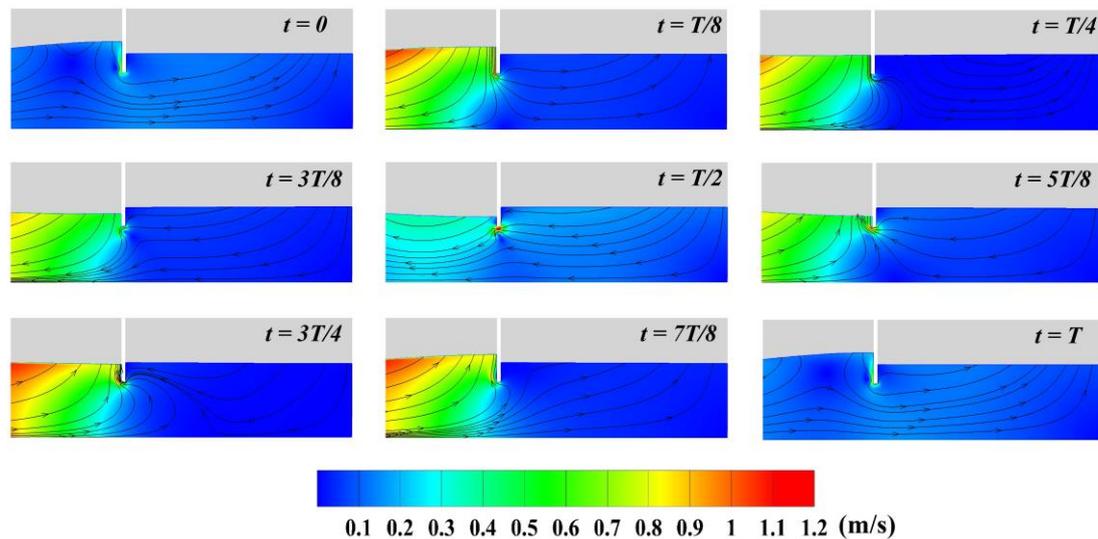


Figura 5.2 - Magnitude de velocidade do escoamento em m/s em nove instantes durante um período de onda para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, $k_t = 530$ Pa.s/m³ e uma câmara de 30x30 m

A fim de comparar ambos os resultados, busca-se também avaliar a elevação da superfície livre η , a pressão p e a potência pneumática P_t de cada um dos dois casos, com a finalidade de descobrir qual dos casos tem uma maior potência disponível para ser gerada. A Figura 5.3 mostra a série temporal dos mesmos casos das Figs. 5.1 e 5.2, apresentando a elevação da superfície livre dentro da câmara conforme o tempo do escoamento varia.

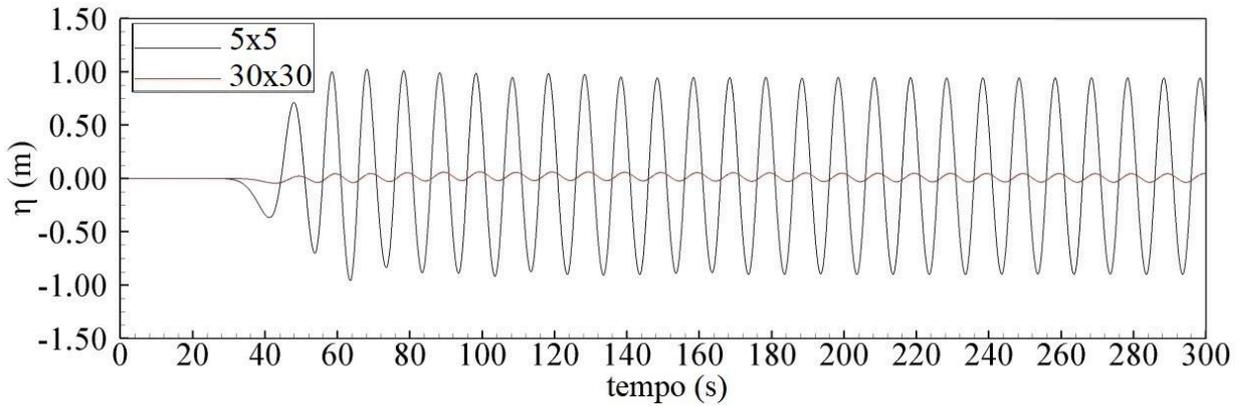


Figura 5.3 - Série temporal de elevação da superfície livre de um caso de $T = 10$ s, $H = 1.5$ m e $k_t = 530$ Pa.s/m³, para câmaras de 5x5 m e 30x30 m

Na Figura 5.3 confirma-se que a elevação da superfície livre em uma câmara de 5x5 m é muito maior que em uma câmara de 30x30 m. Considerando que a mesma onda é aplicada em ambos os casos, infere-se que o menor dispositivo sofrerá maiores efeitos de empolamento de onda, o que explica a grande altura que se alcança. A Figura 5.4 simboliza a pressão exercida na turbina, também para os casos apresentados nas Figs. 5.1 e 5.2.

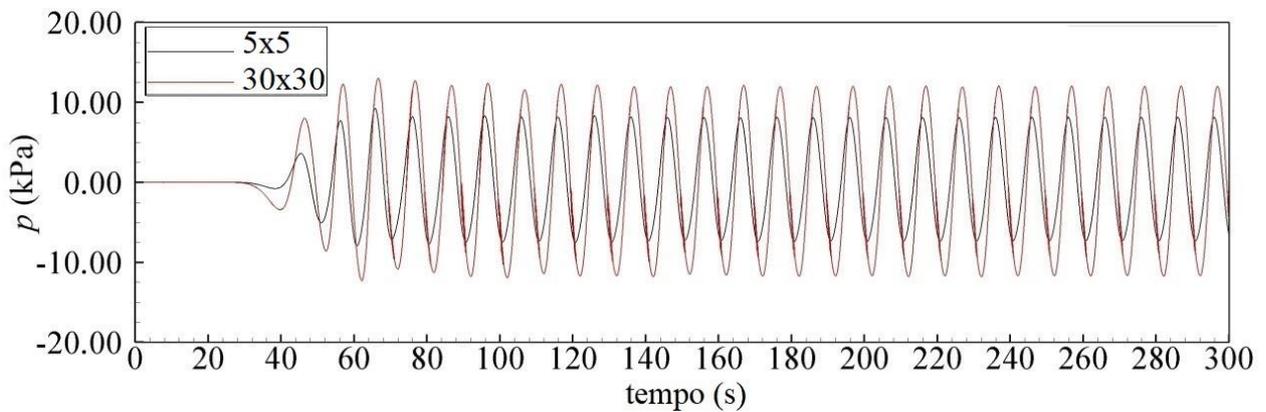


Figura 5.4 - Série temporal de pressão de um caso de $T = 10$ s, $H = 1.5$ m e $k_t = 530$ Pa.s/m³, para câmaras de 5x5 m e 30x30 m

Comparando ambas as séries, é correto afirmar que o caso de 30x30 m tem uma maior amplitude de pressão atuante na turbina. Esta diferença é previsível, visto que a câmara de 30x30 m possui um maior volume de ar, e portanto, o movimento oscilatório das ondas gera uma maior pressão na câmara maior. Analisando a estabilidade das séries temporais de elevação da superfície e pressão da turbina, nota-se que ocorre a estabilização da variação de pressão próximo a um tempo de 80 s.

Por causa da maior pressão na câmara de 30x30 m, pode-se inferir que a maior potência pneumática estará presente na câmara de 30x30 m, como mostra a Fig. 5.5. Cabe lembrar que a câmara de 30x30 m está sujeita a um fluxo de energia da onda incidente 6 vezes maior (relação de larguras de câmaras) do que a da câmara 5x5m.

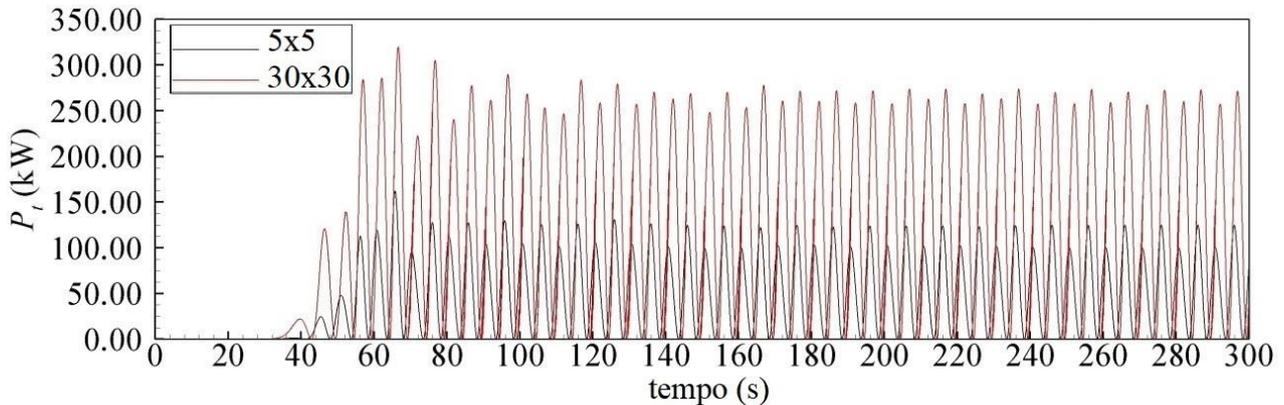


Figura 5.5 - Série temporal de potência pneumática de um caso de $T = 10$ s, $H = 1.5$ m e $k_t = 530$ Pa.s/m³, para câmaras de 5x5 m e 30x30 m

Na Figura 5.5, a série temporal mostrada refere-se à potência pneumática que cada dispositivo tem a capacidade de produzir. É importante explicar que, por um dos dispositivos ser muito maior do que o outro, é natural que as potências sejam muito diferentes, por isso neste trabalho se busca comparar as eficiências dos diferentes dispositivos, e não as potências.

5.2. Análise da aplicabilidade do modelo *TDO original*

A primeira análise feita neste trabalho visa investigar a eficácia do modelo *TDO original* para câmaras diferentes de 10x10 m. Nesta seção, será feita uma análise da eficiência do dispositivo conforme as dimensões do mesmo são alteradas, buscando averiguar se existe concordância nos resultados extraídos.

Adota-se a nomenclatura que indica o comprimento e a largura da câmara como $b \times W$, respectivamente. Todas as simulações foram feitas pelo software FLUENT[®], com uma relação característica da turbina k_t iguais, assumindo a grandeza de 100 Pa.s/m³. Com os resultados de cada caso, calculam-se os valores de *CAF-FLUENT*, conforme metodologia explicada no item 4.3.

Inserindo os valores de *CAF-FLUENT* e outros parâmetros específicos de cada caso, o algoritmo é introduzido a fim de computar diversos resultados de potência da turbina em função do k_t , o que acarreta em diferentes pares de valor de diâmetro da turbina D e velocidade de rotação N . A

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de maior potência extraída do dispositivo para o caso de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, assim como a eficiência, calculada pela Eq. (3.29).

Tabela 5.1. Resultados de maior eficiência encontrados pelo modelo *TDO original* a partir de $k_t = 100$ Pa.s/m³ para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	CAF	P_t (kW)	P_w (kW)	ε (%)	D (m)	N (rad/s)	k_t (Pa.s/m ³)
5 x 5	2.1712	120.97	35.26	29.14	1.00	300.00	540.19
10 x 10	1.9557	241.95	116.41	48.10	2.00	150.00	135.05
15 x 15	1.7319	363.00	206.03	55.76	3.00	95.00	57.02
20 x 20	1.6179	484.01	319.74	66.06	4.00	67.50	30.39
25 x 25	1.5627	605.71	466.59	77.12	4.75	56.58	21.45
30 x 30	1.5249	726.01	640.54	88.23	5.75	46.09	14.43

A Tabela 5.1 mostra os resultados de maiores potências extraídas pela turbina Wells para cada caso estudado. Avaliando os resultados, pode-se inferir que:

- Quanto maior a dimensão da CAO, menor é o valor de CAF ;
- Quanto maiores a dimensão da CAO, maior é a potência extraída pela turbina;
- Quanto maior a dimensão da CAO, maior é o diâmetro e menor é a velocidade de rotação da turbina para alcançar o máximo de potência extraída;
- Quanto maior a dimensão da CAO, menores são os valores de k_t para alcançar o máximo de potência extraída;
- A eficiência do dispositivo aumenta conforme as dimensões do mesmo aumentam, mas alcança eficiências muito altas, o que é um comportamento não esperado.

A mesma proposta é aplicada a uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m de altura. A Tabela 5.2 demonstra os resultados obtidos.

Já para a Tabela 5.2, analisando o caso 30x30 m, vê-se que ocorre um mal funcionamento na simulação numérica do caso de 30x30 m. Um possível motivo é de que as dimensões da câmara são muito grandes comparadas ao comprimento de onda ($L = 66.40$ m). Levando isto em conta, considera-se o dispositivo de 30 x 30 m não relevante para a onda de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m e por isso, terá uma potência extraída nula.

Tabela 5.2. Resultados de maior eficiência encontrados pelo modelo *TDO original* a partir de $k_t = 100 \text{ Pa.s/m}^3$ para uma onda incidente de $T = 7 \text{ s}$ e $H = 1.5 \text{ m}$

Caso (m x m)	CAF	P_t (kW)	P_w (kW)	ε (%)	D (m)	N (rad/s)	k_t (Pa.s/m ³)
5 x 5	2.1400	84.70	49.44	58.37	1.25	240.00	345.72
10 x 10	1.5593	169.40	106.15	62.66	2.25	121.67	97.37
15 x 15	1.3219	254.10	172.02	67.70	3.25	76.15	42.19
20 x 20	1.2048	338.80	254.25	75.04	4.25	55.29	23.43
25 x 25	1.0961	423.51	329.61	77.83	5.25	43.57	14.94
30 x 30	0.1006	508.21	0.18	0.04	2.00	75.00	67.52

Analisando o caso 30x30 m, vê-se que ocorre um mal funcionamento no escoamento do caso de 30x30 m, representando um mal funcionamento do dispositivo. Um possível motivo é de que as dimensões da câmara são muito grandes comparadas ao comprimento de onda ($L = 66.40 \text{ m}$). Levando isto em conta, considera-se o dispositivo de 30 x 30 m não relevante para a onda de $T = 7 \text{ s}$ e $H = 1.5 \text{ m}$ e por isso, terá uma potência extraída nula.

O último item listado como conclusão da Tab. 5.1 mostra que a eficiência do dispositivo não diminui conforme as dimensões do mesmo aumentam, fato que ocorre também com os resultados da Tab. 5.2, o que levanta o questionamento da confiabilidade do modelo *TDO original* para conversores CAO diferentes de 10 x 10 m. Sendo assim, faz-se necessária uma análise do comportamento do CAF em função de diferentes k_t , proposta apresentada pelo próximo tópico.

5.3. Análise de comportamento do fator de amplitude composta

Os resultados da seção 5.2. mostram um comportamento diferente do considerado por Lisboa et al. (2018), que diz que o CAF é aproximadamente constante para diferentes valores de k_t , visto que as potências extraídas pela turbina Wells estão resultando em eficiências muito altas. Para buscar entender o comportamento do fator CAF , são simulados novos pontos com diferentes grandezas de k_t no software FLUENT[®], visto que teoricamente estes resultados seriam constantes. Utilizam-se os pontos que compõem a curva de ajuste, além do ponto que resultados preliminares mostraram ser o mais eficiente, para cada dimensão do CAO. A Figura 5.6 ilustra o comportamento do CAF -FLUENT em função do k_t , encontrados nestas simulações:

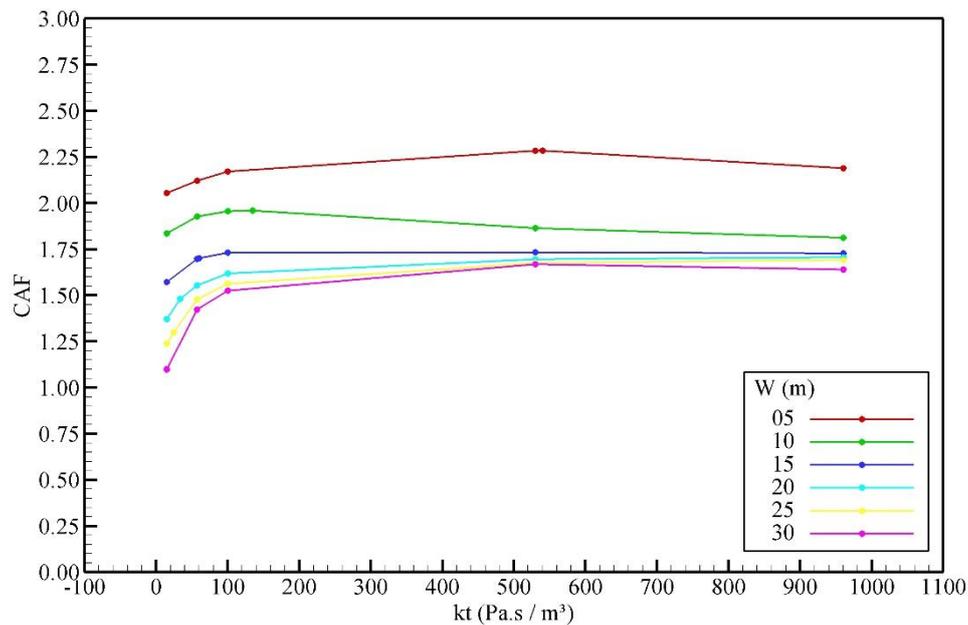


Figura 5.6 - Curvas de k_t x CAF para diferentes câmaras com uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m

Os resultados expressos pela Fig. 5.6 demonstram as curvas de CAF em relação ao k_t para diversas dimensões de câmaras. Analisando seu comportamento, infere-se que:

- O coeficiente CAF não é linear em toda a amplitude do k_t proposto para os diferentes tamanhos de câmara;
- Os valores de CAF para k_t maiores que 100 funcionam de forma mais constante que os valores menores que 100;
- Os valores de CAF para k_t menores tendem a decrescer de uma forma não-linear;
- Quanto maiores as dimensões da CAO, menor é o valor do coeficiente CAF .

Já a Figura 5.7 mostra o gráfico com a mesma proposta, porém para uma onda incidente com período de 7 s e altura de 1.5 m:

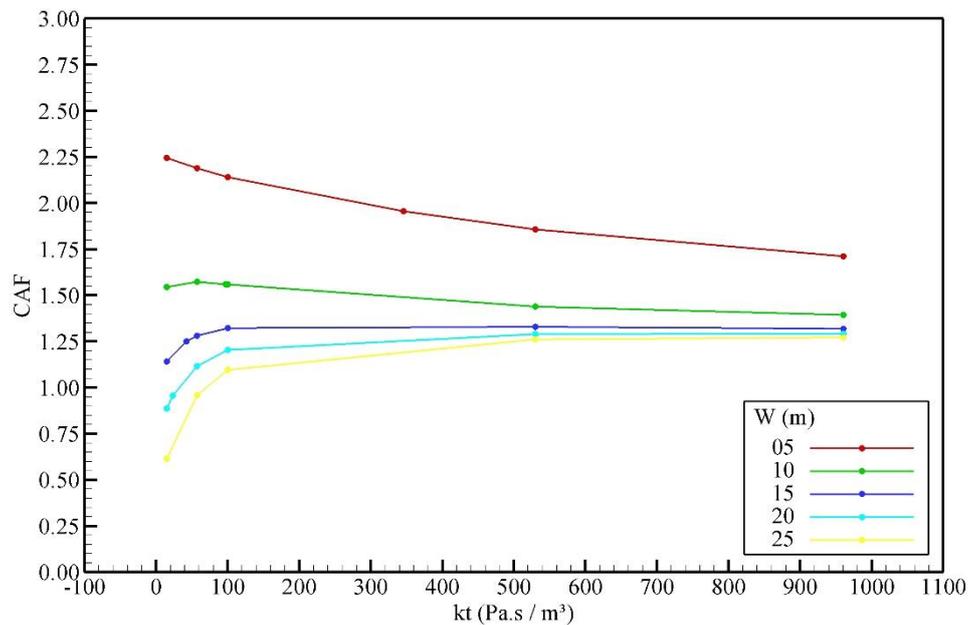


Figura 5.7 - Curvas de k_t x CAF para diferentes câmaras com uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m

Analisando a Fig. 5.7 pode-se dizer que:

- O coeficiente CAF permanece não linear na faixa de k_t estudado;
- Os valores de k_t mais altos funcionam de forma mais linear que os de valores mais baixos;
- Na maioria das câmaras, quanto menor for o valor de k_t , menor é o resultado de CAF ;
- As câmaras com maiores dimensões resultam em um menor resultado de CAF .

E comparando os gráficos das Figs. 5.6 e 5.7, infere-se que:

- Os resultados de CAF são menores conforme as dimensões da CAO aumentam;
- A parcela de k_t maior que 100 Pa.s/m^3 funciona de forma mais linear que a parcela menor que 100 Pa.s/m^3 ;
- A tendência de k_t menores que 100 Pa.s/m^3 é que aparentemente funcione de forma decrescente e exponencial, salvo alguns casos.

Comparando os resultados de forma estatística, têm-se as Tabs. 5.3 e 5.4, apresentando o CAF médio, desvio padrão e coeficiente de variação para as duas ondas incidentes.

Tabela 5.3. Fator de amplitude composta (CAF), CAF médio (CAF_m), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para diferentes relações características de turbina (k_t) e dimensões de dispositivo CAO para uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	k_t (Pa.s/m ³)					Otimizado (Kt utilizado)	CAF_m	DP	CV (%)
	14.94	57.47	100.00	530.17	960.33				
5 x 5	2.0553	2.1211	2.1712	2.2843	2.1894	2.2838 (540.19)	2.1842	0.0903	4.13
10 x 10	1.8361	1.9275	1.9557	1.8637	1.8126	1.9594 (135.05)	1.8925	0.0634	3.35
15 x 15	1.5713	1.6969	1.7319	1.7336	1.7287	1.7011 (60.02)	1.6939	0.0622	3.67
20 x 20	1.3702	1.5536	1.6179	1.6960	1.7059	1.4802 (33.75)	1.5706	0.1303	8.30
25 x 25	1.2374	1.4792	1.5627	1.6756	1.6920	1.2993 (24.61)	1.4910	0.1902	12.75
30 x 30	1.1000	1.4224	1.5249	1.6694	1.6403	1.0983 (15.01)	1.4092	0.2557	18.15

Tabela 5.4. Fator de amplitude composta (CAF), CAF médio (CAF_m), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para diferentes relações características de turbina (k_t) e dimensões de dispositivo CAO para uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	k_t (Pa.s/m ³)					Otimizado (Kt utilizado)	CAF_m	DP	CV (%)
	14.94	57.47	100.00	530.17	960.33				
5 x 5	2.2440	2.1899	2.1400	1.8577	1.7117	1.9568 (345.72)	2.0167	0.2092	10.37
10 x 10	1.5457	1.5746	1.5593	1.4386	1.3941	1.5602 (97.37)	1.5121	0.0760	5.03
15 x 15	1.1410	1.2810	1.3219	1.3302	1.3192	1.2513 (42.19)	1.2741	0.0718	5.63
20 x 20	0.8662	0.9574	1.2048	1.2902	1.2921	0.9574 (23.43)	1.0980	0.1846	16.81
25 x 25	0.6133	0.9581	1.0961	1.2613	1.2729	0.6133 (14.94)	1.0403	0.2716	26.11

A Tabela 5.3 aponta o maior coeficiente de variação no caso 30x30 m (18.15%). Já a Tabela 5.4 tem como maior variação o caso 25 x 25 m (26.11%). Estes resultados implicam que em ambas as ocasiões, o maior desvio é apontado em conversores CAO mais robustos. Comparando os dispositivos de 5 x 5 m de cada tabela, vê-se que o caso de $T = 7$ s obtém uma variação consideravelmente maior e que quando comparada à onda de $T = 10$ s, todas os coeficientes de variação são diferentes para cada caso, o que se leva a crer que o período e altura da onda são parâmetros determinantes para o resultado do fator CAF .

Analisando as Figs. 5.6 e 5.7 junto dos dados coletados pelas Tabs. 5.3 e 5.4, vê-se que os k_t mais baixos são mais variáveis. Ainda avaliando-os, vê-se que o ponto de $k_t = 100$ Pa.s/m³ aparenta funcionar como um divisor entre os comportamentos lineares e não lineares para a maioria dos dispositivos. Sendo assim, torna-se importante separar estas duas faixas de k_t com a mesma metodologia de estudo de variação, onde os resultados são apresentados pelas Tabs. 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5. Fator de amplitude composta (CAF), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para relações características de turbina (k_t) maiores e menores que 100 Pa.s/m³ com uma onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	$k_t < 100$ Pa.s/m ³			$k_t > 100$ Pa.s/m ³		
	CAF_m	DP	CV (%)	CAF_m	DP	CV (%)
5 x 5	2.1159	0.0581	2.75	2.2322	0.0604	2.70
10 x 10	1.9064	0.0625	3.28	1.8979	0.0720	3.80
15 x 15	1.6753	0.0711	4.24	1.7314	0.0025	0.14
20 x 20	1.5055	0.1063	7.06	1.6733	0.0482	2.88
25 x 25	1.3947	0.1519	10.89	1.6434	0.0704	4.28
30 x 30	1.2864	0.2202	17.12	1.6115	0.0764	4.74

Tabela 5.6. Fator de amplitude composta (CAF), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para relações características de turbina (k_t) maiores e menores que 100 Pa.s/m^3 com uma onda incidente de $T = 7 \text{ s}$ e $H = 1.5 \text{ m}$

Caso (m x m)	$k_t < 100 \text{ Pa.s/m}^3$			$k_t > 100 \text{ Pa.s/m}^3$		
	CAF_m	DP	CV (%)	CAF_m	DP	CV (%)
5 x 5	2.1913	0.0520	2.37	1.9166	0.1798	9.38
10 x 10	1.5600	0.0118	0.76	1.4640	0.0855	5.84
15 x 15	1.2488	0.0775	6.20	1.3138	0.0057	0.43
20 x 20	1.0015	0.1397	13.95	1.2624	0.0499	3.95
25 x 25	0.8892	0.2487	27.97	1.2101	0.0989	8.17

Com base nos dados apresentados nas Tabs. 5.5 e 5.6, infere-se que a variação do CAF é mais alta em k_t menores que 100 Pa.s/m^3 , salvo poucos casos específicos. Avaliando os resultados apresentados nesta seção, conclui-se que a teoria de que o CAF atua de forma quase constante é correta para uma câmara CAO de $10 \times 10 \text{ m}$, já que em uma onda de $T = 10 \text{ s}$ e $H = 1.5 \text{ m}$ o coeficiente de variação do caso é 3.35% e com incidência de $T = 7 \text{ s}$ e $H = 1.5 \text{ m}$ o resultado é 5.03% , o que comprova a teoria de Torres et al. (2018).

Porém em outras dimensões os valores de CAF tornam-se inconstantes, fazendo com que se assumam que a teoria de que este seja constante não deva ser aceita para dispositivos diferentes de $10 \times 10 \text{ m}$. Com isso, cria-se a necessidade de equacionar o comportamento da curva de CAF para outras grandezas da CAO, a fim de aplicar a metodologia do presente trabalho com uma melhor acurácia.

5.4. Curvas de ajuste do CAF

Com o intuito de verificar a nova metodologia empregada no algoritmo, apresentada na seção 4.3., deve-se avaliar os CAF 's encontrados pela curva de ajuste ($CAF-TDO$) com os simulados pelo software FLUENT® ($CAF-FLUENT$). Serão analisadas as ondas de período 7 s e 10 s , ambas com 1.5 m de altura. As curvas de ajuste foram obtidas usando 4 pontos, como mostra a metodologia. Porém, como forma de verificação, são comparados de 6 a 9 pontos distintos. A Figura 5.8 mostra as curvas de ajuste e os pontos de $CAF-FLUENT$ para ambas as ondas.

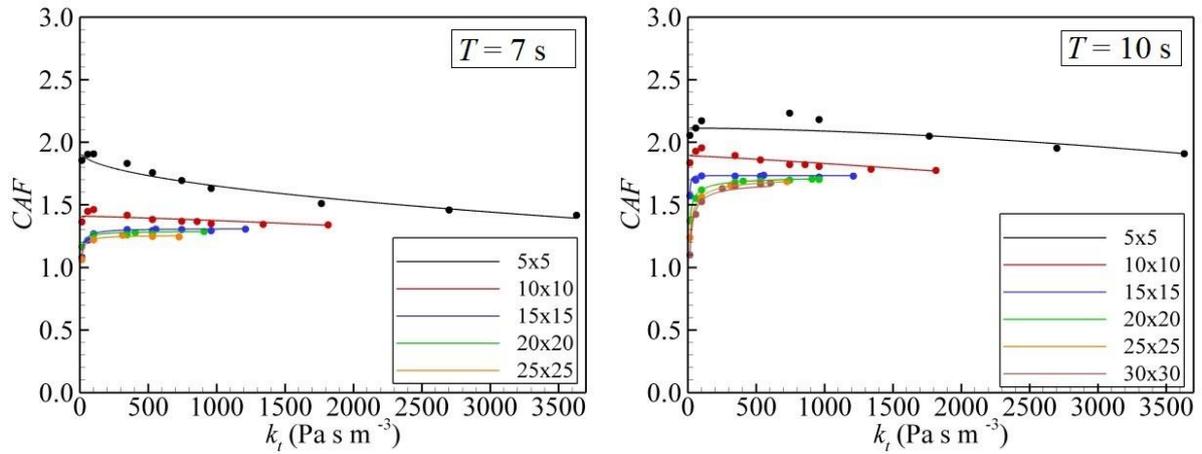
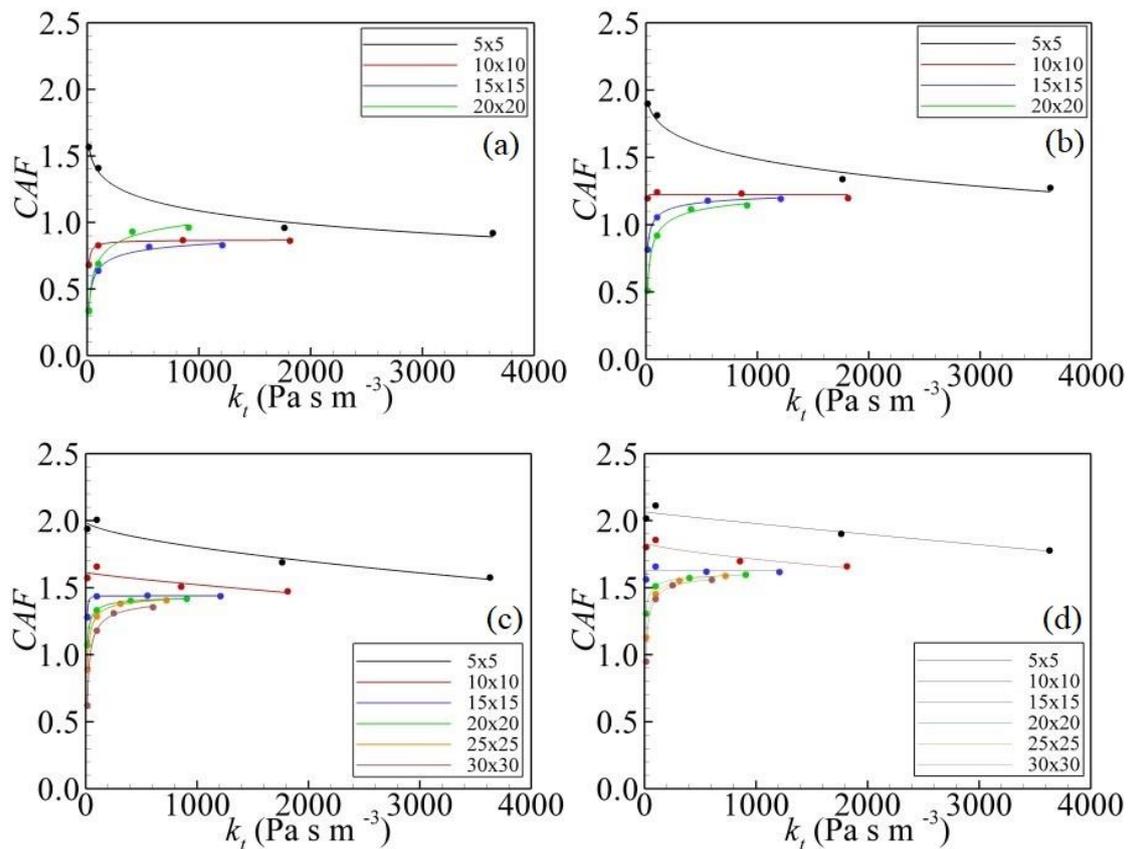


Figura 5.8 - Resultados de $CAF \times k_t$ nas ondas incidentes de $T = 7$ s e $T = 10$ s, ambas com $H = 1.5$ m

Já a Figura 5.9 mostra os mesmos resultados, mas para as ondas mais energéticas de cada período, segundo a Tab. 4.2.



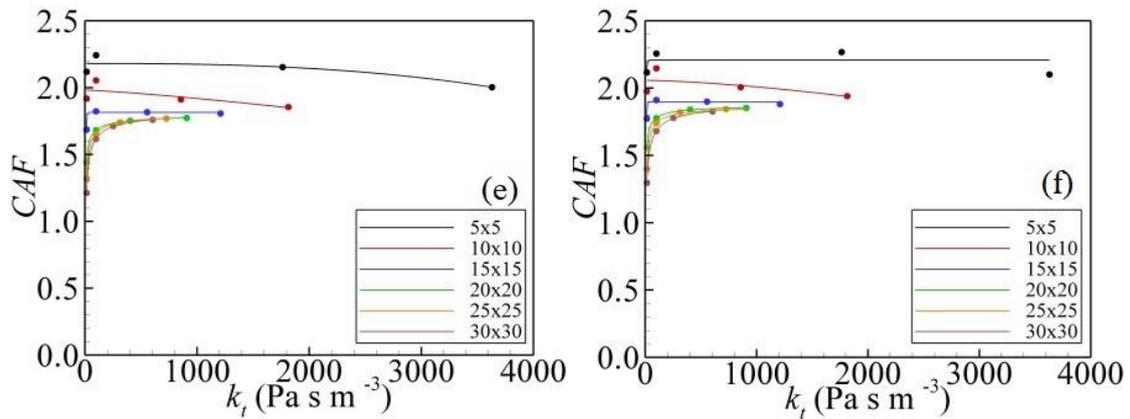


Figura 5.9 - Resultados de $CAF \times k_t$ para as ondas de (a) 5 s e 1.0 m, (b) 6 s e 1.0 m, (c) 8 s e 1.5 m, (d) 9 s e 1.0 m, (e) 11 s e 1.5 m e (f) 12 s e 2.0 m

A Figura 5.9 mostra as diferentes curvas de ajuste para as ondas mais energéticas do estado de mar estudado. Analisando as diferenças entre os resultados de $CAF-FLUENT$ e $CAF-TDO$, nota-se que as divergências entre ambos são baixas na maior parte dos casos. Vê-se também que os comportamentos das curvas são similares, mesmo que sejam em períodos e alturas de onda diferentes. Como complemento às Figs. 5.8 e 5.9, pode-se também analisar as diferenças entre os resultados de CAF simulados pelo modelo FLUENT® ($CAF-FLUENT$) e os encontrados pela curva de ajuste ($CAF-TDO$).

Para a avaliação da eficácia do modelo, utiliza-se o coeficiente de variação (CV) do erro médio quadrático ($RMSE$), dado por (Chapra e Canale, 2010):

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i^n (CAF_{F,i} - CAF_{C,i})^2}{n}}}{CAF} \quad (5.1)$$

onde $CAF_{(F,i)}$ e $CAF_{(C,i)}$ são os resultados obtidos segundo o software FLUENT® e a curva de ajuste, respectivamente, e n é o número de pontos abordados. A Figura 5.8 mostra os resultados de $CAF-TDO$ em forma de curvas e $CAF-FLUENT$ em pontos. No caso de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m, os resultados mínimos e máximos de CV foram 0.92% (15x15) e 2.38% (5x5), respectivamente. Já na onda de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, os resultados mínimos e máximos de CV foram 0.45% (20x20) e 3.97% (5x5), respectivamente. Estes valores mostram uma boa concordância entre os resultados obtidos segundo o software FLUENT® e a metodologia de curva de ajuste. A Tabela 5.7 mostra os resultados de CV para as ondas mais energéticas do estudo.

Tabela 5.7. Resultados de CV para as ondas mais energéticas do estado de mar da costa Sul do Brasil

Caso (m x m)	T (s), H (m)							
	5, 1.0	6, 1.0	7, 1.5	8, 1.5	9, 1.0	10, 1.5	11, 1.5	12, 2.0
5 x 5	2.51	2.31	2.38	2.19	1.95	3.97	2.05	3.01
10 x 10	0.33	1.36	2.36	2.39	1.72	2.03	2.59	3.06
15 x 15	1.96	0.60	0.92	0.09	1.03	0.73	0.33	0.58
20 x 20	2.98	1.37	1.16	0.12	0.10	0.45	0.02	0.41
25 x 25	-	-	1.83	0.30	0.20	0.52	0.13	0.09
30 x 30	-	-	-	0.66	0.81	1.55	0.15	0.17

Os resultados da Tab. 5.7 apontam que o maior coeficiente de variação se encontra na onda de 10 s e 1.5 m com a câmara de 5x5 m (3.97%), enquanto o menor está na onda de 11 s e 1.5 m com a câmara de 20x20 (0.02%). Analisando os resultados em conjunto, infere-se que todos estão abaixo de 5%, o que expressa pequenos valores de variações, mostrando que a metodologia é satisfatória, uma vez que as ferramentas adotadas são aplicadas com o intuito de dar suporte a projetos preliminares de escolha das configurações mais adequadas para o dispositivo CAO.

5.5. Aplicação do modelo *TDO generalizado* às ondas de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m e $T = 7$ s e $H = 1.5$ m

A fim de verificar o modelo *TDO generalizado* e exemplificar seu processo, após elaborar as curvas de ajuste, o algoritmo calcula para cada diâmetro e rotação de turbina a potência que a turbina pode gerar. Este tópico mostrará tais resultados para duas ondas distintas: $T = 10$ s e $H = 1.5$ m e $T = 7$ s e $H = 1.5$ m, como nos itens anteriores. Para ambos os casos, os diâmetros utilizados variam de 0.5 m até 5 m, com espaçamento de 0.25 m entre cada. A Figura 5.10 mostra diferentes curvas de potência em função da velocidade de rotação da turbina, para diversos diâmetros e dimensões de câmaras estudadas, onde a onda incidente possui $T = 10$ s e $H = 1.5$ m.

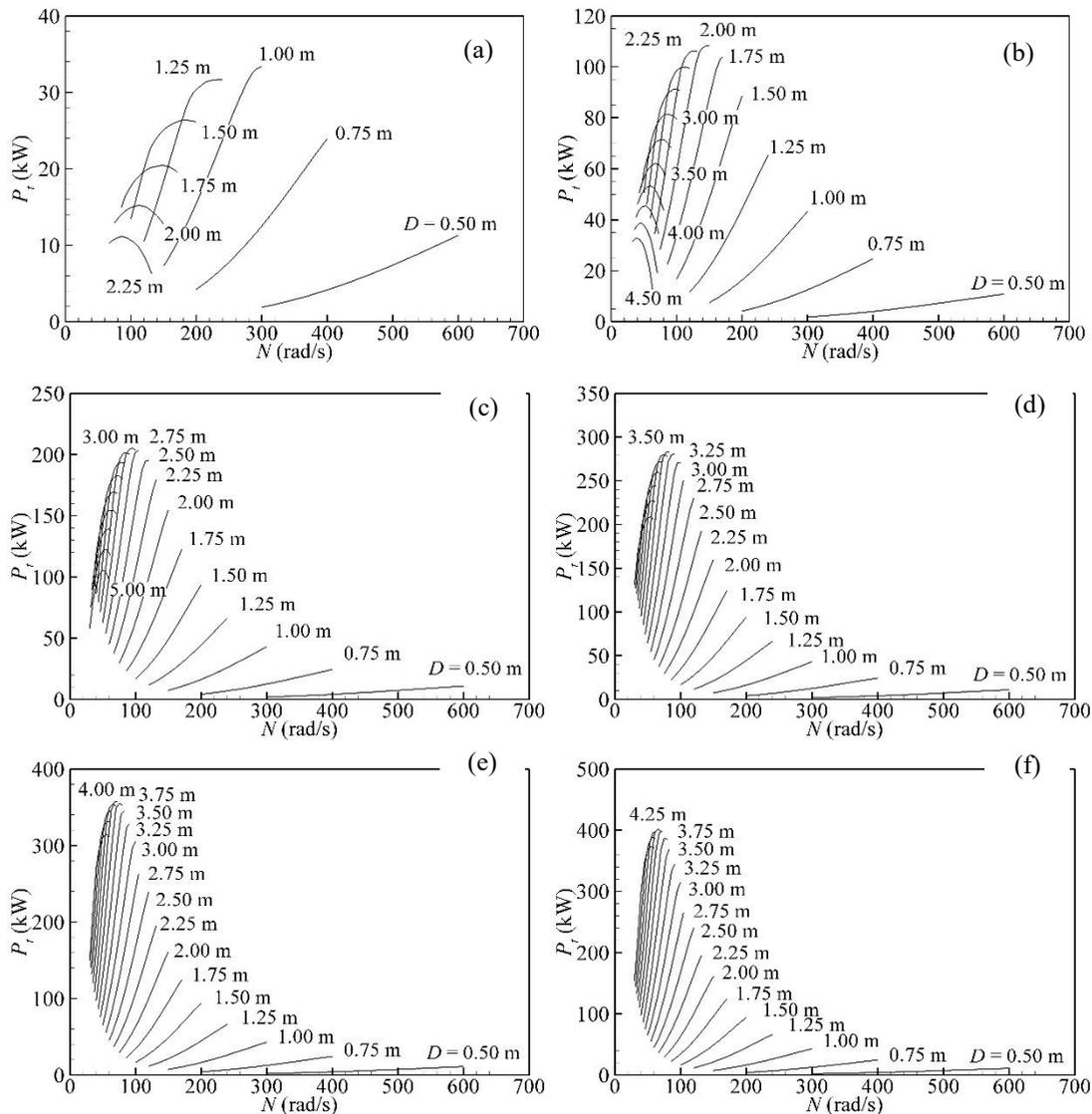


Figura 5.10 - Curvas de potência média P_t versus velocidade de rotação N para uma onda incidente com $T = 10$ s e $H = 1.5$ m para diferentes diâmetros de turbina D e dimensões de câmara (bxW): (a) 5x5 m, (b) 10x10 m, (c) 15x15 m, (d) 20x20 m, (e) 25x25 m, (f) 30x30 m

Analisando os comportamentos das câmaras, nota-se que quanto maior forem as dimensões do dispositivo CAO, maior deve ser a turbina Wells para que se atinja a máxima eficiência, conforme Eq. (3.29). Isto se deve ao fato de que câmaras maiores envolvem vazões maiores. Nota-se que conforme os diâmetros aumentam, a velocidade de rotação tende a diminuir, pois diâmetros maiores possuem k_t menores, alterando a rotação. Vê-se também que os maiores diâmetros de turbina operam em menores velocidades de rotação, por conta da imposição de velocidade tangencial mínima e máxima. Já a Figura 5.11 mostra as curvas de potência para uma onda de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m.

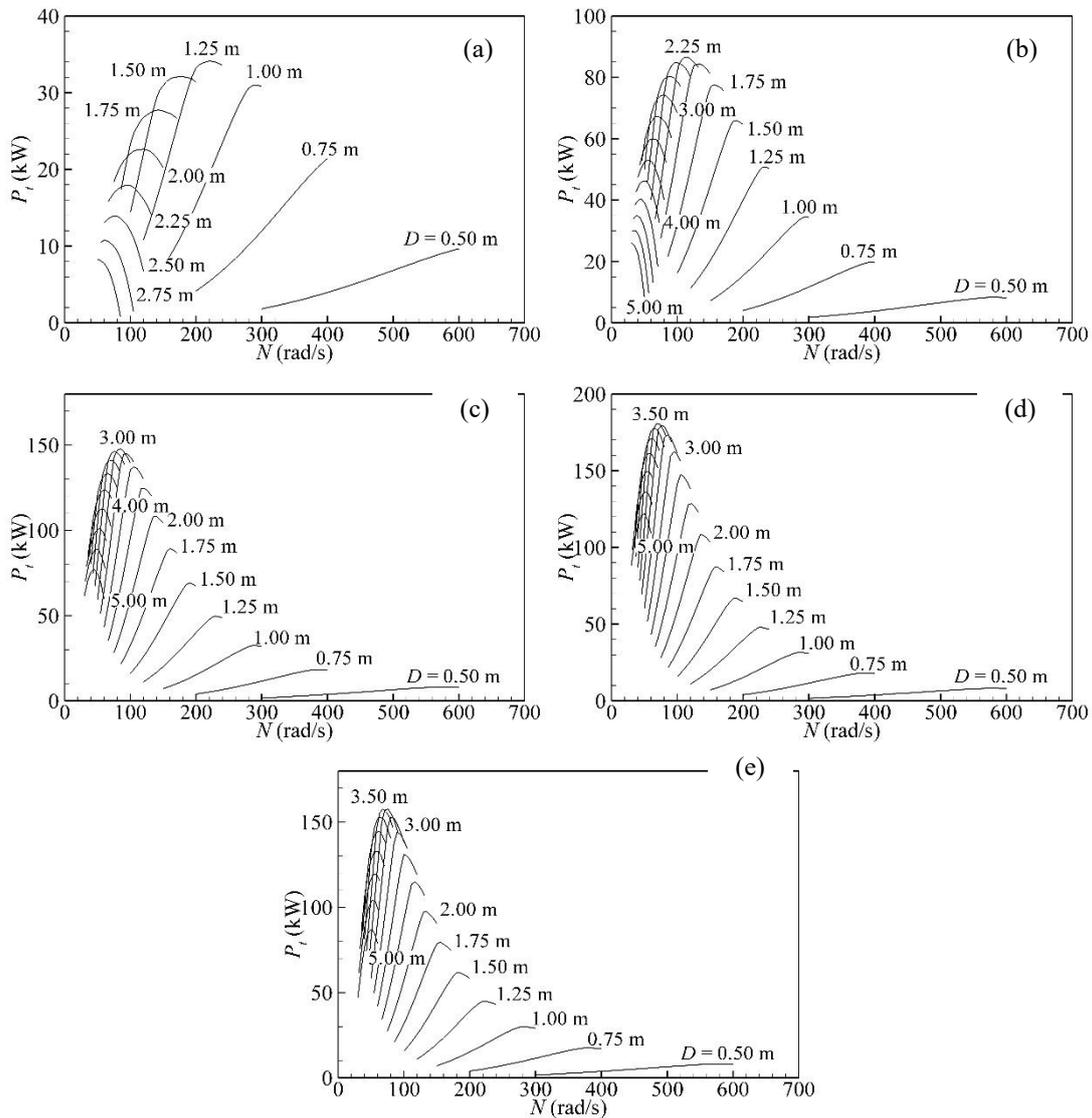


Figura 5.11 - Curvas de potência média P_t versus velocidade de rotação N para uma onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m para diferentes diâmetros de turbina D e dimensões de câmara (bxW) . (a) 5×5 m, (b) 10×10 m, (c) 15×15 m, (d) 20×20 m, (e) 25×25 m

Para a onda de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m, as curvas de potência apontam a mesma tendência de que o maior dispositivo se adapte melhor às menores k_t e maiores diâmetros de turbinas. Mesmo que os resultados otimizados destes casos sejam diferentes, o comportamento das curvas de potência mantém-se o mesmo, comprovando as tendências que foram explicadas anteriormente, como a de que turbinas maiores funcionem melhor em câmaras maiores. As Tabelas 5.8 e 5.9 mostram os resultados de eficiência para todos os casos analisados.

Tabela 5.8. Resultados de eficiência para cada dimensão do dispositivo CAO e diâmetro de turbina Wells, para uma onda de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	Resultados de eficiência para cada diâmetro (ϵ)																		
	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00
5 x 5	9.33	19.82	27.56	26.19	21.80	16.88	12.57	9.20	6.69	4.88	3.43	2.10	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 x 10	4.50	10.22	17.90	27.07	36.62	43.00	44.79	43.90	41.27	37.75	33.66	29.50	25.68	22.04	18.84	16.04	13.60	11.49	9.83
15 x 15	3.02	6.74	11.84	18.23	25.76	33.87	42.72	49.56	53.77	56.02	56.57	55.46	53.31	50.32	46.73	42.59	38.43	33.76	29.10
20 x 20	2.26	5.05	8.87	13.68	19.40	25.74	33.10	39.82	47.60	51.80	55.89	57.94	58.56	57.90	56.12	53.70	50.47	46.97	43.17
25 x 25	1.81	4.03	7.09	10.93	15.52	20.63	26.64	32.30	39.59	43.45	50.51	54.28	57.06	58.69	59.04	58.62	56.98	54.77	52.14
30 x 30	1.51	3.37	5.92	9.12	12.93	17.19	22.20	26.96	33.13	36.52	43.48	47.55	50.89	53.34	54.81	55.42	54.77	53.45	51.45

Tabela 5.9. Resultados de eficiência para cada dimensão do dispositivo CAO e diâmetro de turbina Wells, para uma onda de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	Resultados de eficiência para cada diâmetro (ϵ)																		
	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00
5 x 5	10.75	23.85	34.47	37.95	35.70	30.86	25.19	19.96	15.51	11.95	9.22	6.90	4.91	2.97	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00
10 x 10	4.67	11.00	19.23	28.25	36.68	43.16	46.92	48.17	47.14	44.65	41.34	37.10	33.34	29.47	25.77	22.49	19.48	16.75	14.53
15 x 15	3.07	6.88	12.06	18.45	25.66	33.14	40.13	46.27	50.90	53.74	54.86	54.25	52.27	49.51	45.78	41.72	37.55	33.04	28.67
20 x 20	2.29	5.06	8.79	13.36	18.59	24.27	30.15	35.75	41.07	45.18	48.21	49.98	50.26	49.47	47.57	44.81	41.62	37.92	33.94
25 x 25	1.81	3.93	6.71	10.02	13.72	17.69	21.69	25.60	29.18	32.06	34.03	35.06	35.11	34.00	32.19	29.57	26.59	23.21	19.41

Segundo os resultados das Tabs. 5.8 e 5.9, as maiores eficiências encontradas foram de 59.04% e 54.86%, para os diâmetros de 4.00 m e 3.00 m, respectivamente. Os resultados obtidos mostram que em uma certa potência, o dispositivo alcança sua eficiência máxima e conforme os diâmetros de turbina aumentem após este ponto, a potência extraída diminui. Comparam-se também as dimensões de câmaras em que os maiores resultados foram obtidos, onde na onda de $T = 10$ s foi de 25x25 m e na onda de $T = 7$ s foi de 15x15 m, mostrando que ondas mais energéticas se adaptam a dispositivos mais robustos. Em ambos os casos estudados, foram vistos resultados nulos na câmara de 5x5 m quando se utilizaram turbinas muito grandes. A Tabela 5.10 mostra os resultados de maior eficiência e as características de cada caso para a onda de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m.

Tabela 5.10. Resultados de maior eficiência e características do caso encontrados pelo modelo *TDO generalizado* para a onda incidente de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	P_w (kW)	P_t (kW)	ε (%)	D (m)	N (rad/s)	k_t (Pa.s/m ³)	V_t (m/s)
5 x 5	121.00	33.35	27.56	1.00	300.00	540.19	150.00
10 x 10	242.00	108.39	44.79	2.00	150.00	135.05	150.00
15 x 15	363.00	205.36	56.57	3.00	95.00	57.02	142.50
20 x 20	484.01	283.43	58.56	3.50	82.86	42.63	145.01
25 x 25	605.01	357.22	59.04	4.00	72.50	32.64	145.00
30 x 30	726.01	402.39	55.42	4.25	65.29	27.66	138.74

De acordo com os resultados obtidos e apontados na Tab. 5.10, para uma onda de $T = 10$ s e $H = 1.5$ m, a câmara mais eficiente é de 25x25 m com um k_t de 32.64 Pa.s/m³ (59.04%). O comportamento que se apresenta é de que quanto maior é a câmara, maior é o diâmetro da turbina para que alcance sua máxima eficiência, o que também faz com que o k_t seja menor, assim como mostra a Tab. 5.8. Nota-se também que as melhores eficiências foram próximas do limite superior da velocidade tangencial V_t , de 150 m/s. A Tabela 5.11 mostra os mesmos resultados, mas para a onda de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m.

Tabela 5.11. Resultados de maior eficiência e características do caso encontrados pelo modelo *TDO generalizado* para a onda incidente de $T = 7$ s e $H = 1.5$ m

Caso (m x m)	P_w (kW)	P_t (kW)	ε (%)	D (m)	N (rad/s)	k_t (Pa.s/m ³)	V_t (m/s)
5 x 5	89.88	34.11	37.95	1.25	220.00	316.91	137.50
10 x 10	179.77	86.59	48.17	2.25	111.67	89.36	125.63
15 x 15	269.65	147.94	54.86	3.00	85.00	51.02	127.50
20 x 20	359.53	180.70	50.26	3.50	67.86	34.91	118.76
25 x 25	449.42	157.77	35.11	3.50	67.86	34.91	118.76

De acordo com os resultados mostrados na Tab. 5.11, a câmara com maior eficiência tem 15x15 m, com um k_t de 51.02 Pa.s/m³ (54.86%). Assim como na onda de 10 s, a tendência é de quanto maior for a câmara, maior deve ser o diâmetro da turbina e menor o k_t para que o dispositivo extraia a maior potência. Quando comparados os resultados de máximas eficiências das duas ondas abordadas, pode-se notar que a onda de maior período atinge maiores eficiências em câmaras maiores, assim como a onda de menor período tem melhores resultados em câmaras menores. Uma hipótese aceitável para tal comportamento é que as ondas com menores períodos também têm menores comprimentos e que, desta forma, estas ondas não funcionarão bem em câmaras grandes devido ao comprimento da onda em relação ao comprimento das câmaras.

Como segundo critério para a verificação da metodologia implementada, é feita uma comparação entre as potências obtidas pelo software FLUENT® e pelo modelo *TDO generalizado*. A Figura 5.12 mostra este estudo para as ondas de 10 s e 7 s, ambas com 1.5 m de altura, câmaras de 15x15 m e diâmetro de turbina Wells de 3.00 m.

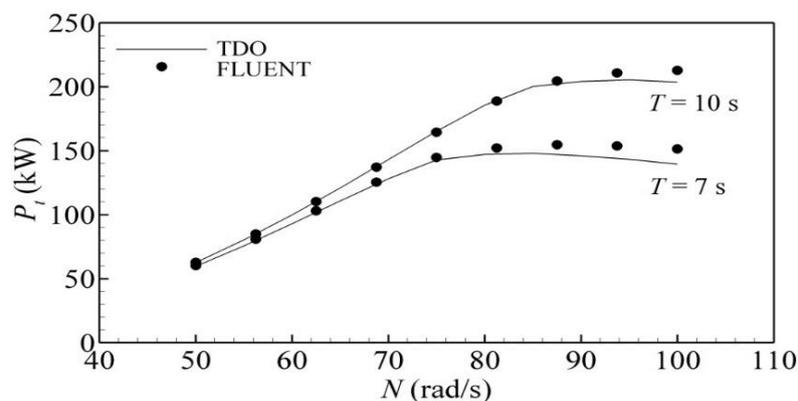


Figura 5.12 - Curvas de potência do modelo *TDO generalizado* e FLUENT® para (a) $T = 7$ s, $H = 1.5$ m, $bxW = 15 \times 15$ m, $D = 3.00$ m e (b) $T = 10$ s, $H = 1.5$ m, $bxW = 15 \times 15$ m, $D = 3.00$ m

Os resultados das comparações feitas entre os resultados de potência obtidos pelo modelo *TDO generalizado* entram em concordância com os obtidos pelo software FLUENT[®]. No caso de $T = 7$ s, a potência máxima extraída pelo FLUENT[®] e pelo *TDO generalizado* são de 154.6 kW e 147.9 kW, respectivamente, que corresponde a uma diferença de 4.3 %. Já no caso de $T = 10$ s, os valores máximos são de 212.8 kW e 205.3 kW, com uma diferença de 3.7%.

5.6. Análise da máxima eficiência do dispositivo CAO para diferentes tamanhos de câmaras e turbinas na costa sul do Rio Grande do Sul

O objetivo principal deste trabalho é encontrar as melhores características de dispositivos CAO com turbina Wells quando acoplados em um quebra-mar, para a região Sul do Brasil. A adaptação do modelo *TDO* (Torres, Teixeira e Didier, 2018) mostrada em capítulos anteriores faz com que seja possível explorar não só diferentes velocidades de rotação e diâmetros de turbina, mas também diferentes dimensões do dispositivo.

Para que isso aconteça, todo o processo descrito anteriormente deve ser repetido para diferentes ondas incidentes: simulam-se quatro diferentes k_t para cada câmara com o FLUENT[®], aplica-se o modelo *TDO generalizado* com o ajuste de curva, são extraídos os resultados de maior eficiência para cada dispositivo e aplicam-se às ocorrências de onda do estado de mar. O Apêndice A mostra alguns resultados próximos ao diâmetro otimizado de cada dimensão do dispositivo e para cada onda incidente. A Figura 5.13 mostra as curvas de eficiência em função do diâmetro da turbina Wells para cada dimensão de câmara, baseadas nos resultados finais do estudo. Conforme o tamanho do dispositivo aumenta, o diâmetro de turbina que fornece uma melhor eficiência também tende a crescer. As câmaras com 15x15 m ($D = 3.00$ m) e 20x20 m ($D = 3.25$ m) alcançaram eficiências anuais similares (50.70% e 48.90% respectivamente) e são consideradas as soluções ótimas para a zona de estudo. Entretanto, a câmara de 10x10 m ($D = 2.00$ m) mostra uma boa eficiência (45.94%) e utiliza uma turbina menor. Por conta destas características, esta opção deve ser considerada também.

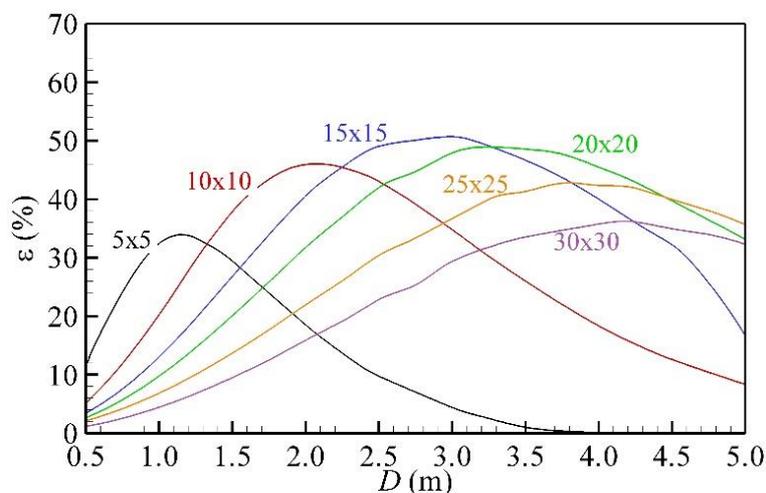


Figura 5.13 - Eficiência anual versus diâmetro da turbina para cada dimensão de câmara

As curvas de eficiências anuais mostram que a câmara de 5x5 m tem baixos resultados, mas em contrapartida, o diâmetro da turbina que alcança a melhor eficiência é muito menor que para outras câmaras. Mesmo que este dispositivo tenha menores eficiências, o seu custo será menor quando comparado aos outros dispositivos, pois tanto suas dimensões quanto o diâmetro da turbina são menores.

Como complemento à Fig. 5.13, pode-se também abordar a eficiência anual do dispositivo em função do período e altura da onda incidente. A Figura 5.14 mostra tais gráficos para cada dimensão de câmara.

A melhor eficiência encontrada nas câmaras de 10x10 m, 15x15 m e 20x20 m podem ser explicadas se as distribuições das eficiências médias anuais em função do período T e da altura de onda H , mostradas na Fig. 5.14, são comparadas com a distribuição de energia do estado de mar da costa Sul do Brasil (Fig. 4.1). A maior potência de onda média da região ganha destaque nos seguintes estados de mar: $(T, H) = (5-6, 1.0)$, $(8-9, 1.0)$ e $(10-11, 1.5)$. As câmaras de 10x10 m, 15x15 m e 20x20 m têm bons resultados de eficiência nestas condições. De outra forma, as câmaras de 5x5 m, 25x25 m e 30x30 m possuem boas eficiências apenas em casos que apresentam baixas ou até nulas eficiências em outras dimensões. O dispositivo de 30x30 m, por exemplo, possui ótimas eficiências em ondas de 10 s e 11 s com altura de 1.5 m, mas em outros casos sua eficiência é nula.

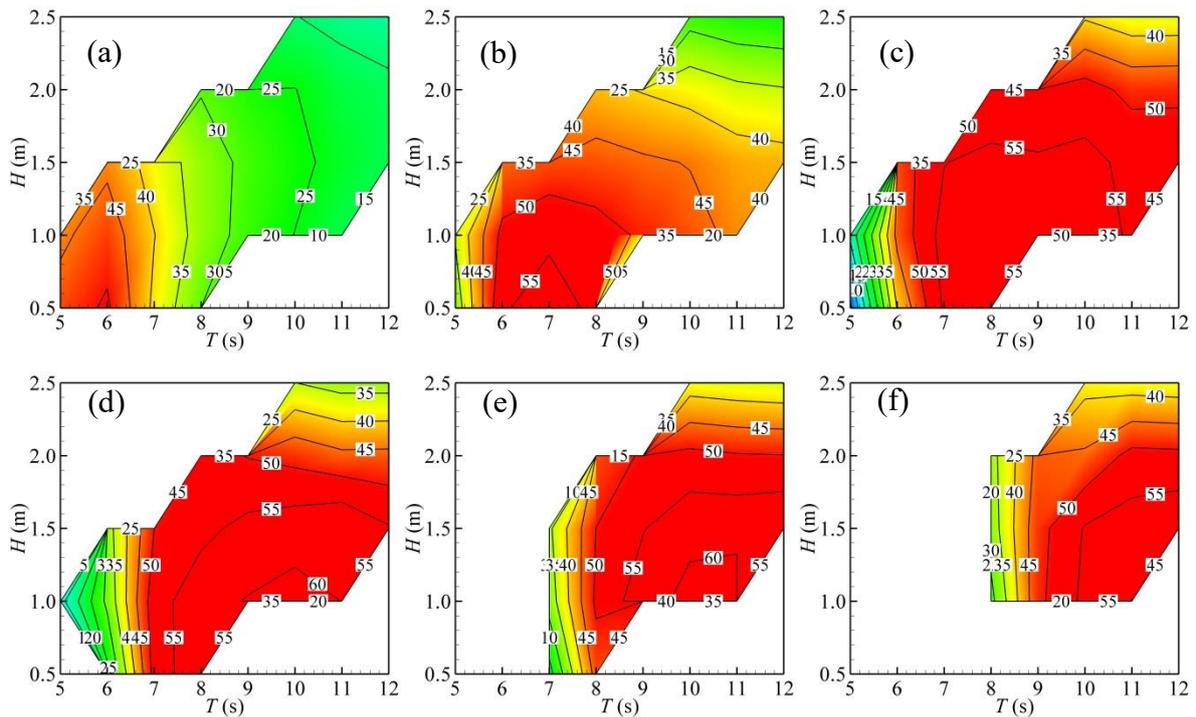


Figura 5.14 - Eficiências anuais em função do período T e altura de onda H para cada dimensão do dispositivo CAO equipado com a turbina Wells otimizada. (a) 5x5, (b) 10x10, (c) 15x15, (d) 20x20, (e) 25x25 e (f) 30x30 m

Apesar de que uma avaliação de custo esteja fora dos objetivos deste trabalho, esta é uma importante característica para a escolha do dispositivo a ser usado. Os custos de construção são mais altos para câmaras mais largas e dominam o custo de um dispositivo CAO (Falcão, 2004), mesmo que elas sejam amenizadas com o compartilhamento de algumas paredes quando construídos em um quebra-mar. Os custos de construção e instalação da parte mecânica e elétrica dependem diretamente do tamanho da turbina e da potência estimada do dispositivo (Falcão, 2004). Entretanto, é importante considerar que, apesar de turbinas maiores terem maiores custos, elas necessitam de um menor número de unidades para um mesmo comprimento de quebra-mar.

6. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi o de encontrar as melhores características de dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante, caso fossem instalados em um quebra-mar hipotético na costa Sul do Brasil. Para isso, foram realizadas simulações numéricas de vários casos com combinações de características das ondas da região (T, H), diâmetro e rotação da turbina Wells (D, N) e dimensões da câmara do dispositivo ($b \times W$).

Foi desenvolvido o modelo *TDO generalizado*, capaz de determinar a potência extraída para diferentes diâmetros e velocidades de rotação a partir de 4 simulações numéricas realizadas com o software FLUENT®, que mostrou ser uma ferramenta auxiliar muito útil para o objetivo do trabalho. Seu tempo computacional é bastante inferior quando comparado a simulações numéricas, o que é vantajoso para finalizar o estudo em tempo hábil.

Aplicando a metodologia para diferentes ondas incidentes e dimensões de câmaras, notou-se que câmaras muito grandes geram potências quase nulas em ondas com pouco comprimento. Encontrou-se a maior eficiência no dispositivo de 15x15 m com diâmetro de 3.00 m, obtendo uma eficiência média anual de 50.69%. Outros resultados chegaram próximos ao máximo, como é o caso do dispositivo de 20x20 m com diâmetro de 3.25 m (48.91%) e 10x10 m com diâmetro de 2.00 m (45.94%). Explorar variados parâmetros de tamanho de câmaras e características de turbina é importante para a discussão de qual dispositivo é mais adequado, por conta dos custos de construção e manutenção. Isto também destaca a importância de elaborar estudos de gastos.

Visto que o trabalho de Lisboa et al. (2018) fez uma análise numérica do mesmo estado de mar, mas com uma câmara de 10x10 m, é importante destacar o presente estudo traz uma contribuição relevante por encontrar um dispositivo diferente deste. Encontrar uma câmara com maior eficiência quando comparada à 10x10 m, mostrou que o objetivo geral do trabalho foi satisfatoriamente atendido (descobrir como as dimensões da câmara influenciam na eficiência do conjunto).

Portanto, analisando o desenvolvimento do trabalho e seus resultados, conclui-se que o mesmo atingiu seus objetivos e que se construiu uma ferramenta importante para determinar as características ótimas de dispositivos de conversão de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante inseridos em um quebra-mar.

Como propostas de continuidade, trabalhos futuros podem abordar o custo benefício dos dispositivos, levando em consideração o custo das dimensões da câmara e turbina, tendo então uma resposta de qual dispositivo é melhor. Pode-se também analisar se o comprimento ou a largura do

dispositivo tem mais influência na eficiência do dispositivo, deixando de manter a seção da câmara quadrada, e trabalhando com ela retangular.

7. REFERÊNCIAS

- ASHLIN, S. J.; SANNASIRAJ, S.; SUNDAR, S. Performance of an array of oscillating water column devices integrated with an offshore detached breakwater. **Ocean Engineering**, v. 163, p. 518-532, 2017.
- BOCCOTTI, P. et al. Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening-Part II: A small-scale field experiment. **Ocean Engineering**, v. 34, n. 5–6, p. 820–841, 2007.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical Methods for Engineers, Sixth Edition**. [s.l.: s.n.]. v. 1
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. [s.l.: s.n.].
- DIDIER, E.; TEIXEIRA, P. R. F.; NEVES, M. G. A 3D numerical wave tank for coastal engineering studies. **Defect and Diffusion Forum**, v. 372, p. 1–10, 2017.
- DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2360–2366, 2011.
- ELHANAFI, A. et al. Numerical energy balance analysis for an onshore oscillating water column–wave energy converter. **Energy**, v. 116, p. 539–557, 2016.
- FALCAO, A. F. D. O. Stochastic modelling in wave power-equipment optimization: Maximum energy production versus maximum profit. **Ocean Engineering**, v. 31, n. 11–12, p. 1407–1421, 2004.
- FALCÃO, A. F. D. O.; JUSTINO, P. A. P. OWC wave energy devices with air flow control. **Ocean Engineering**, v. 26, p. 1275–1295, 1999.
- FALCÃO, A. F. D. O.; RODRIGUES, R. J. A. Stochastic modelling of OWC wave power plant performance. **Applied Ocean Research**, v. 24, n. 2, p. 59–71, 2002.
- FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1391–1424, 2016.
- FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C.; GATO, L. M. C. Rotational speed control and electrical rated power of an oscillating-water-column wave energy converter. **Energy**, v. 120, p. 253–261, 2017.
- GASPAR, L. A.; TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER, E. Numerical analysis of the performance of two onshore oscillating water column wave energy converters at different chamber wall slopes. **Ocean Engineering**, v. 201, n. June 2019, p. 107119, 2020.
- GONÇALVES, R. A. A. C. et al. Numerical analysis of the influence of air compressibility effects

- on an oscillating water column wave energy converter chamber. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1183–1193, 2020.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. **Journal of computational physics**, v. 39, p. 201–255, 1981.
- HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in oceanic and coastal waters**. [s.l.: s.n.].
- HOWE, D.; NADER, J. R.; MACFARLANE, G. Experimental investigation of multiple Oscillating Water Column Wave Energy Converters integrated in a floating breakwater: Energy extraction performance. **Applied Ocean Research**, v. 97, n. February, p. 102086, 2020.
- JOHN ASHLIN, S.; SANNASIRAJ, S. A.; SUNDAR, V. Performance of an array of oscillating water column devices integrated with an offshore detached breakwater. **Ocean Engineering**, v. 163, n. March 2017, p. 518–532, 2018.
- JOSSET, C.; CLÉMENT, A. H. A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants. **Renewable Energy**, v. 32, n. 8, p. 1379–1402, 2007.
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS Van Driest ' s constant Curte t number defined by $(3.1 - 1)$ Coefficients in approximated turbulent transport equations Specific heat at constant pressure Diffusion coefficient for quantity (p Rate of diffu. **Science**, v. 3, p. 269–289, 1974.
- LISBOA, R. C. et al. Numerical evaluation of the power output of an oscillating water column wave energy converter installed in the southern Brazilian coast. **Energy**, v. 162, p. 1115–1124, 2018.
- LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; FORTES, C. J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. **Energy**, v. 121, p. 176–184, 2017.
- MAHNAMFAR, F.; ALTUNKAYNAK, A. Comparison of numerical and experimental analyses for optimizing the geometry of OWC systems. **Ocean Engineering**, v. 130, n. November 2015, p. 10–24, 2017.
- MØRK, G. et al. Assessing the global wave energy potential. **Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE**, v. 3, n. 2008, p. 447–454, 2010.
- NATIONS, U. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. **General Assembly 70 session**, v. 1, n. October, p. 1–35, 2015.
- NEILL, S. P.; HASHEMI, M. R. **Fundamentals of ocean renewable energy: Generating electricity from the sea**. [s.l.: s.n.].
- NING, D. Z. et al. Numerical and experimental investigation of wave dynamics on a land-fixed OWC device. **Energy**, v. 115, p. 326–337, 2016.

- PERDIGAO, J.; SARMENTO, A. Overall-efficiency optimisation in OWC devices. **Applied Ocean Research**, v. 25, n. 3, p. 157–166, 2003.
- POPE, S. B. **Turbulent flows**. [s.l.] Cambridge University Press, 2002.
- REEVE, D.; CHADWICK, A.; FLEMING, C. **Coastal engineering: Processes, theory and design practice**. [s.l.: s.n.].
- SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary Layer Theory**. [s.l.: s.n.]. v. 9
- SIMONETTI, I. et al. Optimization of the geometry and the turbine induced damping for fixed detached and asymmetric OWC devices: A numerical study. **Energy**, v. 139, p. 1197–1209, 2017.
- SORENSEN, R. **Basic coastal engineering**. [s.l.: s.n.].
- TEIXEIRA, P. R. F. et al. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations. **Energy**, v. 61, p. 513–530, 2013.
- TORRE-ENCISO, Y. et al. Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. **8th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2009)**, n. August, p. 319–328, 2009.
- TORRES, F. R.; TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER, E. A methodology to determine the optimal size of a wells turbine in an oscillating water column device by using coupled hydro-aerodynamic models. **Renewable Energy**, v. 121, p. 9–18, 2018.
- WAVEC. **OWC Pico Power Plant**. Disponível em: <<http://www.pico-owc.net/cms.php?page=616&wmsid=c84b02e823264521f7423e9ca9cf5b46>>.
- WINDT, C.; DAVIDSON, J.; RINGWOOD, J. V. High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems: A review of computational fluid dynamics-based numerical wave tanks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, n. July 2017, p. 610–630, 2018.

APÊNDICE A – Resultados de eficiências anuais para as diferentes câmaras e ondas estudadas na região Sul do Brasil

Tabela A.1. Resultados de eficiências anuais das diferentes ondas da região Sul do Brasil, para alguns diâmetros de turbina estudados e uma câmara de 5x5 m

H (m)	T (s)	P_w (kW)	Freq	D (m)						
				0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
0.50	8	10.98	0.0399	2.34	3.91	4.10	3.43	2.55	1.67	0.84
1.00	8	43.93	0.0381	6.43	12.62	15.65	15.05	12.70	9.94	7.47
1.50	8	98.85	0.0212	10.19	22.52	32.22	33.72	30.40	25.21	19.94
2.00	8	175.73	0.0046	11.65	25.99	42.98	54.18	51.55	44.50	36.22
1.00	9	47.03	0.0489	7.20	13.31	15.49	14.11	11.35	8.56	6.22
1.50	9	105.83	0.0165	10.82	23.24	32.62	32.37	27.98	22.30	17.07
2.00	9	188.14	0.0071	12.04	26.70	43.73	54.04	49.65	41.46	32.85
1.00	10	49.38	0.0338	8.07	14.01	15.38	13.39	10.36	7.57	5.36
1.50	10	111.10	0.0270	11.29	23.98	33.35	31.69	26.38	20.42	15.21
2.00	10	197.51	0.0053	12.04	26.70	43.73	54.04	49.65	41.46	32.52
2.50	10	308.61	0.0013	13.13	29.27	49.27	67.75	72.01	61.67	49.69
1.00	11	51.19	0.0091	8.66	14.04	14.68	12.33	9.27	6.60	4.60
1.50	11	115.18	0.0186	11.50	24.17	32.52	29.86	24.10	18.24	13.32
2.00	11	204.76	0.0076	12.58	27.47	43.83	50.39	43.51	34.41	26.00
2.50	11	319.93	0.0015	13.19	29.31	48.82	65.61	65.55	54.57	42.98
1.50	12	118.36	0.0035	11.71	24.26	31.61	28.20	22.15	16.45	11.79
2.00	12	210.41	0.0026	12.81	27.74	43.83	49.12	41.56	32.32	23.97
2.50	12	328.77	0.0010	13.47	29.68	49.09	65.30	63.78	52.25	40.57
ε (%)				11.77	24.08	32.42	33.34	29.42	23.96	18.52

Tabela A.2. Resultados de eficiências anuais das diferentes ondas da região Sul do Brasil, para alguns diâmetros de turbina estudados e uma câmara de 10x10 m

H (m)	T (s)	P_w (kW)	Freq	D (m)						
				1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75
0.50	8	21.97	0.0399	10.69	12.31	12.77	12.23	11.19	9.80	8.37
1.00	8	87.87	0.0381	32.62	40.76	45.69	47.46	46.41	43.54	39.75
1.50	8	197.70	0.0212	59.09	76.89	89.48	93.36	96.67	94.54	88.71
2.00	8	351.46	0.0046	69.60	97.51	125.43	150.95	159.64	159.52	152.75
1.00	9	94.07	0.0489	36.15	44.32	48.66	49.51	47.39	43.78	39.22
1.50	9	211.65	0.0165	62.77	84.33	97.45	103.32	103.09	98.25	91.04
2.00	9	376.27	0.0071	72.42	101.67	131.07	159.41	171.90	171.20	161.87
1.00	10	98.75	0.0338	39.26	46.99	50.53	50.24	47.28	42.97	37.81
1.50	10	222.20	0.0270	65.52	88.62	104.05	108.39	106.23	99.87	91.36
2.00	10	395.02	0.0053	74.77	104.89	135.10	164.53	178.88	177.35	165.51
2.50	10	617.22	0.0013	80.00	113.67	149.27	188.49	217.69	249.49	245.83
1.00	11	102.38	0.0091	40.99	48.14	50.86	49.63	46.03	41.18	35.71
1.50	11	230.35	0.0186	66.70	89.91	105.13	107.98	104.03	96.63	87.09
2.00	11	409.52	0.0076	75.49	105.61	135.31	163.33	174.14	169.80	156.27
2.50	11	639.87	0.0015	80.34	113.85	148.80	186.51	213.24	239.02	228.75
1.50	12	236.71	0.0035	68.31	92.04	108.32	110.31	104.94	96.35	85.83
2.00	12	420.82	0.0026	77.05	107.66	137.66	165.94	176.97	171.49	156.15
2.50	12	657.54	0.0010	82.08	116.20	151.67	189.98	216.97	244.21	233.44
ε (%)				29.67	37.90	43.42	45.94	45.44	43.02	39.15

Tabela A.3. Resultados de eficiências anuais das diferentes ondas da região Sul do Brasil, para alguns diâmetros de turbina estudados e uma câmara de 15x15 m

H (m)	T (s)	P_w (kW)	Freq	D (m)						
				2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75
0.50	8	32.95	0.0399	21.29	21.46	20.66	19.41	17.71	15.93	13.99
1.00	8	131.80	0.0381	74.13	78.94	80.86	79.96	76.80	72.42	67.09
1.50	8	296.55	0.0212	145.69	160.56	170.04	174.35	173.56	168.82	160.88
2.00	8	527.19	0.0046	199.78	240.11	257.28	278.23	284.47	284.1	278.44
1.00	9	141.10	0.0489	83.61	88.72	90.55	89.65	86.74	82.29	77.08
1.50	9	317.48	0.0165	161.07	176.02	185.01	188.98	187.76	182.26	174.29
2.00	9	564.41	0.0071	209.57	253.75	270.40	304.19	308.25	305.65	296.91
1.00	10	148.13	0.0338	89.96	94.33	95.40	93.31	89.16	84.06	77.77
1.50	10	333.30	0.0270	179.91	195.18	203.35	205.36	201.34	193.52	182.65
2.00	10	592.53	0.0053	219.85	268.09	284.85	335.53	341.15	336.01	327.46
2.50	10	925.82	0.0013	239.36	297.55	317.87	397.86	430.9	448.56	476.72
1.00	11	153.57	0.0091	92.1	95.34	95.29	92.09	87.3	81.32	74.35
1.50	11	345.53	0.0186	183.20	198.57	204.41	204.63	199.07	190.23	178.93
2.00	11	614.27	0.0076	221.16	268.62	283.88	330.14	331.14	323.25	312.02
2.50	11	959.80	0.0015	239.37	296.45	315.41	391.53	420.3	432.53	443.8
1.50	12	355.07	0.0035	189.96	208.61	212.34	211.26	203.94	193.68	181.18
2.00	12	631.24	0.0026	227.25	276.73	291.7	344.9	348.69	338.31	326.7
2.50	12	986.31	0.0010	246.63	306.24	325.27	407.07	438.8	453.91	481.83
ε (%)				45.50	49.07	50.10	50.69	49.12	46.68	43.69

Tabela A.4. Resultados de eficiências anuais das diferentes ondas da região Sul do Brasil, para alguns diâmetros de turbina estudados e uma câmara de 20x20 m

H (m)	T (s)	P_w (kW)	Freq	D (m)						
				2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00
0.50	8	43.93	0.0399	27.59	28.38	28.16	27.08	25.5	23.4	21.19
1.00	8	175.73	0.0381	92.30	99.69	104.06	106.03	104.63	101.25	96.35
1.50	8	395.4	0.0212	177.52	197.29	211.47	220.69	224.41	222.65	216.77
2.00	8	702.93	0.0046	252.32	275.21	335.1	360.32	374.91	382.63	381.32
1.00	9	188.14	0.0489	105.85	114.25	119.45	121.18	120.41	116.53	111.21
1.50	9	423.3	0.0165	204.19	227.64	244.19	255.44	260.75	259.90	253.80
2.00	9	752.54	0.0071	267.98	291.10	363.55	399.77	422.39	442.57	439.84
1.00	10	197.51	0.0338	117.56	126.33	131.53	132.98	130.83	126.27	120.03
1.50	10	444.4	0.0270	230.37	250.70	270.51	280.44	283.43	280.24	271.61
2.00	10	970.04	0.0053	279.18	301.74	379.46	416.57	440.59	473.90	465.81
2.50	10	1234.43	0.0013	303.75	328.23	423.26	471.85	507.05	599.25	607.02
1.00	11	204.76	0.0091	122.79	130.75	135.11	135.6	132.47	127.33	120.64
1.50	11	460.7	0.0186	239.66	260.39	291.11	305.35	313.64	315.84	312.70
2.00	11	819.03	0.0076	281.00	303.25	380.60	416.47	438.65	466.93	456.29
2.50	11	1279.73	0.0015	303.69	328.02	422.25	469.43	503.03	590.6	595.47
1.50	12	473.43	0.0035	243.33	260.9	286.78	293.25	292.49	285.31	274.09
2.00	12	841.65	0.0026	290.74	313.11	395.87	434.41	458.88	507.66	496.43
2.50	12	1315.07	0.0010	313.98	338.38	437.82	487.4	523	620.82	628.39
ε (%)				42.02	44.75	47.93	48.91	48.57	47.72	45.47

Tabela A.5. Resultados de eficiências anuais das diferentes ondas da região Sul do Brasil, para alguns diâmetros de turbina estudados e uma câmara de 25x25 m

H (m)	T (s)	P_w (kW)	Freq	D (m)						
				3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50
0.50	8	54.92	0.0399	31.32	30.56	28.99	26.8	24.02	21.1	17.91
1.00	8	219.66	0.0381	112.27	117.06	117.92	116.48	111.99	105.80	97.40
1.50	8	494.24	0.0212	226.77	242.33	252.02	257.23	255.37	248.43	237.75
2.00	8	878.66	0.0046	346.74	382.8	409.01	428.92	435.91	433.98	422.88
1.00	9	235.17	0.0489	134.98	141.70	145.37	145.35	142.53	137.24	130.39
1.50	9	529.13	0.0165	265.86	286.23	300.94	309.24	312.98	309.10	300.77
2.00	9	940.68	0.0071	371.42	414.18	447.00	508.45	519.67	529.80	521.50
1.00	10	246.89	0.0338	152.78	160.54	164.83	165.50	162.33	156.72	149.10
1.50	10	555.49	0.0270	305.61	328.37	345.22	355.09	357.22	354.67	344.75
2.00	10	987.55	0.0053	390.97	436.45	471.15	552.30	564.56	597.00	584.33
2.50	10	1543.04	0.0013	427.62	480.23	521.09	629.73	647.28	747.34	730.29
1.00	11	255.95	0.0091	164.31	172.14	176.26	175.57	172.49	166.19	157.85
1.50	11	575.88	0.0186	236.76	350.66	366.08	374.54	376.37	370.44	358.91
2.00	11	1023.79	0.0076	400.90	447.91	483.54	570.09	582.02	630.57	613.17
2.50	11	1599.67	0.0015	436.68	491.24	533.68	647.81	666.35	774.42	756.69
1.50	12	591.78	0.0035	343.46	371.77	387.37	396.72	395.92	387.31	374.18
2.00	12	1052.06	0.0026	412.27	460.68	497.12	589.48	601.15	666.12	645.43
2.50	12	1643.84	0.0010	446.94	502.18	544.65	662.15	679.51	791.25	771.17
ε (%)				36.68	39.99	41.34	42.75	42.36	41.89	39.97

Tabela A.6. Resultados de eficiências anuais das diferentes ondas da região Sul do Brasil, para alguns diâmetros de turbina estudados e uma câmara de 30x30 m

H (m)	T (s)	P_w (kW)	Freq	D (m)						
				3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00
0.50	8	65.9	0.0399	21.7	18.69	15.03	11.23	7.16	3.22	0
1.00	8	263.6	0.0381	98.05	93.55	86.97	78.07	68.19	56.74	44.60
1.50	8	593.09	0.0212	215.03	214.82	209.14	199.23	184.43	167.56	147.40
2.00	8	1054.39	0.0046	360.93	370.45	372.86	364.03	347.97	326.98	298.66
1.00	9	282.2	0.0489	152.97	154.90	152.26	146.93	139.13	128.86	117.21
1.50	9	634.96	0.0165	309.41	231.42	328.65	327.04	320.75	308.94	293.07
2.00	9	1128.21	0.0071	450.31	523.02	539.31	559.05	553.92	548.43	529.55
1.00	10	296.26	0.0338	181.88	185.83	186.64	182.55	176.10	167.02	156.24
1.50	10	666.59	0.0270	369.49	387.24	397.94	402.39	397.65	388.05	373.56
2.00	10	1185.05	0.0053	469.72	553.01	562.57	590.33	561.65	542.23	507.76
2.50	10	1851.65	0.0013	523.81	638.09	659.61	773.63	761.97	861.06	940
1.00	11	307.14	0.0091	199.81	205.26	206.74	203.85	197.69	189.09	178.74
1.50	11	691.06	0.0186	402.09	422.39	435.54	439.24	438.10	427.66	412.97
2.00	11	1228.55	0.0076	493.10	591.80	610.83	699.08	688.21	730.83	727.65
2.50	11	1919.6	0.0015	536.19	655.87	678.35	799.58	786.89	894.99	991.39
1.50	12	710.41	0.0035	421.49	451.35	463.66	469.34	467.12	456.84	441.99
2.00	12	1972.61	0.0026	504.41	607.74	627.04	722.24	710.81	775.16	781.74
2.50	12	2203.69	0.0010	546.97	670.6	693.19	819.73	806.63	922.43	1031.46
ε (%)				33.55	34.68	35.76	36.12	34.96	33.97	32.31