

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MIGUEL FRANCO LISBOA

**MODELAGEM DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR
MOVIMENTOS DE ONDAS OCEÂNICAS PARA OPERAÇÃO ISOLADA**

Porto Alegre
2023

MIGUEL FRANCO LISBOA

**MODELAGEM DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR
MOVIMENTOS DE ONDAS OCEÂNICAS PARA OPERAÇÃO ISOLADA**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert.

Porto Alegre
2023

MIGUEL FRANCO LISBOA

MODELAGEM DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR
MOVIMENTOS DE ONDAS OCEÂNICAS PARA OPERAÇÃO ISOLADA

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para graduação em Engenharia Elétrica.

Nota obtida: _____ (_____)

Área de concentração: Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Paulo Roberto Eckert, Dr.

Avaliador: Thieli Smidt Gabbi, Dra.

Avaliador: Ben Hur Bandeira Boff, Dr.

AGRADECIMENTO

O mundo no qual vivi durante o processo de elaboração desse projeto foi inesperadamente áspero. Esse trabalho foi escrito durante uma pandemia sobre a qual pouco controle se teve. Muito além das que habitam a vida acadêmica, diversas dificuldades estenderam-se perante mim, mas foram superadas.

Agradeço a minha família, que sempre proporcionou condições adequadas para crescer na vida pessoal e acadêmica pelo carinho, paciência, compreensão e amor.

Agradeço ao meu orientador, Paulo Roberto Eckert, por fornecer todo o apoio que eu precisava para a realização deste trabalho, além da reiterada compreensão de meus momentos difíceis.

*“Só há duas opções nesta vida: se resignar ou se indignar.
E eu não vou me resignar nunca.”*

Darcy Ribeiro

RESUMO

O presente projeto de diplomação foi desenvolvido no âmbito das tecnologias renováveis emergentes, mais especificamente na energia de ondas oceânicas. O trabalho consiste na continuação de trabalhos prévios, desenvolvidos no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE), focados no sistema de geração a partir de colunas de água oscilante (*Oscillating Water Column* ou OWC), sendo aplicado na alimentação de boias oceanográficas para aquisição de dados.

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver, a partir da bibliografia existente, a modelagem de um sistema representando a turbina e a relação inercial entre esta e o gerador. Todos os trabalhos anteriores conduzidos pelo grupo de pesquisa do LMEAE consideraram curvas de potência por velocidade da turbina obtidos em referências bibliográficas. Este trabalho incrementa a modelagem adicionando o modelo pneumático-mecânico, representando então a interação entre a oscilação pneumática da câmara de ar, considerando inclusive dados experimentais de variação de pressão, e a velocidade de rotação do PTO (*Power Take-Off*). Assim, é possível realizar testes mais fidedignos, mesmo em laboratório, caso se desenvolvam estruturas para se utilizar de métodos *Hardware-in-the-Loop*.

Concluiu-se que o método utilizado para a modelagem tem resultados interessantes para a representação da turbina, mostrando a relação da pressão de entrada e conjugado da turbina estudada. Para este trabalho foram feitas adequações empíricas para as componentes de perdas do PTO. Ainda assim, é necessário melhorar a compreensão sobre essas perdas para que o cálculo inercial seja mais correto e possamos ter uma velocidade de rotação mais fidedigna.

Palavras chave: energia das ondas, coluna de água oscilante, energias renováveis, boias oceanográficas, modelo pneumático-mecânico.

ABSTRACT

This graduation project was developed within the framework of emerging renewable technologies, more specifically in ocean wave energy. The work consists of the continuation of previous works, developed at the Laboratory of Electrical Machines, Drives and Energy (LMEAE), focused on the generation system from oscillating water columns (*Oscillating Water Column* or OWC), being applied in the Feeding oceanographic buoys for data acquisition.

The main objective of this work was to develop, based on the existing bibliography, the modeling of a system representing the turbine and the inertial relationship between it and the generator. All previous work conducted by the LMEAE research group considered power curves per turbine speed obtained from bibliographic references. This work increases the modeling by adding the pneumatic-mechanical model, representing the interaction between the pneumatic oscillation of the air chamber, including experimental data on pressure variation, and the rotation speed of the PTO (*Power Take-Off*). Thus, it is possible to carry out more reliable tests, even in the laboratory, if structures are developed to use *Hardware-in-the-Loop* methods.

It was concluded that the method used for modeling has interesting results for the representation of the turbine, showing the relationship between the input pressure and torque of the turbine studied. For this work, empirical adjustments were made to the PTO loss components. Still, it is necessary to improve the understanding of these losses so that the inertial calculation is more correct and we can have a more reliable rotation speed.

Keywords: wave energy, oscillating water column, renewable energies, oceanographic buoys, pneumatic-mechanical model

LISTA DE FIGURAS

1	Evolução do consumo de energia do século XIX aos dias atuais.	13
2	Capacidade de geração oceânica instalada na Europa de 2012 a 2020. . .	13
3	Distribuição da energia oceânica teórica anual no globo.	14
4	Potência da turbina para diversas condições de ondas.	15
5	Classificação de tecnologias WEC.	17
6	Esquemático representando uma boia OBS.	18
7	Esquemático do sistema <i>Overtopping Wave Dragon</i>	19
8	Exemplo de uma boia Masuda retificada.	20
9	Planta OWC de costa em Toftestallen, 1985.	21
10	OWC de quebra-ondas em Mutriku, 2008.	22
11	OWC flutuador japonês, o Might Wale, 1998.	22
12	Ilustração do funcionamento das turbinas unidirecionais.	23
13	Modelo de Turbina Wells.	24
14	Modelo de turbina de impulso.	24
15	Exemplo de uma boia longarina e seus principais elementos.	26
16	Porto de Mutriku e quebra-mar desenvolvido.	27
17	Corte e vista superior do projeto da Planta de Mutriku.	28
18	Turbina birradial OPERA durante o comissionamento na Planta de Mutriku.	28
19	Diagrama do modelo de geração OWC.	29
20	Diagrama da interação da câmara de ar.	30
21	Exemplo de um sinal de pressão de um OWC.	31
22	Diagrama da interação da turbina.	31
23	Relação entre as grandezas adimensionais Π , Φ e η com Ψ	33
24	Diagrama da interação entre turbina e gerador.	33
25	Topologias de rotores com ímãs permanentes.	34
26	Retificador Boost trifásico de 2 níveis bidirecional.	35
27	Fluxograma do método MPPT P&O com perturbação adaptativa.	37
28	Exemplo de um sistema HIL.	38
29	Blocos de funcionamento do WEC-OWC emulado.	40
30	Diagrama destacando o que será abordado neste trabalho.	41
31	Diagrama do sistema proposto.	41
32	Diagrama da relação pneumática-mecânica.	42
33	Diagrama da relação pneumática-mecânica simplificado.	43
34	Relação entre as grandezas adimensionais Π , Φ e η com Ψ da turbina birradial do Projeto OPERA.	44
35	Bloco do modelo pneumático-mecânico	45

36	Diagrama do modelo pneumático-mecânico.	45
37	Potência da turbina para diversas condições de ondas.	46
38	Circuito de regime permanente equivalente por fase do gerador.	47
39	Modelo do elementos de potência do gerador e do conversor.	48
40	Circuito equivalente do conversor acoplado ao gerador.	49
41	Diagrama de integração entre gerador, conversor CA-CC e controle de potência.	50
42	Diagrama do algoritmo MPPT no circuito proposto por (WERMANN, 2021).	52
43	Comparação entre V_d e Ω	52
44	Diagrama do ACP no circuito proposto para este trabalho.	53
45	Fluxograma do ACP desenvolvido para o projeto.	55
46	Diagrama de integração entre gerador, conversor CA-CC e controle de potência.	57
47	Circuito do gerador e medição de potência.	58
48	Circuito do conversor CA-CC.	59
49	Blocos de cálculos das transformadas de Park e Clarke.	59
50	Módulos de controle PI.	60
51	Transformada inversa e geração PWM.	60
52	Bloco de cálculo do ACP.	61
53	Módulo SimCoupler que permite acoplar modelos do Simulink® e do PSIM®.	61
54	SLINK Nodes de entrada e saída que permite acoplar modelos do PSIM® e Simulink®.	61
55	Diagrama final do modelo pneumático-mecânico no Simulink® com elemen- tos de integração ao modelo elétrico do PSIM®.	62
56	Diagrama de validação do conjugado do modelo pneumático-mecânico no Simulink®.	63
57	Diagrama de validação da Velocidade de rotação do modelo pneumático- mecânico no Simulink®.	63
58	Curvas de conjugado obtidos a partir do modelo e obtidos em campo. . .	66
59	Diferença entre saída do modelo e dados experimentais de conjugado da turbina.	66
60	Comparação entre a velocidade de rotação do modelo e dos dados obtidos em campo sem considerar perdas no modelo.	67
61	Diferença entre saída do modelo e dados de campo sem considerar perdas no modelo.	67
62	Diagrama de Sankey para um motor de indução trifásico.	68
63	Comparação entre a velocidade de rotação do modelo e dos dados obtidos em campo após considerar perdas.	70

64	Diferença entre velocidade obtida do modelo com perdas e dados experimentais para 6 cenários distintos que foram avaliados.	70
65	Curva de pressão dentro da câmara de ar considerada no primeiro cenário estudado.	72
66	Velocidade para o cenário avaliado nesta seção.	72
67	Tensão de fase e corrente de fase para o cenário avaliado nesta seção. . .	73
68	Potência convertida e potência de referência para o cenário avaliado nesta seção.	73
69	Correntes Id e Iq para o cenário avaliado nesta seção.	74
70	Detalhe da tensão e corrente de fase para o cenário avaliado nesta seção. .	74
71	Pressão de entrada a partir dos dados de obtidos em campo.	75
72	Velocidade para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.	76
73	Tensão e corrente de fase para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.	76
74	Potência convertida e potência de referência para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.	77
75	Correntes Id e Iq para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.	78
76	Detalhe da tensão e corrente de fase para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.	78
77	Velocidade com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP.	79
78	Tensão e corrente de fase com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP.	80
79	Potência convertida e potência de referência com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP.	80
80	Correntes Id e Iq com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP.	81
81	Detalhe da tensão e corrente de fase com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP. .	82
82	Velocidade com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.	83
83	Potência convertida e potência de referência com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.	83
84	Tensão e corrente de fase com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.	84

85	Correntes I_d e I_q com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.	85
86	Detalhe da tensão e corrente de fase com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.	85

LISTA DE TABELAS

1	Especificações da turbina birradial do Projeto OPERA.	42
2	Especificações de projeto do gerador.	47
3	Valor nominais dos ganhos dos controladores.	51
4	Definição das variáveis do fluxograma do ACP utilizado no projeto. . . .	53

LISTA DE SIGLAS

ACP	Algoritmo para Conversão de Potência
BES	Armazenamento de energia por bateria (<i>Battery Energy Storage</i>)
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
HIL	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
IST	Instituto Superior Técnico
LMEAE	Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia
MPPT	Rastreamento de ponto de máxima potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
OWC	Coluna de água oscilante (<i>Oscilating Water Column</i>)
PI	Proporcional Integral
PMSG	Gerador Síncrono de Imãs Permanentes (<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>)
PTO	<i>Power take off</i>
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse-Width Modulation</i>)
P&O	Perturba e Observa
UE	União Europeia
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
WEC	Conversor de energia das ondas (<i>Wave Energy Converter</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{bat}	Capacitor que modela de forma simplificada uma bateria (F)
C_{buck}	Capacitor do conversor <i>buck</i> (F)
D	<i>Duty cycle</i> [-]
I	Momento de inércia [kg.m ²]
I_d	Corrente de eixo direto [A]
I_q	Corrente de eixo de quadratura [A]
I_o	Corrente de saída [A]
I_{ref}	Corrente de referência [A]
I_x	Corrente eficaz na fase x [A]
m	Massa do corpo [kg]
\dot{m}_{turb}	Taxa de vazão do fluxo de ar da turbina [kg/s]
p	Pressão dentro da câmara [Pa]
p^*	Pressão oscilatória relativa dentro da câmara, [-]
p_{at}	Pressão atmosférica [Pa]
P	Número de polos
P_{ger}	Potência do gerador [W]
P_{turb}	Potência da turbina [W]
R	Carga Externa [Ω]
V_o	Tensão de saída [V]
V_{ref}	Tensão de referência [V]
V_x	Tensão eficaz na fase x [V]
ω	Velocidade de rotação da turbina [rpm]
ω_{nom}	Velocidade nominal de rotação da turbina [rpm]
ω_{ref}	Velocidade de referência de rotação da turbina [rpm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	12
1.1.1	Potencial de geração de energia no mar	12
1.1.2	Contextualização	14
1.1.3	Objetivos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	TOPOLOGIAS DE SISTEMAS WECs	17
2.1.1	WECs do tipo OWC	19
2.1.1.1	Desenvolvimento da Tecnologia	19
2.1.1.2	Turbinas Unidirecionais	23
2.1.1.3	Sistema de Geração em Spar Buoys	25
2.1.1.4	Planta Mutriku e Dados de Campo	26
2.2	MODELAGEM DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO OWC	29
2.2.1	Modelagem Hidromecânica	30
2.2.1.1	Câmara de Ar	30
2.2.1.2	Turbina	31
2.2.2	Modelagem Elétrica	34
2.2.2.1	Gerador	34
2.2.2.2	Conversores CA-CC	35
2.2.2.3	Métodos MPPT	36
2.3	<i>HARDWARE-IN-THE-LOOP</i>	38
3	SOLUÇÃO PROPOSTA	40
3.1	MODELO HIDRODINÂMICO SIMPLIFICADO	41
3.1.1	Projeto do Modelo Pneumático-Mecânico	42
3.1.2	Modelo para Estudo	45
3.2	MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE GERAÇÃO	45
3.2.1	Modelo do Gerador	46
3.2.2	Modelo do Conversor CA-CC	48
3.2.3	Projeto dos Controladores	49
3.2.4	Algoritmo para Conversão de Potência	51
3.2.5	Modelo para Estudo	56
3.3	INTEGRAÇÃO DOS MODELOS	61
3.4	ESTUDOS DE CASOS PROPOSTOS	62
3.4.1	Validação do modelo pneumático-mecânico	62

3.4.2	Verificação do comportamento do sistema de geração para diferentes estímulos	64
3.4.3	Verificação do comportamento do modelo ACP desenvolvido	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO PNEUMÁTICO-MECÂNICO	65
4.2	VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO	71
4.2.1	Caso com soma de componentes cossenoidais	71
4.2.2	Caso com dados experimentais	75
4.3	VALIDAÇÃO DO MODELO ACP	79
4.3.1	Caso com soma de componentes cossenoidais	79
4.3.2	Caso com dados experimentais	82
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente busca por fontes de energias renováveis em diversos campos da indústria e do mercado, é natural que a geração de energia a partir de ondas do mar ou oceanos, por ser uma fonte de energia renovável vasta, sustentável e de baixo impacto ambiental, siga esse *momentum* e comece a ser mais difundida. Este trabalho é focado no desenvolvimento de um modelo desde o comportamento pneumático de um sistema OWC até a carga elétrica. Especificamente, o modelo desenvolvido representará a relação entre pressão da câmara de ar do OWC e da velocidade de rotação (da turbina e gerador) e incluir esse fator em trabalhos já desenvolvidos previamente. Trabalhos como este têm a função de estudar a viabilidade técnica, promover e popularizar o conhecimento e interesse em métodos não convencionais de geração de energia limpa como é o caso da energia gerada a partir do movimento das ondas oceânicas.

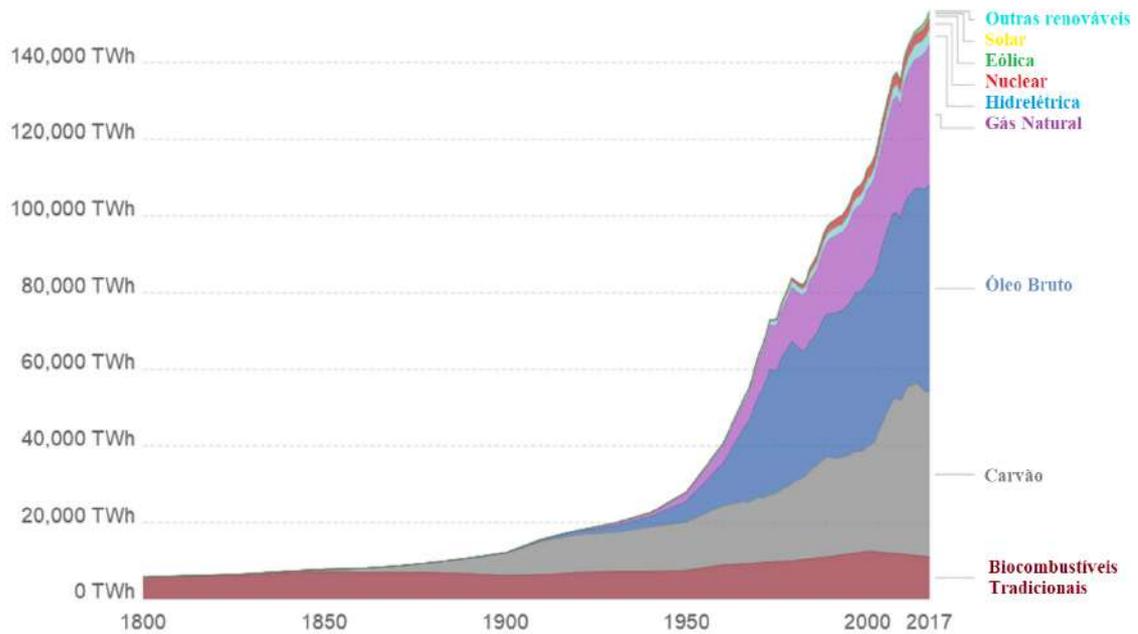
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

1.1.1 Potencial de geração de energia no mar

O consumo de energia do mundo cresce de forma considerável desde a revolução industrial, na segunda metade do século XVIII. Desde então, novas formas de se conseguir essa energia foram se desenvolvendo, seja por questões de diversidade energética, quanto por questões ambientais. Atualmente, os combustíveis fósseis ainda são a fonte dominante de energia, avaliada por volta dos 85% como relata (GONZÁLEZ et al., 2021) a partir de dados fornecidos pela Universidade de Oxford. A Figura 1 apresenta a evolução do consumo de energia do século XIX aos dias atuais junto com a distribuição de cada matriz energética.

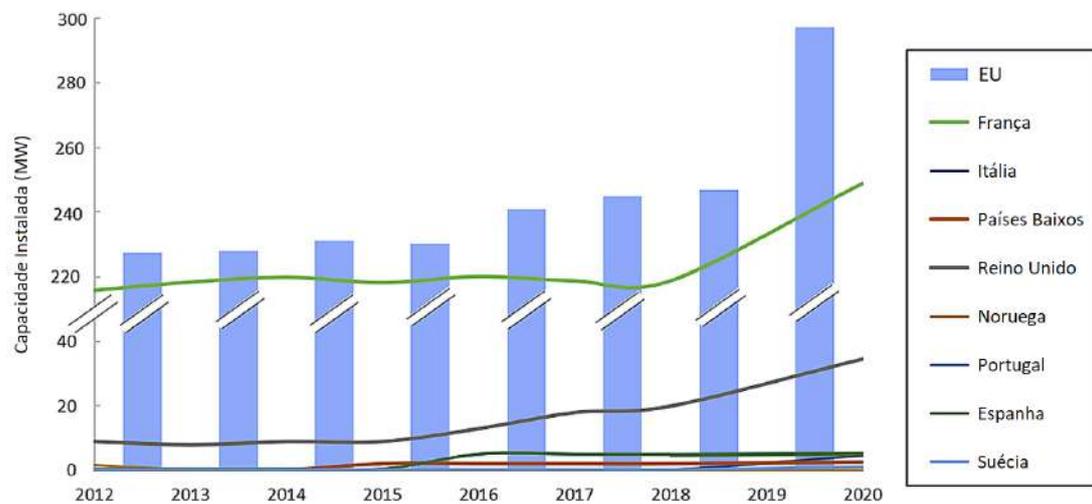
Apesar das fontes de energia renováveis terem avançado bastante nas últimas duas décadas, entre as fontes alternativas, a geração de energia dos oceanos (considerando energia das marés e das ondas) ainda é insignificante (cerca de 0,02%) e sequer destaca-se dentre as matrizes apresentadas. Apesar disso, podemos ver que seu desenvolvimento vem acontecendo, mesmo que lentamente, como indica a Figura 2, que mostra a evolução da carga instalada de 2012 a 2020 na União Europeia. Atualmente, como relata (GONZÁLEZ et al., 2021), a União Europeia (destacando-se a França) e a Coreia do Sul são os líderes em capacidade instalada correspondendo a 46,64% (cerca de 247 MW) e 48,17% (cerca de 255 MW), respectivamente.

Figura 1 – Evolução do consumo de energia do século XIX aos dias atuais.



Fonte: Adaptado de (GONZÁLEZ et al., 2021)

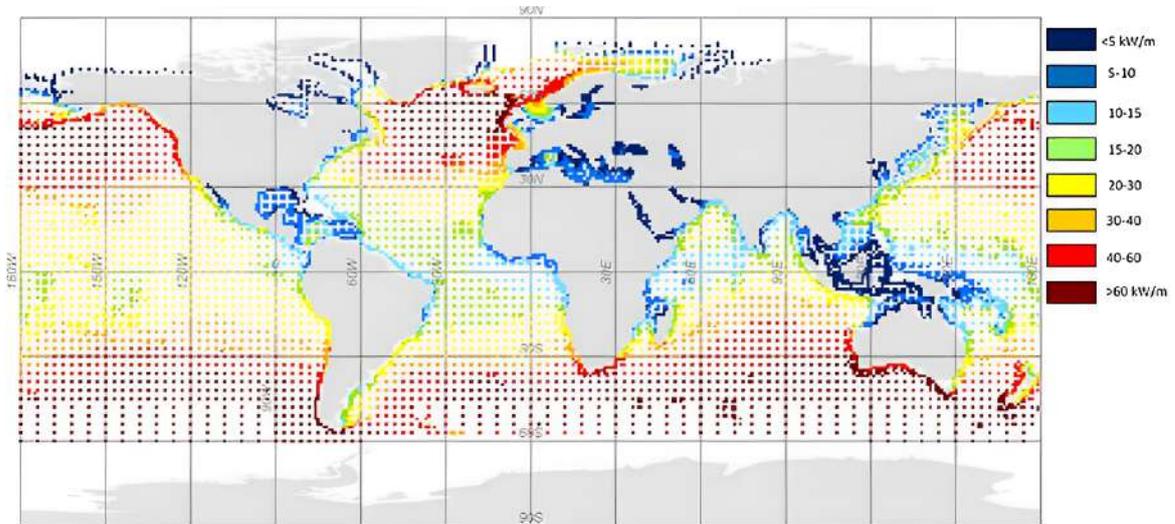
Figura 2 – Capacidade de geração oceânica instalada na Europa de 2012 a 2020.



Fonte: Adaptado de (GONZÁLEZ et al., 2021)

Por fim, umas das grandes vantagens e, portanto, expectativas para a geração oceânica é a grande disponibilidade perto de cidades costeiras. A Figura 3 apresenta a quantidade de energia por unidade de comprimento teórica que pode ser gerado ao redor do globo.

Figura 3 – Distribuição da energia oceânica teórica anual no globo.



Fonte: (GONZÁLEZ et al., 2021)

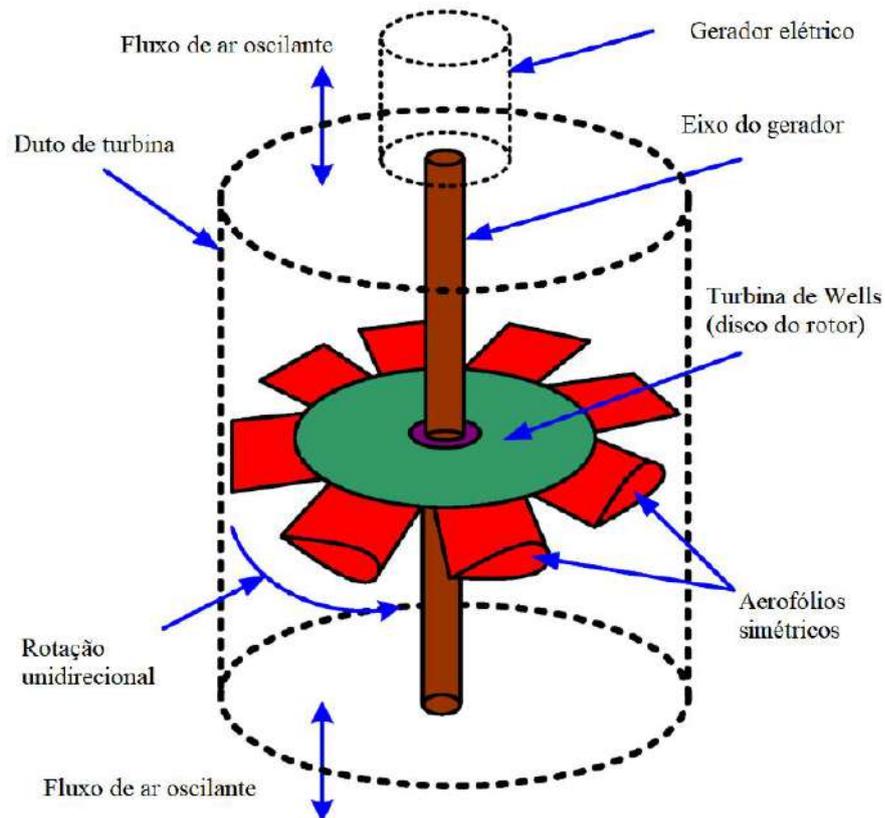
1.1.2 Contextualização

Ao redor do globo existem inúmeras boias espalhadas pelos oceanos e mares para os mais diversos fins, desde a medição de condições climáticas e geográficas de determinado local a simples sinalizações visuais e sonoras. Os instrumentos utilizados para o sensoriamento e indicação, como observa (HENRIQUES et al., 2016), tem sua atual capacidade de monitoramento limitada por sua fonte de energia. Tradicionalmente, a fonte de energia consiste de células fotovoltaicas e baterias para armazenamento de energia. Entretanto a área disponível para instalação de painéis fotovoltaicos muitas vezes faz com que a potência fornecida sejam insuficientes para aplicações modernas e ambiciosas como a de estações flutuantes de carregamento marítimo para veículos subaquáticos autônomos e de sistemas autônomos de longo prazo de observação científica em oceanos profundos. Alternativamente, o Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa em parceria com o LMEAE visa estudar a viabilidade de alimentar as boias a partir do próprio movimento das ondas onde as mesmas estão instaladas.

De acordo com (FALCÃO, 2010), uma variedade de tecnologias foram apresentadas, estudadas e em alguns casos testadas em condições reais para Conversores de Energia das Ondas (*Wave Energy Converter* ou WEC); porém, a que ganhou mais atenção, principalmente por sua simplicidade, foram as chamadas de Coluna de Água Oscilante (*Oscillating-Water-Column* ou OWC). Uma OWC, que é o modelo seguido no projeto em questão, compreende dois elementos principais: uma câmara coletora, na qual a energia das ondas é transferida para o ar dentro da câmara, e um sistema de tomada de força (*Power Take Off* ou PTO), que converte a energia pneumática em energia mecânica de

rotação. A condição barométrica no coletor é alternadamente pressurizada à medida que a coluna de água sobe e é rarefeita à medida que a coluna de água desce. A Figura 4 exemplifica os elementos e funcionamento. As especificidades serão abordadas nos capítulos subsequentes deste trabalho.

Figura 4 – Potência da turbina para diversas condições de ondas.



Fonte: (NURICH, 2019)

Até o presente momento, todos os testes realizados nos trabalhos anteriores desenvolvidos no LMEAE, pelas teses de (SANTOS, 2021; ASSENHEIMER, 2021; WERMANN, 2021; NURICH, 2019) e pelo artigo publicado de (SANTOS; TAVARES; ECKERT, 2021), utilizaram curvas de potência em função da velocidade angular, apresentadas por (HENRIQUES et al., 2016). Essas curvas de potência para variados estados marítimos observados foram utilizadas para gerar a referência de potência para o controle dos conversores eletrônicos propostos para o sistema.

Contudo, a análise do sistema a partir das curvas de potência em função da velocidade angular da turbina não permitem considerar o rendimento da turbina e nem a variação de velocidade mediante condições de carga e de variação de pressão pneumática na câmara de ar. A fim de possibilitar um estudo mais abrangente do sistema de geração, neste trabalho são incorporados aspectos de modelagem da turbina que permitem ter como entrada do sistema a variação da pressão pneumática em condições reais e considerar o

comportamento acoplado do sistema que contempla a turbina, a máquina elétrica, o conversor estático controlado e a carga elétrica. Essa abordagem representa um incremento nos modelos até então empregados pelo grupo de pesquisa do LMEAE.

1.1.3 Objetivos

O trabalho visa aprimorar a modelagem já elaborada no laboratório LMEAE, iniciada por (SANTOS; TAVARES; ECKERT, 2021) e avançada por (ASSENHEIMER, 2021) e por (WERMANN, 2021), incorporando a estas a variação pneumática dentro da câmara da OWC como uma variável de entrada. Com isso, além de aprimorar as simulações, ganha-se uma ferramenta importante para que futuramente possa se desenvolver uma bancada para aplicação do modelo utilizando-se do conceito *Hardware-in-the-Loop*.

A implementação da modelagem pretendida visa representar melhor o sistema de geração e proporcionar um incremento no estudo de alimentação das boias oceanográficas. Esse sistema de geração, por sua vez, visa reduzir o risco de falta de energia à carga e reduzir a necessidade de interferência humana para manutenção. A implementação da modelagem também representa um passo para o domínio desta tecnologia sustentável. Neste contexto são elencados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

Objetivo geral:

- Modelagem de um sistema de geração *offshore* isolado com boias de coluna de água oscilante a partir da variação de pressão na câmara de ar.

Objetivos específicos:

- Modelagem do sistema pneumático-mecânico simplificado;
- Modelagem do sistema dos componentes elétricos do sistema de conversão (gerador e retificador);
- Integração dos modelos e controle do sistema de geração;
- Análise dos resultados sob diferentes excitações (curvas de pressão dentro da câmara de ar da boia).

Embora possa haver outros aspectos a serem otimizados, como a eficiência e outros métodos de controle do sistema de conversão, isso não será abordado neste trabalho, uma vez que requer uma análise individual dos componentes do circuito e de outras partes que não são o escopo deste trabalho.

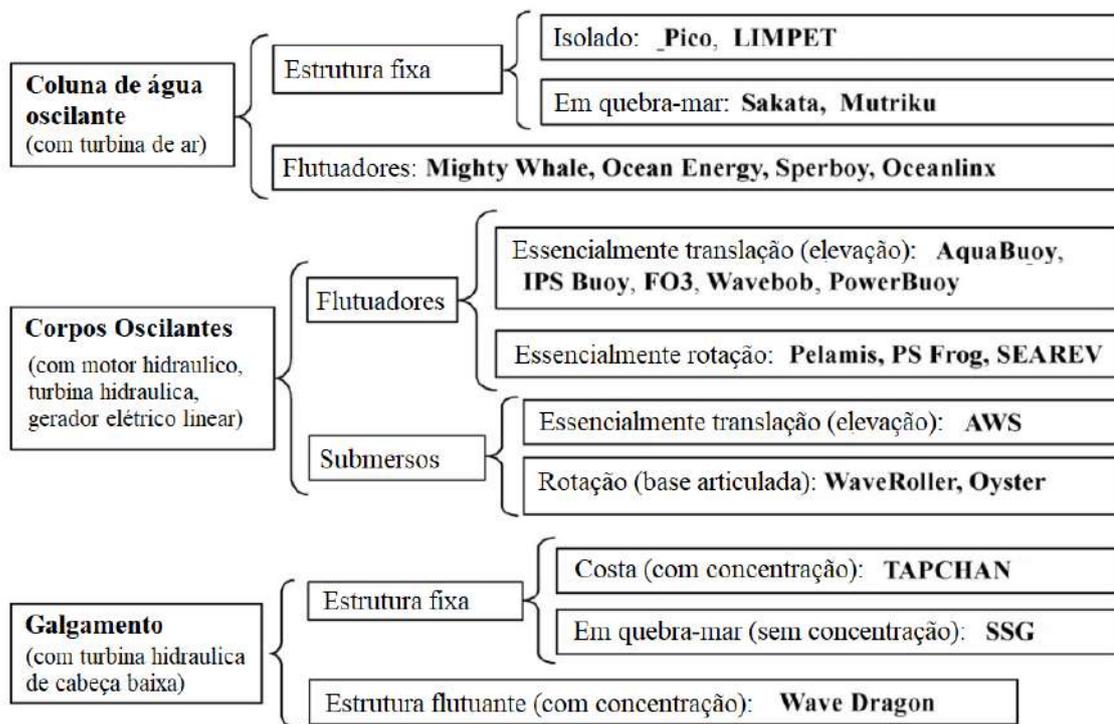
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados: os diversos e principais sistemas WEC já desenvolvidos; a modelagem matemática do sistema pneumático-mecânico e elétrico; e, por fim, o conceito de *Hardware-in-the-Loop* aplicado à OWCs.

2.1 TOPOLOGIAS DE SISTEMAS WECs

Existe uma grande variedade de tecnologias já desenvolvidas para converter a energia das ondas, dependendo inclusive da profundidade e localização (na costa, próximo à costa, em alto mar). Esses diferentes modelos de geradores de energia por ondas e alguns protótipos e plantas desenvolvidas, são apresentados na Figura 5; seus conceitos, tecnologias e sistemas de tomada de força desenvolvidas foram resumidos e classificados por (FALCÃO, 2010), alguns serão expostos a seguir.

Figura 5 – Classificação de tecnologias WEC.

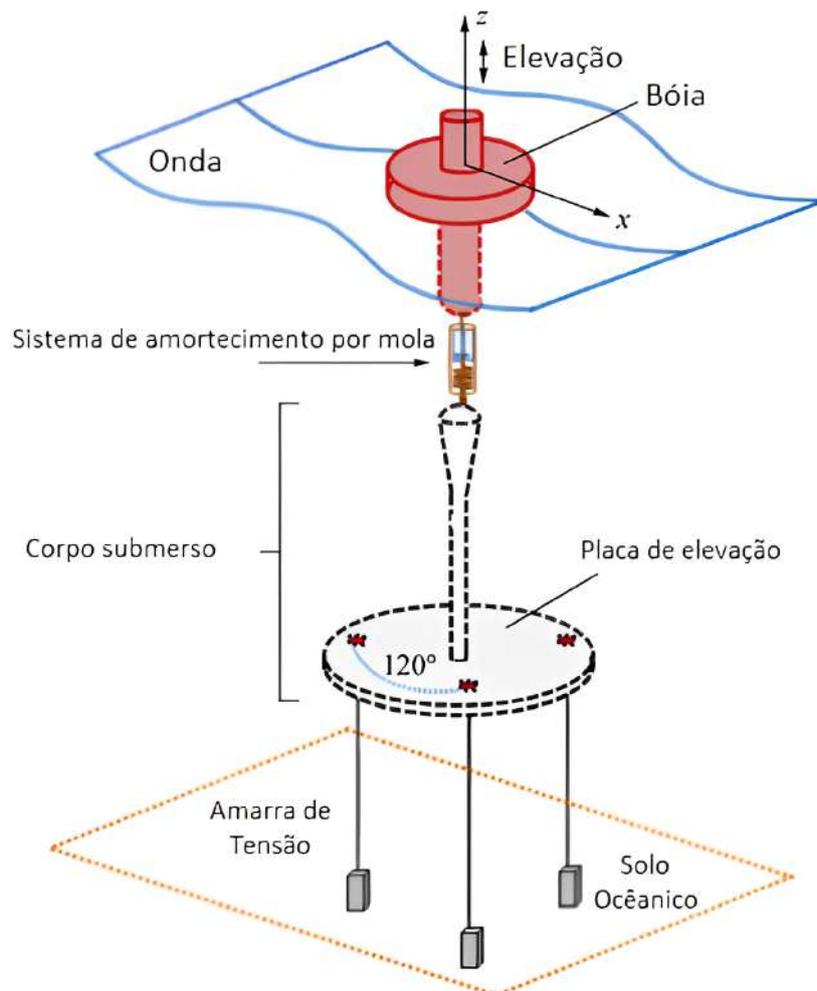


Fonte: (FALCÃO, 2010)

No grupo chamado Corpos Oscilantes (*Oscillating Bodies Systems* ou OBS) temos por exemplo o conceito *Two-body heaving systems* onde a energia é convertida a partir da movimentação relativa entre dois corpos oscilando individualmente, reagindo às ondas como apresenta (FALCÃO, 2010). A proposta consiste em dois flutuadores, onde o superior (a nível do mar) atua como referência e o inferior (submerso) atua como elemento ressonante e receptor da energia. A oscilação causada no corpo submerso ativa o pistão

no corpo superior para assim ativar o mecanismo PTO e realizar a conversão. A Figura 6 exemplifica esse conceito.

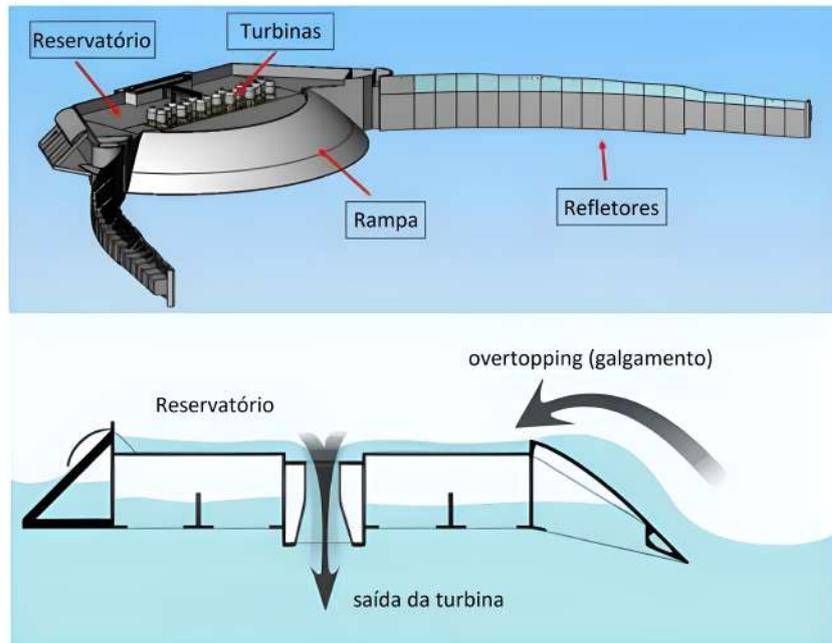
Figura 6 – Esquemático representando uma boia OBS.



Fonte: Adaptado de (BERENJKOOB; GHIASI; SOARES, 2019)

Outro jeito de se converter energia das ondas é capturar a água que esta perto da crista da onda e armazená-la em um nível maior que a do mar local, o conceito *Overtopping*. As ondas entram por canais que se estreitam, denominado "refletores", amplificando a altura das ondas até que cheguem ao reservatório. O potencial energético armazenado é então convertido se utilizando de turbinas hidráulicas muito semelhantes às tradicionais. A Figura 7 exemplifica esse conceito.

Figura 7 – Esquemático do sistema *Overtopping Wave Dragon*.



Fonte: Adaptado de (TEDD et al., 2007)

A aplicação determina a localidade em que se encontra o dispositivo e a estrutura sugere como é realizado o movimento do dispositivo que incidirá sobre a PTO, gerando energia. Na sequência é discutido com mais detalhamento o tipo de conversor utilizado neste trabalho, o OWC.

2.1.1 WECs do tipo OWC

Os sistemas de geração do tipo Coluna de Água Oscilante (OWC) tem como principal vantagem sua simplicidade, sendo compostas por um compartimento onde há ar e onde a água de mar pode oscilar, e contém uma turbina e um gerador elétrico posicionados acima do nível da água. O ar da câmara flui alternativamente para a atmosfera e de volta à câmara, sempre girando o rotor unidirecionalmente, graças aos diversos tipos de turbinas unidirecionais desenvolvidas, sendo a turbina Wells a mais difundida.

2.1.1.1 Desenvolvimento da Tecnologia

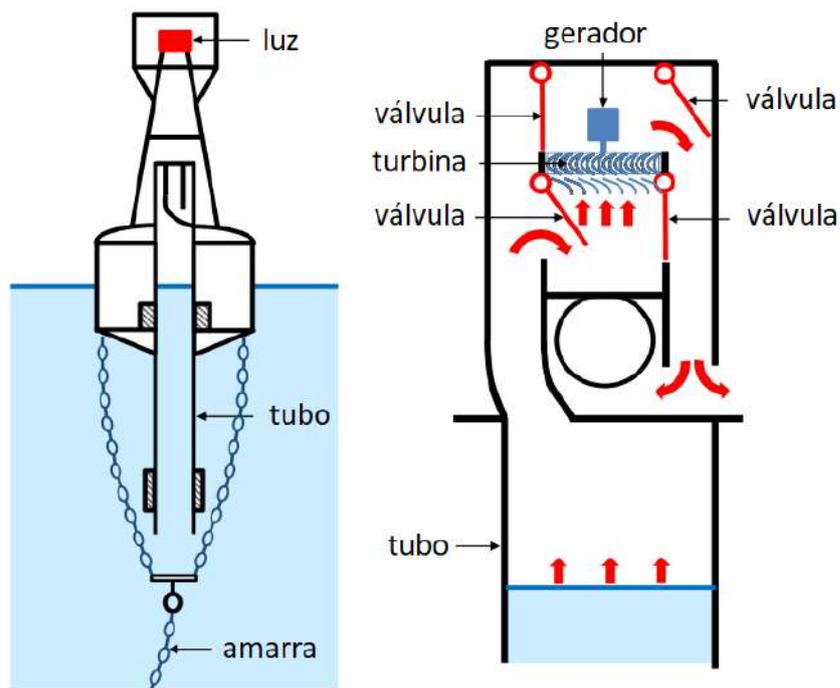
Para abordar as tecnologias de OWCs é necessário mencionar Yoshio Masuda (1925-2009), um oficial naval japonês, que é considerado como o pai das tecnologias modernas de energia marítima, como descreve (FALCÃO, 2010), tendo estudos na área desde 1940. Ele desenvolveu a primeira boia de navegação alimentada por energia marítima, que ficou posteriormente conhecida como a tecnologia de OWC flutuante. Estas boias, também denominadas boias Masuda, se utilizavam de válvulas retificadoras a fim de que

se mantivesse o fluxo de ar em apenas uma direção; portanto, se utilizavam de turbinas convencionais, como representa a Figura 8.

Nos anos 70 foram desenvolvidos estudos para a elaboração de WECs de grande escala, muito estimulado pela crise do petróleo na época. As primeiras foram os modelos ditos *shore-fixed*, grandes estruturas construídas nas costas em que se visava estudar a viabilidade desta tecnologia. Em 1985 foi construído em Toftestallen, na Noruega, uma planta OWC com potência nominal de 500 kW (embora não tenha conseguido atingir as expectativas), mostrada na Figura 9, mas que foi destruída por uma tempestade em 1988.

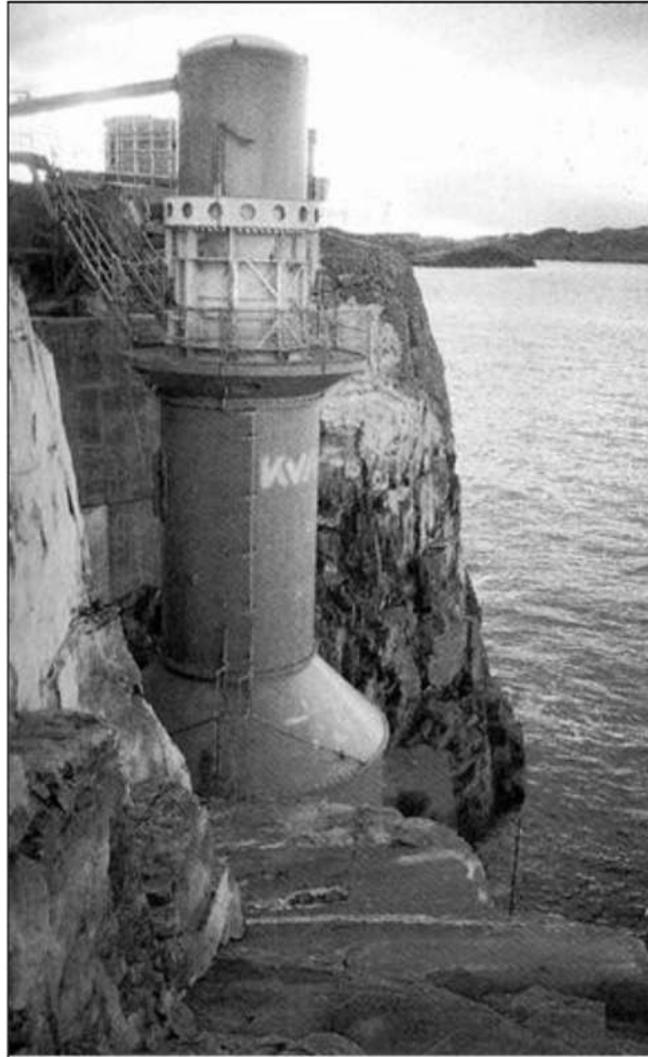
Ao longo dos anos 80 teve início o desenvolvimento e estudo de modelos que se utilizavam das quebra-ondas próximos às costas, integrando a planta à estrutura. Dentre as vantagens observadas estão o custo compartilhado (quebra-mar e planta) e a facilitação no acesso para construção, operação e manutenção. Este modelo foi o adotado no porto de Mutriku, no nordeste da Espanha em 2008 com 16 Câmaras e 16 Turbinas estimadas em 18,5 kW cada. A Figura 10 mostra a estrutura de Mutriku.

Figura 8 – Exemplo de uma boia Masuda retificada.



Fonte: Adaptado de (FALCÃO, 2010)

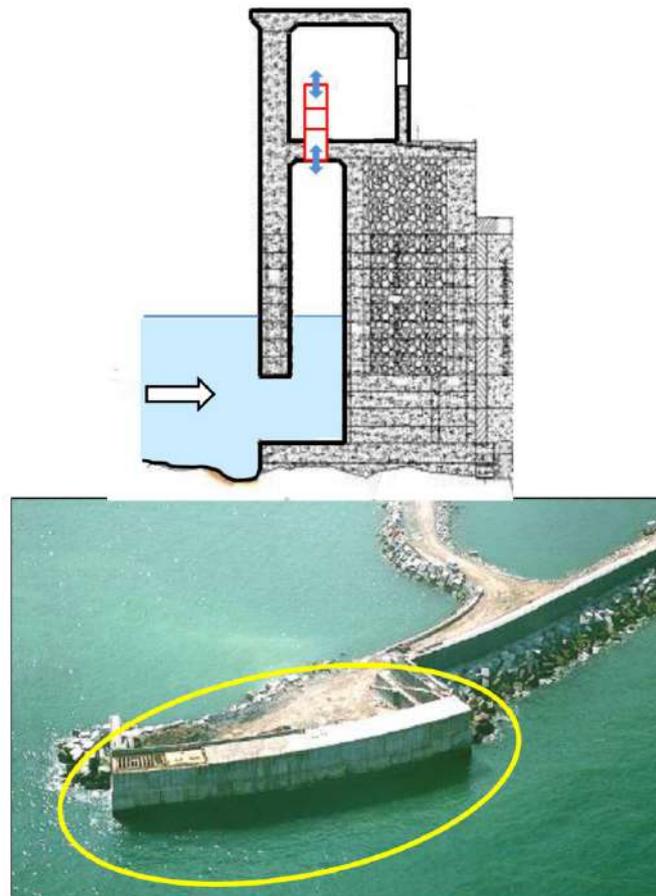
Figura 9 – Planta OWC de costa em Toftestallen, 1985.



Fonte: (FALCÃO; HENRIQUES, 2016)

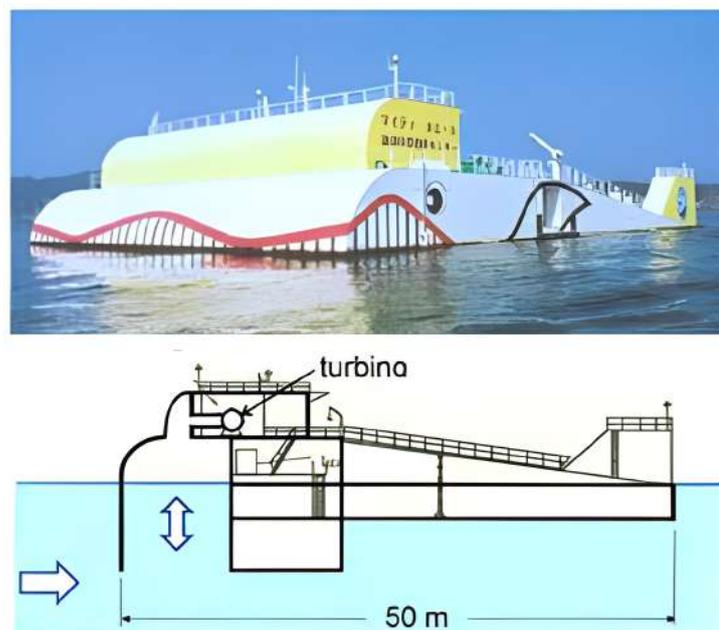
Ainda nos anos 80, vários países (Japão, Coreia do Sul, EUA, China, entre outros) tiveram interesse no desenvolvimento de sistemas OWC flutuantes. O conceito de construção segue o esquema de todos os OWCs e a finalidade seria para aplicação no litoral ou em mares mais afastados da costa. Logo, não possui um sistema fixo na costa ou no fundo do mar, o que difere das outras tecnologias apresentadas. A flexibilidade obtida através desse sistema reduz seu custo de implementação além de permitir uma rápida mudança em sua posição geográfica, caso seja necessário. A Figura 11 mostra o OWC flutuador de nome *Might Wale*, desenvolvido pelo Centro de Ciência e Tecnologia da Marinha Japonesa em 1998.

Figura 10 – OWC de quebra-ondas em Mutriku, 2008.



Fonte: (FALCÃO; HENRIQUES, 2016)

Figura 11 – OWC flutuador japonês, o Might Wale, 1998.

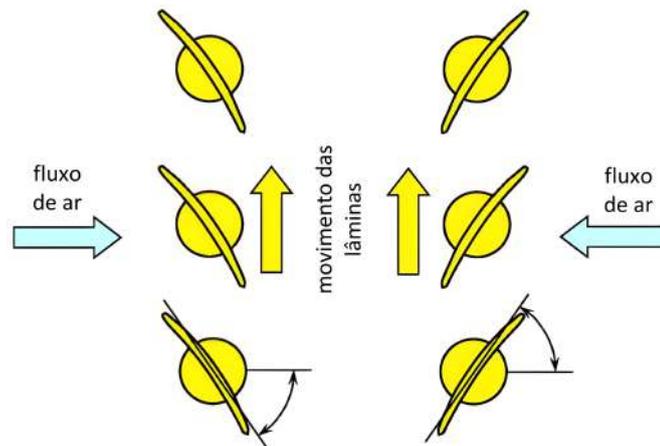


Fonte: Adaptado de (FALCÃO; HENRIQUES, 2016)

2.1.1.2 Turbinas Unidirecionais

As turbinas de ar de um OWC é um tema que, segundo (FALCÃO, 2010), demanda o atendimento a muito mais requisitos que turbinas em outras aplicações, inclusive as turbinas eólicas. Isso por conta das altas variações randômicas, tanto entre ondas e quanto estações. Logo não é de se admirar que turbinas em OWCs tenham uma eficiência a longo prazo consideravelmente inferior se comparado com outras que trabalham com condições mais estáveis. Ao longo do tempo, vários modelos de turbina foram propostos contudo todos seguem o mesmo princípio, isto é, são auto-retificadas, em outras palavras, unidirecionais. Isso se dá por meio de suas aletas serem espelhadas com relação ao eixo radial da turbina, como exemplifica a Figura 12.

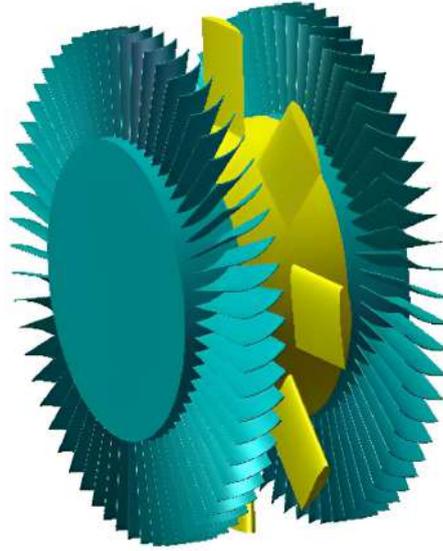
Figura 12 – Ilustração do funcionamento das turbinas unidirecionais.



Fonte: Adaptado de (FALCÃO, 2010)

Um tipo de turbina unidirecional é a turbina Wells, que foi inventada nos anos 70 pelo Dr. Allan Wells. É uma turbina de fluxo axial, portanto seu conjugado não é dependente da direção do fluxo do ar, isso devido ao seu rotor que é composto de várias lâminas aerofólias dispostas simetricamente em relação ao eixo radial, e cujo o formato direciona o fluxo de ar de forma a conduzir a turbina na direção desejada. As turbinas Wells certamente são as mais frequentemente utilizadas em sistemas WEC-OWC por sua boa eficiência (70-80%) e um custo de construção baixo. Contudo, segundo (DUARTE, 2018), temos que entre suas principais desvantagens está sua faixa operacional de fluxo de ar muito estreito; tamanho relativamente grande, quando comparado com seu nível de potência; além de um nível de ruído superior a de turbinas convencionais. A Figura 13 mostra um modelo de uma turbina Wells.

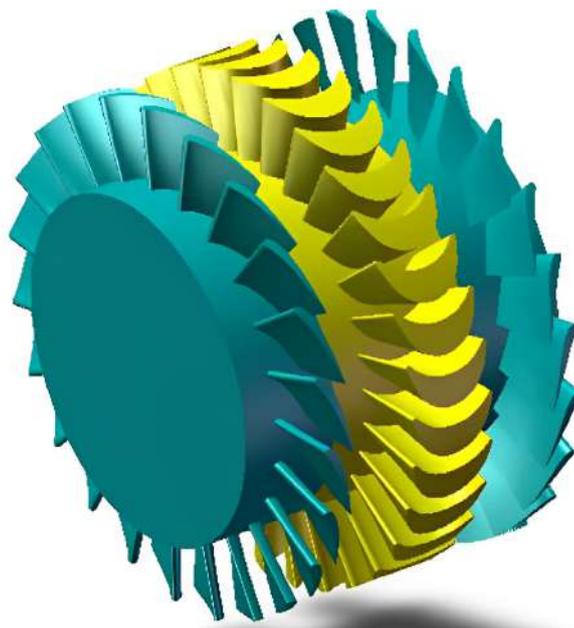
Figura 13 – Modelo de Turbina Wells.



Fonte: (FALCÃO, 2010)

A alternativa mais popular às Turbinas Wells são as chamadas Turbinas de Impulso, patenteadas por Babinsten em 1975. A turbina segue a ideia das aletas espelhadas, para atender sua característica unidirecional. Novamente, (DUARTE, 2018) aponta que o principal problema deste tipo de turbina é seu alto grau de perdas aerodinâmicas devido ao excessivo fluxo de ar na segunda linha de aletas. A Figura 14 mostra um modelo desse tipo de turbina.

Figura 14 – Modelo de turbina de impulso.



Fonte: (FALCÃO, 2010)

2.1.1.3 Sistema de Geração em Spar Buoys

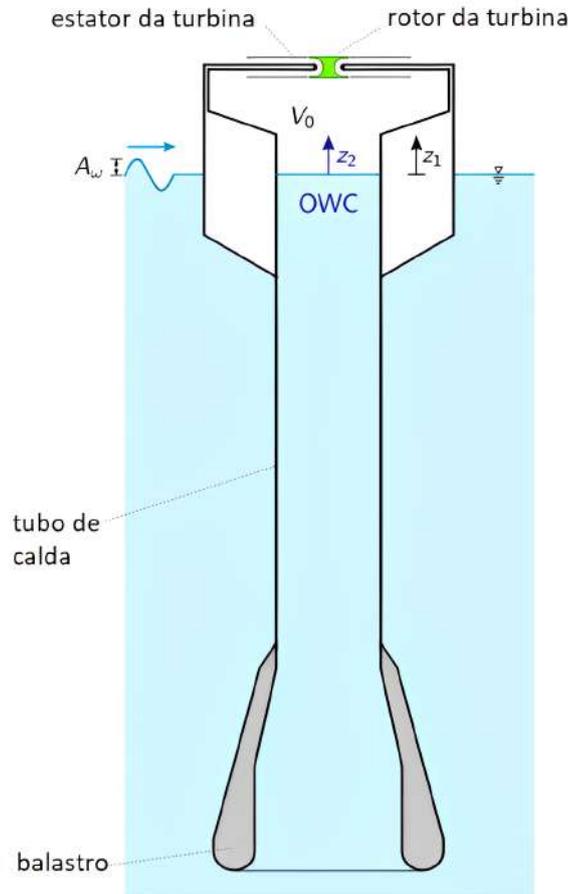
Uma nova metodologia sistemática é apresentada por (HENRIQUES et al., 2016) para o projeto ótimo de conversores de energia por ondas aplicado em duas boias, uma de longarina OWC e outra de duto coaxial OWC, ressaltando a forma hidrodinâmica da boia, dimensionamento e seleção da turbina do gerador, além do controle e conjugado eletromagnético do gerador. Esse projeto possui uma etapa importante para a otimização e o desenvolvimento de boias WEC-OWC, elencando as etapas e características necessárias para realizar um projeto de gerador de energia por ondas, independentemente do tipo de dispositivo utilizado. Além de comparar desempenho energético obtido entre os dois tipos de boias, também considerou a viabilidade e nível de desenvolvimento tecnológico e econômico. Para os dois projetos, foram avaliados dois diâmetros de rotor diferentes e analisados os desempenhos de curva de potência da turbina e rotação. Além da análise de indicadores de desempenho para rendimento das turbinas, os estudos comprovaram que há um grande potencial de fornecimento de energia para esse tipo de dispositivo.

O modelo representativo de uma boia de longarina OWC considera, basicamente, quatro macroetapas de um sistema: ondas, câmara OWC, turbina e gerador. Exceto pelo gerador, todos são representados na Figura 15. A relação de dependência existente na câmara OWC representa a modelagem matemática entre a geometria e movimento da boia com os dados de entrada da onda, representados por sua amplitude, frequência e probabilidade de incidência. Os movimentos da boia, resultantes da dinâmica de oscilação das ondas são responsáveis por alterar a pressão de ar no interior da câmara que, por sua vez, determinam a potência de saída no eixo da turbina. Ao conectar o eixo da turbina ao gerador ocorrerão mudanças de conjugado e rotação, os quais também são dependentes dos valores incidentes da onda.

A incidência da onda é caracterizada essencialmente por sua altura, período e probabilidade de ocorrência, capaz de criar um movimento relativo entre boia e lâmina d'água existente dentro da câmara, que movimenta o fluxo de ar incidente na turbina.

De acordo com a geometria da boia, o movimento relativo determina variações de pressão, volume e fluxo de ar dentro da câmara, impondo um movimento de rotação na turbina, o qual depende das características intrínsecas da própria turbina. O gerador, ao conectar-se no eixo da turbina, impõe um conjugado que influencia todo o processo desde a rotação da turbina, a pressão interna, fluxo de ar e novamente o próprio conjugado aplicado ao eixo, até que o sistema se estabilize. O movimento, ascendente ou descendente da boia, por sua vez, é indiferente ao sentido de rotação quando a turbina é do tipo auto-retificada. Essa condição é de extrema importância ao gerador pois seu sentido de rotação não varia.

Figura 15 – Exemplo de uma boia longarina e seus principais elementos.



Fonte: Adaptado de (HENRIQUES et al., 2016)

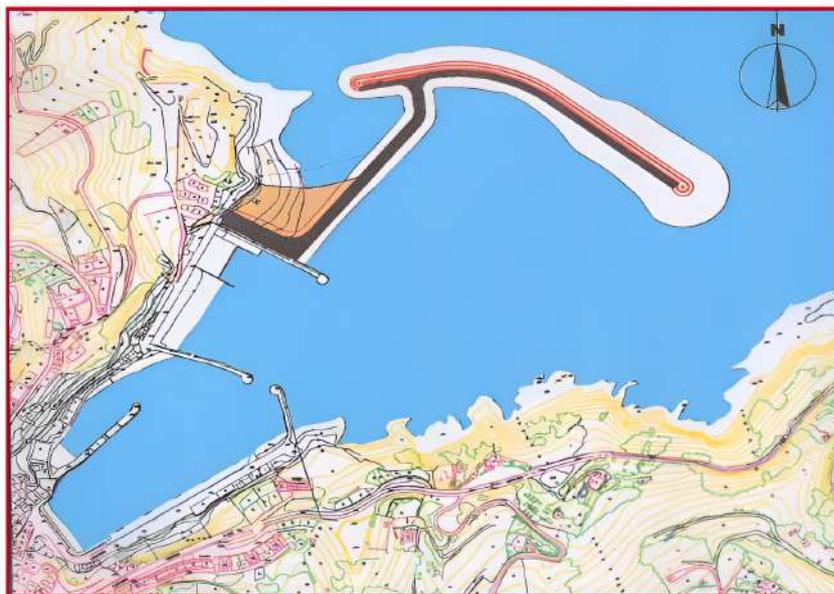
2.1.1.4 Planta Mutriku e Dados de Campo

Nesta subseção será apresentado um pouco mais sobre a planta de Mutriku na Espanha, pois é dela que são tirados alguns dos dados experimentais que serão de suma importância para a concepção e avaliação do modelo matemático implementado.

No trabalho de (TORRE-ENCISO et al., 2009) é relatado que a planta de Mutriku não foi apenas a primeira instalação multi-turbina em um quebra-mar, mas também foi o primeiro projeto de caráter comercial no mundo.

Mutriku foi um dos primeiro portos feitos na região do País Basco, na Espanha. O porto se localiza em uma pequena baía natural. Contudo, este porto sempre foi alvo de pequenas tempestades, danificando piers e causando instabilidades no canal que leva ao porto e às docas. Por conta disso, o governo local propôs a criação de alguns quebra-mares. Com este projeto definido, o governo local assinou uma colaboração com o *Ente Vasco de la Energía* para se utilizar da estrutura planejada para o desenvolvimento de uma planta WEC. A Figura 16 mostra o porto mais a barragem construída.

Figura 16 – Porto de Mutriku e quebra-mar desenvolvido.



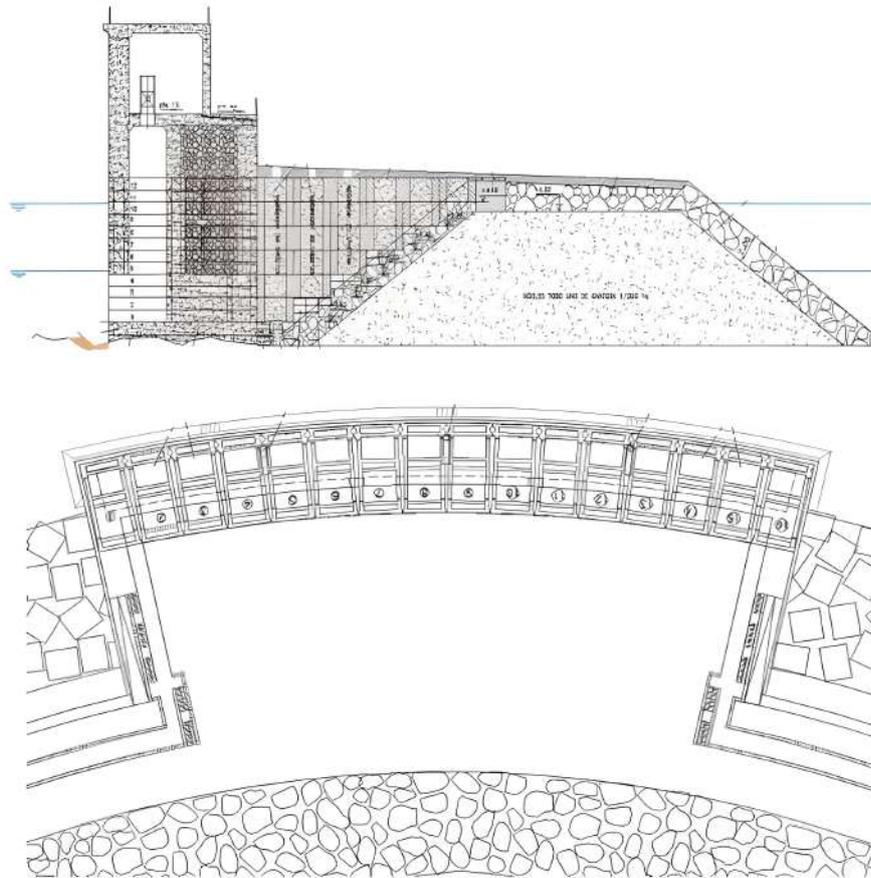
Fonte: (TORRE-ENCISO et al., 2009)

Após estudo da bibliografia para identificar qual tecnologia seria mais simples e não-disruptiva, chegou-se à topologia OWC. Uma vez decidida a tecnologia, foram contatados os Professores A. Falcão e A. Sarmiento do IST de Lisboa, já citados neste trabalho, para verificação da viabilidade do projeto. Feito isso, foi contatada a empresa Voith Hydro Wavegen, única empresa na Europa na época com experiência na execução de protótipos em larga escala de WECs do tipo OWC.

Após os estudos de fluxo de energia para decidir qual a melhor posição para a construção da planta, a Planta de Mutriku foi construída, consistindo de 16 câmaras de 18,5 kW de potência cada, totalizando uma capacidade total de 296 kW. Os custos totais de projeto ficaram na casa dos 2 milhões de Euros. A Figura 17 mostra as plantas de projeto de Mutriku.

O desenvolvimento foi realizado no contexto do Projeto EU OPERA H2020 (2016-2019), iniciativa promovida pela União Europeia com o propósito de diminuir o tempo de entrada da energia marítima ao mercado coletando, analisando e compartilhando dados operacionais e experiência de forma a validar e diminuir os riscos de novas tecnologias e assim diminuir os custos das mesmas no longo prazo. Dentre estas inovações, como cita (GATO; HENRIQUES; CARRELHAS, 2022), está a turbina birradial, proposta/desenvolvida no IST de Lisboa. O Projeto OPERA então deu suporte para a produção de um protótipo de 30 kW a ser aplicado em uma boia longarina. Mas antes foi estudado e analisado nas instalações do Laboratório de Fluxo Variável do IST e posteriormente nas instalações da Planta de Mutriku. A Figura 18 mostra a turbina birradial em seu comissionamento na Planta de Mutriku.

Figura 17 – Corte e vista superior do projeto da Planta de Mutriku.



Fonte: Adaptada de (TORRE-ENCISO et al., 2009)

Figura 18 – Turbina birradial OPERA durante o comissionamento na Planta de Mutriku.



Fonte: (GATO; HENRIQUES; CARRELHAS, 2022)

A turbina birradial é uma alternativa à turbina de impulso. Este modelo apresenta uma considerável redução das perdas devido às altas incidências do fluxo de ar comparadas as de Impulso, chegando a uma eficiência de 79%. Dentre outras qualidades estão sua característica compacta, confiabilidade e simplicidade mecânica, como relata (CARRELHAS, 2017).

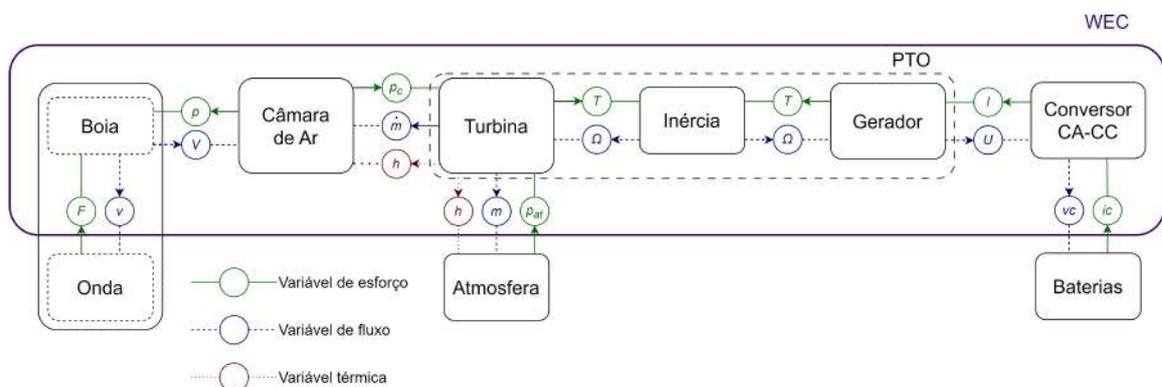
Ao fim dos testes realizados em Mutriku, se verificou que as turbinas Wells possuem uma operação próxima ao pico de eficiência para uma grande faixa de estados marítimos, porém com uma grande dispersão nos resultados. Já a turbina birradial mesmo não conseguindo apresentar sua maior eficiência, mostrou que na média, de uma faixa de operação de $1,0 \text{ kPa} < \Delta p < 4,8 \text{ kPa}$, apresentou uma eficiência média de 0,40 enquanto que, nas mesmas condições, a turbina Wells apresentou uma eficiência média de 0,59. Portanto a eficiência da turbina birradial mostrou que a eficiência pode ser até 50% superior, em dada situação, em comparação às turbinas Wells.

O presente trabalho irá utilizar os dados operacionais coletados nesse período em que a turbina birradial foi estudada em Mutriku, de julho de 2017 até junho de 2018, para o desenvolvimento e análise dos modelos matemáticos.

2.2 MODELAGEM DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO OWC

A WEC-OWC pode ser analisada por suas partes (HENRIQUES et al., 2016), as quais podemos subdividir entre incidência de onda, boia de longarina, câmara de ar, turbina, gerador e os componentes de tratamento da energia elétrica, conforme representado na Figura 19. Os modelos matemáticos de cada etapa serão vistos na sequência, de forma que os parâmetros de integração podem ser verificados através da pressão oscilatória relativa dentro da câmara p^* , da taxa de vazão do fluxo de ar da turbina \dot{m}_{turb} e do índice que define a eficiência da turbina k .

Figura 19 – Diagrama do modelo de geração OWC.



Fonte: Adaptado de (DUARTE, 2018)

2.2.1 Modelagem Hidromecânica

2.2.1.1 Câmara de Ar

A WEC-OWC possui um modelo matemático de movimento relativo baseado em um sistema de dois corpos, sendo a boia o corpo 1 e a interface ar-água o corpo 2 (representada por um pistão rígido). Ao acoplar os dois corpos, o movimento relativo causado pela incidência da onda cria forças dentro da câmara devido à interação entre as massas dos corpos e a geometria da boia. Esse movimento resulta em uma pressão interna na câmara que, conforme o dimensionamento da turbina e o deslocamento da boia, gera um fluxo de ar capaz de impor uma força nas hélices da turbina e, conseqüentemente, a rotação do eixo da mesma. O diagrama da Figura 20 mostra essa interação.

Figura 20 – Diagrama da interação da câmara de ar.



Fonte: Adaptado de (DUARTE, 2018)

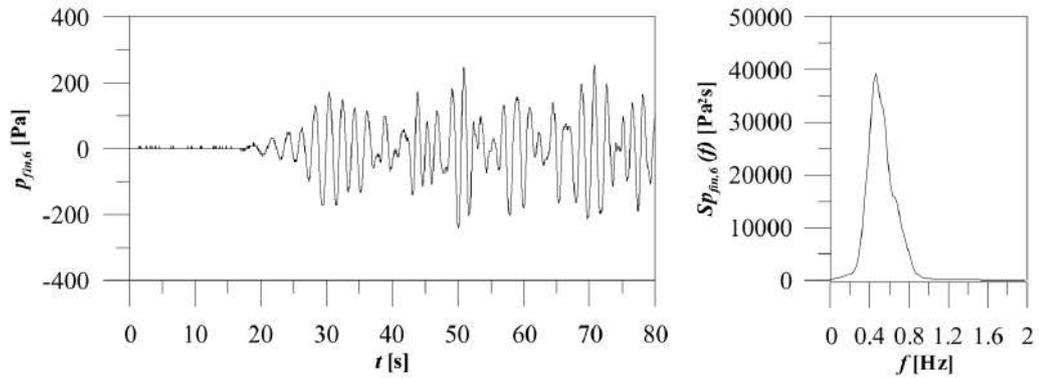
O movimento de cada um dos corpos depende da sua respectiva massa, da densidade da água, aceleração da gravidade, área de seção transversal do corpo em questão, da coordenada de deslocamento. Esta interação mar-boia não será desenvolvida neste trabalho. Contudo, compreende-se como se forma a pressão relativa dentro da câmara que é definida por p^* , a qual é dependente da pressão atmosférica p_{at} e da pressão p_c dentro da câmara, conforme (1).

$$p^* = \frac{p_c}{p_{at}} - 1 \quad (1)$$

Como é de se esperar, o comportamento da pressão dentro da câmara de ar segue as características senoidais das ondas, podendo, tipicamente, ter amplitudes de até 15 kPa e frequências de 0,5 a 2 Hz, como mostram trabalhos como o de (GARRIDO et al., 2015) e (SAMUEL; A; SUNDAR, 2019). Podemos ver na Figura 21 um exemplo. Dadas estas características, podemos considerar, uma vez olhando apenas para a pressão de entrada, que a mesma pode ser representada como um somatório de componentes senoidais como descrito em (2), onde p_i é a pressão, ω_i a velocidade angular e ϕ_i o ângulo, respectivamente, de cada uma das componentes harmônicas i .

$$p(t) = \sum_{i=1}^n p_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (2)$$

Figura 21 – Exemplo de um sinal de pressão de um OWC.

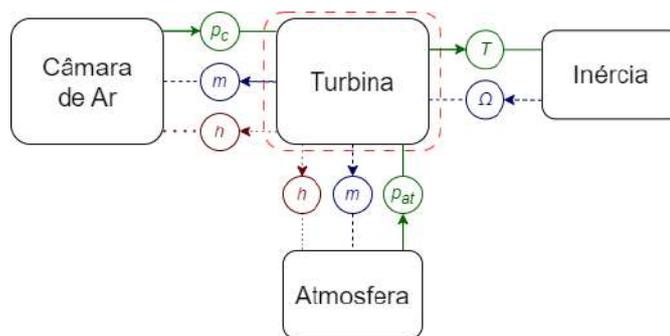


Fonte: (SAMUEL; A; SUNDAR, 2019)

2.2.1.2 Turbina

As características de desempenho da turbina são geralmente apresentadas em forma adimensional e o rendimento η_{turb} da turbina é determinado pela Equação (6) a qual relaciona os valores da pressão estática *pressure head* adimensional Ψ , a taxa de fluxo adimensional da turbina Φ e a potência adimensional da turbina Π por meio das equações (3), (4) e (5), respectivamente (HENRIQUES et al., 2016). Elas são resultantes da interação das variáveis que relacionam turbina com a atmosfera, a câmara de ar e o momento de inércia (esta, que relaciona a turbina e o gerador), como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Diagrama da interação da turbina.



Fonte: Adaptado de (DUARTE, 2018)

A adimensional de pressão, Ψ , relaciona a pressão atmosférica p_{at} , a pressão relativa p^* , a densidade de entrada do ar na turbina ρ_{in} , rotação Ω e diâmetro do rotor D através da equação (14), verifica-se que o aumento de rotação Ω representa uma redução no valor de Ψ , enquanto que o aumento da pressão relativa representa um acréscimo deste valor. A pressão relativa é apresentada através de (1) e demonstra uma dependência da altura incidente da onda e dos valores de pressão dentro da câmara. Dessa forma, a altura da onda incidente representará um aumento da pressão interna na câmara e o aumento da

rotação da turbina reduzirá a pressão e, por conseguinte, aumentará a altura do fluido dentro da câmara.

A taxa de fluxo de ar adimensional da turbina Φ é dependente da taxa de fluxo de ar deslocada \dot{m}_{turb} e da rotação Ω , enquanto a potência adimensional da turbina Π relaciona a potência da turbina P_{turb} , rotação Ω , diâmetro D e a densidade do ar ρ_{in} .

$$\Psi = \frac{p_{at} p^*}{\rho_{in} \Omega^2 D^2} \quad (3)$$

$$\Phi = \frac{\dot{m}_{turb}}{\rho_{in} \Omega D^3} \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{P_{turb}}{\rho_{in} \Omega^3 D^5} \quad (5)$$

$$\eta_{turb} = \frac{\Pi}{\Phi \Psi} \quad (6)$$

A densidade do ar ρ_{in} é representada pela equação (7), que relaciona a pressão atmosférica com o índice politrópico k , ou seja a relação térmico-dinâmica entre pressão e volume, é determinado por meio da equação (8). É sabido que o calor específico do ar é $\gamma = 1,4$, o qual representa a taxa de transferência calor do ar (HENRIQUES et al., 2016).

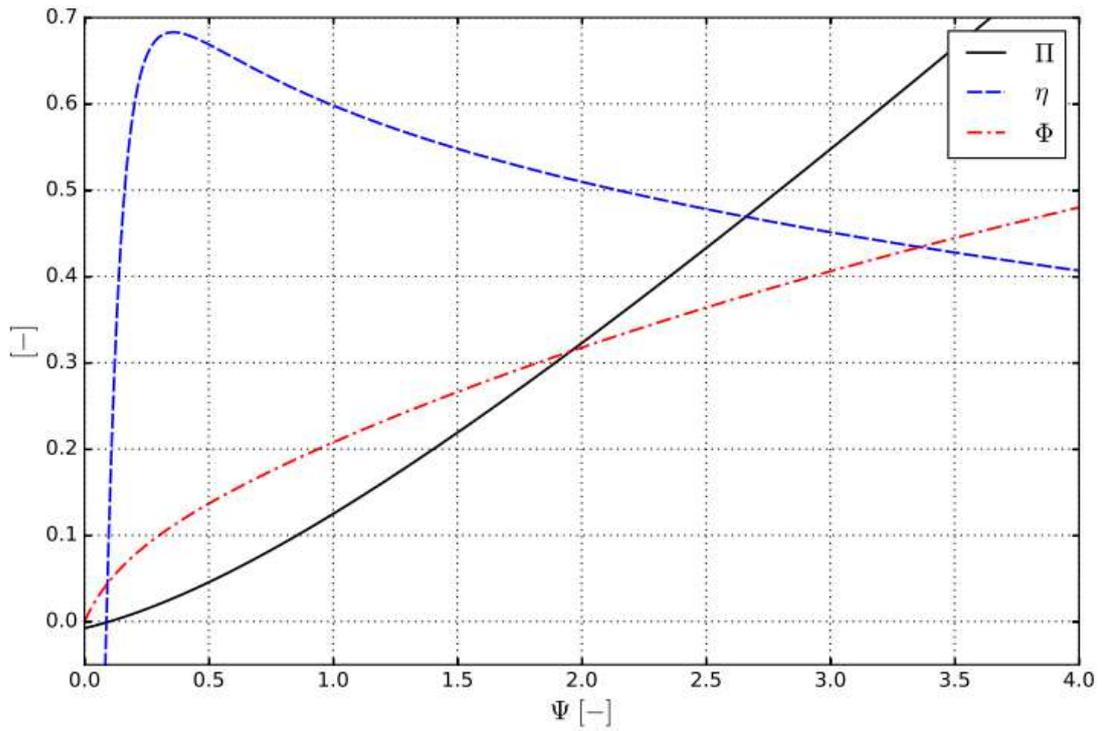
$$\rho_{in} = \rho_{at} \max(p^* + 1.1)^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

$$k = \frac{1}{1 - \frac{\gamma-1}{\gamma} \eta_{turb}} \quad (8)$$

Na Figura 23 podemos ver como exemplo as grandezas adimensionais Π , Φ e η em função de Ψ , obtidas de uma turbina birradial.

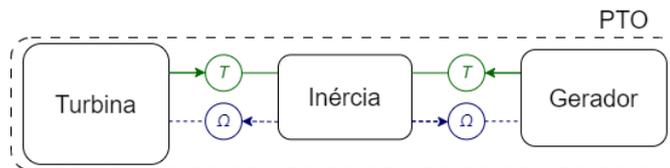
Por fim, a dinâmica mecânica da turbina e do gerador é determinada pela equação (9), exemplificada pela Figura 24, que relaciona o momento de inércia I do sistema, obtido a partir de (10) pela soma do momento de inércia da turbina I_{turb} e o momento de inércia do gerador I_{ger} , a aceleração angular $\dot{\Omega}$ e a diferença entre os valores instantâneos de conjugado do gerador e o conjugado da turbina, este último representado pela equação (11).

Figura 23 – Relação entre as grandezas adimensionais Π , Φ e η com Ψ .



Fonte: (DUARTE, 2018)

Figura 24 – Diagrama da interação entre turbina e gerador.



Fonte: Adaptado de (DUARTE, 2018)

$$I\dot{\Omega} = T_{turb} - T_{ger} \quad (9)$$

$$I = I_{turb} + I_{ger} \quad (10)$$

$$T_{turb} = \rho_{atm} \Omega^2 D^5 \Pi \quad (11)$$

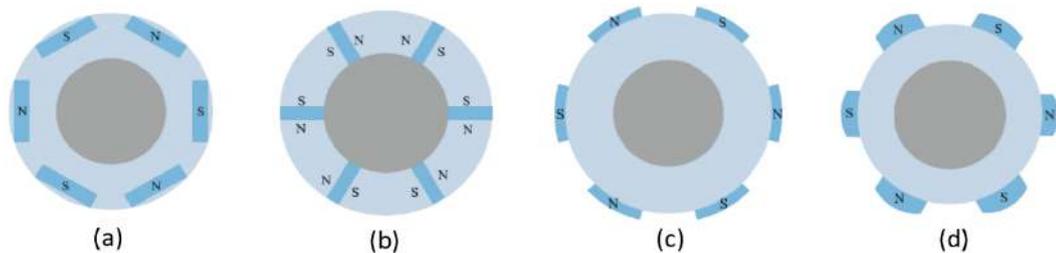
2.2.2 Modelagem Elétrica

2.2.2.1 Gerador

Em seu estudo, (SANTOS, 2021) chega à conclusão que uma máquina síncrona rotativa de ímãs permanentes é a melhor alternativa para a aplicação em sistemas do tipo OWC, principalmente por considerar fatores como rendimento, densidade de potência e a não utilização de anéis comutadores e escovas. Quanto ao uso dos ímãs, sabe-se que devem ser tomadas as devidas precauções para que os mesmos não sejam expostos ao ar altamente salino que estarão submetidos.

Na análise, vê-se no trabalho de (FANG; WANG, 2016) a comparação entre geradores síncronos de ímãs permanentes diferenciados pela topologia do rotor, são eles: rotor com ímãs enterrados (Figura 25(a)), tangenciais (Figura 25(b)), de superfície (Figura 25(c)), e de superfície excêntricos (Figura 25(d)). No artigo é avaliado o desempenho dessas máquinas com o mesmo volume de ímãs permanentes para aplicação em geração de energia elétrica a partir das ondas marítimas. Observou que a topologia apresentada na Figura 25(c) é a que apresenta maior potência de saída, seguida pela máquina com ímãs enterrados, ímãs com excentricidade e tangenciais. Destaca-se que o volume de ímã permanentes é mantido constante para as quatro topologias. Isso significa que a máquina com ímãs de superfície faz um melhor aproveitamento dos ímãs permanentes. Segundo os autores estudados, quanto ao rendimento das máquinas, todas apresentam um rendimento próximo a 97%. Portanto, esse não foi um critério preponderante para a escolha da topologia.

Figura 25 – Topologias de rotores com ímãs permanentes.



Fonte: (FANG; WANG, 2016)

O desempenho da turbina é dependente de certos fatores como tamanho e modelo de turbina e gerador (HENRIQUES et al., 2016). Dessa forma, a otimização da potência do gerador pode ser simplificada de acordo com a equação (12), considerando que o modelo de tomada de forças PTO consiste em uma turbina birradial acoplada a um gerador com controle de potência convertida. Conforme esta, a potência da turbina é proporcional a Ω^b e, segundo (HENRIQUES et al., 2016) o valor do expoente b deve ser aproximadamente

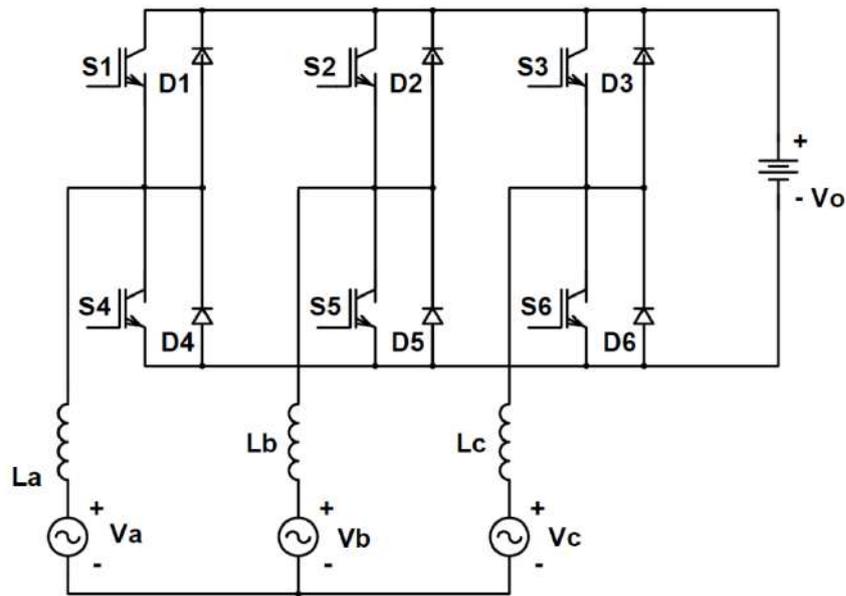
igual a 3 para a maximização da potência do gerador, enquanto a representa a constante geral da lei de controle do gerador.

$$P_{ger} = a\Omega^b \quad (12)$$

2.2.2.2 Conversores CA-CC

Em seus estudos, (SANTOS, 2021) verificou que os retificadores Boost unidirecionais são a topologia mais utilizada para substituir um retificador a diodos quando se necessita de um alto fator de potência, uma taxa de distorção harmônica baixa e a possibilidade de regulagem da tensão de saída CC mesmo com oscilações na tensão induzida no gerador. Essa topologia é também usada para aplicações de controle de velocidade de motores e em fontes de alimentação. A Figura 26 exemplifica o modelo utilizado no trabalho de (SANTOS, 2021).

Figura 26 – Retificador Boost trifásico de 2 níveis bidirecional.



Fonte: (BORGONOVO, 2005)

Em (BORGONOVO, 2005) são apresentadas as seguintes conclusões sobre as diversas topologias de retificadores:

- os retificadores passivos são mais simples e robustos, porém não há possibilidade de controle da tensão de saída;
- os circuitos que utilizam modulação PWM apresentam correntes com formato senoidal, com apenas uma ondulação de alta frequência devido à comutação dos dispositivos semicondutores, que pode ser atenuada após processo de filtragem;

- os retificadores que operam em altas frequências possuem menor volume e peso;
- a modulação PWM possibilita uma melhor regulação da tensão de saída;
- nos inversores de três níveis apenas metade do valor da tensão de saída fica sobre o interruptor, o que em aplicações de alta tensão de saída se torna uma excelente alternativa. Porém, o controle da tensão nos bancos de capacitores se torna necessário.

Quando uma aplicação demanda fluxo bidirecional de energia, ou seja, fluir energia do lado CA para o lado CC, e vice-versa, podem ser utilizadas topologias de retificadores Boost bidirecionais. São utilizados, por exemplo, em guindastes, elevadores e UPSs (*Uninterruptible Power Supply*). Nessa topologia, o controle da tensão no barramento CC define os valores das correntes de alimentação, permitindo assim o controle do fator de potência do conversor, de forma que esse valor pode excursionar entre 0 e 1. O controle PWM possibilita que a corrente de alimentação CA tenha formato próximo a uma senoide. Esse circuito também permite que, em um único estágio, a potência convertida seja regulada.

Embora para a aplicação pretendida neste trabalho não necessite seguir normas de nenhuma concessionária de energia relacionadas a qualidade da energia gerada, torna-se interessante trabalhar com um fator de potência unitário, ou próximo da unidade. Do ponto de vista da máquina elétrica, um fator de potência unitário diminui a potência aparente nominal do gerador, o que se traduz em uma máquina menor, mais leve, e com custo menor de produção. Essa topologia permite que seja regulada a potência convertida em apenas um estágio de conversão e, conforme já mencionado, permite que se opere com fator de potência unitário no gerador e com baixa distorção harmônica total na corrente. A operação com baixa distorção harmônica foi considerada na etapa de projeto da máquina por (SANTOS, 2021). O controle proposto depende apenas da componente fundamental da corrente e tensão na sua operação. Dessa forma, pretende-se obter corrente e tensão do gerador com formato senoidal.

Neste trabalho será utilizado o conversor mostrado na Figura 26, em função das vantagens aqui discutidas e sua modelagem será abordada no próximo capítulo.

2.2.2.3 Métodos MPPT

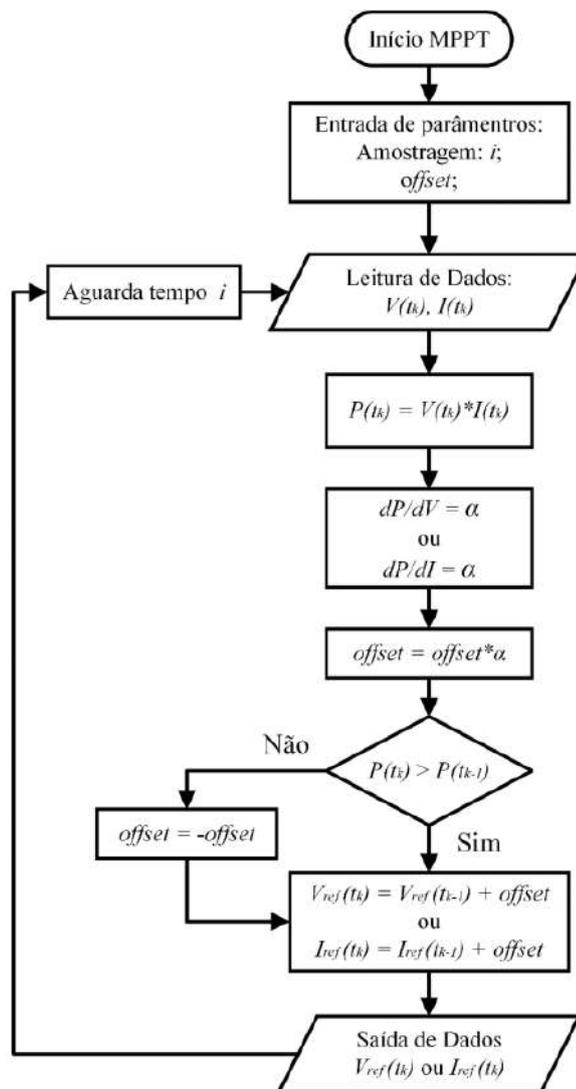
Os métodos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) são um conjunto de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência e são amplamente usadas em sistemas que buscam maximizar a geração de energia elétrica. Usualmente essas técnicas já são implementadas em sistemas de geração eólica e fotovoltaica, porém ainda são pouco estudadas no campo da geração de energia elétrica através das ondas marítimas.

Em seu estudo bibliográfico, (WERMANN, 2021) constatou que os métodos mais

simples e comuns para maximizar a geração de energia elétrica são o P&O Convencional e o P&O Adaptativo, que consistem basicamente em alterar um valor de referência com uma *offset* e observar como esta mudança altera nossa variável de interesse, fazendo isso de forma a atingir o MPP (*Maximum Power Point*). No método adaptativo, a diferença está justamente na proporcionalidade do *offset* para com a distância do MPP, sendo cada vez menos a medida que se aproxima deste.

O fluxograma do método P&O adaptativo pode ser visto na Figura 27. cuja única mudança para o P&O convencional está no tamanho do *offset*, que será adaptado conforme o valor da derivada.

Figura 27 – Fluxograma do método MPPT P&O com perturbação adaptativa.



Fonte: (WERMANN, 2021)

2.3 HARDWARE-IN-THE-LOOP

O desenvolvimento de sistemas denominados *Hardware-in-the-Loop* (HIL) iniciou no século 20 como uma alternativa para validação de sistemas em casos que estes são muito caros, perigosos ou até impossíveis de serem realizados em ambientes reais, como, por exemplo, o setor automobilístico, ferroviário e aeroespacial, como cita (BRAYANOV; STOYNOVA, 2019). Tais condições trouxeram consigo algumas vantagens como aplicação de modelos matemáticos complexos, características reais de ruído, banda morta, histerese e folga mecânica.

A metodologia HIL é amplamente utilizada na indústria com o objetivo de emular sistemas físicos para redução de custos e aumento de confiabilidade. Ela é uma alternativa mais barata que as aplicações em tamanho real (ou escala) e mais confiável que as simulações puramente baseadas em software.

A flexibilidade do HIL permite o uso de dispositivos reais e simulados que, integrados entre si, são capazes de proporcionar um entendimento maior do projeto e as interdependências entre seus sistemas. A Figura 28 mostra o exemplo de uma configuração de um sistema HIL.

Figura 28 – Exemplo de um sistema HIL.



Fonte: Adaptado de (BRAYANOV; STOYNOVA, 2019)

Através da metodologia HIL, portanto, é possível criar com elevado grau de fidelidade o movimento das WEC-OWC sem a necessidade de um dispositivo físico real e de alto custo. Da mesma forma, o estudo de geradores em alto mar pode ser emulado em laboratório, pois os modelos de onda e determinados sistemas podem ser equacionados e aplicados através do HIL. Essa metodologia, portanto, demonstra-se ainda mais importante e flexível sendo possível avaliar o sistema boia-turbina para qualquer tipo de onda em qualquer lugar, desde que os modelos matemáticos do movimento de ondas da região de interesse estejam disponíveis.

Dentre os desafios existentes para o desenvolvimento de geradores de energia por ondas, são considerados o custo de implementação, a grande variação de movimento das ondas e a condição *offshore* em que muitas vezes estes dispositivos são empregados. O desenvolvimento de sistemas conversores de energia por ondas WEC-OWC, portanto, apresentam um desafio técnico ao considerar suas condições de aplicações e a necessidade de simulações complexas existente na interação entre o conversor de energia das ondas, os controladores e projeto de sistemas de PTO que, muitas vezes, são difíceis de reproduzir

em simulação. Ao utilizar plataformas de ensaios HIL em tais aplicações, as simulações podem ser realizadas em terra diretamente no equipamento, contornando o desafio da análise em ambiente oceânico ou marítimo e permitindo a substituição de apenas uma determinada etapa ou parte do projeto por um ambiente virtual, conectado ao dispositivo real. Tal condição permite reduzir custos de projeto, além de viabilizar o desenvolvimento de sistemas complexos de forma mais fácil e ágil.

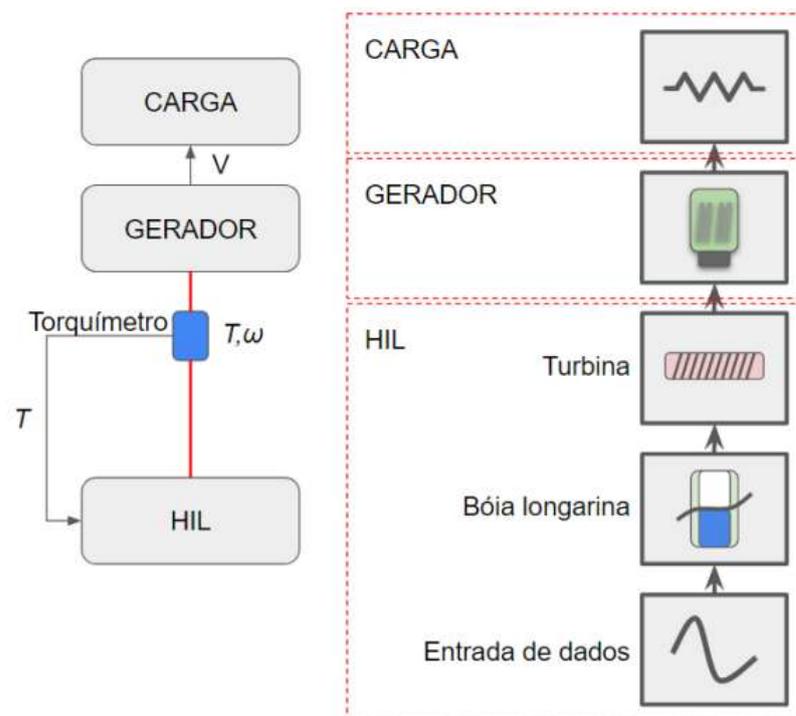
Para exemplificar o uso de HIL em WECs, pode-se considerar que em estados do mar muito energéticos, o sistema de geração elétrica pode ser incapaz de impor um conjugado eletromagnético e a velocidade de rotação tende a ultrapassar um determinado limite definido pelo gerador. Para estes casos, a taxa de fluxo de ar através da turbina aumenta (HENRIQUES et al., 2016), reduzindo a pressão interna na câmara. Sendo assim, O HIL de uma boia de longarina OWC representa uma estratégia adequada para validar algoritmos de controle capazes de garantir a operação do sistema dentro de limites seguros. O HIL também permite a integração de modelos em escalas diferentes, além de possibilitar a análise de dados em laboratório a um custo reduzido (HENRIQUES et al., 2016).

No trabalho realizado por (ASSENHEIMER, 2021) implementou-se um sistema HIL capaz de emular um OWC composto de onda, boia e turbina, reproduzindo um conjugado gerado pela turbina através de servomotor, o qual foi acoplado a um gerador síncrono de ímãs permanentes que, por conseguinte, foi conectado a uma carga. Os cálculos dos valores relacionados às ondas e por conseguinte, pelo torque do servomotor seguiam as curvas do trabalho de (HENRIQUES et al., 2016), apresentados na Figura 37.

3 SOLUÇÃO PROPOSTA

O trabalho visa criar um modelo que emule o sistema pneumático-mecânico de uma OWC do tipo boia longarina, sistema que tem como função fornecer energia elétrica aos dispositivos eletrônicos responsáveis por medições de grandezas monitoradas em estações meteorológicas localizadas em diversos lugares do oceano, transmitindo-as a um centro de coleta de dados. Com este modelo será possível criar um sistema HIL para testar experimentalmente os componentes elétricos (gerador, circuitos eletrônicos e controle) do sistema de geração, como exemplificado na Figura 29.

Figura 29 – Blocos de funcionamento do WEC-OWC emulado.



Fonte: (ASSENHEIMER, 2021)

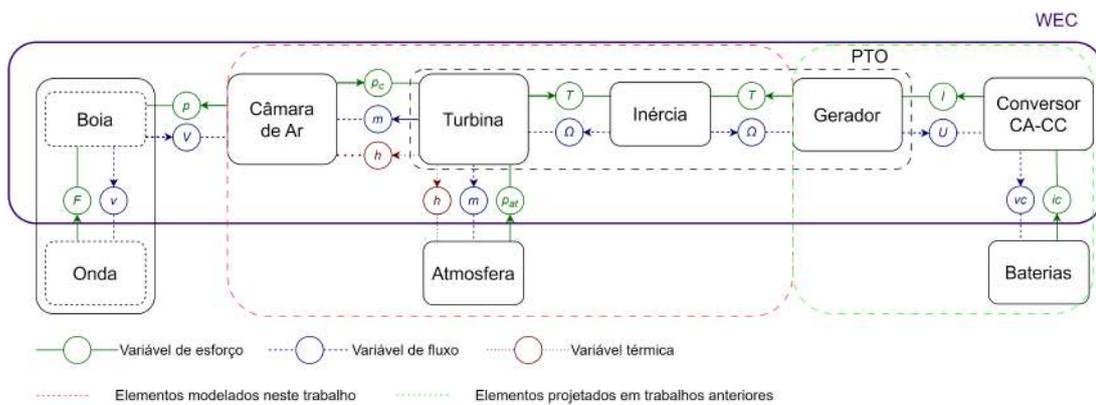
O principal objetivo técnico deste trabalho é a elaboração de um modelo matemático do sistema pneumático-mecânico dado pela relação da câmara de ar e a turbina e adicionar este ao modelo dos componentes elétricos do sistema, indicado no quadro HIL da Figura 29. Não será considerado a relação onda marítima e boia/câmara de ar, pois necessitaria modelagem numérica e adicionaria complexidade e elevada capacidade de processamento aos modelos.

Para a realização das análises serão utilizados os trabalhos anteriores de (SANTOS, 2021) e das otimização de (WERMANN, 2021) e (ASSENHEIMER, 2021) para elaboração da parte elétrica: gerador, conversor CA-CC, controlador, método MPPT (adequado para este trabalho). Para o sistema de conversão de energia elétrica, foi realizado também o

estudo e a modelagem de um conversor CA-CC, juntamente com o projeto do sistema de controle.

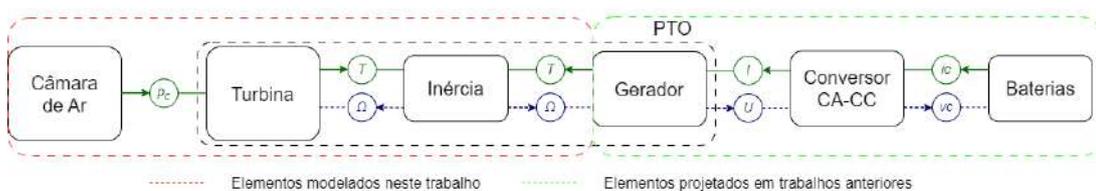
Estipulados esses fatores, o sistema final é composto por: uma boia de coluna de água oscilante; uma turbina birradial; um gerador elétrico; um conversor CA-CC; um sistema de controle; banco de baterias; e, por fim, a carga. Na Figura 30 é apresentada uma visão geral do modelo do sistema de geração, subdividindo elementos projetados em trabalhos anteriores e elementos modelados neste trabalho. Já na Figura 31 podemos ver o sistema final proposto, evidenciando as partes novas incluídas por este trabalho e os trabalhos anteriores.

Figura 30 – Diagrama destacando o que será abordado neste trabalho.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Diagrama do sistema proposto.

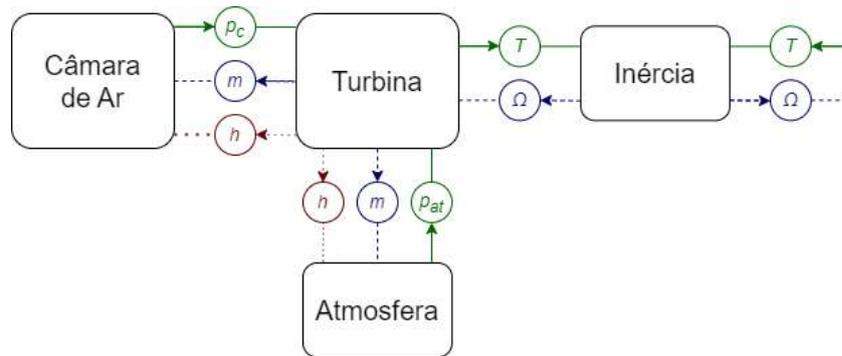


Fonte: Autor.

3.1 MODELO HIDRODINÂMICO SIMPLIFICADO

O intuito de se incluir a relação pneumática-mecânica na modelagem é a de se representar um comportamento mais realístico com relação à velocidade de rotação da turbina/gerador como função da variação de pressão que se observa na câmara de ar de uma boia do tipo longarina, com interação entre os elementos dos sistema como mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Diagrama da relação pneumática-mecânica.



Fonte: Autor.

As modelagens e análises serão realizadas a partir dos dados obtidos pelo Projeto OPERA, com a turbina birradial desenvolvida pelo IST da Universidade de Lisboa, como descrito em (GATO; HENRIQUES; CARRELHAS, 2022). Na Tabela 1 são listadas as especificações da turbina utilizada.

Tabela 1 – Especificações da turbina birradial do Projeto OPERA.

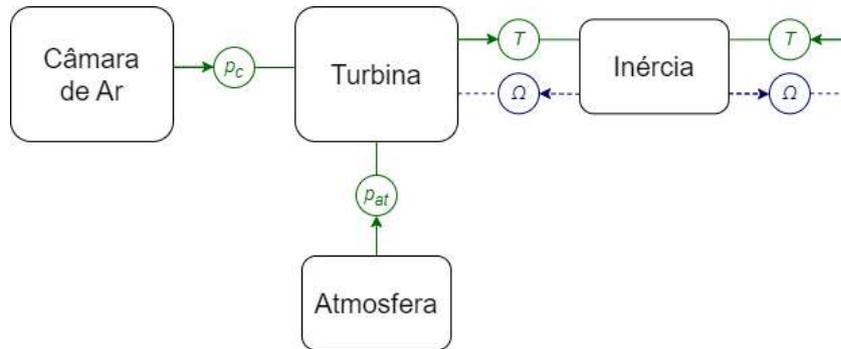
Simbologia	Definição
Posição de montagem	Eixo Vertical
Velocidade Angular Máxima	3600 [rpm]
Diâmetro do Rotor da Turbina	0,5 [m]
Diâmetro do Estator da Turbina	2,1 [m]
Número de lâminas no rotor	7
Tipo de distribuidor	Linha dupla de palhetas-guia
Número de palhetas-guias	64 por linha
Inercia do rotor da Turbina	5,01 [kg.m ²]

Fonte: (GATO; HENRIQUES; CARRELHAS, 2022)

3.1.1 Projeto do Modelo Pneumático-Mecânico

A modelagem implementada é simplificada por conta de não se incluir ao modelo hidrodinâmico que representa as ondas marítimas e sua interação com a boia longarina. O modelo implementado considera já a variação de pressão dentro da câmara de ar que fica interna à boia. Com isso antes o modelo pneumático-mecânico fica com a estrutura conforme exemplificado na Figura 33.

Figura 33 – Diagrama da relação pneumática-mecânica simplificado.



Fonte: Autor.

Para se determinar o comportamento dinâmico do sistema do diagrama proposto na Figura 33, é necessário solucionar a equação diferencial ordinária descrita em (9). A seguir, as equações (13), (14), (15) demonstram a resolução da mesma.

$$\Omega I \dot{\Omega} = \Omega T_{turb} - \Omega T_{ger} \quad (13)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{I} (T_{turb} - T_{ger}) \quad (14)$$

$$\Omega = \int \frac{1}{I} (T_{turb} - T_{ger}) dt \quad (15)$$

A princípio a equação é de resolução simples; entretanto, é necessário calcular o torque da turbina considerando as relações estabelecidas nas equações (3) a (8). Para tanto, são utilizados de dados experimentais para que se possa obter a correlação entre Ψ e as variáveis adimensionais Φ e Π , conforme indicado em (16) e (17). Considerando isso, o conjugado da turbina pode ser obtido por (18).

$$\Pi = \Pi(\Psi) \quad (16)$$

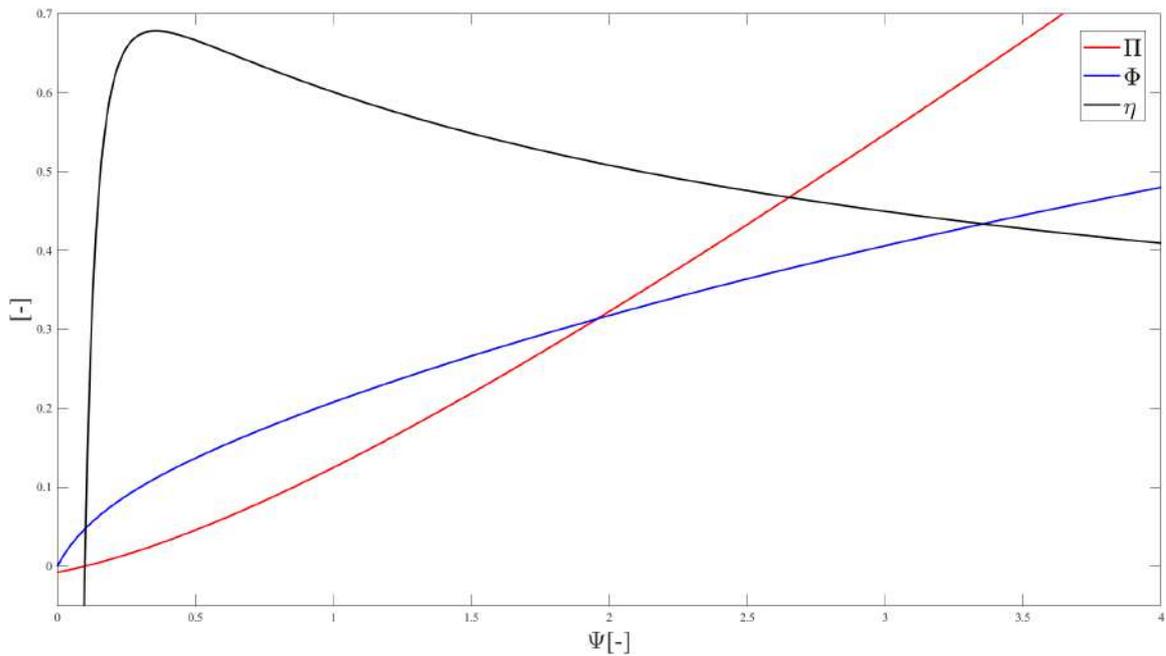
$$\Phi = \Phi(\Psi) \quad (17)$$

$$T_{turb} = \rho_{atm} \Omega^2 D^5 \Pi(\Psi(t)) \quad (18)$$

Para se obter as correlações de (16) e (17), foram utilizados os dados experimentais realizados pelo Projeto OPERA, utilizando-se de uma turbina birradial desenvolvida pelo IST da Universidade de Lisboa e testado na Planta de Mutriku, no norte da Espanha,

como descrito na Seção 2.1.1.4. Na Figura 34 observa-se a correlação entre as gradezas, obtidas a partir dos dados de campo obtidos em Mutriku, onde já fornecem os valores de Φ e Π em tempo real. Destas curvas podemos fazer uma regressão polinomial, como a sugerida em (19) e (20).

Figura 34 – Relação entre as grandezas adimensionais Π , Φ e η com Ψ da turbina birradial do Projeto OPERA.



Fonte: Autor.

$$\Pi(\Psi) = \left(\frac{a_{pi} + b_{pi}\Psi + c_{pi}\Psi^2}{d_{pi} + e_{pi}\Psi + f_{pi}\Psi^2 + g_{pi}\Psi^3} \right) \quad (19)$$

$$\Phi(\Psi) = \left(\frac{a_{phi} + b_{phi}\Psi + c_{phi}\Psi^2}{d_{phi} + e_{phi}\Psi + f_{phi}\Psi^2 + g_{phi}\Psi^3} \right) \quad (20)$$

A partir de operações de regressão foi possível obter as seguintes equações.

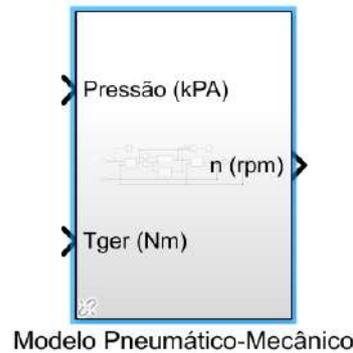
$$\Pi(\Psi) = \left(\frac{-8311615,56473 + 69022248,16\Psi + 136450487,222\Psi^2}{1067882948,21 + 512641214,194\Psi + 76229,083\Psi^2 + \Psi^3} \right) \quad (21)$$

$$\Phi(\Psi) = \left(\frac{539581725,354\Psi + 638407403,112\Psi^2}{844010065,844 + 4360645489,11\Psi + 468212474,631\Psi^2 + \Psi^3} \right) \quad (22)$$

3.1.2 Modelo para Estudo

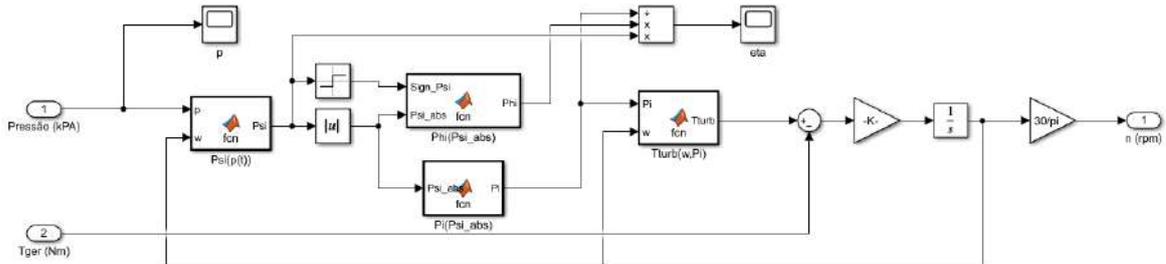
Uma vez definida a forma de solução da equação (15) e estabelecida a relação (16) para resolver (18), implementou-se um diagrama de blocos no software Matlab®/Simulink® (2022) onde são realizados os cálculos de conjugado da turbina e consequentemente da velocidade do sistema a partir da pressão de entrada. O diagrama final fica exemplificado nas Figuras 35 e 36.

Figura 35 – Bloco do modelo pneumático-mecânico



Fonte: Autor.

Figura 36 – Diagrama do modelo pneumático-mecânico.



Fonte: Autor.

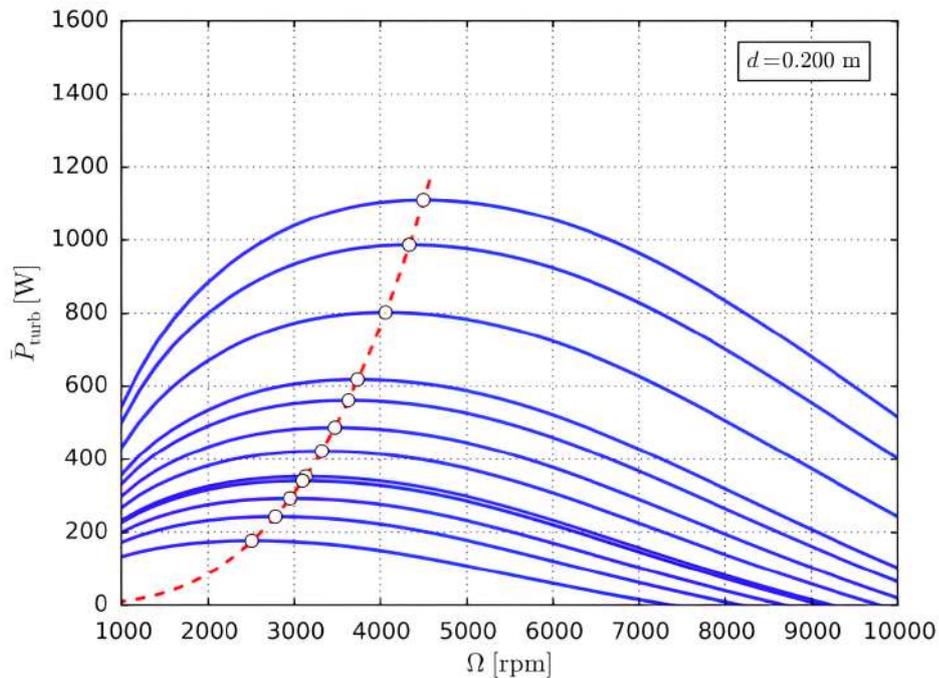
3.2 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE GERAÇÃO

Essa seção tem por finalidade mostrar as etapas realizadas para o projeto do sistema de conversão de energia escolhido. Serão abordados aspectos do projeto e da modelagem do gerador elétrico, assim como da modelagem do conversor CA-CC e do cálculo dos controladores.

O projeto do gerador e do conversor estático é tratado em (SANTOS, 2021). É importante destacar que o sistema de geração neste trabalho é projetado levando em conta

as curvas expressas na Figura 37, apresentadas por (HENRIQUES et al., 2016). Logo seu projeto não foi feito considerando uma turbina específica, como a do Projeto OPERA, para o qual se tem acesso a dados experimentais. Ainda assim, se considera que há compatibilidade a ponto de permitir a integração dos modelos pneumático-mecânico e dos componentes do sistema elétrico projetados em (SANTOS, 2021), e analisar o comportamento dos sistemas integrados.

Figura 37 – Potência da turbina para diversas condições de ondas.



Fonte: (HENRIQUES et al., 2016)

3.2.1 Modelo do Gerador

Para o dimensionamento do gerador, (SANTOS, 2021) definiu algumas premissas de projeto. Foi selecionada uma máquina síncrona de ímãs permanentes dedicada para a aplicação do sistema de geração proposto. As tensões nominais, potência, conjugado, velocidade de operação, fator de potência e rendimento deste gerador são apresentadas na Tabela 2.

Destaca-se que a velocidade de rotação pode chegar em até 10.000 rpm; porém, como o sistema de controle tem como função maximizar a potência convertida, a velocidade de rotação nominal foi fixada em torno de 4.500 rpm. Para não se ter perdas magnéticas elevadas, optou-se por uma máquina de dois polos, uma vez que com um número reduzido de polos a frequência para uma dada velocidade de rotação será menor, obtendo-se menores perdas magnéticas para um dado material ferromagnético macio, utilizado no projeto do gerador. O fator de potência é considerado unitário na entrada do conversor CA-CC por

se tratar de uma topologia com correção de fator de potência, como será demonstrado no capítulo de análise dos resultados.

Tabela 2 – Especificações de projeto do gerador.

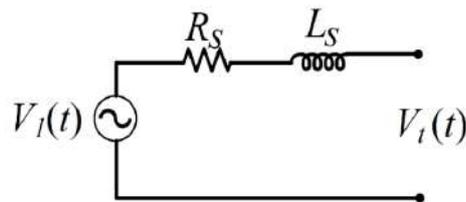
Simbologia	Definição	Valor
T	Conjugado Nominal	10 [N.m]
n_m	Velocidade Angular Mecânica Nominal	4500 [rpm]
P	Potência Mecânica Nominal	4712 [W]
η	Rendimento	90 [%]
$\cos\phi$	Fator de Potência	1
p	Número de Polos	2 polos

Fonte: (SANTOS, 2021)

A tensão de barramento CC foi definida como 180 V, conseqüentemente a tensão de linha máxima é também 180 V (restrição imposta pela utilização do retificador Boost PWM trifásico). Para uma ligação em estrela no gerador, a tensão de fase será de 103,9 V e a tensão de fase eficaz igual a aproximadamente 73,5 V. A fim de se evitar problemas de sobremodulação, definiu-se a tensão de fase nominal em 65 V.

O circuito equivalente do gerador por fase é apresentado na Figura 38, onde $V_1(t)$ é a componente fundamental da tensão induzida, R_S é a resistência elétrica de fase do enrolamento, L_S é a indutância síncrona e $V_t(t)$ é a tensão terminal. Os valores dos parâmetros do circuito equivalente foram obtidos através da modelagem do gerador aplicando-se um modelo numérico em elementos finitos. A amplitude da componente fundamental da tensão induzida a vazio é de 95,93 V, então tem-se o valor eficaz da componente fundamental da tensão induzida em aproximadamente 67,8 V em 4500 rpm. A resistência por fase é de 0,0638 Ω e a indutância síncrona da máquina é de 2,385 mH. Os demais dimensionamentos e parâmetros do gerador estão detalhados em (SANTOS, 2021).

Figura 38 – Circuito de regime permanente equivalente por fase do gerador.



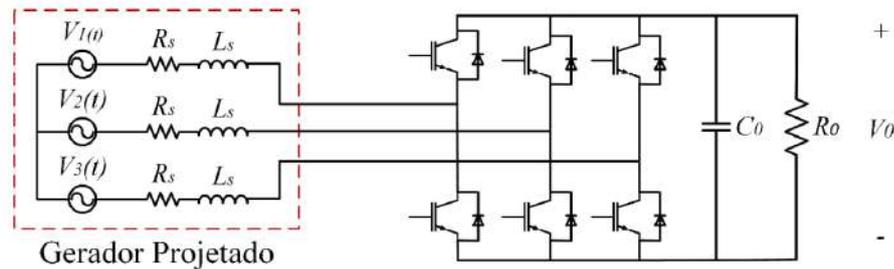
Fonte: (SANTOS, 2021).

3.2.2 Modelo do Conversor CA-CC

Considerando que a aplicação do projeto é a alimentação de um banco de baterias e uma carga em corrente contínua, faz-se necessário o uso de um conversor CA-CC trifásico. Para obter resultados de conversão como baixo fator de potência e baixa distorção harmônica de corrente, optou-se pelo uso de um conversor Boost PWM CA-CC trifásico bidirecional totalmente controlado com correção de fator de potência. O controle do circuito é feito com o uso de controladores PI devido a facilidade de implementação.

Em (SANTOS, 2021) é apresentada uma análise detalhada da obtenção dos parâmetros relativos à modelagem do circuito do conversor, que tiveram como base os métodos discutidos por (BORGONOVO, 2005). A Figura 39 apresenta o circuito considerado para a modelagem, onde a tensão induzida de fase, as resistências elétricas de enrolamento e as indutâncias síncronas por fase representam o circuito equivalente trifásico do gerador. O sistema é composto ainda pelo retificador PWM que contém 6 chaves estáticas ativas S e 6 diodos em antiparalelo com cada chave ativa, além de um capacitor C_0 e uma resistência de carga R_0 , com tensão de saída de barramento de V_0 .

Figura 39 – Modelo do elementos de potência do gerador e do conversor.



Fonte: (SANTOS, 2021).

Para a modelagem do circuito, considera-se uma alimentação senoidal e equilibrada e que as tensões de fase podem ser representadas de acordo com as funções dadas em (23), onde V_p é a tensão de pico de fase.

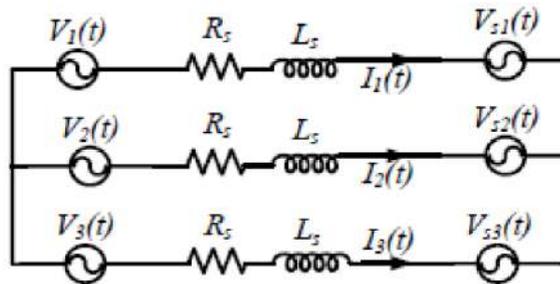
$$\begin{cases} V_1(t) = V_p \cdot \cos(\omega t) \\ V_2(t) = V_p \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ V_3(t) = V_p \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{cases} \quad (23)$$

A modelagem foi desenvolvida separando as correntes em eixo direto e em quadratura, aplicando-se a transformada de Park, com o objetivo de obter a função de transferência das correntes em função das razões cíclicas trifásicas D_1 , D_2 e D_3 , que formam o PWM e com a tensão de saída V_0 . Para obter tal relação, considera-se o circuito da Figura 40, que é um circuito simplificado do conversor acoplado com o gerador. Assim, expandindo-se para as demais chaves, tem-se a relação (24), e considerando uma tensão de saída

constante, o circuito equivalente do gerador acoplado ao conversor pode ser representado pela Figura 40.

$$\begin{cases} V_{s1}(t) = V_0 D_1(t) \\ V_{s2}(t) = V_0 D_2(t) \\ V_{s3}(t) = V_0 D_3(t) \end{cases} \quad (24)$$

Figura 40 – Circuito equivalente do conversor acoplado ao gerador.



Fonte: (SANTOS, 2021).

Necessita-se para o sistema de controle obter a função de transferência da tensão de saída em função das correntes de eixo direto $I_d(t)$ e de eixo em quadratura $I_q(t)$. Em (SANTOS, 2021), é feita uma análise por malhas do circuito da Figura 40 e é aplicada a transformada de Park para obter-se o novo sistema de coordenadas de eixo direto e em quadratura. Sabendo que se busca um fator de potência unitário, ou seja, $I_q = 0$, a função de transferência da tensão de saída $v_o(s)$ depende apenas da corrente de eixo direto $i_d(s)$ e é dada pela equação (25), onde $P_0 = \frac{P_{in}}{\eta} = \frac{V_d I_d}{\eta}$ é a potência de entrada ativa e η é o rendimento do conversor. É importante salientar que essa modelagem não considera a resistência de fase do gerador. No entanto, em geral o valor desta resistência não afeta significativamente o desempenho do sistema.

$$\frac{v_o(s)}{i_d(s)} = \frac{\sqrt{3}V_p R_0}{\sqrt{2}V_0} \frac{1 - \frac{s2L_s P_0 \eta}{3sV_p^2}}{1 + sR_0 C_0} \quad (25)$$

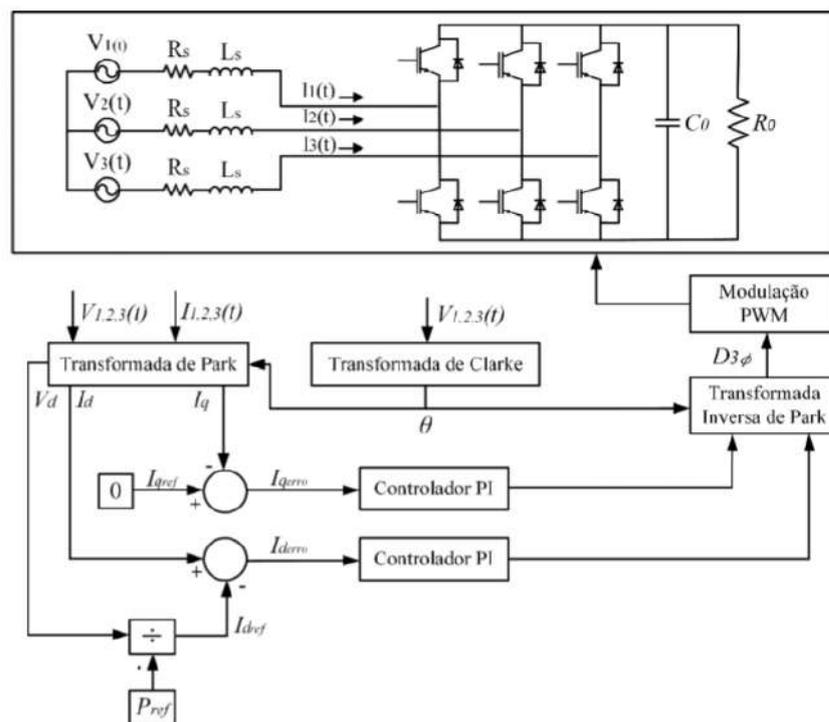
3.2.3 Projeto dos Controladores

A partir do modelo do gerador e do conversor, faz-se necessário o projeto dos controladores para que o sistema seja capaz de operar em determinados pontos e garantir a máxima potência convertida. Os controladores deverão manter a corrente de eixo de quadratura nula para garantir um fator de potência unitário. Assim, a saída do sistema dependerá apenas da corrente de eixo direto para controlar a potência de saída do conversor.

O equacionamento para os ganhos dos controladores PI foi realizado por (SANTOS, 2021) tomando como base para os cálculos de (SIQUEIRA, 2003). A potência de entrada em relação à rotação velocidade de rotação, fornecida pela turbina ao gerador, é adaptada de um equacionamento apresentado em (HENRIQUES et al., 2016), estimando-se uma curva com mesmo formato, mas com potência máxima de 4700 W, visto que em seu trabalho a potência máxima é 1100 W.

A Figura 41 mostra o diagrama do sistema de controle, contendo uma fonte trifásica com resistências e indutâncias em série com as fontes, que caracteriza o modelo em parâmetros concentrados do gerador, o conversor CA-CC Boost PWM trifásico, as transformações de sistemas de referência (Park e Clarke), a geração do PWM trifásico e o sistema de controle, composto por dois controladores de corrente, um para corrente de eixo direto e outro para corrente de eixo em quadratura.

Figura 41 – Diagrama de integração entre gerador, conversor CA-CC e controle de potência.



Fonte: (WERMANN, 2021).

Os valores dos ganhos de cada variável dos controladores estão na Tabela 3 e são dados de forma geral pela equação (26), que define a função de transferência do controlador. Através da Figura 41 pode-se verificar que a corrente do eixo em quadratura I_q terá sempre seu controle buscando uma referência nula. Já o controle da corrente de eixo direto I_d terá seu *setpoint* dado pela potência de referência P_{ref} . O controle dessa corrente implicará diretamente no controle da potência de saída do sistema.

$$G(s) = \frac{k \cdot (1 + s\tau)}{s\tau} \quad (26)$$

Tabela 3 – Valor nominais dos ganhos dos controladores.

Simbologia	Definição	Valor
k_{id}	Ganho do Controlador PI de I_d	1,3176
τ_{id}	Constante de tempo do controlador PI de I_d	66,4 ms
k_{iq}	Ganho do Controlador PI de I_q	1,3176
τ_{iq}	Constante de tempo do controlador PI de I_q	66,4 ms

Fonte: Autor.

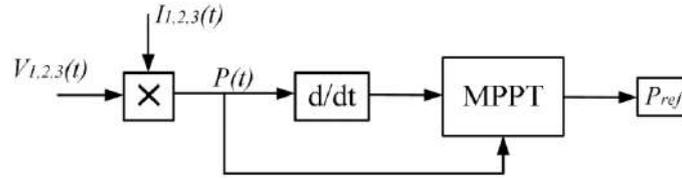
3.2.4 Algoritmo para Conversão de Potência

Conforme observado na Figura 41, o controle do circuito é realizado baseado em uma dada potência de referência considerada para o sistema. No trabalho de (SANTOS, 2021), essa referência é calculada, e trabalhada de forma fixa, de acordo com a velocidade de rotação da turbina pelas curvas de potência em função da rotação da turbina que foram adaptadas de (HENRIQUES et al., 2016), conforme a Figura 37.

Para uma máxima conversão de energia, a potência de referência do circuito precisa ser a máxima, considerando cada perfil de onda marítima traçada na Figura 37. Em (SANTOS, 2021), a obtenção da potência de referência P_{ref} é calculada de acordo com o perfil de onda identificado em dado momento, o que traz a dificuldade de aplicação prática deste modelo de controle para um sistema na qual precisa estar identificando continuamente as condições de onda marítima para obtenção de uma máxima geração de energia. Ainda assim, esses valores de máximo apresentados por (HENRIQUES et al., 2016) são teóricos e podem não representar na prática uma potência máxima convertida do sistema de maneira genérica e abrangente.

Considerando tal cenário, o trabalho de (WERMANN, 2021) traz como solução a aplicação do método MPPT para obtenção da potência máxima de conversão, que não necessita identificar o perfil de onda marítima em dado instante de tempo para produzir a máxima conversão de energia. Isso porque, conforme apresentado na Seção 2.2, o método busca de forma autônoma a operação no ponto de máxima potência no sistema em que está atuando. Entretanto, o modelo proposto por (WERMANN, 2021), a princípio, não atende aos requisitos que o sistema como um todo apresenta. Isto porque o modelo proposto, lia os valores instantâneos de saída de potência e buscará sempre atualizar a potência de referência P_{ref} para a máxima naquele instante baseado nesta entrada. A Figura 42 apresenta o diagrama completo do circuito proposto com a inclusão do método MPPT, ajustando a potência de referência P_{ref} do circuito de controle.

Figura 42 – Diagrama do algoritmo MPPT no circuito proposto por (WERMANN, 2021).

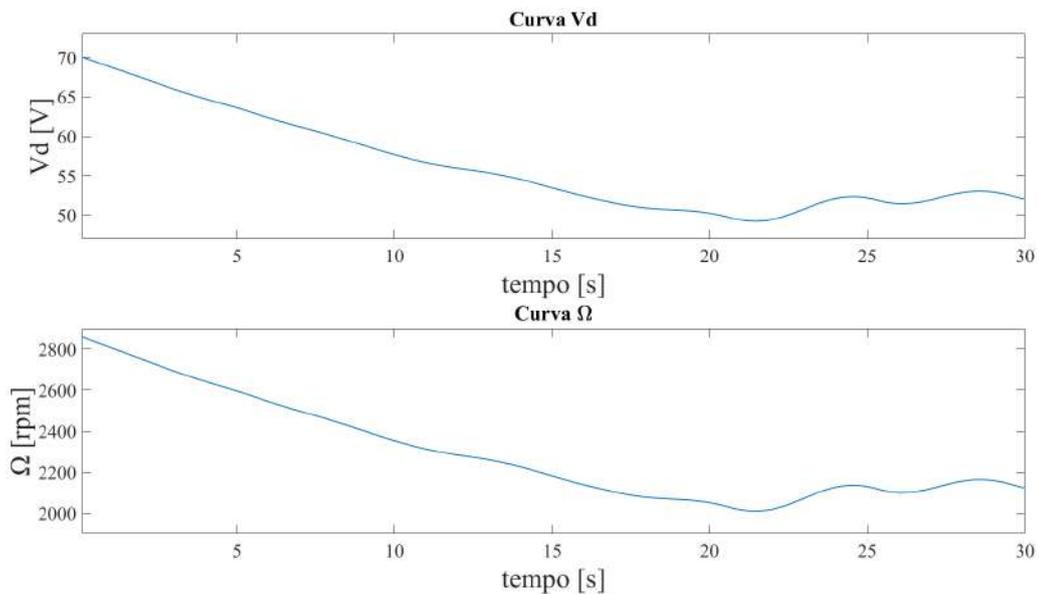


Fonte: (WERMANN, 2021).

Como apresentado e desenvolvido ao longo deste projeto, existem outras variáveis que são mais indicadas para se ter como referência para a atualização de P_{ref} . Isso porque como a condição do mar e, conseqüentemente, do sistema WEC estão sempre mudando, não se deve considerar a potência, que é a variável final, logo a de interesse do sistema elétrico, como base. Os trabalhos da literatura citam que o ideal de um sistema WEC-OWC é a manutenção da velocidade nominal do sistema PTO desenvolvido.

Tendo esse conceito estipulado, começou a se buscar qual variável, já trabalhada dentro do sistema desenvolvido, teria uma relação direta com a velocidade de rotação. Sabe-se que a tensão do gerador tem uma relação linear com a frequência de rotação da máquina, entretanto sua característica senoidal dificulta sua utilização de maneira direta. Como indicado na Figura 43, se observou que V_d seria a variável interesse por sua disponibilidade, já que é utilizada nos cálculos dos controladores.

Figura 43 – Comparação entre V_d e Ω .



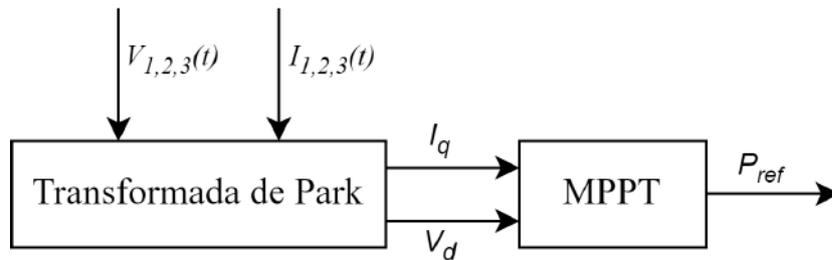
Fonte: Autor.

O desenvolvimento desse novo algoritmo, que segue as premissas do método MPPT

mas que não tem como variável de entrada a potência, será aqui denominada então como Algoritmo para Conversão de Potência ou ACP, para que não denominemos de forma equivocada esse grupo de métodos já consolidados na literatura.

O ACP, então, seguiu as premissas técnicas de (WERMANN, 2021) e baseou-se em duas das principais técnicas utilizadas, a P&O e a P&O com Perturbação Adaptativa, devido a sua facilidade de aplicação, rápida resposta e reduzida necessidade de processamento, tornando o sistema simplificado e, ao mesmo tempo, eficaz. As Figuras 44 e 45 trazem, respectivamente, o bloco ACP a ser adicionado aos demais blocos do circuito de potência e a representação do fluxograma proposto e utilizado para aplicação do ACP no presente trabalho. A Tabela 4 detalha cada variável definida no fluxograma deste método da Figura 45.

Figura 44 – Diagrama do ACP no circuito proposto para este trabalho.



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Definição das variáveis do fluxograma do ACP utilizado no projeto.

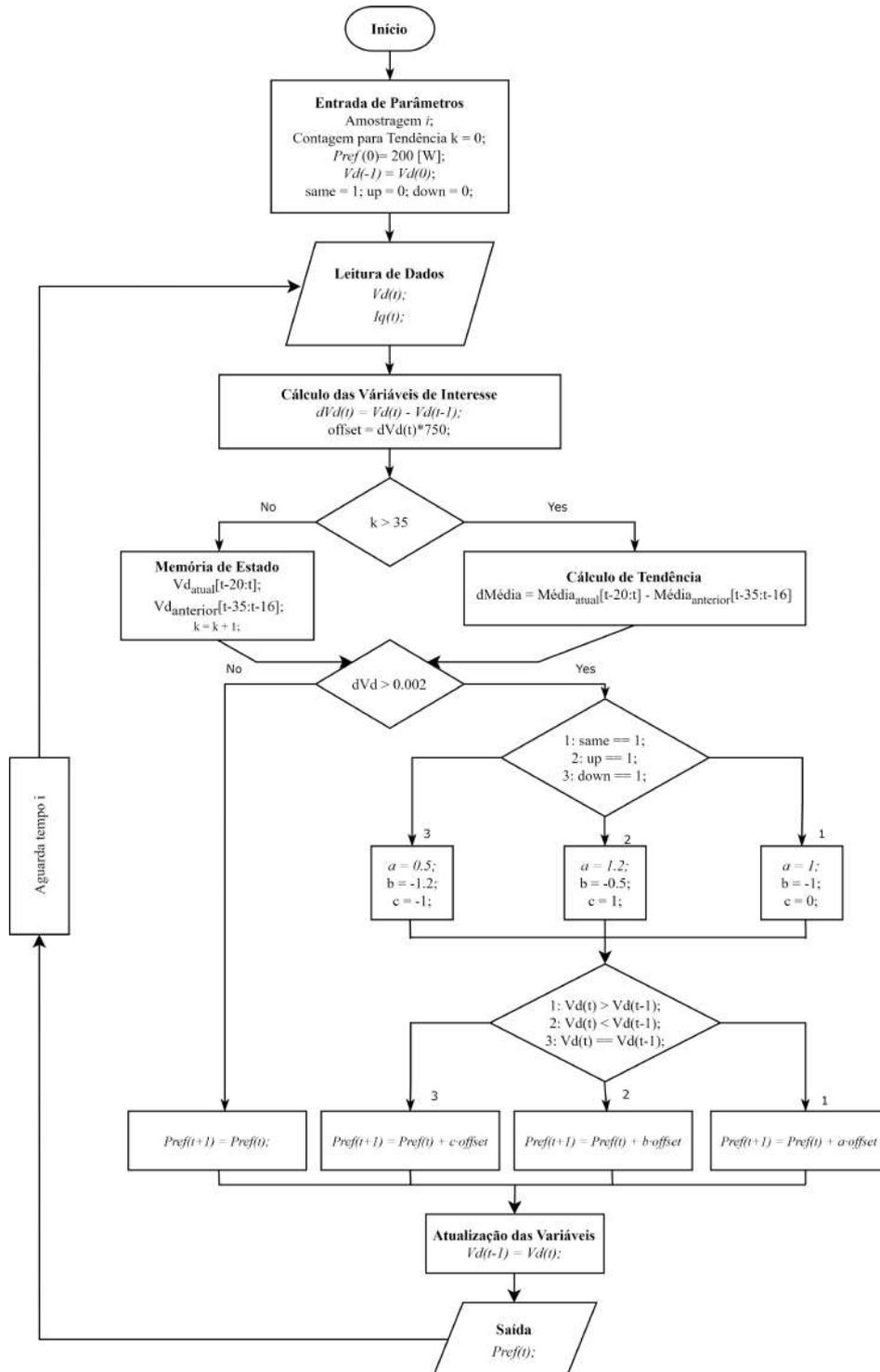
Simbologia	Definição
i	Tempo de amostragem
$offset$	Passo de perturbação (em watts)
t_k	Instante de tempo
t_{k-1}	Instante de tempo anterior
$P_{ref}(t_k)$	Potência de referência em um instante t_k
$V_d(t_k)$	Tensão V_d em um instante t_k
$V_d(t_{k-1})$	Tensão V_d em um instante t_{k-1}

Fonte: Autor.

O método de obtenção do ponto de máxima potência apresentado no fluxograma da Figura 45 segue os mesmos princípios apresentados na Subseção 2.2.2.3, na qual a potência de referência é perturbada, então as variáveis de entrada (a potência e a sua derivada em relação ao tempo) são lidas e comparadas com valores anteriores. Assim, o algoritmo toma a decisão de aumentar, diminuir ou manter a referência de saída.

O algoritmo faz a inicialização necessária definindo os parâmetros de entrada, como o tempo de amostragem do cálculo i e a P_{ref} inicial, arbitrariamente posta em 200 W. Também é definido apenas na primeira amostragem que a potência medida atual $P(t_k)$ é igual a potência medida anterior $P(t_{k-1})$, para fins de inicialização, devido a não existir valor anterior medido. Portanto, é feita a leitura dos dados de entrada: tensão de eixo direto $V_d(t_k)$ e corrente de quadratura $I_q(t_{k-1})$, ambos no instante de tempo t_k .

Figura 45 – Fluxograma do ACP desenvolvido para o projeto.



Fonte: Autor.

Com esta implementação do ACP a potência de referência irá seguir diretamente as alterações da velocidade de rotação do PTO, aqui representada por V_d . As comparações são realizadas em duas esferas: a imediata e a de tendência. Na primeira, verifica-se a inclinação instantânea da curva V_d para se identificar se a curva de potência irá subir, descer ou se manter. Já a esfera de tendência é um cálculo, a cada 40 medições, para se verificar se a velocidade está tendendo a se manter numa faixa, ou está em uma crescente ou diminuição. A definição da tendência influi apenas no peso das mudança que o *offset* causa na potência de referencia.

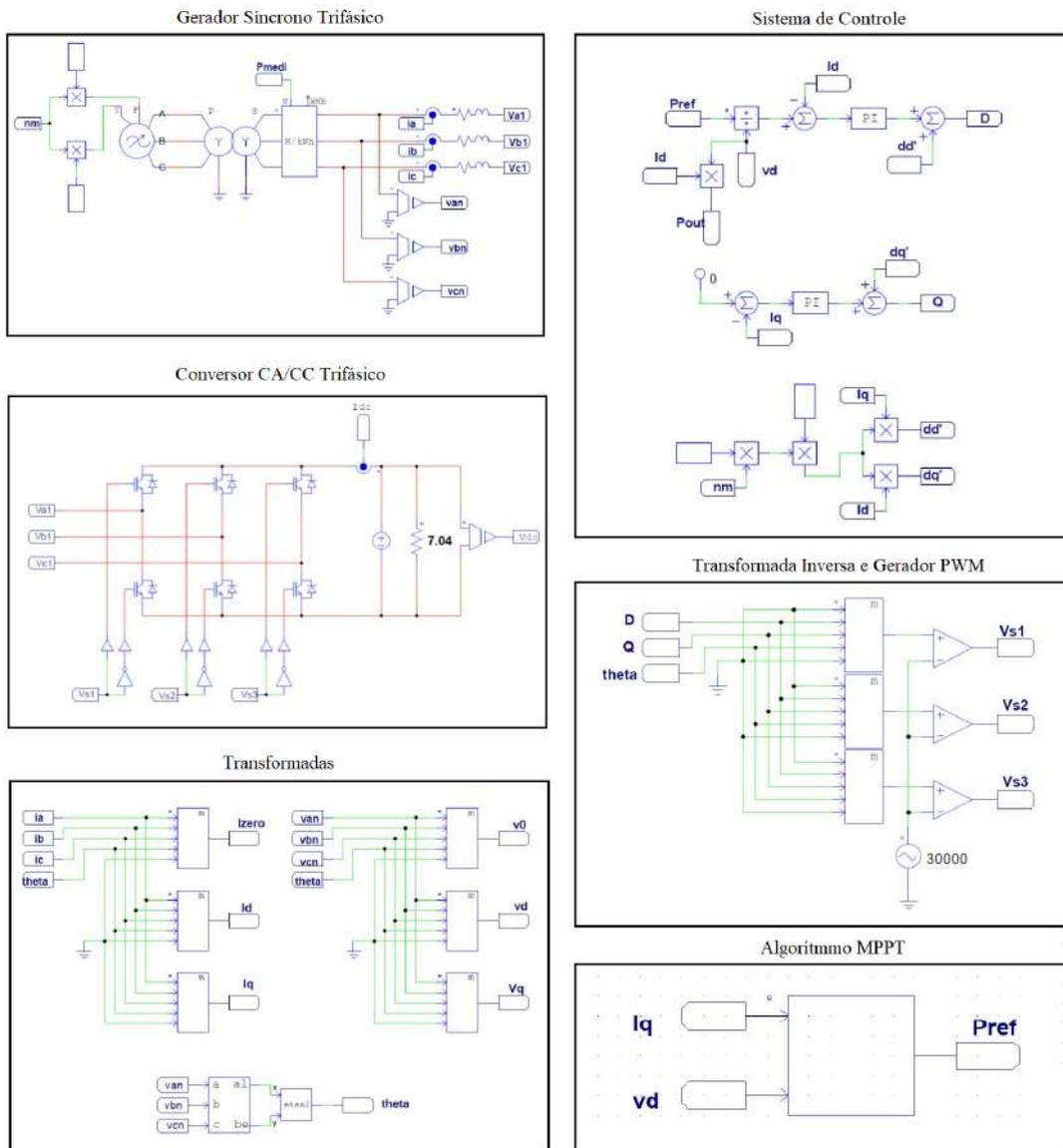
Há outras medidas, de segurança e de boas práticas que são situacionais, como: há um corte para cima e para baixo de potência, sendo a potencia de referência igual a 0, apenas quando a V_d é menor que 15, que representa, aproximadamente 650 rpm. Isso permite que o sistema sempre esteja se adequando a condição energética do mar.

3.2.5 Modelo para Estudo

Com base nas modelagens e nos métodos apresentados na Seção 3.1, a Figura 46 traz uma visão geral do circuito desenvolvido através do software PSIM® , a fim de aplicar e comprovar as deduções até aqui apresentadas através de simulações. O projeto foi dividido em 6 partes: gerador síncrono trifásico, conversor CA-CC trifásico, transformadas, sistema de controle, transformada inversa, gerador PWM trifásico e o bloco ACP.

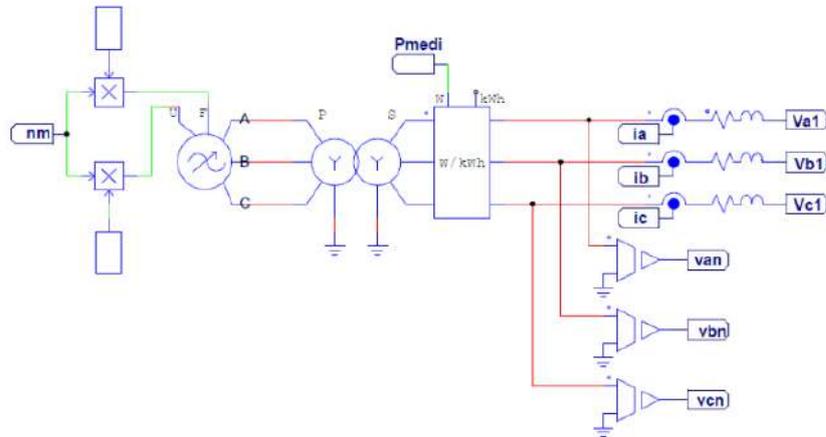
A Figura 47 apresenta o sistema de geração de energia composto por uma fonte de tensão trifásica variável que tem como parâmetros de entrada a frequência elétrica e o valor eficaz de tensão induzida do gerador. Assim será possível modelar a tensão induzida do gerador em função da velocidade de rotação da turbina e do próprio gerador. Aqui também estão inclusos os demais parâmetros do circuito equivalente do gerador: resistência de fase e indutância síncrona. Neste bloco foi incluso a medição de potência que serve como base para o cálculo do ACP. Usou-se um bloco transformador estrela-estrela trifásico com relação 1-1 para isolar o sistema de geração com o de conversão.

Figura 46 – Diagrama de integração entre gerador, conversor CA-CC e controle de potência.



Fonte: Autor.

Figura 47 – Circuito do gerador e medição de potência.

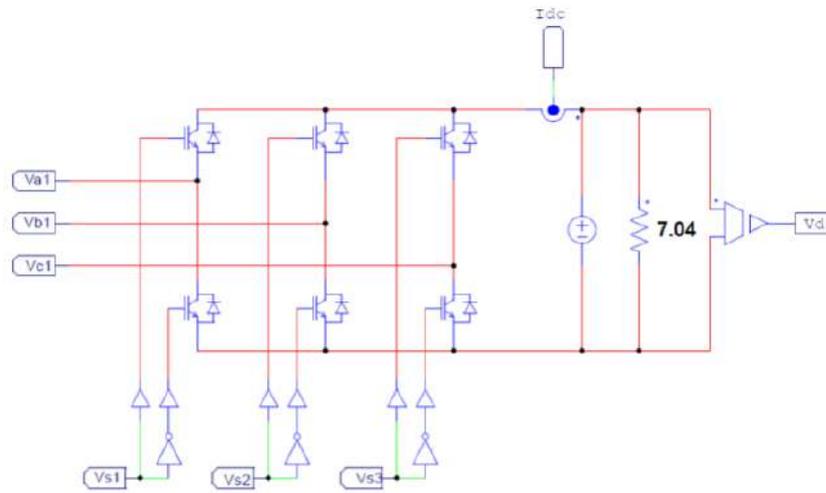


Fonte: Autor.

O sistema de conversão CA-CC é apresentado na Figura 48. Este é composto por um retificador PWM trifásico. Para a representação da bateria, usou-se uma fonte de tensão V_{DC} na saída do circuito em paralelo com uma carga resistiva. Essa configuração foi escolhida pois o regime de ondas não será alterado significativamente de forma abrupta, então a tensão terminal da bateria também não terá seu valor alterado nos intervalos de tempo das simulações realizadas. Para o controle PWM, considerou-se os sinais V_{S1} , V_{S2} e V_{S3} que formarão o controle das chaves do retificador. Esses sinais são oriundos do bloco de Transformada Inversa e Geração PWM.

O bloco de desacoplamento dos circuitos de eixo direto e quadratura realizado pelas transformadas de Park, alterando-se o sistema de referência trifásico para o sistema de referência síncrono dq , a fim de garantir que o controle da potência convertida será dado apenas pela corrente de eixo direto. A transformada de Clarke é utilizada para a obtenção do ângulo de referência para aplicar tanto na Transformada de Park, quanto na sua inversa (SANTOS, 2021). Os dois blocos de transformada são apresentados na Figura 49.

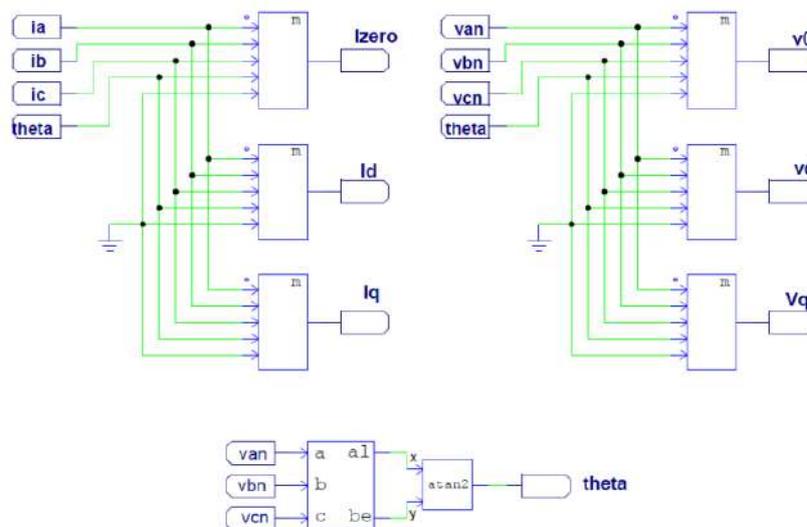
Figura 48 – Circuito do conversor CA-CC.



Fonte: Autor.

O sistema de controle discutido na Subseção 3.1.3 é composto por dois controladores PI utilizados para controlar a corrente de eixo direto I_d e do eixo em quadratura I_q , conforme ilustra a Figura 50. A partir das saídas dos controladores são obtidas as variáveis que compõem os cálculos para as transformadas inversas que formarão o PWM, responsável pelo chaveamento do conversor CA-CC, conforme Figura 51. Os sinais gerados a partir da transformada inversa de Park são comparados com um sinal triangular com frequência fundamental de 30 kHz, caracterizando assim uma modulação senoidal PWM.

Figura 49 – Blocos de cálculos das transformadas de Park e Clarke.

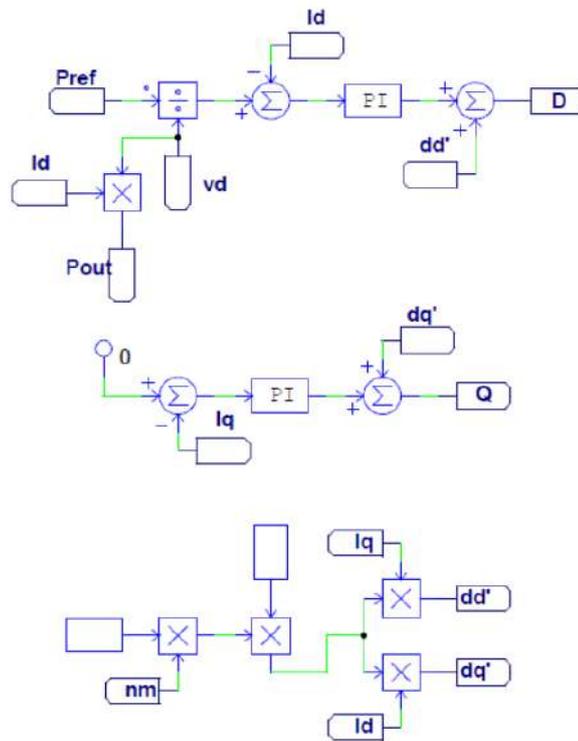


Fonte: Autor.

O bloco de aplicação do método MPPT é apresentado na Figura 52, onde foi utilizado o *C Block* do PSIM®. Este bloco permite a criação e aplicação da lógica do diagrama

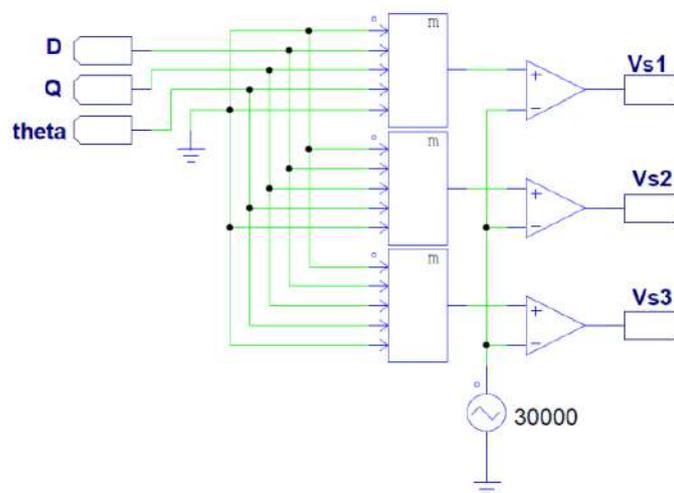
da Figura 45 utilizando a linguagem C. Como descrito na seção anterior, foram definidas duas variáveis de entrada: V_d , como intermediador da velocidade de rotação, e I_q , como variável de segurança. A variável de saída do *C Block* é a potência de referência P_{ref} que servirá de base para o circuito de controle.

Figura 50 – Módulos de controle PI.



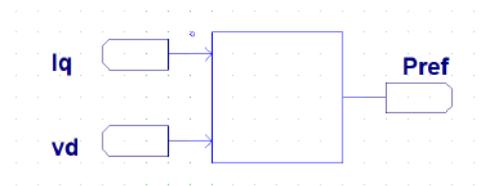
Fonte: Autor.

Figura 51 – Transformada inversa e geração PWM.



Fonte: Autor.

Figura 52 – Bloco de cálculo do ACP.



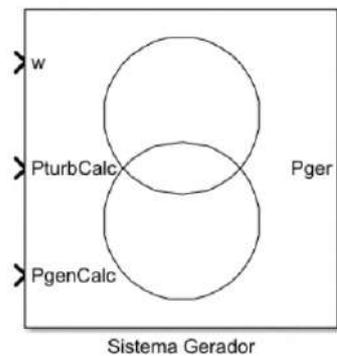
Fonte: Autor.

3.3 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS

Com base nas modelagens e nos métodos apresentados na Seção 3.1 e 3.2 temos que por fim juntar os dois modelos a fim de verificar a possível utilização do Modelo Pneumático-Mecânico associado ao modelo do sistema elétrico previamente já tratado no LMEAE, adicionalmente ao método ACP neste trabalho.

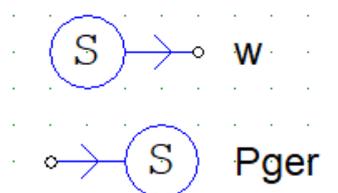
Ambos os *softwares* utilizados, MATLAB®/Simulink® e PSIM®, conseguem co-simular graças a um módulo chamado *SimCoupler* e aos *SLINK Nodes*, nos respectivos programas. Com eles podemos vincular os arquivos do tipo *.slx* e *.psimsch* e direcionar *streams* das variáveis que queremos nos utilizar em cada modelo, portanto temos variáveis de saída e de entrada, como representado na Figura 53 e 54.

Figura 53 – Módulo SimCoupler que permite acoplar modelos do Simulink® e do PSIM®.



Fonte: Autor (Simulink®).

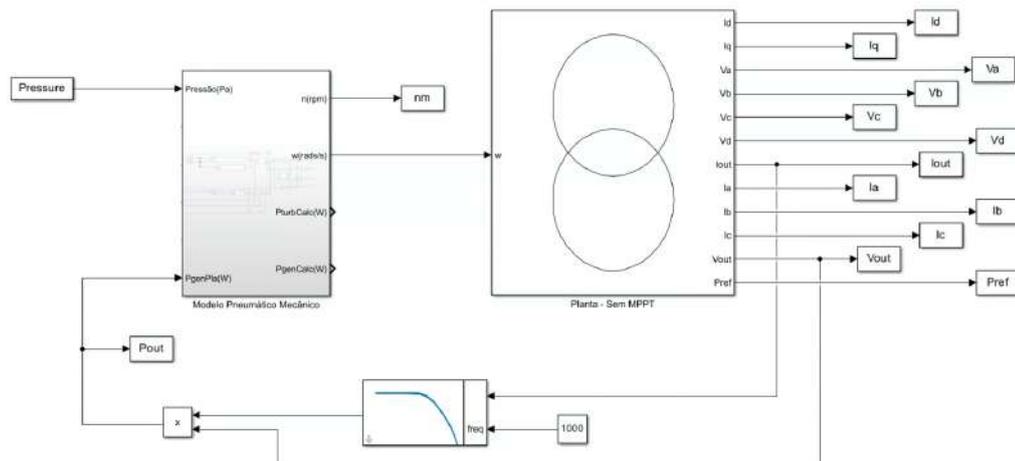
Figura 54 – SLINK Nodes de entrada e saída que permite acoplar modelos do PSIM® e Simulink®.



Fonte: Autor (PSIM®).

Na implementação do modelo a velocidade angular que é calculada pelo modelo pneumático-mecânico é enviada para o modelo elétrico (Simulink® para PSIM®), e no sentido inverso a potência elétrica convertida enviada do modelo elétrico (PSIM® para Simulink®) para novamente realizar o cálculo da velocidade, como apresentado na equação (15). O modelo pneumático-mecânico com interface para o PSIM® utilizado na obtenção dos resultados é mostrado na Figura 55.

Figura 55 – Diagrama final do modelo pneumático-mecânico no Simulink® com elementos de integração ao modelo elétrico do PSIM®.



Fonte: Autor.

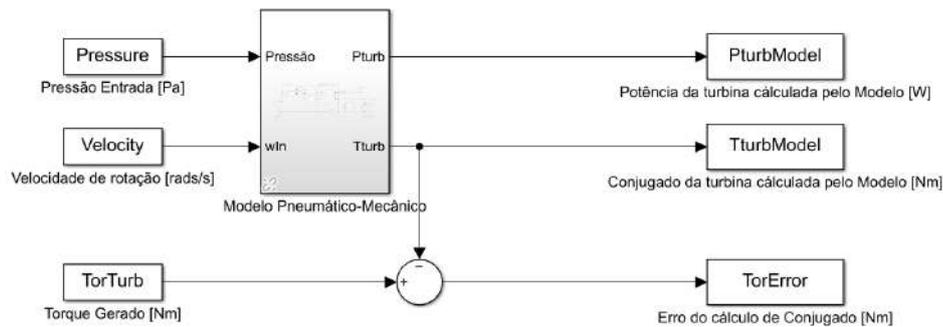
3.4 ESTUDOS DE CASOS PROPOSTOS

As análises de resultados para o modelo desenvolvido podem ser classificadas em três itens, que são: validação do modelo pneumático-mecânico, verificação do comportamento para diferentes estímulos e verificação do método ACP desenvolvido, conforme detalhado a seguir.

3.4.1 Validação do modelo pneumático-mecânico

Para a validação do modelo pneumático-mecânico faz-se uso dos dados experimentais de forma que o modelo receba a pressão da câmara e a velocidade de rotação a fim de se observar o conjugado gerado da turbina T_{Turb} e comparar com a obtida em campo. Para tal foi utilizado o diagrama indicado na Figura 56. Dessa forma, isola-se a parte do modelo que se refere somente à turbina e pode-se validar qualitativamente e quantitativamente essa parte do modelo.

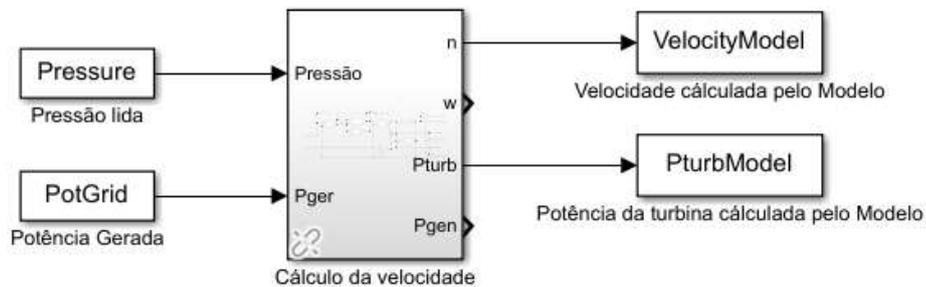
Figura 56 – Diagrama de validação do conjugado do modelo pneumático-mecânico no Simulink®.



Fonte: Autor.

Também, pode-se utilizar a potência elétrica convertida, a fim de determinar de forma indireta o conjugado do gerador e, portanto, permitir que seja determinada a velocidade de rotação do rotor. Para tal, foi utilizado o diagrama indicado na Figura 57. Dessa forma, pode-se analisar quantitativamente e qualitativamente a parte do modelo que se refere à junção da turbina e o gerador, ou seja, o PTO como um todo.

Figura 57 – Diagrama de validação da Velocidade de rotação do modelo pneumático-mecânico no Simulink®.



Fonte: Autor.

Dos dados experimentais disponíveis, foram extraídos 6 seções, de dias variados, selecionados randomicamente, com uma duração de 40 segundos. Com isso será possível, com os resultados, analisar se o modelo em suas partes principais, a turbina e ao PTO, e como um todo, representam de forma satisfatória um sistema físico para o qual se tem dados experimentais.

3.4.2 Verificação do comportamento do sistema de geração para diferentes estímulos

Como vimos na Seção 2.2.1.1, a pressão na câmara de ar tem como característica ser comparável com um somatório de componentes senoidais, como representado em (2).

Portanto, propõe-se os seguintes estudos de caso:

1. Pressão senoidal com 3 componentes harmônicas (27);
2. Sinal de pressão obtida pelos dados do Projeto OPERA, também utilizados na modelagem.

$$p(t) = a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t + \phi_1\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t + \phi_2\right) + a_3 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_3}t + \phi_3\right) \quad (27)$$

em que a_1 , a_2 e a_3 são amplitudes da pressão interna na câmara de ar, T_1 , T_2 e T_3 os períodos e ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 as fases dos sinais cosenoidais.

3.4.3 Verificação do comportamento do modelo ACP desenvolvido

No sistema com a implementação do ACP, serão impostos os mesmos testes realizados apenas para o sistema de geração com potências de referência fixas. Assim poderemos avaliar e comparar de forma dinâmica o comportamento do ACP na busca da máxima potência convertida. Além disso, é possível avaliar a resposta do sistema quando a potência de referência é alterada. Como o sistema é realimentado, é possível verificar a interferência da alteração da potência de referência no desenvolver da velocidade do PTO (turbina/gerador).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas e explicadas as diferentes simulações realizadas com os modelos propostos, assim como os respectivos resultados de interesse. Esses resultados são discutidos e analisados de forma a se possibilitar chegar as seguintes conclusões sobre o funcionamento dos modelos propostos:

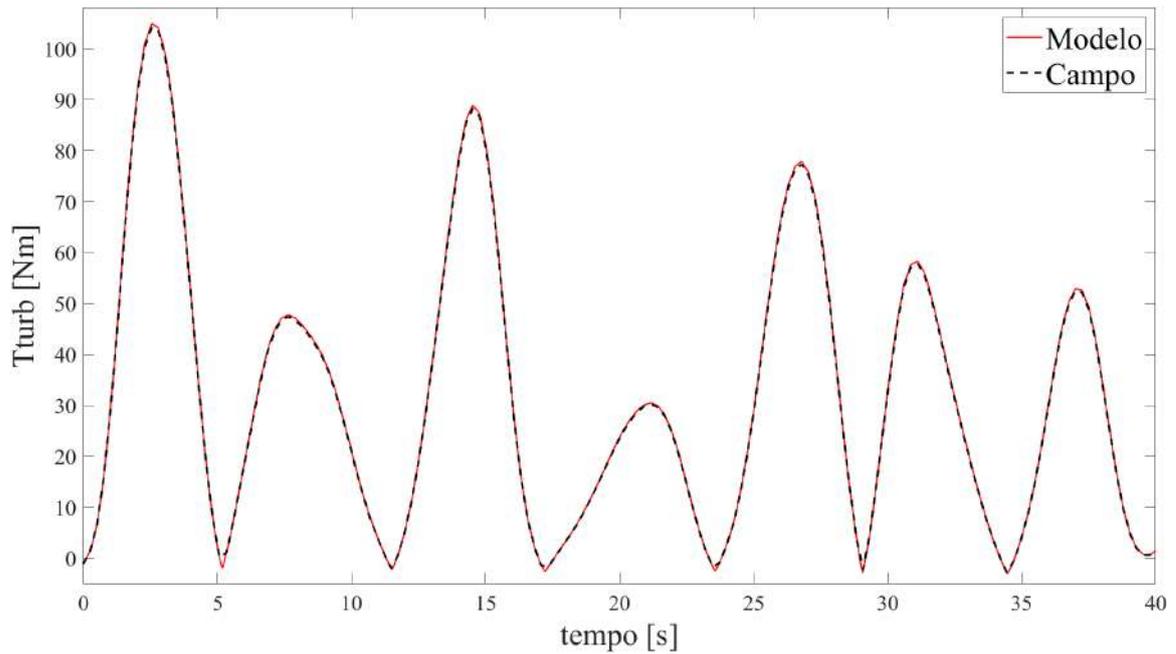
1. Verificar se o modelo pneumático-mecânico desenvolvido atende as expectativas qualitativas e quantitativas para a utilização do mesmo em futuros testes do tipo *Hardware-in-the-Loop*;
2. Verificar se o sistema elétrico de geração desenvolvido por (SANTOS, 2021), suporta as variações de velocidade do rotor, inerentes ao sistema como um todo, uma vez que o mesmo não foi desenvolvido para atender a turbina trabalhada no projeto em questão;
3. Verificar se o modelo ACP proposto consegue operar de forma a converter a máxima potência possível, respeitando a faixa de velocidade desejada.

Todos as situações propostas aqui foram devidamente descritas na Seção 4.4. Especificidades e observações na execução das mesmas serão desenvolvidas nos seguintes subcapítulos.

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO PNEUMÁTICO-MECÂNICO

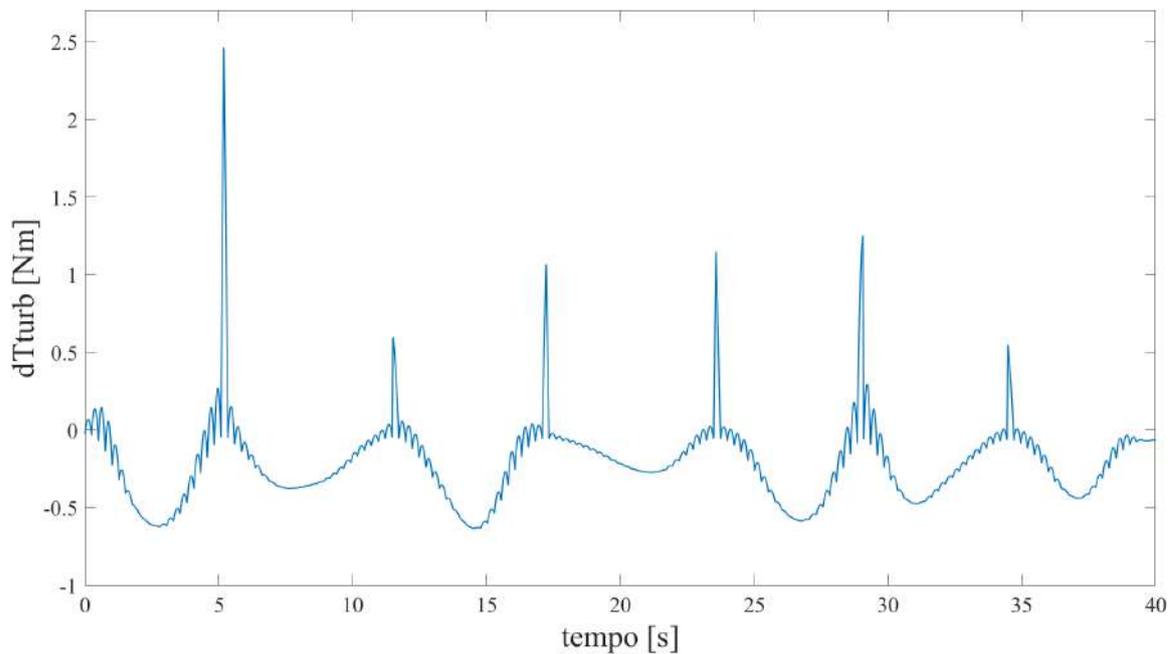
Para a validação, o modelo pneumático foi dividido em dois blocos. O primeiro compreende o bloco que implementa a relação pressão-torque, representado a turbina propriamente e o bloco que implementa a interação entre os conjugados e a velocidade de rotação do PTO, representando a relação inercial entre a turbina e o gerador, representado pela Figura 56. Nas Figuras 58 e 59 pode-se observar, respectivamente, as curvas de conjugado da turbina obtidas a partir do modelo e obtida experimentalmente e a curva da diferença entre o modelo e o experimental.

Figura 58 – Curvas de conjugado obtidos a partir do modelo e obtidos em campo.



Fonte: Autor.

Figura 59 – Diferença entre saída do modelo e dados experimentais de conjugado da turbina.



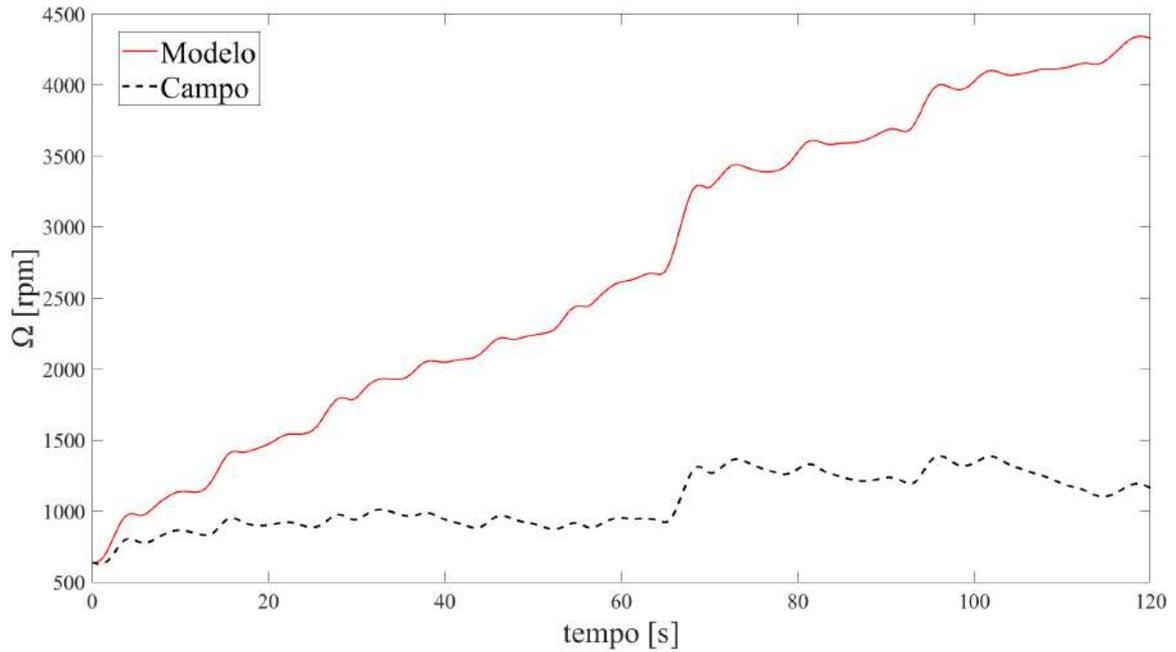
Fonte: Autor.

Podemos observar que as curvas de conjugado praticamente se sobrepõem, comprovado na diferença entre as curvas, que oscila sobre o eixo zero.

Na segunda etapa foram utilizados, como indicado na Figura 57, os dados de pressão e potência elétrica gerada a fim de verificar se o sistema se comportaria da maneira

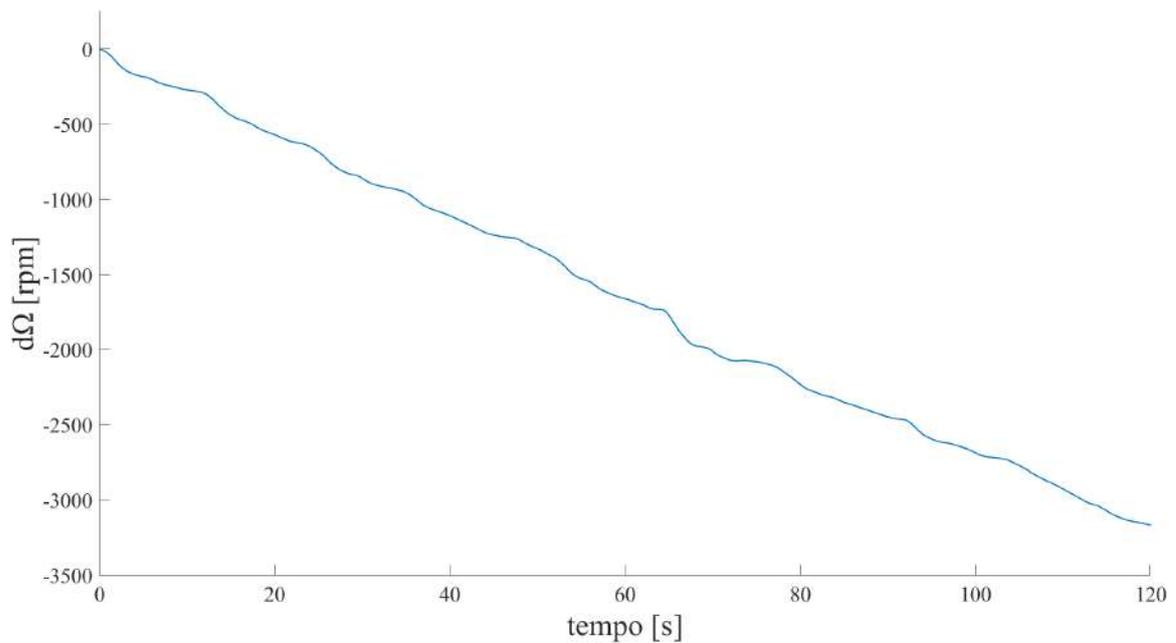
esperada. Nas Figuras 60 e 61 pode-se observar as comparações de velocidade de rotação e a diferença entre os resultados do modelo e obtidos em campo, respectivamente.

Figura 60 – Comparação entre a velocidade de rotação do modelo e dos dados obtidos em campo sem considerar perdas no modelo.



Fonte: Autor.

Figura 61 – Diferença entre saída do modelo e dados de campo sem considerar perdas no modelo.



Fonte: Autor.

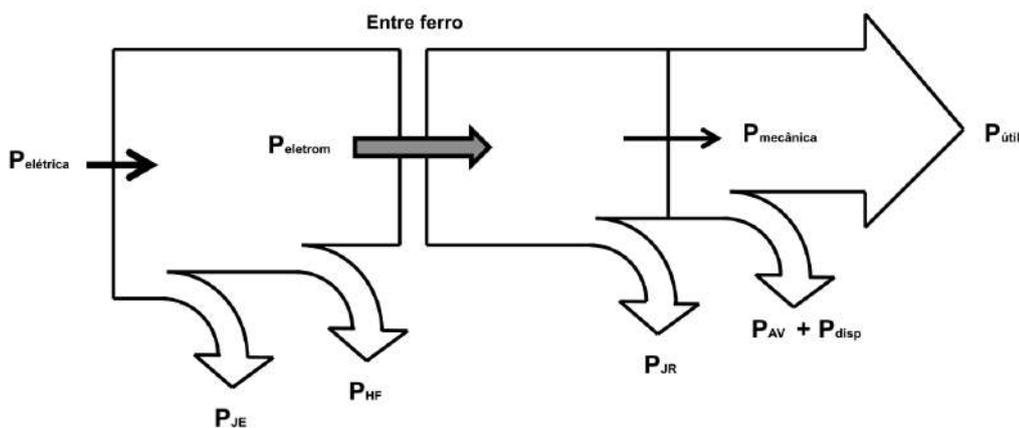
Pode-se observar que existe diferença significativa entre o comportamento do modelo

e o experimental. É importante destacar que os dados de potência disponíveis e utilizados para a simulação são dados de potência gerada na rede no Projeto Opera. Estes dados não consideram perdas diversas no gerador, conversor eletrônico e elementos de armazenamento de energia. Conclui-se, portanto, que na Equação (15) a velocidade do PTO não pode ser estimado a partir da potência gerada sem considerar as perdas. Optou-se então por reescrever a equação (9), como indicado na equação (28), incluindo o termos de conjugado devido a potência gerada na rede T_{ger} e o conjugado devido às perdas diversas nos elementos elétricos do sistema $T_{perdas}(\Omega)$.

$$I\dot{\Omega} = T_{turb} - T_{ger} - T_{perdas}(\Omega) \quad (28)$$

Em sua dissertação (YAMACHITA, 2013) resume as principais perdas envolvendo motores/geradores elétricos. Na Figura 62, a relação entre potência elétrica e mecânica (no exemplo, na direção contrária, ou seja, de um motor).

Figura 62 – Diagrama de Sankey para um motor de indução trifásico.



Fonte: (YAMACHITA, 2013).

Onde:

- $P_{elétrica}$ – Potência elétrica de entrada;
- P_{JE} – Perdas Joule no enrolamento do estator;
- P_{HF} – Perdas no ferro por histerese e Foucault;
- P_{JR} – Perdas Joule no enrolamento do rotor;
- P_{AV} – Perdas mecânicas por atrito e ventilação;
- P_{disp} – Perdas por dispersão em carga;
- $P_{útil}$ – Potência mecânica de saída.

Como já mencionado, além das perdas na máquina elétrica, existem outras perdas como de comutação e condução no conversor estático, perdas por condução nos elementos de armazenamento de energia, etc. Considerando a dificuldade de modelar todas as perdas e considerando que não se tem conhecimento detalhado dos dados experimentais que envolvem as perdas, propõe-se a implementação do modelo de perdas genérico, isto é, que engloba as perdas elétricas e mecânicas a fim de melhorar quantitativamente o modelo. Propõe-se a seguinte interpretação, constituída pelas equações que se seguem.

$$P_{perdas}(\Omega) = T_{perdas}(\Omega) \cdot \Omega \quad (29)$$

$$T_{perdas}(\Omega) = \frac{a_p}{\Omega} + b_p \cdot \dot{\Omega} + c_p + d_p \cdot \Omega \quad (30)$$

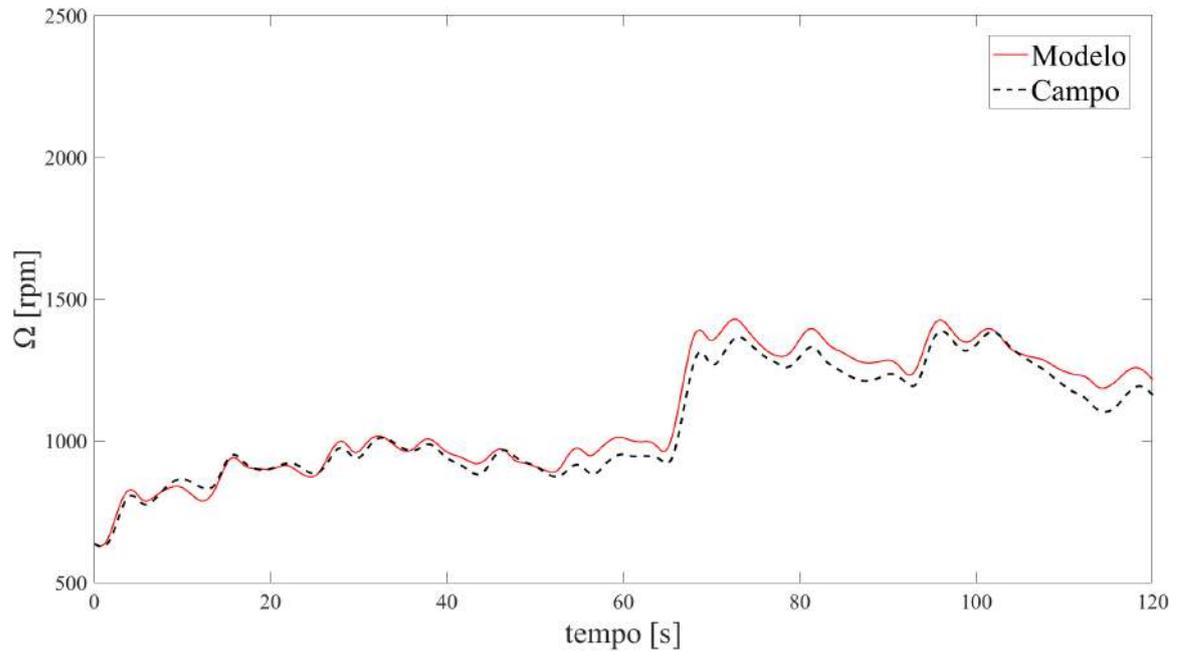
Sendo a_p o coeficiente da relação inversa do conjugado com a velocidade, b_p o coeficiente da relação do conjugado com a variação da velocidade, c_p o coeficiente de conjugado constante, que será tomada como sendo a principal por conta do crescimento praticamente linear dos testes iniciais, e por fim d_p sendo o coeficiente que relaciona o conjugado diretamente com a velocidade.

De forma empírica, após diversos testes, chegou-se nas constantes utilizadas para se obter em uma resposta do modelo que representa uma pequena variação entre velocidade obtida a partir do modelo e a partir dos dados de campo. A equação (31), que é disposta a seguir, apresenta os valores das constantes utilizadas.

$$T_{perdas}(\Omega) = \frac{170}{\Omega} + 1,1 \cdot \dot{\Omega} + 11,4 + 0,001 \cdot \Omega \quad (31)$$

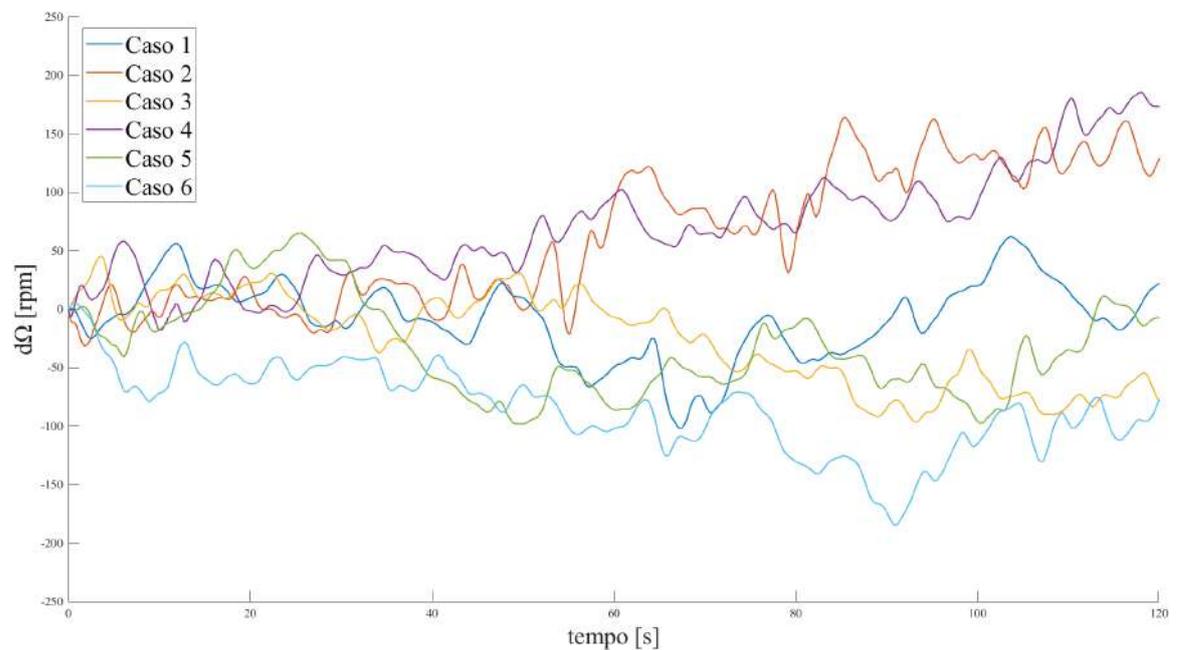
Na Figura 63 pode-se observar a velocidade de rotação, referente ao Caso 1, isto é, aquele avaliado na Figura 60 quando são consideradas as perdas no modelo. Seis diferentes cenários foram avaliados, sempre considerando os coeficientes de perdas identificados na equação (31) e a diferença entre os resultados de modelo e de campo são mostrados na Figura 64 para estes cenários.

Figura 63 – Comparação entre a velocidade de rotação do modelo e dos dados obtidos em campo após considerar perdas.



Fonte: Autor.

Figura 64 – Diferença entre velocidade obtida do modelo com perdas e dados experimentais para 6 cenários distintos que foram avaliados.



Fonte: Autor.

Com este modelo corrigido o trabalho segue para as etapas seguintes, uma vez que o modelo pneumático-mecânico incorporado reflete de forma aceitável, os dados experimentais obtidos para o sistema modelado. Ressalta-se que esse tipo de modelagem atende a

turbina em questão considerando os coeficientes das equações (19), (20) e (31).

4.2 VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO

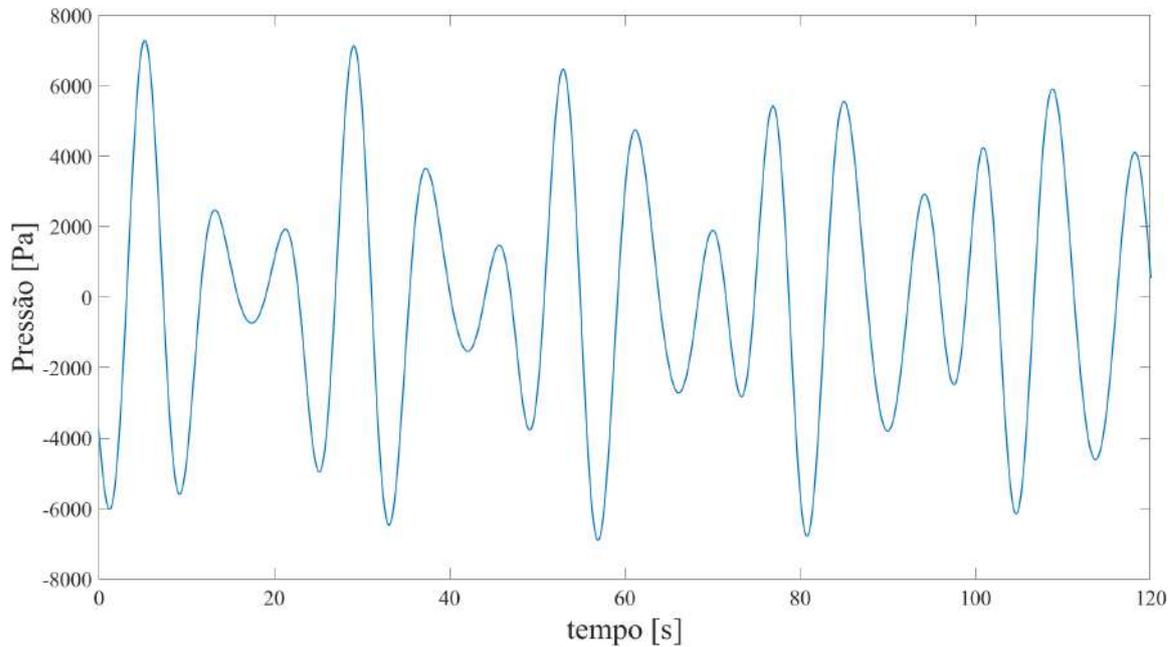
Os resultados obtidos nesta seção utilizam sempre o mesmo modelo, mas apresentam dois cenários distintos de pressão como entrada do sistema, que são: soma de componentes cossenoidais e outra baseada em dados experimentais. Nesta seção a potência de referência é definida como constante e o comportamento do sistema como um todo é analisado. O passo de simulação foi definido com fixo em $10 \mu s$ e a potência de referência como 400 W.

4.2.1 Caso com soma de componentes cossenoidais

A primeira proposta de simulação para análise do sistema de geração consiste em estipular a pressão de entrada como um somatório de componentes cossenoidais, como descrito na equação (27). Essa abordagem é a mais simples para se iniciar a análise, pois não considera um sinal randômico. Pode-se verificar o comportamento do circuito frente a esse estímulo quase realístico. Assim, já é possível avaliar como se comportam as variáveis elétricas frente à variação de velocidade, além do comportamento das variáveis mecânicas, em especial, a própria rotação. Na equação (32) é dado o sinal de entrada considerado nas simulações e na Figura 65 a sua representação gráfica. As constantes foram retiradas tendo como base, os sinais de pressão de dados experimentais típicos.

$$p(t) = 4000 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{8}t + 1, 20\pi\right) + 2200 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{11,5}t + 1, 55\pi\right) + 1100 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{6,8}t + 0, 76\pi\right) \quad (32)$$

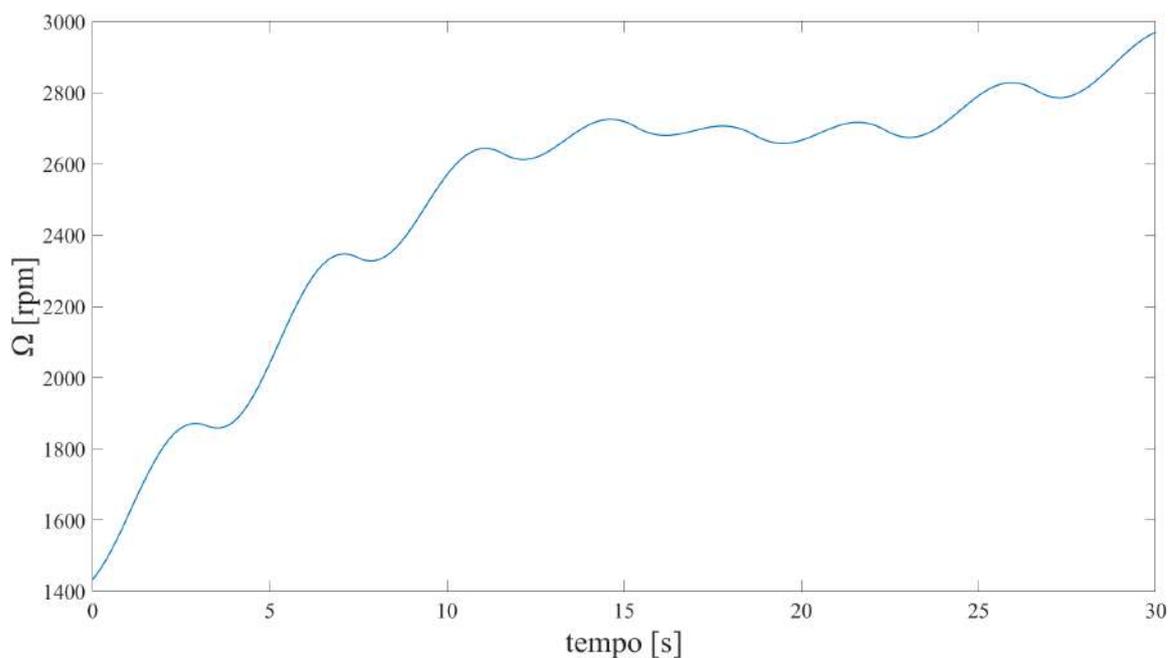
Figura 65 – Curva de pressão dentro da câmara de ar considerada no primeiro cenário estudado.



Fonte: Autor.

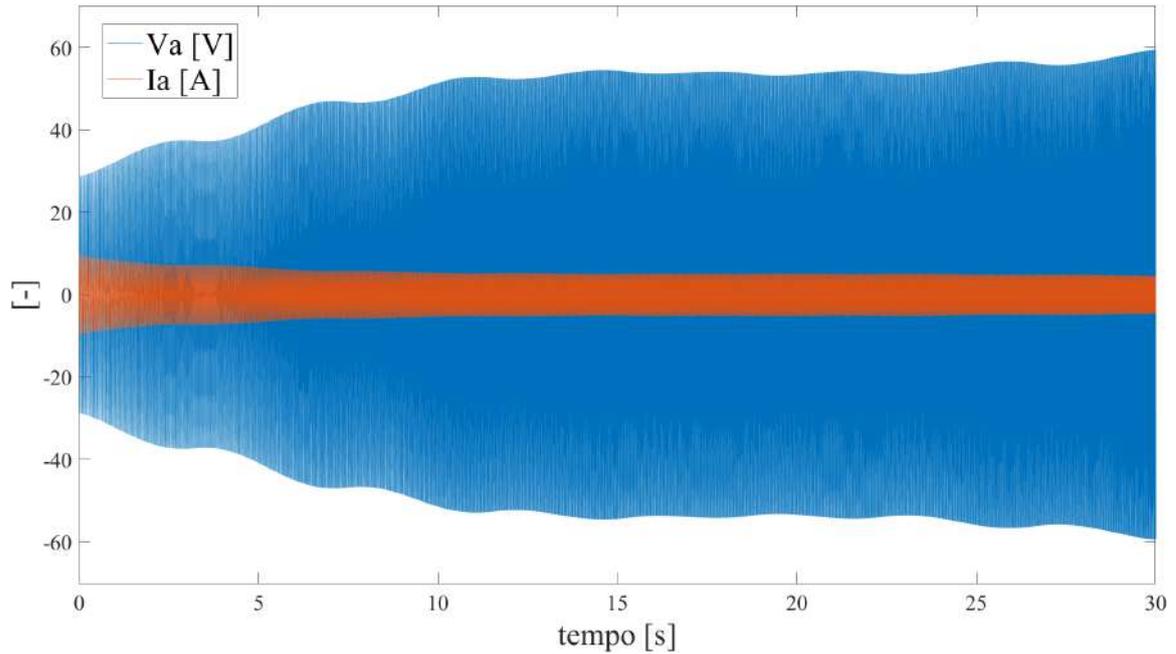
A simulação foi realizada com velocidade inicial $\Omega_0 = 1450$ rpm. Podemos observar na Figura 66 o comportamento da velocidade de rotação do PTO, assim como o comportamento da tensão de fase e a corrente de fase do gerador, na Figura 67, e a relação entre a potência de referência estipulada e a potência convertida, na Figura 68.

Figura 66 – Velocidade para o cenário avaliado nesta seção.



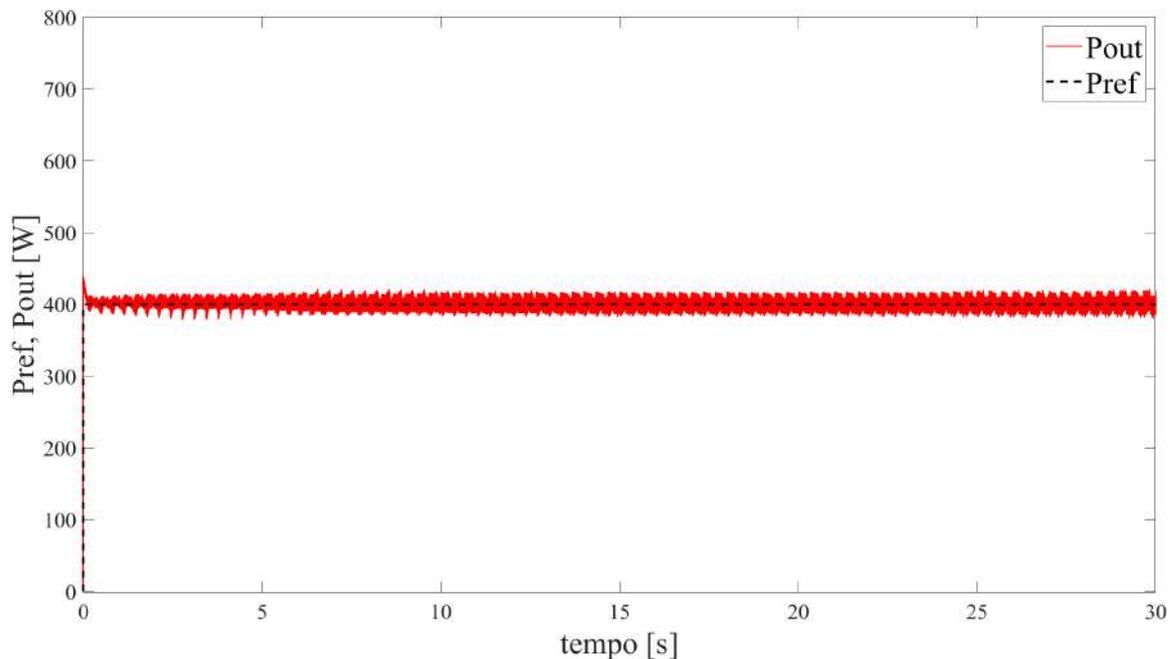
Fonte: Autor.

Figura 67 – Tensão de fase e corrente de fase para o cenário avaliado nesta seção.



Fonte: Autor.

Figura 68 – Potência convertida e potência de referência para o cenário avaliado nesta seção.

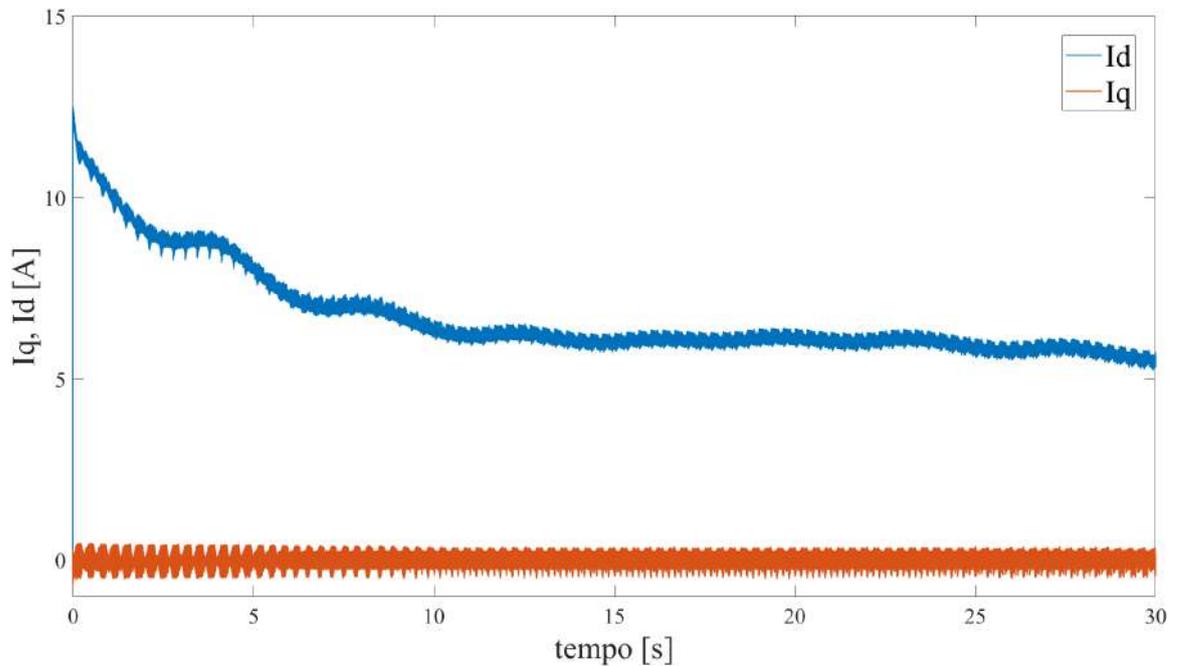


Fonte: Autor.

Podemos observar o comportamento oscilatório tanto na tensão quanto na corrente do gerador, associado a variação da velocidade, o que já era esperado. Observa-se ainda que o controlador conseguiu manter a potência convertida com valor médio igual ao da potência de referência. Na Figura 69 podemos ver que a corrente de quadratura conseguiu

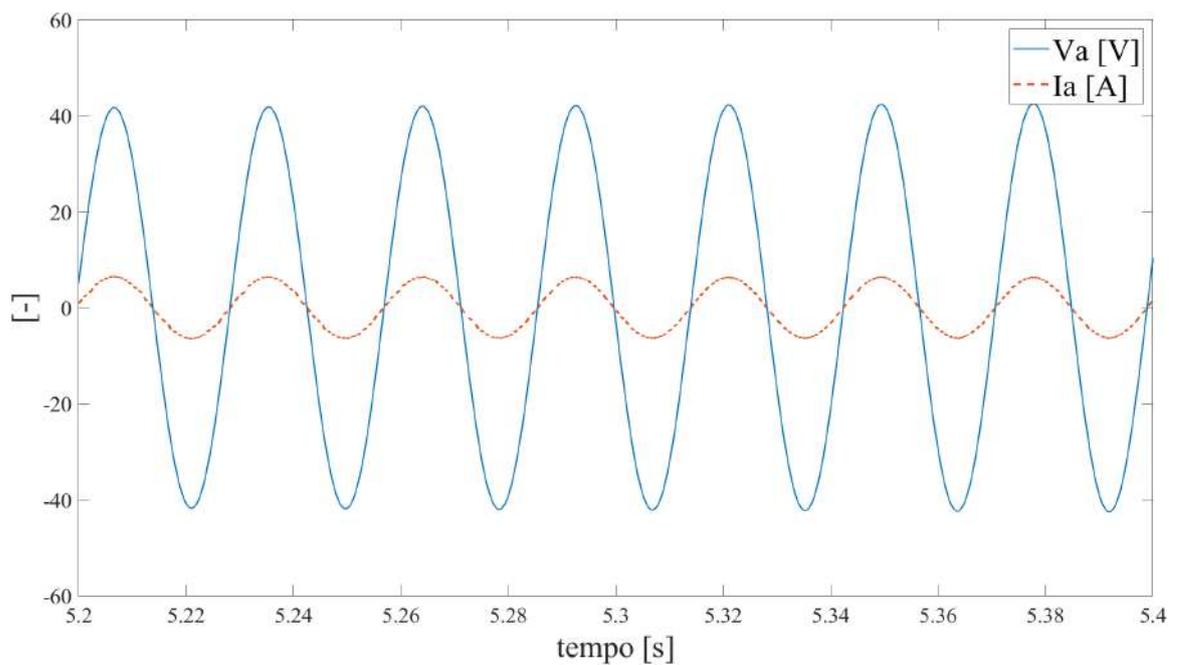
manter-se no entorno de zero, atendendo o requisito de projeto de ter o fator de potência unitário. Isso fica evidente quando analisamos qualitativamente a Figura 70, onde são mostrados apenas alguns ciclos completos da tensão e da corrente de fase.

Figura 69 – Correntes I_d e I_q para o cenário avaliado nesta seção.



Fonte: Autor.

Figura 70 – Detalhe da tensão e corrente de fase para o cenário avaliado nesta seção.

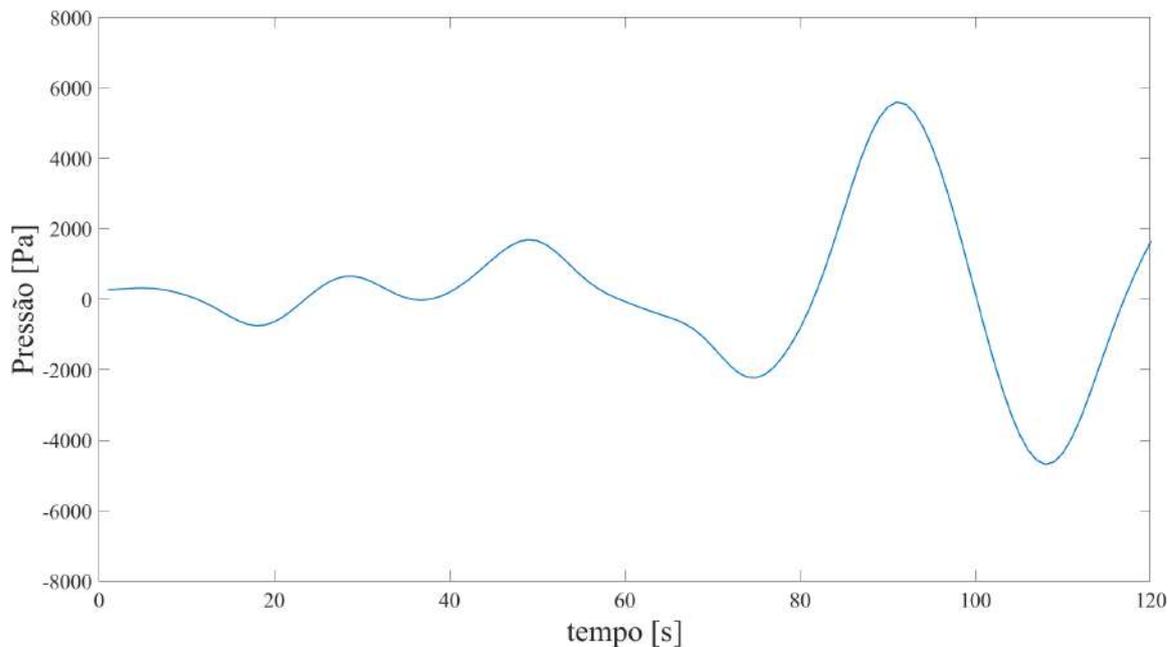


Fonte: Autor.

4.2.2 Caso com dados experimentais

Após análise inicial com uma pressão de entrada com componentes bem especificadas durante a simulação, é proposta uma situação em que a entrada de pressão seja baseada em dados. Neste cenário, o espectro de frequências é mais amplo e varia ao longo do tempo. A Figura 71 ilustra a pressão obtida de dados experimentais e considerada para a simulação do sistema de geração.

Figura 71 – Pressão de entrada a partir dos dados de obtidos em campo.

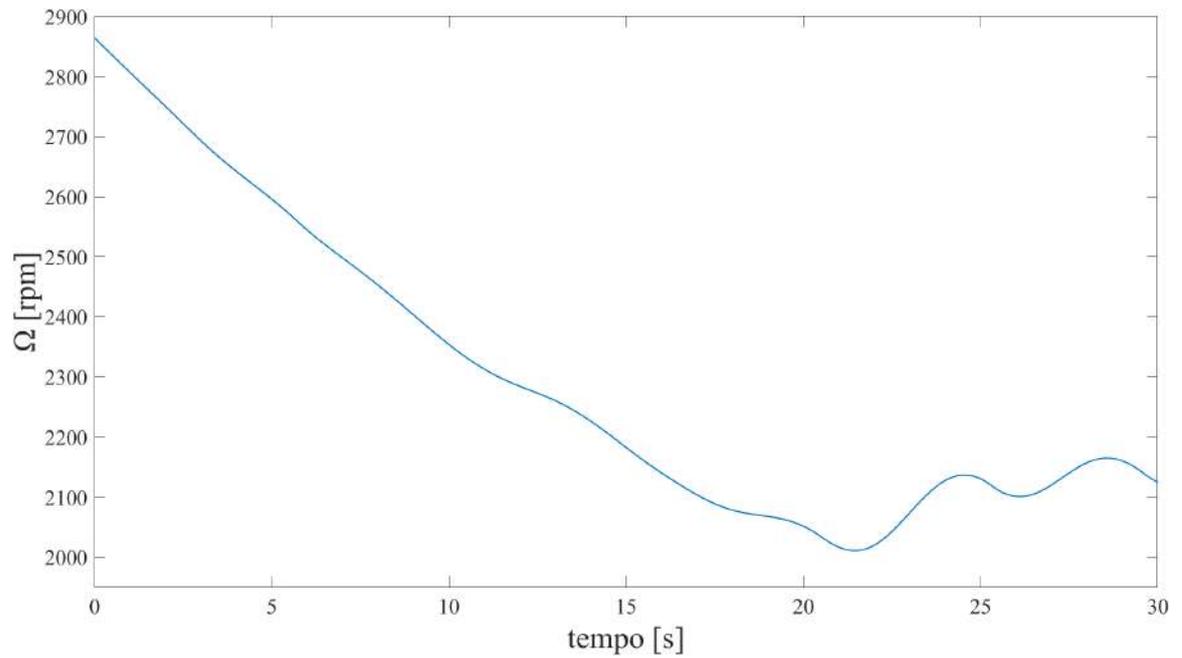


Fonte: Autor.

Neste caso foi feita uma simulação definindo como velocidade inicial de $\Omega_0 = 2850$ rpm do sistema a fim de observar o comportamento do mesmo frente a um estímulo que começa com pressão relativamente baixa, ou seja, cuja a velocidade de rotação irá reduzir, e depois, aumentar com o aumento da pressão observado em aproximadamente 90 s na Figura 71.

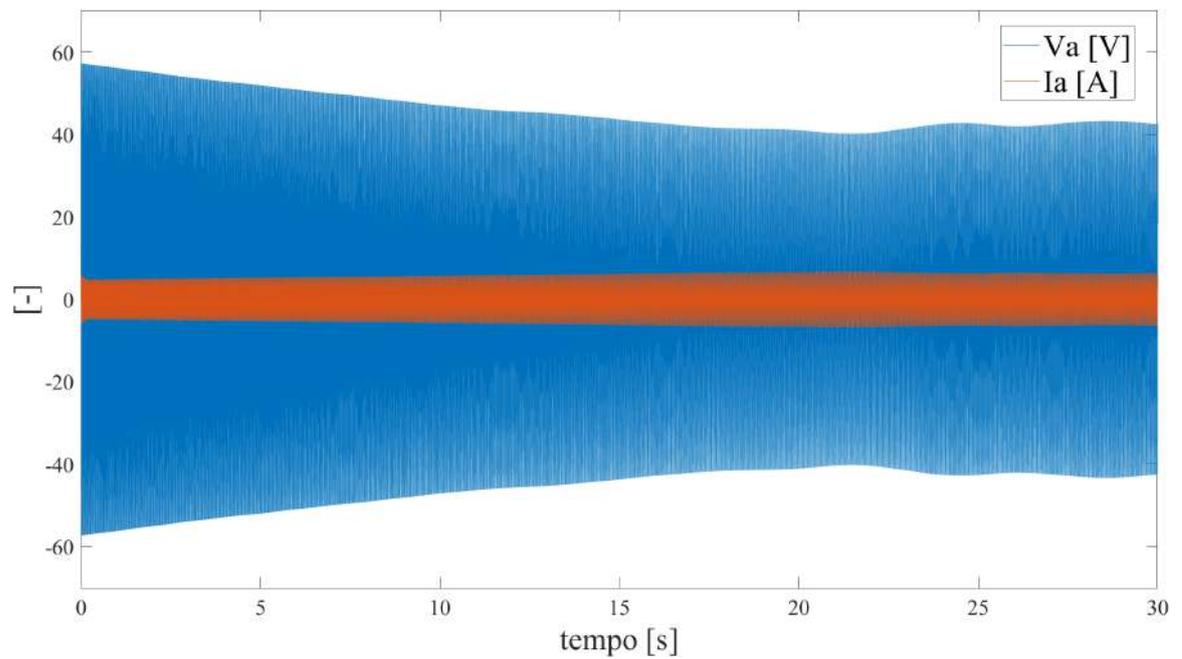
Observamos, novamente, na Figura 72 o comportamento da velocidade de rotação do PTO, assim como o comportamento da tensão de fase e a corrente de fase do gerador, na Figura 73, e a relação entre a potência de referência estipulada e a potência convertida, na Figura 74.

Figura 72 – Velocidade para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.



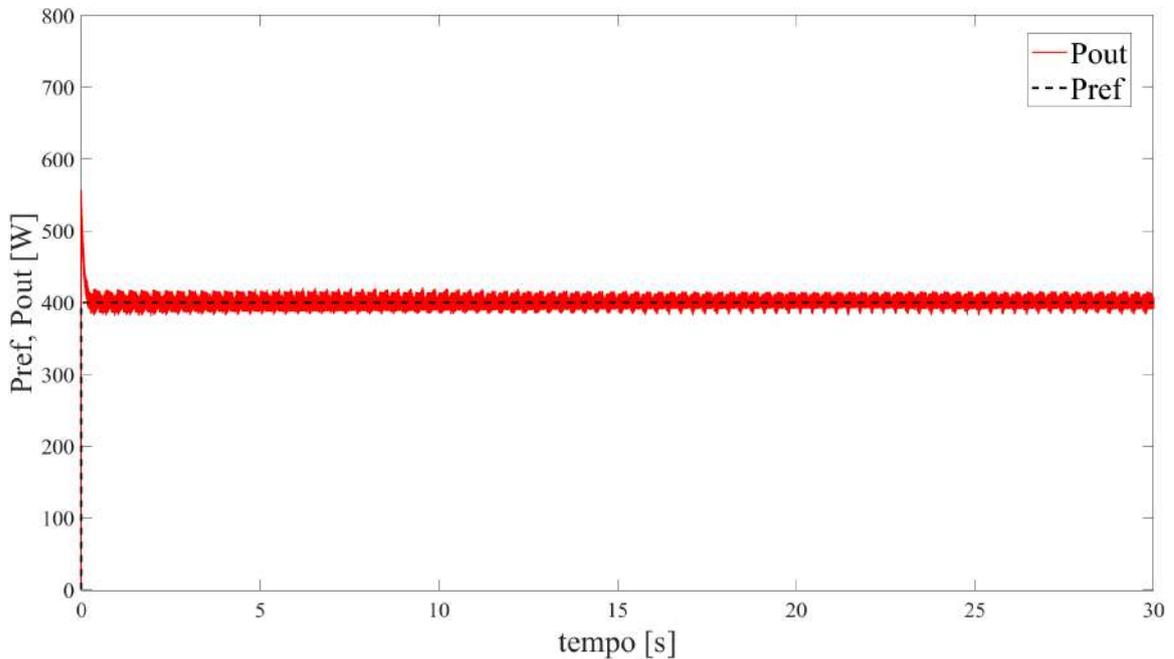
Fonte: Autor.

Figura 73 – Tensão e corrente de fase para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.



Fonte: Autor.

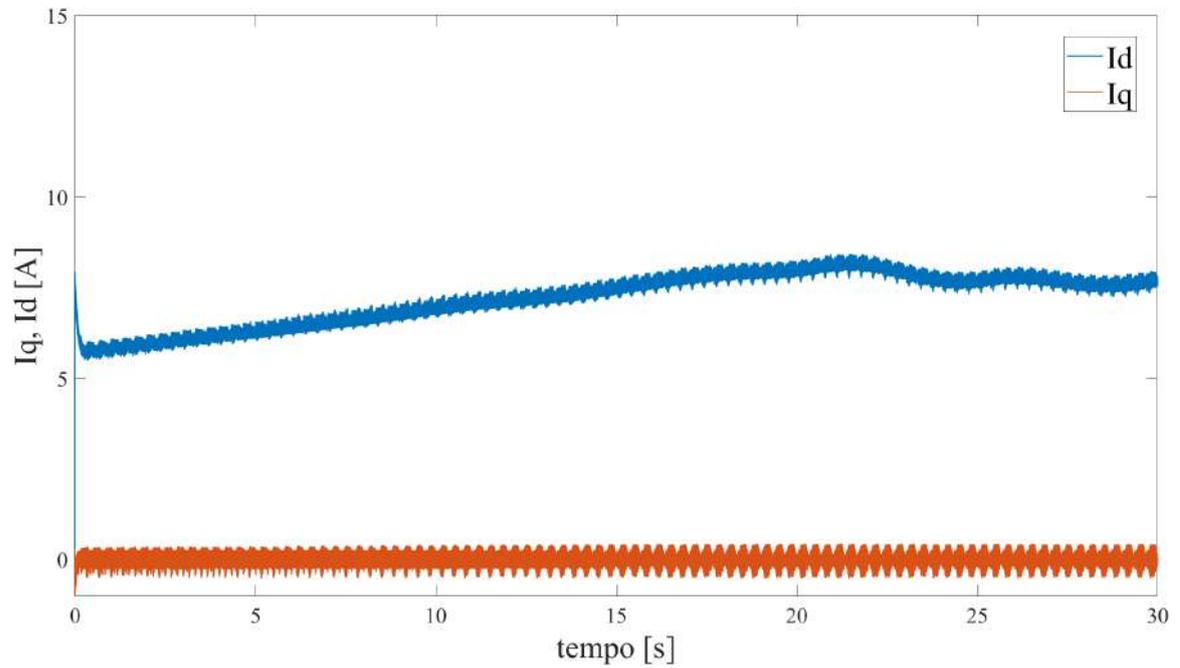
Figura 74 – Potência convertida e potência de referência para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.



Fonte: Autor.

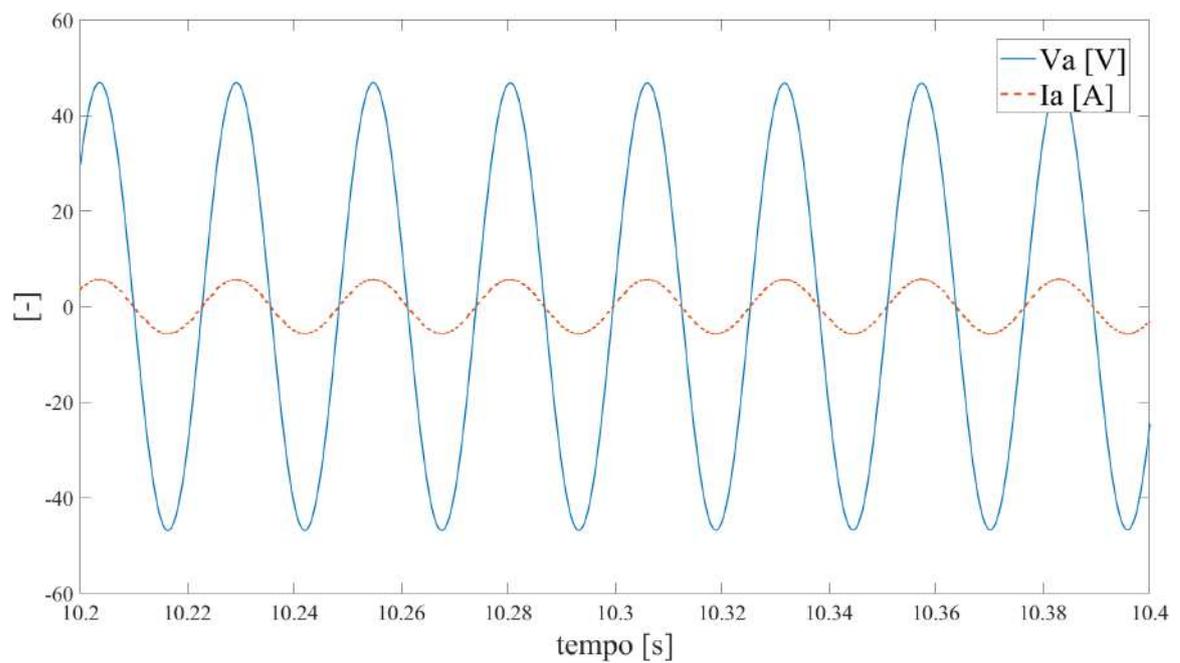
Podemos observar o comportamento oscilatório tanto na tensão quanto na corrente do gerador, que já era esperado e vemos que o controlador conseguiu manter a potência convertida com valor médio igual ao da potência de referência. Na Figura 75, podemos ver ainda que a corrente em quadratura conseguiu manter-se no entorno de zero, atendendo o requisito de projeto de ter o fator de potência unitário, assim como podemos verificar que por conta da queda da velocidade e, portanto, da queda da tensão do gerador, temos que para compensar a demanda da potência fixa, a corrente tem que aumentar. O atendimento do requisito de operação com fator de potência unitário fica evidente quando analisamos qualitativamente a Figura 76.

Figura 75 – Correntes I_d e I_q para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.



Fonte: Autor.

Figura 76 – Detalhe da tensão e corrente de fase para o cenário que considera pressão obtida de dados de campo.



Fonte: Autor.

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO ACP

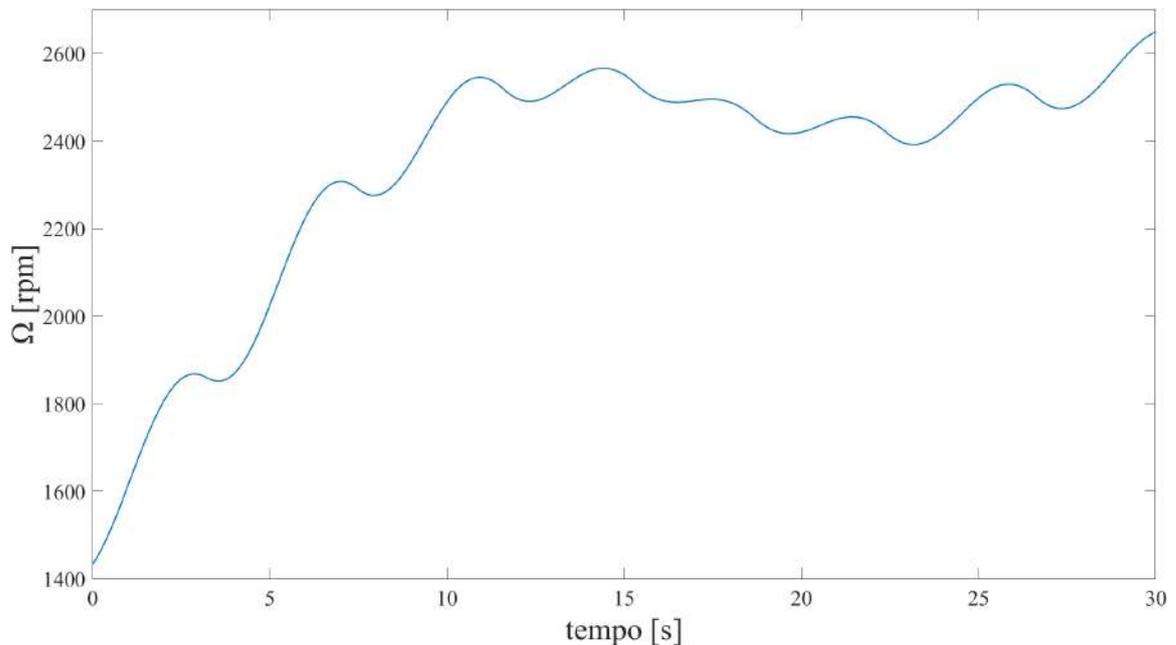
Por fim, a fim de testar o método ACP desenvolvido, o mesmo modelo foi testado nos mesmos dois cenários avaliados na seção anterior, isto é, sendo um cenário com pressão de entrada sendo a soma de sinais cossenoidais e outro cenário com pressão de entrada obtida em campo. Existe, no entanto, uma diferença importante no modelo em relação à subseção anterior relacionada à referência de potência. Na seção anterior foi considerada a potência de referência como constante. Entretanto, nesta seção a potência de referência é variável e determinada pelo método ACP.

4.3.1 Caso com soma de componentes cossenoidais

Novamente, neste caso foi feita uma simulação, tendo como velocidade inicial de $\Omega_0 = 1450$ rpm do sistema a fim de observar o comportamento com potência de referência variável, de acordo com o algoritmo desenvolvido.

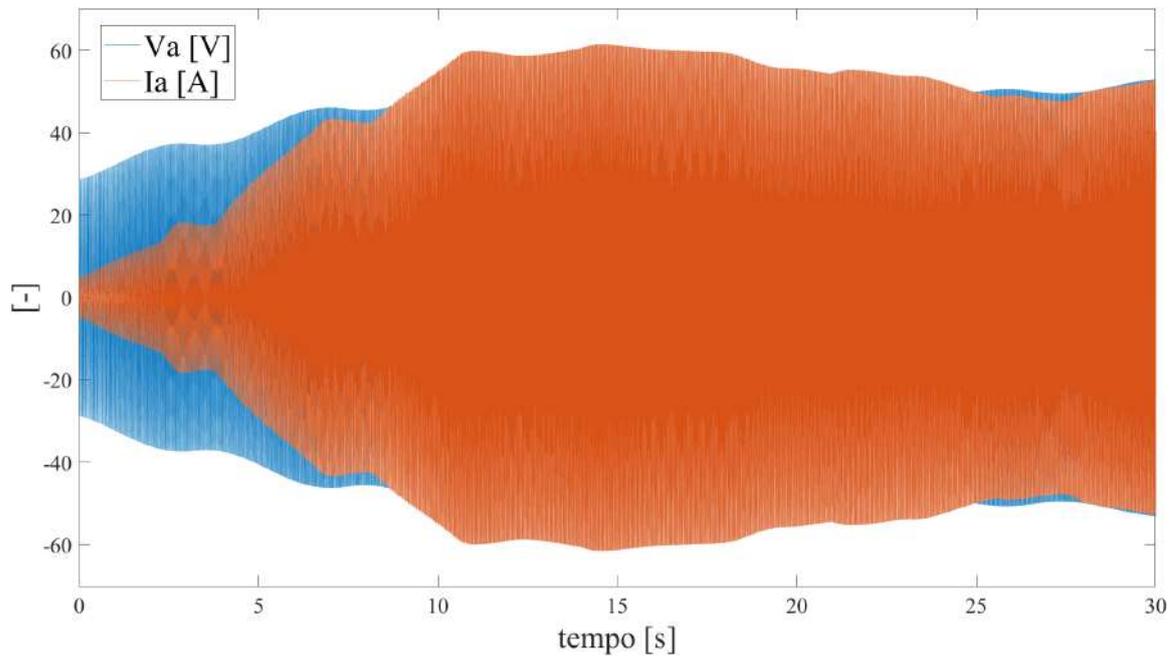
Podemos observar na Figura 77 o comportamento da velocidade do PTO, assim como o comportamento da tensão de fase e a corrente de fase do gerador, na Figura 78, e a relação entre a potência de referência determinada pelo ACP e a potência convertida, na Figura 79.

Figura 77 – Velocidade com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP.



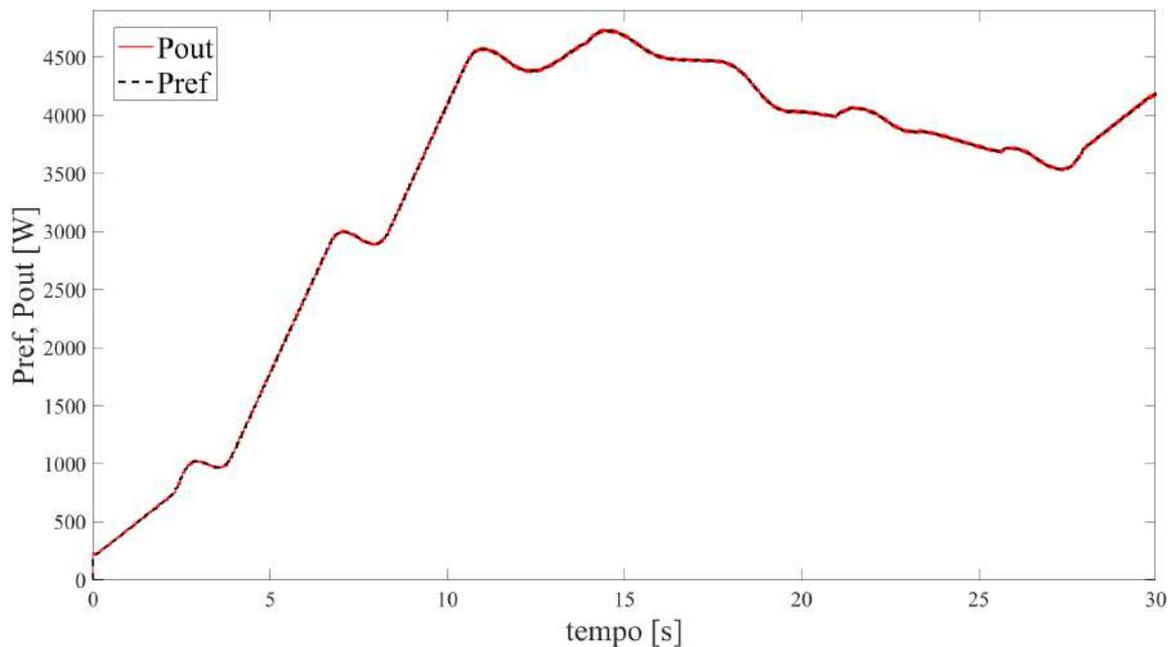
Fonte: Autor.

Figura 78 – Tensão e corrente de fase com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP.



Fonte: Autor.

Figura 79 – Potência convertida e potência de referência com pressão de entrada como soma de componentes cossenoidais e referência de pressão determinada com ACP.

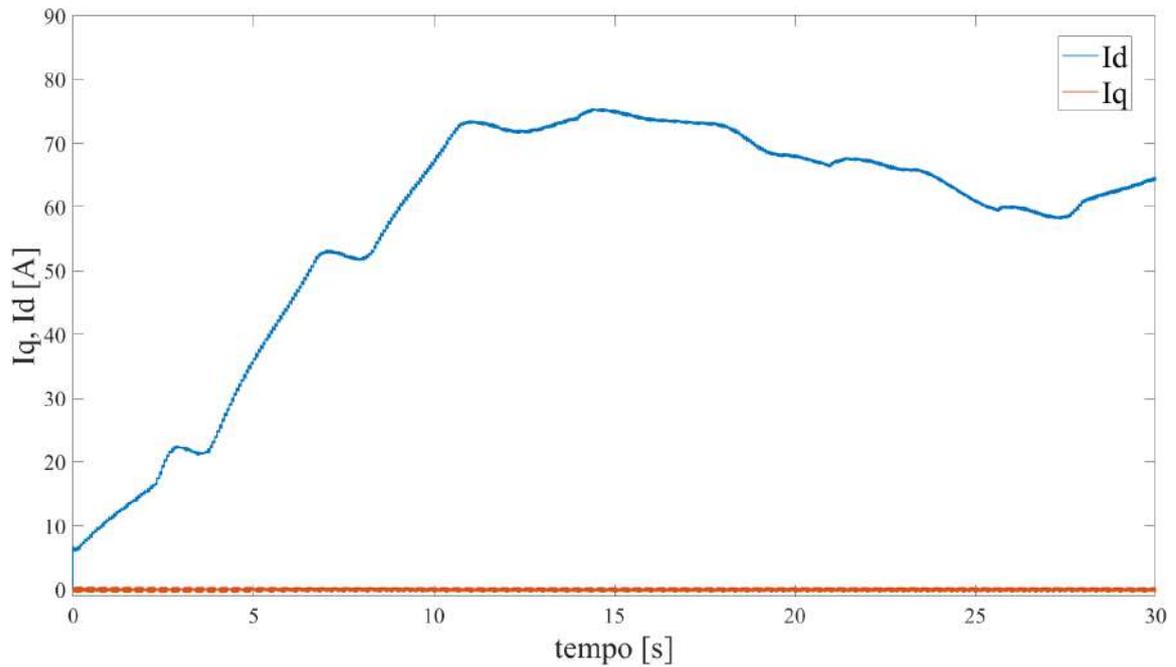


Fonte: Autor.

Podemos observar na Figura 79 um comportamento oscilatório na potência de referência e isso também é visível na velocidade, assim como na tensão quanto na corrente do gerador, que já era esperado e vemos que o controlador conseguiu manter a potência

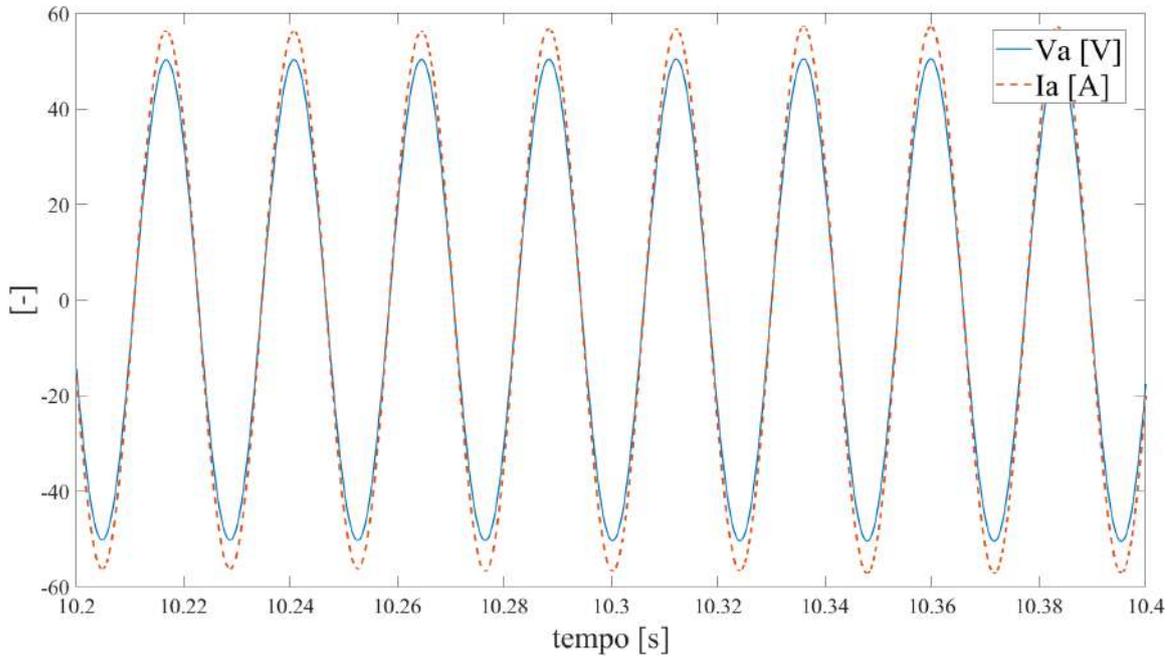
convertida seguindo a potência de referência, mesmo com significativas na referência. Na Figura 80 podemos ver que a corrente de quadratura conseguiu manter-se no entorno de zero, atendendo o requisito de projeto de ter o fator de potencia unitário, assim como podemos verificar que por conta da oscilação da velocidade, a corrente tem grande oscilação também. O atendimento do fator de potência unitário fica evidente quando analisamos qualitativamente a Figura 81.

Figura 80 – Correntes I_d e I_q com pressão de entrada como soma de componentes cosenoidais e referência de pressão determinada com ACP.



Fonte: Autor.

Figura 81 – Detalhe da tensão e corrente de fase com pressão de entrada como soma de componentes cosenoidais e referência de pressão determinada com ACP.



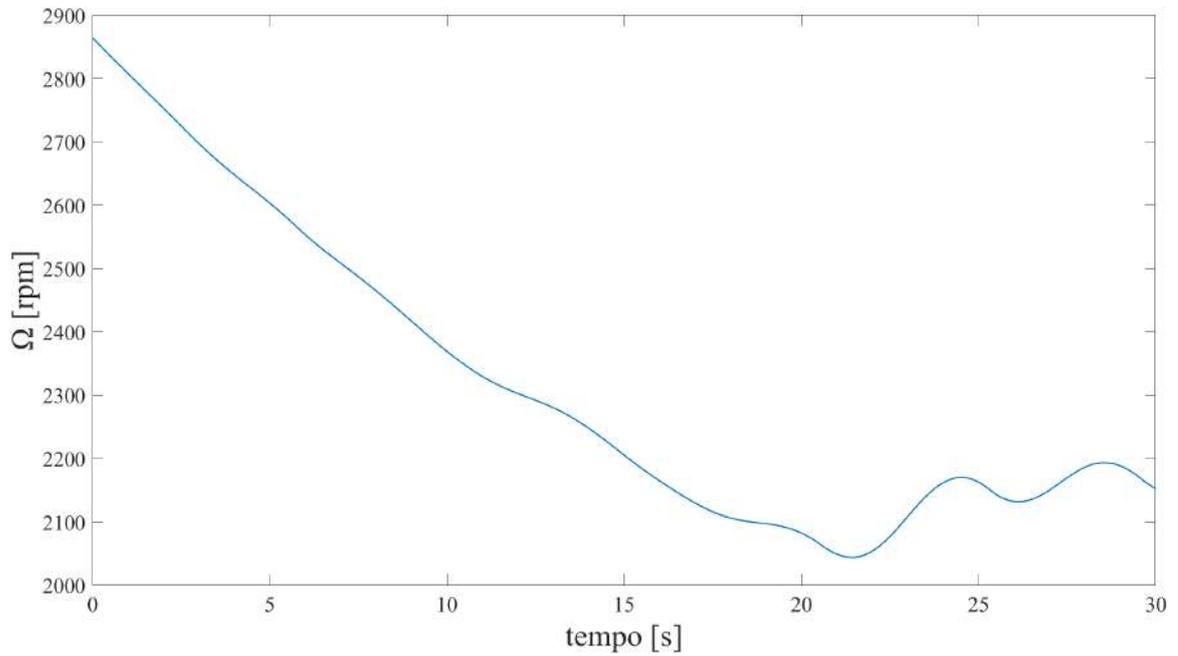
Fonte: Autor.

4.3.2 Caso com dados experimentais

Considerando novamente um perfil de pressão obtido de dados de campo, conforme Figura 71, e adotando velocidade inicial de aproximadamente $\Omega_0 = 2850$ rpm, foram realizadas análises análogas às anteriormente apresentadas.

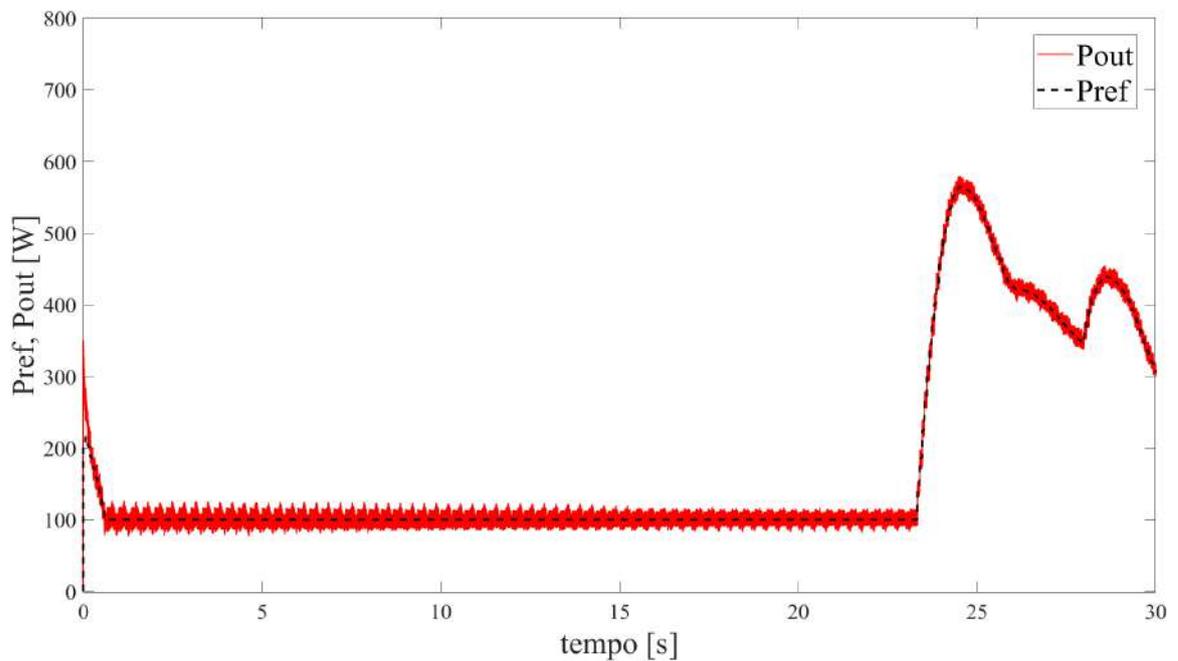
Neste caso, observamos, novamente, na Figura 82 o comportamento da velocidade de rotação do PTO, assim como o comportamento da tensão de fase e a corrente de fase do gerador, na Figura 84, e a relação entre a potência de referência determinada pelo ACP e a potência convertida, na Figura 83.

Figura 82 – Velocidade com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.



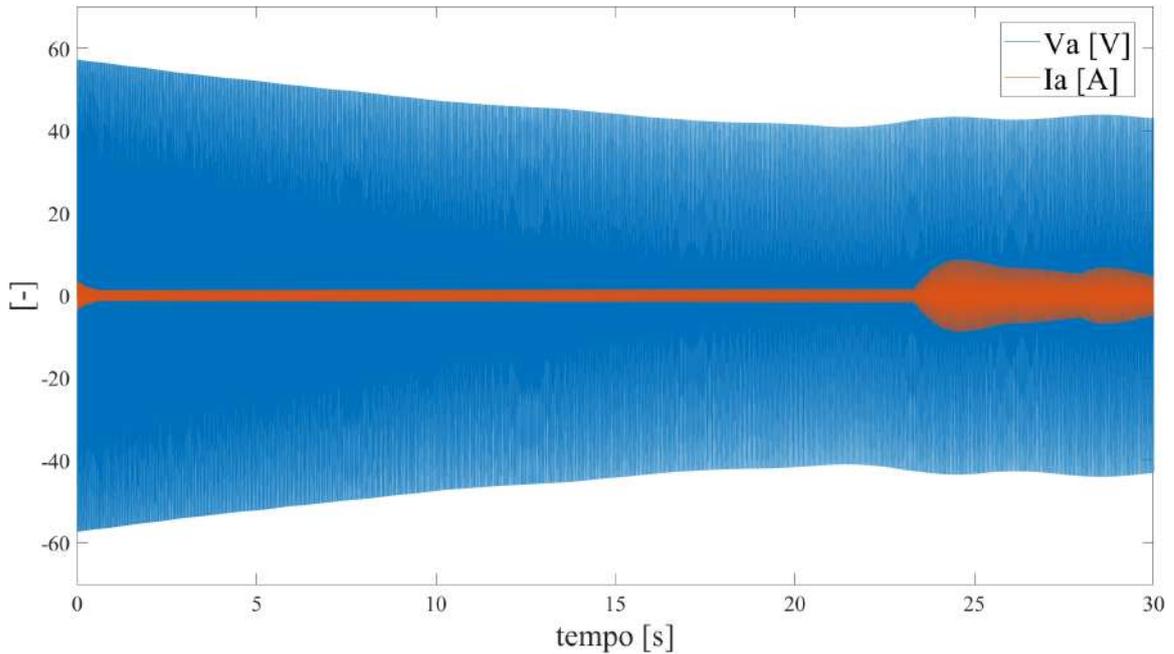
Fonte: Autor.

Figura 83 – Potência convertida e potência de referência com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.



Fonte: Autor.

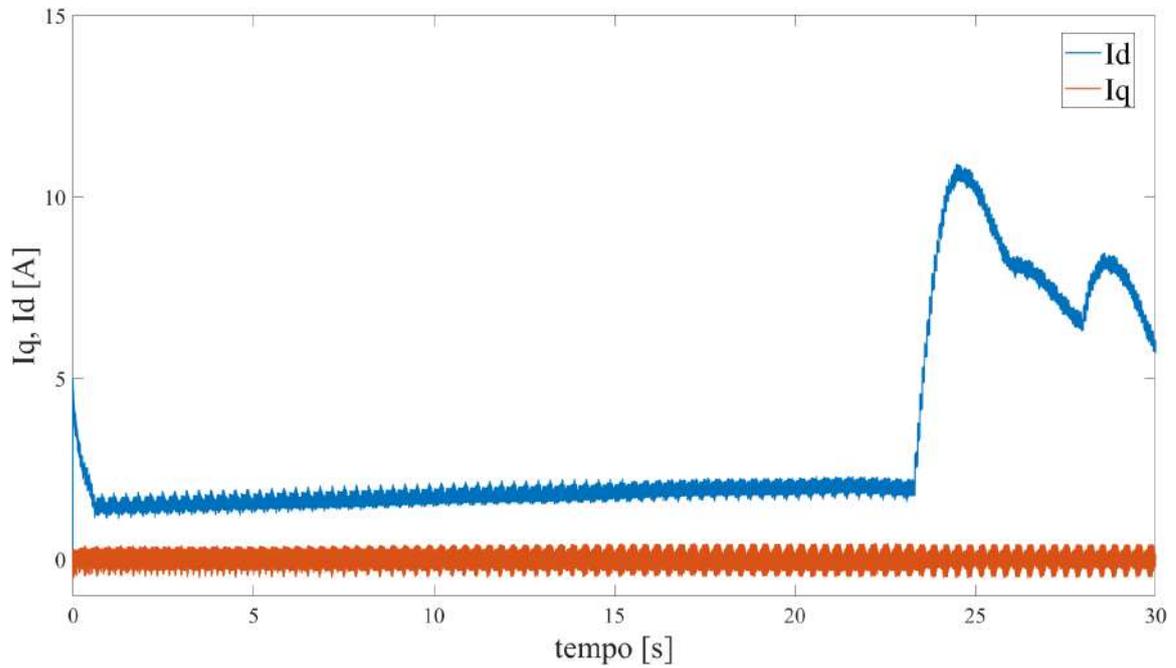
Figura 84 – Tensão e corrente de fase com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.



Fonte: Autor.

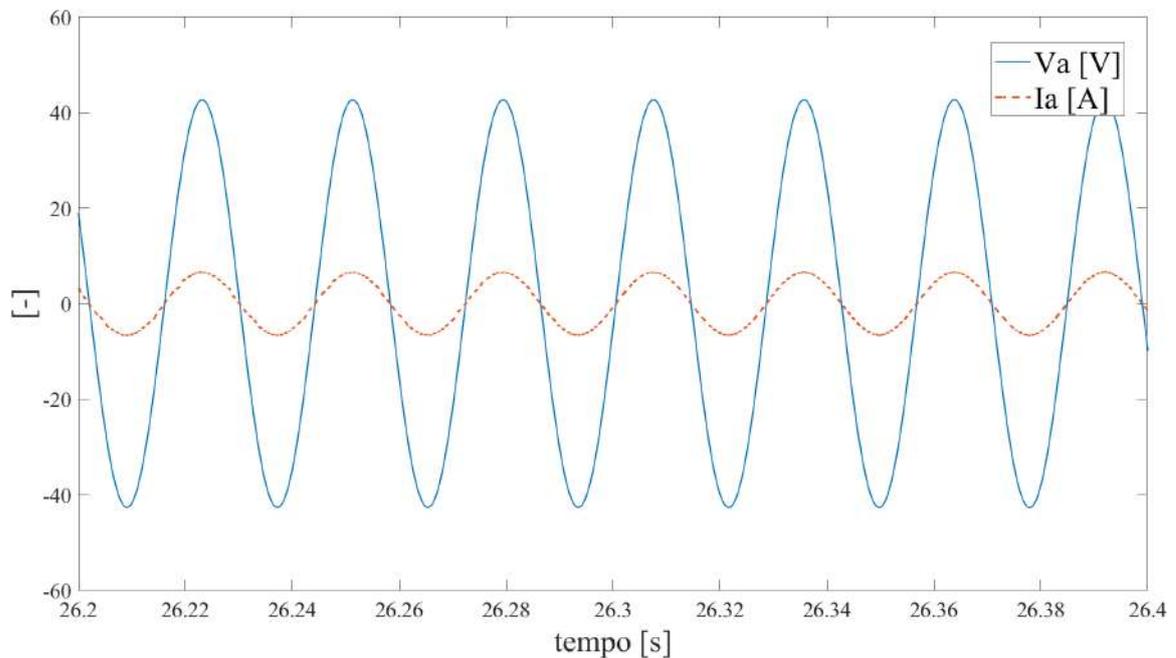
Podemos observar que o algoritmo percebe que a velocidade está decaindo e tenta conter essa queda diminuindo a potência de referência para o mínimo estipulado, de 100 W. Vemos que essa contenção fez que com a velocidade decaísse menos que no caso da potência constante. Na Figura 85 podemos ver que a corrente em quadratura conseguiu manter-se no entorno de zero, atendendo o requisito de projeto de ter o fator de potência unitário, assim como podemos verificar que por conta da queda da velocidade e, portanto, da queda da tensão do gerador, temos que para compensar a demanda da potência fixa, a corrente do eixo direto tem que aumentar, assim como na validação anterior. O atendimento do fator de potência unitário fica evidente quando analisamos qualitativamente a Figura 86.

Figura 85 – Correntes I_d e I_q com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.



Fonte: Autor.

Figura 86 – Detalhe da tensão e corrente de fase com pressão de entrada baseada em dados experimentais e referência de pressão determinada com ACP.



Fonte: Autor.

Em suma a aplicação do método ACP desenvolvido para este trabalho obteve êxito no fundamento principal de sua aplicação, ou seja, com o método ACP desenvolvido para

o projeto foi possível obter, de forma autônoma e eficiente, a potência ótima instantânea, buscando e encontrando o ponto de máxima potência gerada na operação do sistema.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho detalhou um estudo teórico e computacional sobre a criação de um modelo representativo do PTO de um sistema de geração de um WEC-OWC, para estudo, testes e aplicações do tipo *Hardware-in-the-Loop*. Em adição foram realizados testes com o modelo pneumático-mecânico, junto com sistema de geração, desenvolvidos previamente e a elaboração de um algoritmo de adequação da potência de referência ao longo do tempo, baseado na técnica MPPT, o ACP.

O dimensionamento do modelo pneumático-mecânico se deu com base nos dados de campo obtidos pelo Projeto OPERA financiado pela União Europeia e realiza pelo Instituto Técnico da Universidade de Lisboa na planta de Mutriku, Espanha, e nos serviu para a criação do modelo como para sua validação.

O modelo, desenvolvido na ferramenta Simulink®/MATLAB®, foi submetido a testes específicos para o modelo onde verificamos o quão assertivo os valores de conjugado da turbina o modelo apresentava e, posteriormente o mesmo para os cálculos de velocidade de rotação do PTO. Verificou-se que parte do modelo, referente à turbina apresentou valores satisfatórios; porém, para os cálculos de velocidade foram necessárias adequações empíricas para considerar perdas existentes no sistema de geração e se obter resultados compatíveis com os dados experimentais disponíveis.

Os testes realizados utilizando o modelo desenvolvido neste trabalho e o modelo do sistema de geração, desenvolvido por (SANTOS, 2021), mostraram bons resultados, onde o sistema conseguiu manter o fator de potência unitário e convertendo a potência de referência estipulada.

Por outro lado, para avaliar o funcionamento do sistema integrado junto ao algoritmo ACP desenvolvido, foi possível demonstrar que sempre se operou com os valores de referência de potência estipulado em cada instante, e que a potência convertida pode ser otimizada para este tipo de sistema de geração.

Por fim, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios para o que se propunha, que era a elaboração de um modelo representativo de um sistema WEC-OWC, de maneira simplificada, que possa ser utilizado em testes do tipo *Hardware-in-the-Loop* no futuro. Essa modelagem simplificada, a partir de dados de campo e formada pelas equações adimensionais mencionadas, mostrou-se muito eficiente no cálculo do conjugado e velocidade do conjunto turbina-gerador. Contudo as noções relacionadas às perdas do PTO (*Power Take Off*) ainda precisam ser aprofundadas.

Com base nos estudos realizados e apresentados ao longo deste trabalho, sugere-se que os seguintes temas sejam avaliados para trabalhos futuros:

- a construção de uma bancada para um ambiente de testes *Hardware-in-the-Loop*

utilizando o modelo aqui desenvolvido junto com o servomotor desenvolvido por (ASSENHEIMER, 2021) para robustez de eventuais estudos na área;

- incorporar ao modelo o comportamento hidrodinâmico do sistema que modela a interação entre ondas do mar e a boia longarina de forma que se possa entrar com referência associada ao comportamento das ondas do mar;
- avaliar diferentes métodos de controle do retificador trifásico a fim de verificar qual seria a escolha mais adequada e eficiente para as variações inerentes da energia das ondas;
- aprofundar o estudo relacionado a perdas em sistemas de geração de modo geral, e também em sistemas específicos do tipo WEC-OWC para aprimoramento do modelo desenvolvido.

Referências

- ASSENHEIMER, A. **Projeto E Desenvolvimento De Uma Bancada Hardware-in-the-Loop Para Testar Um Sistema De Geração De Energia De Ondas Oceânicas**. Monografia (TCC) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- BERENJKOOB, M. N.; GHIASI, M.; SOARES, C. G. Performance of two types of mooring systems in the heave motion of a two-body floating wave energy converter. **Journal of Marine Science and Application**, 03 2019.
- BORGONOVO, D. **Análise Modelagem E Controle De Retificadores PWM Trifásicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- BRAYANOV, N.; STOYNOVA, A. Review of hardware-in-the-loop - a hundred years progress in the pseudo-real testing. **Electrotechnica Electronica (+)**, v. 54 (3-4), p. 70–84, 12 2019. ISSN 0861-4717.
- CARRELHAS, A. A. de F. D. I. **Estudo experimental do modelo e protótipo de uma turbina auto-rectificadora bi-radial com pás fixas**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2017.
- DUARTE, A. P. de A. **Modelling and analysis of a backward bent duct buoy WEC for oceanographic applications**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2018.
- FALCÃO, A. F.; HENRIQUES, J. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1391–1424, 2016.
- FALCÃO, A. F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 899–918, 2010.
- FANG, H.; WANG, D. Design of permanent magnet synchronous generators for wave power generation. **Transactions of Tianjin University**, 2016.
- GARRIDO, A. et al. Mathematical modeling of oscillating water columns wave-structure interaction in ocean energy plants. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, p. 1–11, 11 2015.
- GATO, L.; HENRIQUES, J.; CARRELHAS, A. Sea trial results of the biradial and wells turbines at mutriku wave power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 268, p. 115936, 2022. ISSN 0196-8904.
- GONZÁLEZ, A. T. et al. Is wave energy untapped potential? **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 205, p. 106544, 2021.
- HENRIQUES, J. et al. Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys. **Energy**, v. 112, p. 852–867, 2016.
- NURICH, L. B. **Projeto, Simulação E Análise De Conversores Estáticos Para Geração De Energia Elétrica A Partir Do Movimento De Ondas Oceânicas**. Monografia (TCC) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- SAMUEL, J.; A, S. S.; SUNDAR, V. An experimental study on wave forces and pressures on an oscillating water column under random waves. 07 2019.

SANTOS, I. M. dos; TAVARES, R. B.; ECKERT, P. R. Design and analysis of pmsg and pwm boost converter for isolated ocean wave energy conversion system. In: **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 924–931.

SANTOS Ígor M. D. **Sistema De Conversão De Energia Dedicado Para Geração De Energia Elétrica A Partir De Ondas Marítimas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SIQUEIRA, E. S. **Controle por inclinação para paralelismo de inversores em microrredes**. Porto Alegre: [s.n.], 2003.

TEDD, J. et al. Advanced control techniques for wec wave dragon. **Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference**, 2007.

TORRE-ENCISO, Y. et al. Mutriku wave power plant: from the thinking out to the reality. **Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference**, 2009.

WERMANN, F. D. S. **Aplicação Da Técnica Mppt Para Otimização De Energia Convertida Em Sistema De Geração A Partir Do Movimento De Ondas Oceânicas**. Monografia (TCC) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

YAMACHITA, R. A. **Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha**. Monografia (TCC) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.