

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

**ALEXANDRE ASSENHEIMER**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA *HARDWARE-IN-THE-  
LOOP* PARA TESTAR UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ONDAS  
OCEÂNICAS**

Porto Alegre

2021

**ALEXANDRE ASSENHEIMER**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA *HARDWARE-IN-THE-LOOP* PARA TESTAR UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ONDAS OCEÂNICAS**

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

2021

**ALEXANDRE ASSENHEIMER**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA *HARDWARE-IN-THE-LOOP* PARA TESTAR UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE ONDAS OCEÂNICAS**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert

BANCA EXAMINADORA

Prof. Paulo Roberto Eckert, UFRGS

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

Prof. Luís Tiarajú dos Reis Loureiro

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

Mestre Ben Hur Bandeira Boff

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

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha esposa fiel e sua paciência que caminharam lado a lado comigo por tantos anos. Sua paciência, porém, às vezes mais longe, às vezes mais perto, mas sempre fiel.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha amada Juliet Mirel Assenheimer que me concedeu os dois maiores presentes que poderíamos ter nestes anos de faculdade. Às nossas duas pequenas filhas, Anna Sofie Assenheimer e Cecília Assenheimer que, mesmo tão pequenas, abnegaram uma parte preciosa de seu tempo comigo e repetiam palavras como “papai vai estudar”.

Ao professor, orientador e parceiro Paulo Roberto Eckert por viabilizar e me permitir participar deste projeto maravilhoso.

Ao grande colega e sempre professor Bruno Fensterseifer Dias pelo apoio e amizade durante os tempos de faculdade.

Ao professor Igor Pasa Wiltuschnig pelo apoio e auxílio quando necessário durante o desenvolvimento deste projeto.

Aos meus pais, Renato Schmidt Assenheimer e Margid Lilian Assenheimer, que neste momento final de curso, prestaram todo suporte para que fosse possível a conclusão deste curso.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, seus professores e servidores, que contribuíram para minha formação.

Àquele que criou todas as coisas e as escondeu em ciência para que possamos definhar nossa vida ao pó até que a verdade nos seja revelada.

“Post Tenebras Lux”

Jean Calvin

## RESUMO

Um sistema *Hardware-In-the-Loop* para emular um conjunto turbina e gerador capaz de gerar energia pelo movimento das ondas é o objetivo deste trabalho. É apresentada uma visão geral sobre os diversos modelos de geradores existentes no mundo, além de realizar uma síntese do modelo matemático de um gerador de energia por ondas através de coluna d'água oscilante. Por meio de referências de curva de rendimento, o dispositivo HIL é construído para replicar um modelo real de sistema boia e turbina, desacoplando do modelo seu gerador original e incorporando uma máquina de ímãs permanentes. Sistemas de hardware, instrumentos de medição e softwares são implementados com o objetivo de realizar controle de torque por meio da PTO entre turbina e gerador. São realizados ensaios a vazio e curto-circuito para obtenção de parâmetros do gerador, tais como indutância de eixo direto e quadratura.

**Palavras-Chaves:** Gerador de energia por ondas; *Hardware-In-the-Loop* (HIL); Coluna d'água oscilante; Máquina síncrona de ímãs permanentes; Indutância de eixo direto e quadratura.

## **ABSTRACT**

A Hardware-In-the-Loop system to emulate a turbine and generator set capable of generating energy through the movement of waves is the objective of this work. An overview of the different models of generators existing in the world is presented, as well as a synthesis of the mathematical model of a wave energy generator through the oscillating water column. Using yield curve references, the HIL device is built to replicate a real model of a float and turbine system, decoupling its original generator from the model and incorporating a permanent magnet machine. Hardware systems, measuring instruments and softwares are implemented with the objective of performing torque control through the Power Take Off (PTO) between turbine and generator. Open-circuit and short circuit tests are performed for generator parameter results, such as quadrature and direct axis inductance.

**Keywords: Ocean wave generator; Hardware-In-the-Loop (HIL); Oscillating-water-column; Synchronous permanent magnet machine; Direct axis and quadrature inductance.**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de um sistema OWC com (a) turbina unidirecional e (b) boia de longarina.	20
Figura 2: Etapas de apresentação do trabalho.	22
Figura 3: Estrutura do HIL WEC-OWC desenvolvido no trabalho.	23
Figura 4: Consumo primário global de energia por fonte entre os anos de 1965 e 2019.	25
Figura 5: Geração de energia através de boia com duplo sistema de energia composto por conversor de energia por ondas e painel solar.	25
Figura 6: Tabela comparativa da produção elétrica mensal de energia entre geradores de energia por ondas do mar e fotovoltaica/solar na ilha de Lampedusa, Itália.	26
Figura 7: Tipos de geradores de energia por ondas. Gerador de energia por ondas fixo em costa marítima (a), Gerador de energia por ondas com boia em superfície (b), Sistema de geração de energia submersa por aríetes hidráulicos (c), Gerador de energia por ondas através de galgamento flutuante (d).	27
Figura 8: Modelo WEC-OWC.	29
Figura 9: Movimento relativo WEC-OWC.	30
Figura 10: Segmentação do WEC-OWC: diagrama do modelo (a), ilustração do modelo e suas partes (b).	31
Figura 11: Rendimento das turbinas com diâmetro 0,2m e 0,25m, conforme os 14 estados do mar.	35
Figura 12: Gerador de energia por ondas, manivela deslizante.	38
Figura 13: WEC fixa (a) e HIL representativo (b).	39
Figura 14: HIL para ensaio de turbinas para aplicação em WEC.	39
Figura 15: HIL aplicado à sistemas de ensaio em turbina.	40
Figura 16: HIL simulando as condições do mar, conectado a um sistema de potência.	41
Figura 17: Blocos de funcionamento do WEC-OWC emulado.	42
Figura 18: Curvas de rendimento da turbina, relação potência <i>versus</i> rotação (a) e conjugado <i>versus</i> rotação (b). “ $d = 0,250 (n02)$ ” corresponde ao 2º estado do mar enquanto “ $d = 0,250 (n11)$ ” representa o 11º estado do mar.	44
Figura 19: Blocos dos modelos simulados em Software PSIM® Professional Versão 12.0.4.	45
Figura 20: Bloco boia e turbina.	45
Figura 21: Bloco gerador.	46
Figura 22: Bloco de controle.	46

Figura 23: Bloco onda de referênica.	46
Figura 24: Esquema de ligações do HIL WEC-OWC.	47
Figura 25: Fluxograma adotado para obtenção dos parâmetros do gerador.	49
Figura 26: Modelo de gerador, circuito equivalente. Diagrama de eixo em quadratura (a), diagrama de eixo direto (b).	50
Figura 27: Análise comparativa de densidade de fluxo magnético entre ensaio sob carga nominal (a), ensaio de curto-circuito (b), ensaio de curto-circuito com impedância reativa externa (c).	52
Figura 28: Ensaio de rotor bloqueado com alimentação por fonte de corrente controlada. Conexão com fase A e divisão entre fases B e C (a), conexão entre fases B e C (b).	52
Figura 29: Imagens da máquina síncrona de ímãs permanentes empregada como gerador no sistema HIL. Rotor com ímãs de ferrite (a), estator com enrolamento distribuído e sem inclinação de ranhuras (b).	56
Figura 30: Relação tensão de fase de pico <i>versus</i> rotação com o gerador a vazio.	57
Figura 31: Formas de onda de tensão de fase a vazio no gerador com rotação de 1.000 rpm	58
Figura 32: FFT da tensão a vazio no gerador com rotação de 1.000 rpm, amplitude fundamental e 3º harmônica.	58
Figura 33: Valor de pico da componente fundamental e de terceira harmônica da tensão de fase a vazio para ensaios de 100 a 3000 rpm.	59
Figura 34: Ensaio de reatância síncrona para as 3 fases do gerador em (a) fase A, (b) fase B, (c) fase C.	59
Figura 35: Fotografias da bancada para os ensaios de rotor bloqueado.	62
Figura 36: Modelo de simulação de gerador sob carga.	64
Figura 37: Ensaio de gerador sob carga. (a) bancada com cargas resistivas. (b) detalhamento da ligação em triângulo das cargas.	65
Figura 38: Comparação entre dados de corrente elétrica obtidas por ensaio e simulação.	65
Figura 39: Comparação entre dados de tensão elétrica terminal obtidas, ensaio e simulação.	65
Figura 40: Comparação entre dados de rotação obtidas por ensaio e simulação.	65
Figura 41: Modelo Simulink para aplicação do HIL.	67
Figura 42: Curvas de potência <i>versus</i> rotação (a) e conjugado <i>versus</i> rotação (b). Destaque aos pontos simulados em regime permanente na curva n02.	68
Figura 43: Curvas de potência <i>versus</i> rotação (a) e conjugado <i>versus</i> rotação (b). Destaque aos pontos simulados em regime permanente na curva n11.	68

Figura 44: Curvas de conjugado (conjugado), Conjugado de referência (conjugado <sub>ref</sub> ) do modelo matemático, e rotação (rotação) para uma carga de 242 $\Omega$ do modelo simulado de HIL para a curva n11.	69
Figura 45: HIL do modelo de WEC OWC emulado.	70
Figura 46: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 100 rpm. (b) 200 rpm.	75
Figura 47: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 300 rpm. (b) 400 rpm.	75
Figura 48: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 500 rpm. (b) 600 rpm.	75
Figura 49: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 700 rpm. (b) 800 rpm.	75
Figura 50: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 900 rpm. (b) 1000 rpm.	76
Figura 51: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1100 rpm. (b) 1200 rpm.	76
Figura 52: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1300 rpm. (b) 1400 rpm.	76
Figura 53: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1500 rpm. (b) 1600 rpm.	76
Figura 54: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1700 rpm. (b) 1800 rpm.	77
Figura 55: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1900 rpm. (b) 2000 rpm.	77
Figura 56: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2100 rpm. (b) 2200 rpm.	77
Figura 57: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2300 rpm. (b) 2400 rpm.	77
Figura 58: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2500 rpm. (b) 2600 rpm.	78
Figura 59: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2700 rpm. (b) 2800 rpm.	78
Figura 60: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2900 rpm. (b) 3000 rpm.	78
Figura 61: Conjugado de referência versus conjugado lido pelo torquímetro.	80
Figura 62: Medidas de rotação [rpm] em ensaio de curto-circuito.	81
Figura 63: Medida de corrente elétrica e sinal de conjugado em ensaio de curto-circuito.	82
Figura 64: Ensaio de curto-circuito, corrente.	83
Figura 65: Ensaio de curto-circuito, conjugado.	83

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1: Dados das máquinas e do torquímetro.....	47
Tabela 2: Medidas de tensão de pico de fase <i>versus</i> rotação.....	57
Tabela 3: Medidas de resistência de fase.....	60
Tabela 4: Dados do ensaio de rotor bloqueado.....	62
Tabela 5: Dados do ensaio de curto-circuito. ....	62
Tabela 6: Dados do gerador ( $R_s, L_d, L_q, V_{pk}/krpm, P, J$ ).....	63
Tabela 7: Resultados experimentais e de simulação do gerador com carga para operação com imposição de conjugado no eixo pelo servomotor. ....	64
Tabela 8: Simulações e ensaios a partir da aplicação de cargas em HIL. ....	67
Tabela 9: Ensaio com DSpace e servoconversor SCA-05. Envio de sinal de referência de conjugado e leitura de conjugado no torquímetro. ....	79
Tabela 10: Medidas de corrente e conjugado em curto-circuito. ....	82
Tabela 11: Relação de rotação, tensão elétrica a vazio, corrente elétrica de curto-circuito e resistência síncrona para obtenção de indutância síncrona. ....	84

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

*WEC: Wave Energy Converter*

*OWC: Oscillating-water-column*

*HIL: Hardware-in-the-Loop*

*PTO: Power Take Off*

*ISWEC: Inertial Sea Wave Energy Converter*

*PMSG: Permanent Magnetic Synchronous Generator*

*PTAP: Peak-to-Average Power Ratio*

*SVPWM: (Space Vector Pulse Width Modulation)*

*LMEAE: Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Constante geral da lei de controle do gerador
$A_{ij}$	Matriz de estados do espaço de estados $R_{ij}$
$A_m$	Amplitude de onda dependente da frequência [m]
$A_{\omega j}$	Amplitude de onda [m]
$b$	Expoente da lei de controle do gerador
$d$	Diâmetro da boia [m]
$E$	Tensão induzida [V]
$f$	Frequência [Hz]
$f_{cc}$	Frequência de curto circuito [Hz]
$F_{di}$	Força de difração no corpo $i$ [N]
$g$	Aceleração da gravidade [g]
$H_s$	Altura de onda [m]
$I$	Corrente elétrica [A]
$I_a$	Corrente elétrica de fase A [A]
$I_b$	Corrente elétrica de fase B [A]
$I_c$	Corrente elétrica de fase C [A]
$I_d$	Corrente elétrica de eixo direto [A]
$I_{inercia}$	Momento de inércia [kg m <sup>2</sup> ]
$I_q$	Corrente elétrica de eixo de quadratura [A]
$I_{rms}$	Corrente elétrica eficaz de fase [A]
$I_{sc}$	Corrente elétrica de curto circuito [A]
$k$	Índice de eficiência da turbina
$K$	Constante de força eletromotriz [V/rpm]
$L_d$	Indutância direta [H]

$L_d$	Indutância de eixo direto [H]
$L_{ext}$	Indutância externa [H]
$m$	Massa do corpo [kg]
$m_{turb}$	Taxa de vazão do fluxo de ar da turbina [kg/s]
$N_{cc}$	Rotação em curto circuito [rpm]
$P$	Número de polos
$p$	Pressão dentro da câmara [Pa]
$p^*$	Pressão oscilatória relativa dentro da câmara, adimensional
$P_{at}$	pressão atmosférica [Pa]
$P_{turb}$	Potência da turbina [W]
$R$	Carga externa [ $\Omega$ ]
$R_{ij}$	Forças de radiação amortecidas no corpo i devido ao corpo j [N]
$R_s$	Resistência do estator
$S$	Área de seção transversal anular [m <sup>2</sup> ]
$T_e$	Período energético [s]
$T_{em}$	Conjugado elétrico [N.m]
$V_c$	volume de ar instantâneo dentro da câmara [m <sup>3</sup> ]
$V_d$	Tensão elétrica de eixo direto [V]
$V_{fpl}$	Tensão de fase de pico da fundamental [V]
$V_{l-pp}$	Tensão de linha pico a pico [V]
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto [V]
$V_{oc}$	Tensão a vazio rms [V]
$V_{peak}$	Tensão em circuito aberto [V]
$V_{pk/krpm}$	Tensão elétrica de fase (pico) induzida [V]
$V_q$	Tensão elétrica de eixo quadratura [V]
$X_i$	Posição vertical do corpo i [m]

$X_d$	Reatância de eixo direto [ $\Omega$ ]
$Z$	Impedância [ $\Omega$ ]
$Z_{cc}$	Impedância de curto circuito [ $\Omega$ ]
$\gamma$	Taxa específica de transferência calor do ar
$\eta$	Rendimento da turbina
$\lambda_d$	Fluxo concatenado de eixo direto [Wb]
$\lambda_m$	Fluxo magnético produzido pelos imãs permanentes [Wb]
$\lambda_q$	Fluxo concatenado de eixo de quadratura [Wb]
$\Pi$	Potência adimensional da turbina
$\rho_{in}$	Densidade de entrada do ar na turbina [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{at}$	Densidade do ar em condições atmosféricas [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_w$	Densidade da água [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\Phi$	Taxa de fluxo adimensional da turbina
$\psi$	Cabeça de pressão adimensional
$\Omega$	Rotação [rpm]
$\omega_j$	Frequência da onda [rad/s]
$\omega_e$	Frequência elétrica [rad/s]
$\omega_m$	Velocidade mecânica [rad/s]
$\phi_i$	Resposta de fase do corpo i [rad]
$\phi_{i,m}$	Resposta de fase do corpo i na frequência angular $\omega_m$ e $\phi_r$ [rad]
$\phi_r$	Valor randômico [rad]



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1. GERAÇÃO DE ENERGIA POR ONDAS OCEÂNICAS .....	20
1.2. OBJETIVOS .....	21
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
2.1. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE SISTEMAS WEC-OWC .....	24
2.2. MODELOS DE GERADORES DE ENERGIA .....	26
2.3. WEC-OWC .....	27
2.4. MODELO MATEMÁTICO DA WEC-OWC .....	30
2.4.1 Representação matemática da onda.....	31
2.4.2 Boia de Longarina.....	32
2.4.3 Câmara de ar.....	33
2.4.4 Representação matemática da turbina.....	33
2.5. DADOS DOS ENSAIOS DA TURBINA .....	35
2.6. <i>HARDWARE-IN-THE-LOOP</i> .....	36
2.7. <i>HARDWARE-IN-THE-LOOP</i> APLICADOS À WEC-OWC .....	37
<b>3. SOLUÇÃO PROPOSTA.....</b>	<b>42</b>
3.1. DADOS DE REFERÊNCIA CONJUGADO VERSUS ROTAÇÃO.....	43
3.2. SIMULAÇÃO DE MODELO ATRAVÉS DE SOFTWARE PSIM.....	44
3.3. IMPLEMENTAÇÃO HIL .....	47
3.4. GERADOR DE IMÃS PERMANENTES - ENSAIOS E MODELO .....	48
3.4.1 Modelo de Máquinas Síncronas de Imas Permanentes com Saliência.....	49
3.4.2 Indutância de Eixo Direto.....	51
3.4.3 Indutância de Eixo de Quadratura.....	52
3.4.4 Relação entre Carga, Conjugado e Rotação.....	53

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
4.1. GERADOR .....	56
4.2. SIMULAÇÕES E ENSAIOS HIL .....	66
<b>5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE A – TENSÕES OBTIDAS A VAZIO .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE B – NÃO LINEARIDADE DO CONTROLE DE CONJUGADO ...</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE C – INDUTÂNCIA SEM IMPEDÂNCIA REATIVA ACOPLADA</b>	<b>81</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de energia por ondas dos oceanos apresenta um enorme potencial energético. No entanto, apesar de não ser um conceito novo, o seu desenvolvimento em escala ainda é pouco explorado e há diferentes métodos de aproveitamento para este tipo de energia, com diferentes tipos de aplicação. Por outro lado, há uma crescente demanda por energia limpa e eficaz que demonstra a necessidade de explorar novos métodos de geração mais eficientes, além dos tradicionais sistemas de geração.

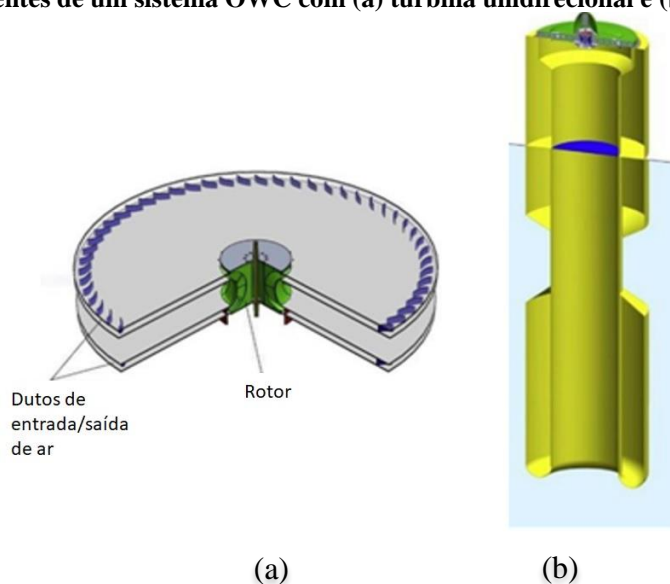
Geradores de energia por ondas oceânicas são sistemas físicos que utilizam o movimento natural das ondas para gerar eletricidade de forma limpa e relativamente constante (se comparado com geradores eólicos e solares). Dentre os diversos modelos de geração de energia por ondas, o conversor de energia das ondas (*Wave Energy Converter* - WEC) através de coluna de água oscilante (*Oscilating Water Column* - OWC) apresenta um compartimento de ar que varia a sua pressão e cria um fluxo de ar capaz de girar um conjunto de pás em uma turbina de acordo com o movimento natural das ondas. Apesar de apresentarem elevado potencial energético, determinadas tecnologias baseadas em WEC-OWC não são comercializadas em larga escala e ainda se apresentam em fase de desenvolvimento. Dessa forma, percebe-se que há uma lacuna de conhecimento a ser explorada capaz de transformar tais dispositivos em produtos comercialmente viáveis aos diversos setores de geração em que há necessidade de energia em plantas *offshore*. Boias oceanográficas e de sinalização marítima são apenas alguns dos dispositivos a serem beneficiados com a geração de energia por ondas os quais, atualmente, fazem uso de baterias e painéis solares que necessitam de constante manutenção.

O desenvolvimento de tecnologias disruptivas necessita de modelos e simulações que, muitas vezes, não são viáveis em seu ambiente natural de aplicação ou apresentam um elevado grau de dificuldade para implementação. A geração de energia com WEC-OWC ocorre em ambiente hostil e de difícil acesso para realização de ensaios experimentais voltados para o desenvolvimento e caracterização da tecnologia. Em tais condições, a pesquisa e desenvolvimento *in loco* é impraticável; portanto, é necessário o uso de alternativas capazes de simular as mesmas condições, porém em ambiente laboratorial. Tais ambientes controlados geralmente fazem uso de modelos híbridos retroalimentados, ou seja, enquanto há o desenvolvimento de uma determinada tecnologia, partes desta podem ser simuladas, ao que chamamos *Hardware-In-The-Loop* (HIL), técnica que será aplicada a este trabalho.

## 1.1. GERAÇÃO DE ENERGIA POR ONDAS OCEÂNICAS

No âmbito do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) da UFRGS, a geração de energia por ondas oceânicas foi estudada de forma precursora por NEUMANN (2016) que, através da construção de um gerador de ímãs permanentes com duplo rotor, foi capaz de gerar energia para uma boia de sinalização marítima. Entretanto, o conceito de geração de energia por ondas marítimas não é novo e sua primeira aplicação em boias oceânicas (ou marítimas) foi realizada por Yoshio Masuda (HENRIQUES *et al.*, 2016) que, posteriormente, foi nomeada como coluna de água oscilante (OWC). Através dos estudos de FALCÃO *et al.* (2012), o modelo da *spar buoy* (em tradução livre, boia de longarina) foi matematicamente definido e aprimorado, enquanto os estudos de otimização em torno de uma turbina com funcionamento unidirecional aplicados por FALCÃO *et al.* (2013) tornaram o conversor de energia por ondas (WEC) mais eficiente no ponto da Tomada de Força (PTO). A partir destes estudos, seguiram-se inúmeros outros ao integrar a boia de longarina com a turbina unidirecional (FALCÃO *et al.*, 2016), os quais comparam rendimento em diâmetros diferentes de rotores (HENRIQUES *et al.*, 2016), definiram uma metodologia sistemática para otimização de conversores de energia em longarinas OWC e OWC coaxial (HENRIQUES *et al.*, 2016), além de modelos e simulações baseadas em HIL (FONSECA *et al.*, 2019; HENRIQUES *et al.*, 2016). O modelo de turbina e boia de longarina podem ser observados na Figura 1 (a) e (b), respectivamente.

**Figura 1: Componentes de um sistema OWC com (a) turbina unidirecional e (b) boia de longarina.**



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

Através destes e de outros trabalhos (FALCÃO *et al.*, 1999; FALCÃO, 2010; GATO *et al.*, 1990; GOMES *et al.*, 2012; HENRIQUES *et al.*, 2013) realizados pelo Instituto Técnico Superior (IST) da Universidade de Lisboa, surgiu então a oportunidade em realizar um projeto de pesquisa colaborativo com o Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) da UFRGS, sendo que este último é responsável pelo desenvolvimento do gerador elétrico, dos componentes eletrônicos e do controle do sistema de geração, enquanto que o IST é responsável pela modelagem do sistema hidrodinâmico e pneumático, além do projeto otimizado da boia e da turbina unidirecional. No contexto deste projeto colaborativo já foram desenvolvidos outros trabalhos (NUHRICH, L. B., 2019; SANTOS, I. M. dos, 2021) no LMEAE.

Ainda, é importante mencionar que há uma evolução constante nos estudos referente à geração de energia por ondas marítimas que, desde o reconhecimento da capacidade de converter a energia por ondas em energia aplicável, mais de mil patentes já foram registradas até 1980. Nessa condição, além dos modelos de geração de energia por ondas através de coluna de água oscilante (WEC-OWC) outros autores também desenvolveram tecnologias, que também são capazes de obter energia através de ondas e marés, fixas em costas ou móveis sobre os oceanos, sobre a superfície ou no fundo do mar. Há uma grande variedade de sistemas de energia das ondas em vários estágios de desenvolvimento, sem um consenso claro quanto ao modelo mais adequado a ser implementado em escala global (DREW *et al.*, 2009). No entanto, destaca-se que o foco deste trabalho será voltado para sistemas de geração OWC com boia de longarina e turbina unidirecional.

## 1.2. OBJETIVOS

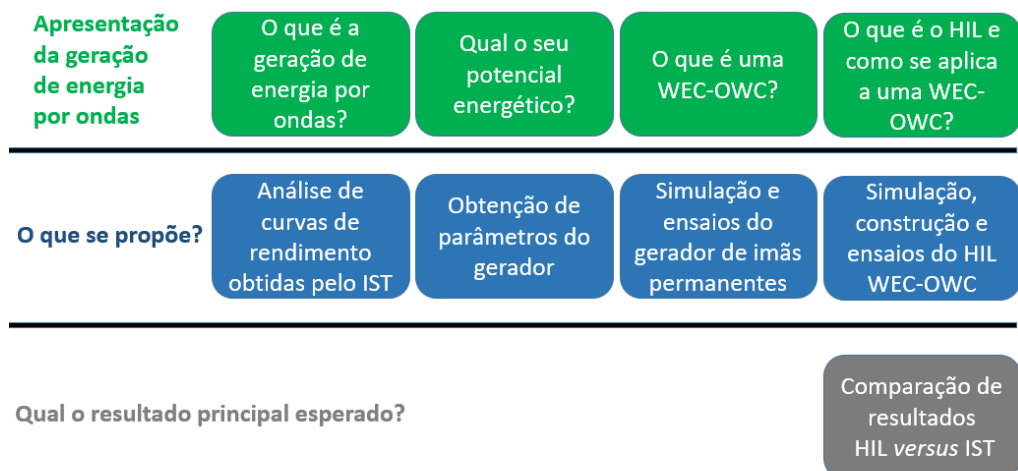
O objetivo geral deste trabalho é a implementação de um sistema HIL que emule um OWC composto de onda, boia e turbina de forma que o conjugado gerado pela turbina seja reproduzido por um servomotor que é acoplado a um gerador síncrono de ímãs permanentes conectado a uma carga. Os modelos matemáticos para o sistema boia e turbina estão presentes na literatura, assim como há informações a respeito de ondas, seus tipos e formas de propagação que dependem de uma série de fatores climáticos e regionais, os quais variam conforme a localização geográfica. Portanto, ao implementar o sistema HIL, espera-se disponibilizar uma bancada para o ensaio dos componentes elétricos do sistema de geração, como gerador, conversores eletrônicos e controle do sistema de geração.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Realizar revisão bibliográfica sobre diferentes estudos de HIL aplicado à WEC-OWC;
- Definição de modelo HIL e WEC-OWC adequado à proposta deste trabalho;
- Montar uma bancada que acopla um servomotor e um gerador com torquímetro;
- Desenvolver um modelo de simulação para o WEC-OWC para fins de validação de resultados;
- Desenvolvimento e caracterização do modelo matemático do gerador síncrono de ímãs permanentes;
- Ensaios e análises do modelo simulado da WEC-OWC;
- Montagem e ensaios do sistema HIL da WEC-OWC integrado ao gerador e carga;
- Análise e comparação dos dados obtidos.

Para alcançar tais objetivos, modelos de geradores de energia por ondas serão apresentados, assim como a relevância deste tipo de geração e alguns exemplos de aplicação com HIL. Também serão propostas a análise de dados comparativos com os obtidos pelo IST, a obtenção de parâmetros de um gerador síncrono de ímãs permanentes, sua aplicação em carga, simulação e através do HIL. Como resultado final, serão comparados os dados do HIL com os dados obtidos pelo IST, conforme apresentado na Figura 2.

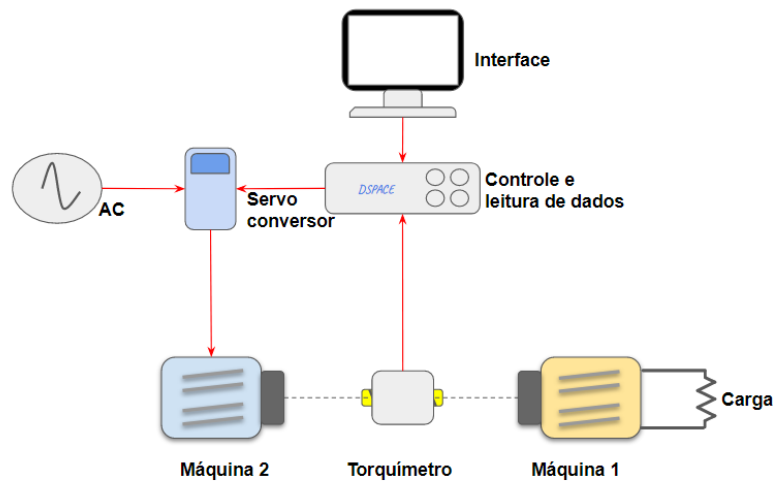
**Figura 2: Etapas de apresentação do trabalho.**



**Fonte: Próprio Autor.**

O resultado final esperado, portanto, consiste na análise e comparação dos dados do HIL com os dados obtidos pelo IST através da estrutura mostrada na Figura 3, que representa o modelo físico WEC-OWC com HIL composto por uma interface para simulação de software e tratamento de dados (Interface), um dispositivo para controle e aquisição de dados (Controle e leitura de dados), um servoconversor para emular o conjugado da turbina (máquina 2), um torquímetro, um gerador (máquina 1) e a carga.

Figura 3: Estrutura do HIL WEC-OWC desenvolvido no trabalho.



Fonte: Próprio Autor.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao descrever um modelo de conversor de energia por coluna d'água oscilante, torna-se necessário compreender seu princípio de funcionamento, suas partes e interdependências entre os blocos que o compõe. Diante de certas características peculiares e desafios para emular tais dispositivos, serão apresentados modelos matemáticos de uma WEC-OWC e modelos implementados através de HIL para o desenvolvimento de dispositivos inovadores que necessitam de uma abordagem técnica capaz de integrar um modelo de simulação com sistemas físicos.

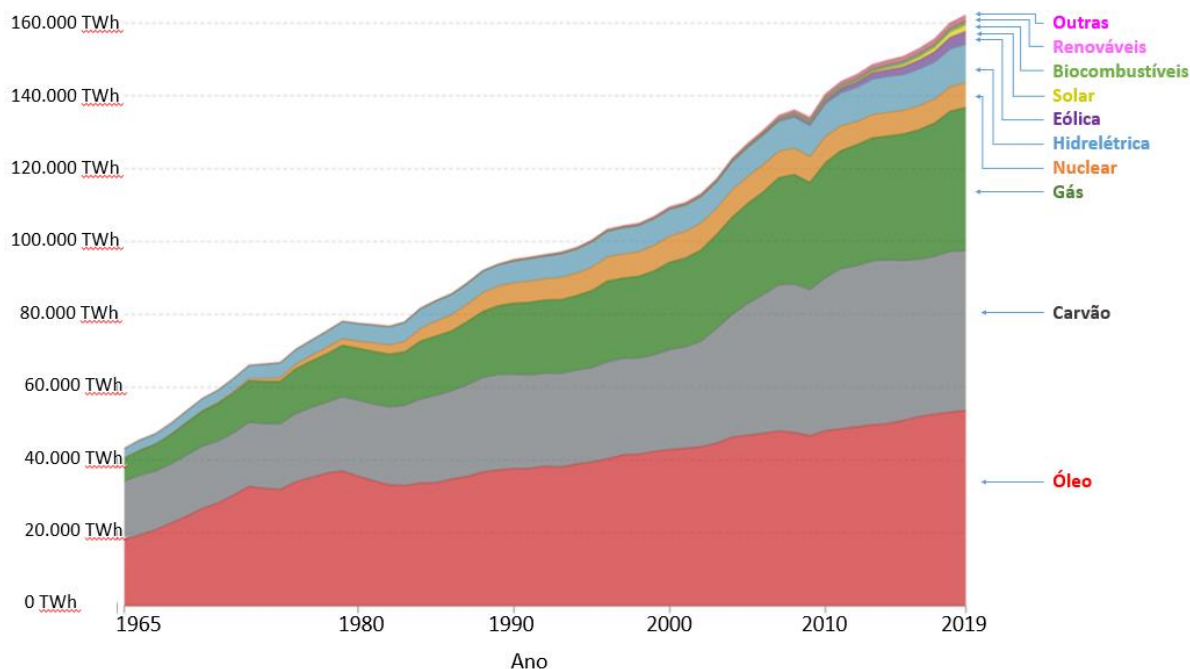
### 2.1. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE SISTEMAS WEC-OWC

A proporção no uso de energia por fonte alternativa ainda é muito pequena se comparada às energias por queima de combustíveis fósseis. Conforme SMIL (2017), a transição entre a queima destes combustíveis para o uso de energias renováveis ainda é muito lenta, o que pode ser verificado ao compará-las por meio da Figura 4, que relaciona a geração de energia entre os anos de 1965 e 2019 no mundo. Dentre as fontes alternativas, a geração de energia por ondas é ainda tão insignificante que sequer destaca-se dentre as matrizes apresentadas na Figura 4, apesar de ter mais previsibilidade que a eólica e uma densidade de energia maior que a solar (UIHLEIN *et al.*, 2016; ZHENG *et al.*, 2016), além de sua capacidade para gerar em torno de 8.000 TWh/ano a 80.000 TWh/ano (MUETZE; VINING, 2006).

Para demonstrar o potencial de geração de energia por movimento de onda oceânica, VIOLA *et al.* (2013) realizaram um estudo comparativo em um dispositivo capaz de gerar energia por ondas do mar e energia fotovoltaica aplicado na ilha de Lampedusa, Itália. O dispositivo é apresentado na Figura 5 e foi desenvolvido e construído pela Universidade de Palermo, Itália, com o objetivo de se obter energia através de painéis solares e também por meio de ondas, no qual o movimento das ondas do mar é convertido em movimento através de um sistema de cremalheiras. O dispositivo é fixo no fundo do mar e movimento relativo gerado a partir das ondas permite a conversão de energia mecânica em elétrica por meio de um gerador instalado na estrutura.

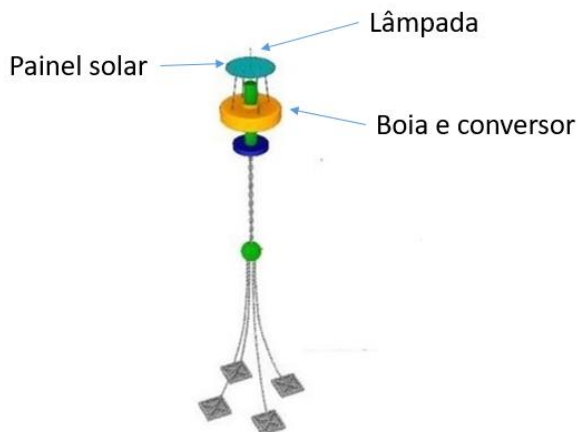


**Figura 4: Consumo primário global de energia por fonte entre os anos de 1965 e 2019.**



Fonte: Adaptado de <https://ourworldindata.org/energy-mix>.

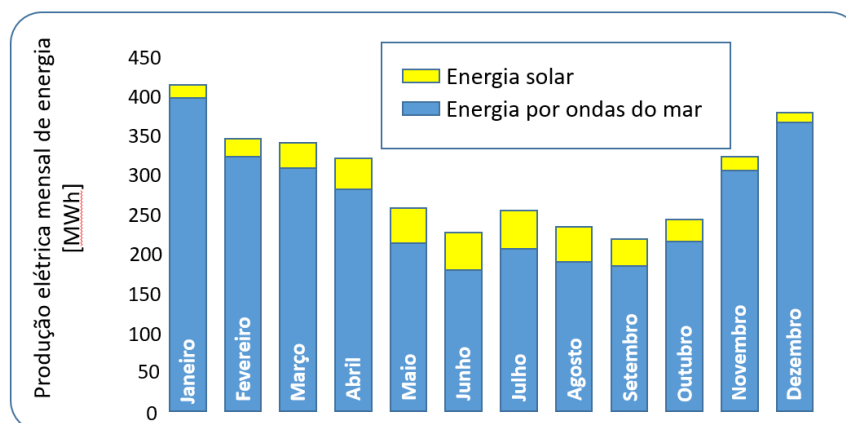
**Figura 5: Geração de energia através de boia com duplo sistema de energia composto por conversor de energia por ondas e painel solar.**



Fonte: Adaptado de (VIOLA *et al.*, 2013).

Os resultados obtidos através do conversor de energia desenvolvido pela Universidade de Palermo, Itália, demonstraram que, para esta aplicação localizada na ilha de Lampedusa, a capacidade de geração de energia por ondas com esse tipo de tecnologia é similar à obtenção de energia através de painéis solares, conforme apresentado na Figura 6. Porém, ressalta-se que a localização geográfica e o tipo de gerador utilizado, o qual é diferente deste trabalho, são fatores determinantes para realizar a comparação entre os modelos.

**Figura 6: Tabela comparativa da produção elétrica mensal de energia entre geradores de energia por ondas do mar e fotovoltaica/solar na ilha de Lampedusa, Itália.**



Fonte: Adaptado de (VIOLA *et al.*, 2013).

A geração de energia por WEC-OWC, portanto, apresenta-se como uma alternativa viável em relação aos geradores eólicos e solares quando aplicados em pequenos dispositivos como boias marítimas e sondas oceanográficas. Quando as condições meteorológicas não são favoráveis, sistemas solares exigem o uso de grandes bancos de baterias para suprir a demanda. Se o dispositivo é pequeno, sistemas eólicos necessitam de uma estrutura complexa para comportar pás e geradores. Por sua vez, a incidência frequente das ondas, independente do período do dia, a possibilidade do gerador tornar-se um sistema único com a boia (ou a própria boia), são apenas alguns dos benefícios proporcionados por WEC-OWC.

## 2.2. MODELOS DE GERADORES DE ENERGIA

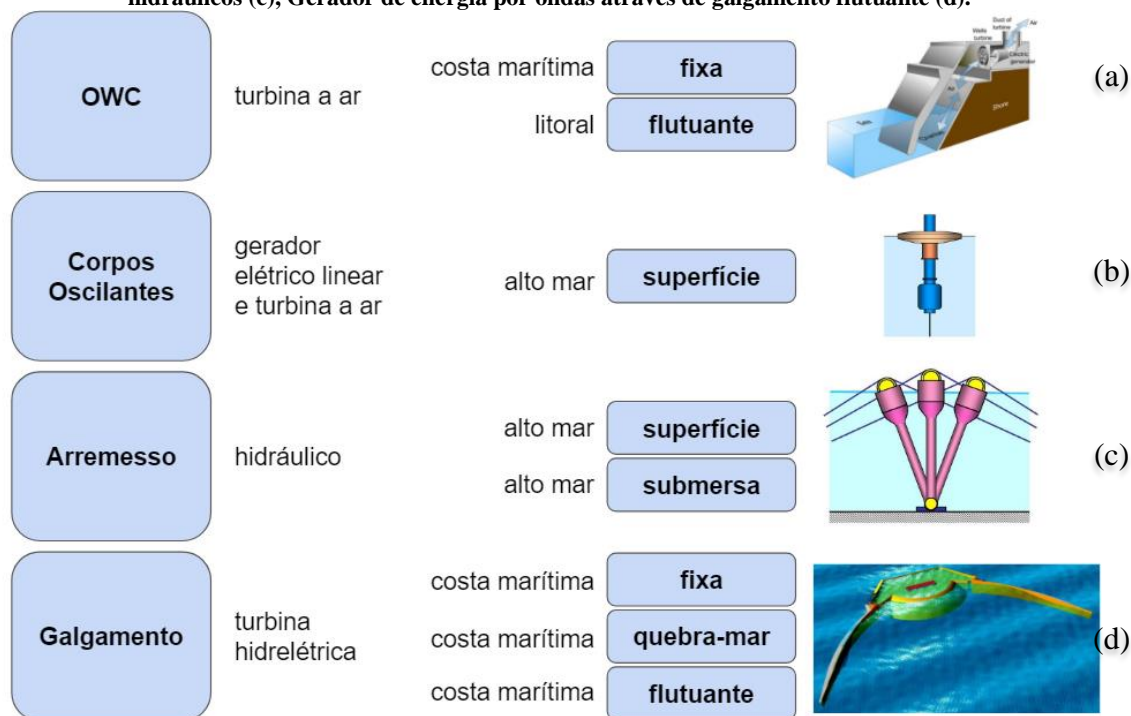
Os diferentes modelos de geradores de energia por ondas, seus conceitos, tecnologias e sistemas de tomada de força foram resumidos por FALCÃO *et al.* (2010) e PRAKASH *et al.* (2016), através da síntese de uma série de publicações e classificados conforme apresentado na Figura 7. Segundo PRAKASH *et al.* (2016), o tipo de estrutura define a tecnologia utilizada, caracterizada pelo modelo de PTO. 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. WEC-OWC são compostos por geradores elétricos ativados por turbinas, excitadas pelo fluxo de ar dentro de uma coluna d'água oscilante.

Quanto aos modelos de corpos oscilantes, estes são sistemas em que o gerador e boia são fixos no fundo do mar e as ondas são fonte de movimento para PTOs. Já os sistemas de

arremesso em superfície valem-se do movimento da superfície dos oceanos para ativar a PTO em turbinas hidráulicas acionadas por aríetes hidráulicos. Se o sistema de arremesso estiver submerso, as variações de pressão causadas por cristas adjacentes por meio de ondas passantes são usadas como fonte para ativar a PTO. Por fim, os modelos de galgamento canalizam a água e armazenam em um nível mais alto do que as ondas do mar, de forma que esta é então liberada e o fluxo de água de uma posição elevada para uma posição inferior aciona as turbinas, semelhantemente a uma represa.

Além das tecnologias citadas, existem inúmeros outros modelos de geradores de energia por ondas, cada qual com outras diversas formas de se obter energia. A escolha do modelo é dependente da sua finalidade.

**Figura 7: Tipos de geradores de energia por ondas. Gerador de energia por ondas fixo em costa marítima (a), Gerador de energia por ondas com boia em superfície (b), Sistema de geração de energia submersa por aríetes hidráulicos (c), Gerador de energia por ondas através de galgamento flutuante (d).**



Fonte: Adaptado de (PRAKASH *et al.*, 2016; PARMEGGIANI *et al.*, 2013).

### 2.3. WEC-OWC

Dentre os modelos de geradores de energia por ondas elencados por PRAKASH *et al.*, (2016) sabe-se que, até o momento, a WEC-OWC com turbina a ar flutuante é a tecnologia mais adequada para aplicação em boias oceânicas ou marítimas. Sua estrutura é flutuante para

aplicação no litoral e 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. Os estudos de Gato (1990), Falcão (1999, 2010, 2012, 2013, 2016), Henriques (2013, 2016) e Fonseca (2019), demonstram uma clara evolução no desenvolvimento de uma boia de longarina por coluna d'água oscilante (OWC) equipadas com turbinas de impulso radial.

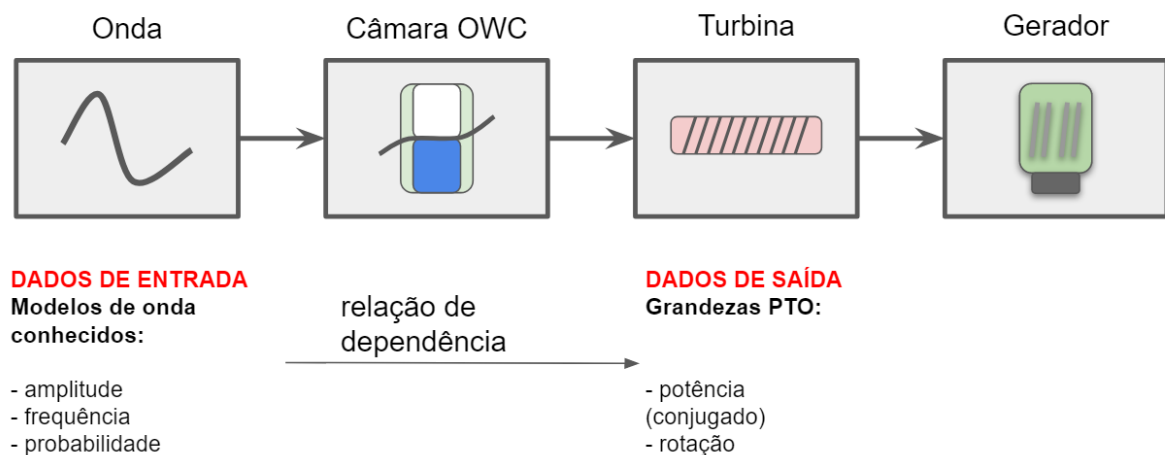
No estudo de FALCÃO *et al.* (2012), é realizada uma análise hidrodinâmica, com especial atenção aos estudos de otimização. A geometria e características estruturais da OWC por boia de longarina, assim como a dinâmica do movimento de ondas, são analisados de forma adimensional. As únicas forças consideradas foram uma combinação de difração e radiação, conforme modelado pela teoria de onda linear. A avaliação de desempenho do dispositivo foi realizada através da análise no domínio de frequência. Resultados numéricos para ondas regulares e irregulares foram obtidos através de análise numérica, alterando a relação entre o diâmetro do tubo da boia e do tubo submerso. Os resultados demonstraram haver uma grande variedade de pontos ótimos para máxima eficiência da turbina, conforme alterações na geometria da turbina. Tais condições podem ser um desafio no projeto de turbinas de ar e, conseqüentemente, no projeto de geradores e dispositivos de potência.

Uma nova metodologia sistemática (HENRIQUES; PORTILLO *et al.*, 2016) é apresentada 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 analisadas 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, conforme apresentado na Figura 8. 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.

**Figura 8: Modelo WEC-OWC.**



**Fonte: Próprio Autor.**

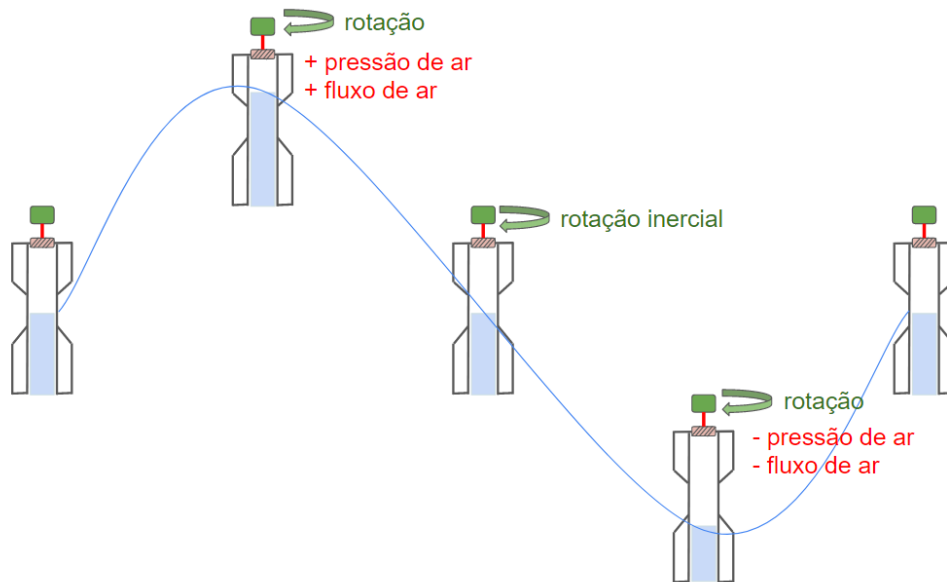
A incidência da onda é caracterizada essencialmente por sua altura, período e probabilidade de ocorrência, capaz de criar um movimento relativo entre boia e lâmina d'água existente dentro da câmara, que movimenta o fluxo de ar incidente na turbina, conforme apresentado na Figura 9.

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.

Entretanto, em estados do mar muito energéticos, o sistema de geração elétrica pode ser incapaz de impor um conjugado eletromagnético e a velocidade de rotação ultrapassar um

determinado limite definido pelo gerador. Para estes casos, a taxa de fluxo de ar através da turbina aumenta (HENRIQUES, GOMES *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, GOMES *et al.*, 2016).

**Figura 9: Movimento relativo WEC-OWC.**

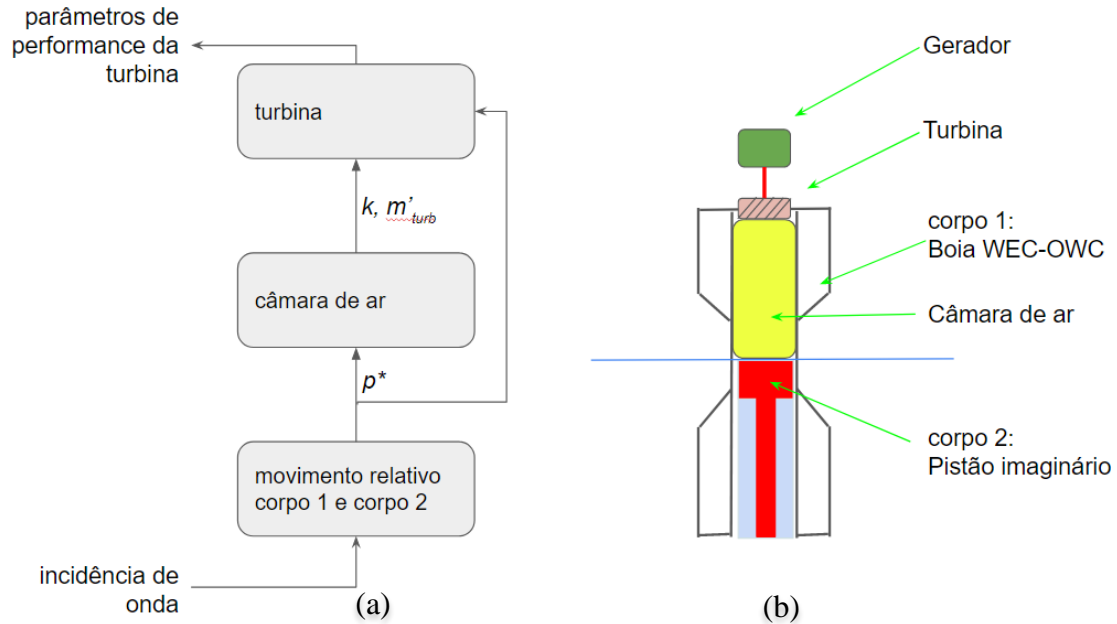


**Fonte: Próprio Autor.**

#### 2.4. MODELO MATEMÁTICO DA WEC-OWC

A WEC-OWC pode ser analisada por suas partes (HENRIQUES, PORTILLO *et al.*, 2016), as quais podemos subdividir entre incidência de onda, boia de longarina, câmara de ar e turbina, conforme representado na Figura 8. Ao considerar cada uma destas etapas, busca-se obter os parâmetros de performance da turbina, conforme pode ser verificado na Figura 10. 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  $m_{turb}$  e do índice  $k$ , o qual define a eficiência da turbina.

**Figura 10: Segmentação do WEC-OWC: diagrama do modelo (a), ilustração do modelo e suas partes (b).**



Fonte: Próprio Autor.

#### 2.4.1. Representação Matemática da Onda

A amplitude de onda definida por  $A_{\omega_j}$ , obtida através da equação (1), é composta por valores de frequência angular  $\omega_j$ , e pelo espectro de Pierson-Moskovitz  $S_{\zeta}(\omega_j)$ , o qual define a distribuição de energia de acordo com a frequência no oceano e relaciona os valores de altura de onda  $H_s$ , período energético  $T_e$  e frequência angular  $\omega$ , conforme equação (2), obtendo assim um modelo de incidência da onda. Para que o movimento se apresente randômico e não periódico, é aplicada a equação (3), na qual a variação da velocidade é obtida por (4) (HENRIQUES *et al.*, 2013). Sabendo que através do espectro de Pierson-Moskovitz se obtém o movimento das ondas irregulares, a aleatoriedade deste movimento é obtida através de  $rand()$  com valores entre 0 e 1, além de  $\Delta\omega=3,0/n$ , enquanto  $\delta$  se mantém igual a 0,2. Para isto,  $\omega_1=0,1$  rad/s e  $n = 300$ .

$$A_{\omega_j} = \sqrt{2\Delta\omega_j S_{\zeta}(\omega_j)} \quad (1)$$

$$S_{\zeta}(\omega) = 262,9 \frac{H_s^2}{\omega^5 T_e^4} \exp\left(-\frac{1054}{\omega^4 T_e^4}\right) \quad (2)$$

$$\Delta\omega_j = (1 + \delta rand())\Delta\omega \quad (3)$$

$$\omega_j = \omega_{j-1} + \frac{1}{2}(\Delta\omega_j + \omega_{j-1}), j = 2, \dots, n \quad (4)$$

### 2.4.2. Boia de Longarina

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), conforme demonstrado na Figura 10. 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 na turbina e, conseqüentemente, a rotação do eixo da mesma.

A equação de movimento (5) e (6) é caracterizada pelas variáveis dependentes do corpo  $i$  (subíndice 1), corpo  $j$  (subíndice 2) e da interação entre os dois corpos  $ij$  (1 e 2). O movimento de cada um dos corpos depende da sua respectiva massa  $m$ , da densidade da água  $\rho_w$ , aceleração da gravidade  $g$ , área de seção transversal anular  $S$  do corpo em questão, da coordenada de deslocamento  $x$  e o valor limite  $A_{ij}^\infty$  na frequência infinita ao acrescentar massa de um dos corpos quando afetado pelo movimento do outro corpo. A pressão relativa dentro da câmara é definida por  $p^*$ , a qual é dependente da pressão atmosférica  $p_{at}$  e da pressão  $p$  dentro da câmara, conforme (7). As forças de radiação são definidas por  $R_{ij} + A_{11}^\infty \ddot{x}_1$ , e  $R_{ij}$  é definido por (8), em que  $k_{ij}$  corresponde ao kernel. Ao assumir a teoria linear das ondas, a força de difração  $F_{di}(t)$  resultante é obtida pela superposição de  $N$  componentes de frequência angular  $\omega_m$ . Para isto,  $T_i(\omega_m)$  corresponde ao coeficiente da força de excitação,  $A_m$  é a amplitude de onda dependente da frequência,  $\phi_{i,m}$  corresponde à resposta de fase do corpo  $i$  na frequência angular  $\omega_m$  e  $\phi_r$  é definido como um valor de fase randômico, conforme Equação (9) (HENRIQUES, PORTILLO *et al.*, 2016).

$$(m_1 + A_{11}^\infty)\ddot{x}_1 + \rho_w g S_1 x_1 + A_{12}^\infty \ddot{x}_2 - p_{at} S_2 p^* = F_{d,1} - R_{11} - R_{12} \quad (5)$$

$$(m_2 + A_{22}^\infty)\ddot{x}_2 + \rho_w g S_2 x_2 + A_{21}^\infty \ddot{x}_1 - p_{at} S_2 p^* = F_{d,2} - R_{22} - R_{21} \quad (6)$$

$$p^* = \frac{p}{p_{at}} - 1 \quad (7)$$

$$R_{ij} = \int_{-\infty}^t k_{ij}(t-s)\ddot{x}_j(s)ds \quad (8)$$

$$F_{di}(t) = \sum_{j=1}^n T_i(\omega_m) A_m \cos(\omega_m t + \phi_{i,m} + \phi_r) \quad (9)$$



### 2.4.3. Câmara de Ar

As equações que definem a câmara de ar podem ser verificadas conforme (10), (11), (12) e (13), as quais são dependentes da pressão de ar determinada pelo movimento oscilatório dos dois corpos. Conseqüentemente há uma relação entre estes parâmetros e o volume de ar no interior da câmara e sua compressão e expansão foi modelada como um processo politrópico com a eficiência da turbina relacionada ao índice politrópico  $k$ . A taxa de fluxo de ar  $\dot{m}_{turb}$  é obtida através da densidade do ar  $\rho$  e do volume de ar instantâneo  $V_c$  dentro da câmara, enquanto  $\rho_{at}$  representa a densidade do ar em condições atmosféricas (HENRIQUES; PORTILLO *et al.*, 2016).

$$-\dot{m}_{turb} = \rho \dot{V}_c + V_c \dot{\rho} \quad (10)$$

$$\frac{p}{\rho^k} = \frac{p_{at}}{\rho_{at}^k} \quad (11)$$

$$\dot{p}^* = -k(p^* + 1) \frac{\dot{V}_c}{V_c} - k(p^* + 1)^\beta \frac{\dot{m}_{turb}}{\rho_{at} V_c} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{k - 1}{k} \quad (13)$$

### 2.4.4. Representação Matemática da Turbina

As características de desempenho da turbina são geralmente apresentadas em forma adimensional e o rendimento  $\eta$  da turbina é determinado pela Equação (17) a qual relaciona os valores da cabeça de pressão adimensional  $\psi$ , taxa de fluxo adimensional da turbina  $\Phi$  e potência adimensional da turbina  $\Pi$  por meio das equações (14), (15) e (16) (HENRIQUES, PORTILLO *et al.*, 2016). A cabeça de pressão  $\psi$  relaciona a pressão atmosférica  $p_{at}$ , a pressão relativa  $p^*$ , a densidade de entrada do ar na turbina  $\rho_{in}$ , rotação  $\Omega$  e diâmetro do rotor  $d$ . Através da equação (14), verifica-se que o aumento de rotação  $\Omega$  representa uma redução no valor de  $\psi$ , enquanto que o aumento da pressão relativa representa um acréscimo deste valor. A pressão relativa é apresentada através de (7) 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 à 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  $\Phi$  é dependente da taxa de fluxo de ar deslocada  $\dot{m}_{turb}$  e da rotação  $\Omega$ , enquanto a potência adimensional da turbina  $\Pi$  relaciona a potência da turbina  $P_{turb}$ , rotação  $\Omega$ , diâmetro  $d$  e a densidade do ar  $\rho_{in}$ . A densidade do ar  $\rho_{in}$  é representada pela equação (18) e

o índice  $k$  é determinado por meio da equação (19). É sabido que  $\gamma=1,4$ , o qual representa a taxa de transferência calor do ar (HENRIQUES, PORTILLO *et al.*, 2016). A dinâmica da turbina é determinada pela equação (20), que relaciona o momento de inércia  $I_{inercia}$ , a derivada rotação  $\dot{\Omega}$  com a diferença entre os valores instantâneos de conjugado do gerador e o conjugado da turbina, este último representado pela equação (21).

$$\psi = \frac{p_{at} p^*}{\rho_{in} \Omega^3 d^2} \quad (14)$$

$$\phi = \frac{\dot{m}_{turb}}{\rho_{in} \Omega d^3} \quad (15)$$

$$\Pi = \frac{P_{turb}}{\rho_{in} \Omega^3 d^5} \quad (16)$$

$$\eta_{turb} = \frac{\Pi}{\phi \psi} \quad (17)$$

$$\rho_{in} = \rho_{at} \max(p^* + 1, 1)^{1/k} \quad (18)$$

$$k = \frac{1}{1 - \frac{\gamma-1}{\gamma} \eta_{turb}} \quad (19)$$

$$I_{inercia} \dot{\Omega} = T_{turb} - T_{gen} \quad (20)$$

$$T_{turb} = \rho_{in} \Omega^2 d^5 \eta_{turb} \phi \psi \quad (21)$$

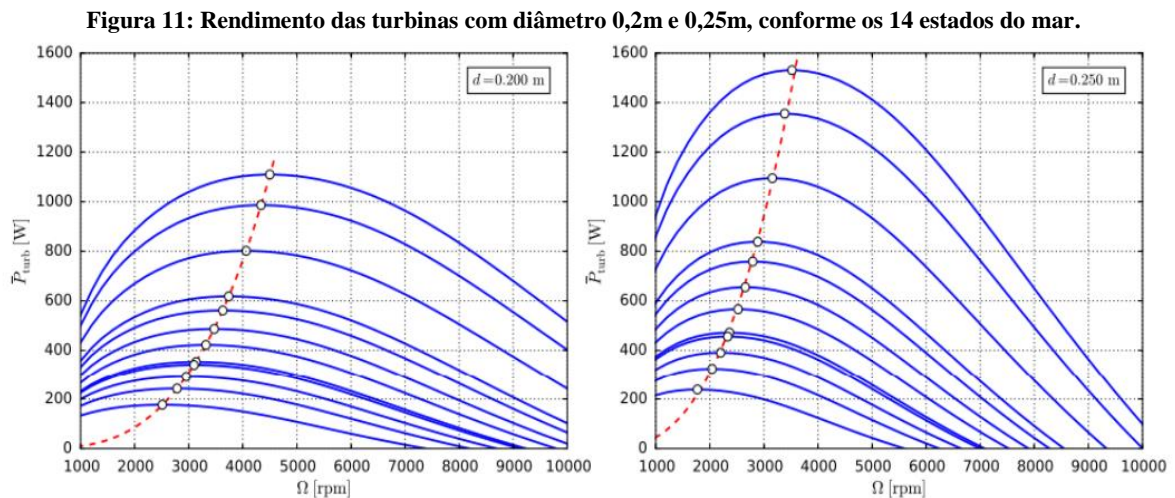
O desempenho da turbina é dependente de certos fatores como tamanho e modelo de turbina e gerador (HENRIQUES, PORTILLO *et al.*, 2016). Dessa forma, a otimização da potência do gerador pode ser simplificada de acordo com a equação (22), considerando que o modelo de tomada de forças PTO consiste em uma turbina birradial acoplada a um gerador e a potência de saída da turbina. Conforme equação (21), a potência da turbina é proporcional a  $\Omega^3$  e, segundo HENRIQUES, PORTILLO *et al.* (2016) o valor do expoente  $b$  na equação (22) deve ser igual a 3 para a maximização da potência do gerador, enquanto  $a$  representa a constante geral da lei de controle do gerador.

$$P_{gen}^{opt} = a \Omega^b \quad (22)$$

## 2.5. DADOS DOS ENSAIOS DA TURBINA

Ao escolher dois modelos diferentes de geradores aplicados em uma WEC-OWC, HENRIQUES, PORTILLO *et al.* (2016) obtiveram a potência instantânea gerada de acordo com a rotação da turbina. As curvas de incidência foram parametrizadas conforme diferentes 14 estados do mar, representativas da costa oeste de Portugal, através dos parâmetros de altura de onda  $H_s$ , período energético  $T_e$  apresentados na Equação (2) e a probabilidade destas ocorrerem, conforme o respectivo estado do mar, denominado por  $n$ .

A partir das características de incidência das ondas, HENRIQUES, PORTILLO *et al.* (2016) analisaram o rendimento dos geradores classificados de acordo com o diâmetro da turbina utilizada ( $d = 0,20$  m e  $d = 0,25$  m). Por meio de ensaios realizados, conforme a incidência de cada um dos 14 estados do mar, determinou-se o ponto ótimo de cada um destes e foram obtidos os parâmetros a e b da equação (22) em função da velocidade de rotação  $\Omega_{opt,n}$ , apresentadas através da linha vermelha pontilhada da Figura 11.



Fonte: Retirado de (HENRIQUES, PORTILLO *et al.*, 2016).

A incidência das ondas do mar é aleatória e imprevisível, portanto a escolha adequada do modelo de gerador determina o rendimento da WEC-OWC, definido tanto pelo gerador em si quanto pelo estado do mar e sua amplitude. Percebe-se também que a diferença entre os diâmetros dos geradores resulta em uma performance com maior potência em uma faixa menor de rotação ou uma potência mais constante a medida que ocorre o aumento de rotação. Essas condições são importantes para o desenvolvimento de turbinas e geradores com o objetivo de aumentar rendimento da WEC-OWC.

## 2.6. *HARDWARE-IN-THE-LOOP*

O desenvolvimento de sistemas denominados *Hardware-in-the-loop* (HIL) iniciou no século 20 como uma alternativa para implantação de sistemas completos, em que alguns processos são experimentais e outros simulados. Tais condições trouxeram consigo algumas vantagens como aplicação de modelos matemáticos complexos, características reais de ruído, banda morta, histerese e folga mecânica, obtidos apenas com sensores reais, além de projeto e ensaios dos sistemas de controle realizados fora de ambientes reais, e também economia de tempo e custo (ISERMANN *et al.*, 1999).

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 aplicações em tamanho real (ou escala) e mais confiável que 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. Dentre suas diversas aplicações, pode-se citar seu uso no desenvolvimento e prototipagem de um sistema de ensaios para geradores de energia por ondas do tipo ISWEC (*Inertial Sea Wave Energy Converter*) (BRACCO *et al.*, 2015), a montagem de uma bancada HIL para analisar a capacidade de conversão de energia de ondas em um gerador tubular (DELLICOLLI *et al.*, 2006) e a emulação de uma WEC envolvendo o uso de uma máquina híbrida vernier (SHEK *et al.*, 2011).

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.

Cabe também considerar que o desenvolvimento de sistemas conversores de energia por ondas apresenta um desafio técnico devido às condições de aplicações e a necessidade de simulações complexas existente na interação entre o conversor de energia das ondas, controladores e projeto de sistemas de PTO que, muitas vezes, são difíceis de reproduzir apenas com simples simulações (SIGNORELLI *et al.*, 2011). Considerando o local, a forma de

aplicação e diante da dificuldade de construir um modelo físico aplicado a um ambiente real, emular a WEC-OWC através da metodologia HIL representa uma solução viável para ensaios e análise para cada tipo de gerador de energia.

Portanto, neste trabalho será desenvolvido um sistema HIL que permite emular o sistema hidrodinâmico e pneumático do OWC, juntamente com a turbina, e testar experimentalmente os componentes elétricos (gerador, circuitos eletrônicos e controle) do sistema de geração.

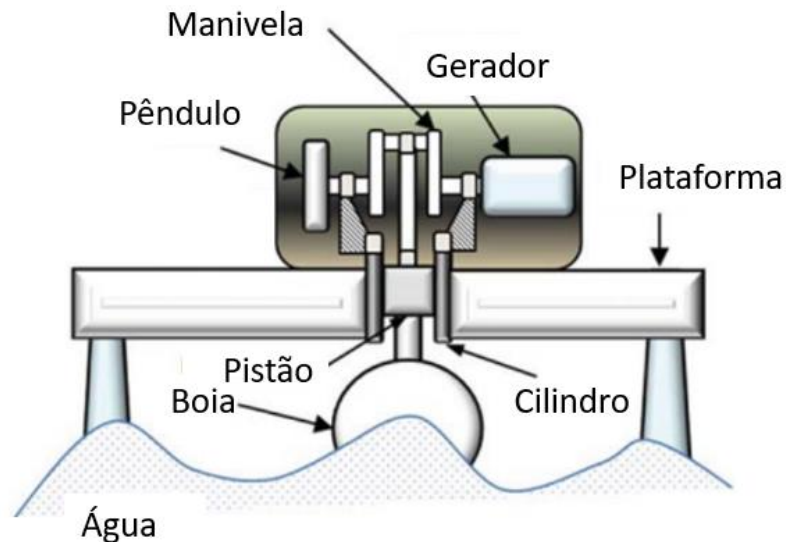
## 2.7. *HARDWARE-IN-THE-LOOP* APLICADOS À WEC-OWC

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 (SIGNORELLI *et al.*, 2011). 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.

Geradores de onda com sistema de tomada de forças (PTO) de manivela deslizante foram estudados por HOLLIS *et al.* (2018) através de tecnologia HIL. Conforme Figura 12, as partes simuladas na estrutura tratam-se de uma boia, acoplamento de manivela deslizante e uma caixa de engrenagens. O acoplamento da manivela deslizante atua como um conversor linear rotativo, representado por um motor DC acoplado a um gerador físico. A força de excitação de entrada do sistema é realizada através de uma onda regular sinusoidal, enquanto as forças hidrodinâmicas resultantes desse sinal de entrada são convertidas em um conjugado emulado pelo motor que está acoplado ao gerador. O algoritmo de controle, implementado através de um dispositivo DSpace (DSPACE DS1104 R&D ControllerBoard e DSPACE ControlDesk Software) associado a uma placa de potência, tem como objetivo acionar o motor,

demonstrando sua capacidade de extrair energia no gerador (compostos por duas máquinas DC idênticas acopladas). O objetivo deste trabalho é demonstrar um novo modelo de WEC, utilizando-se da tecnologia HIL, através de um novo algoritmo de controle capaz de reduzir a razão de pico a média de energia (PTAP - *Peak-to-Average Power Ratio*) em qualquer conversor linear rotacional. Para este mesmo modelo de gerador de energia de manivela deslizante, (SANG *et al.*, 2016) propõe meios computacionais para avaliar o desempenho da WEC diante de um novo algoritmo de controle baseado em controlador proporcional integral (PI).

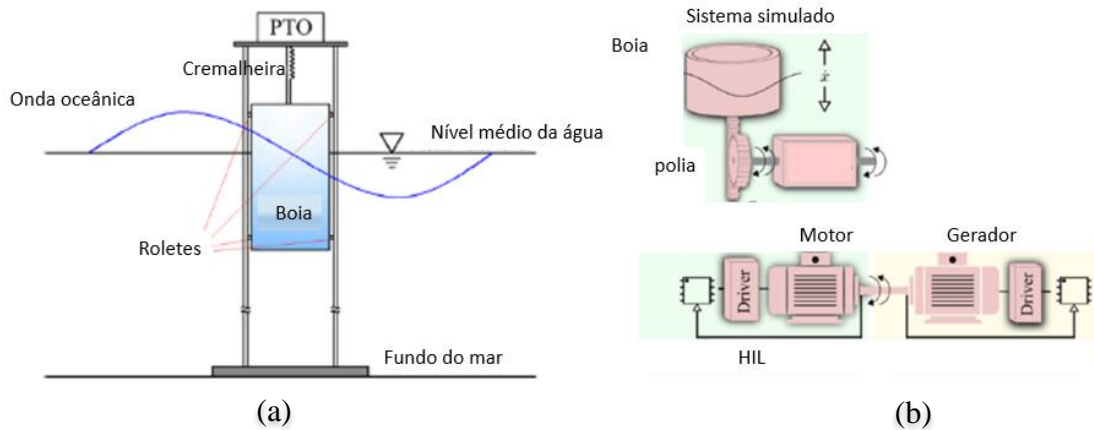
Figura 12: Gerador de energia por ondas, manivela deslizante.



Fonte: Retirado de (SANG *et al.*, 2017).

Outro modelo de gerador de energia por ondas com sistema de tomada de manivela deslizante foi proposto por BERRIEL *et al.* (2020), conforme apresentado na Figura 13. Na imagem à esquerda está representada o tipo de WEC enquanto na imagem à direita é demonstrada a construção do HIL com motor e gerador simulando a boia. Através do mesmo princípio utilizado por KOKER *et al.* (2017), é utilizado uma boia conectada a uma cremalheira que transfere movimento rotacional para um gerador. Diferentemente das WEC-OWC, a estrutura do dispositivo é fixa, enquanto apenas a boia oscila conforme a incidência de ondas. Enquanto KOKER *et al.* (2017) utiliza um pêndulo para representar a resistência da boia diante da aceleração, BERRIEL *et al.* (2020) emula a inércia do sistema, o que permite simular diversos modelos de boias sem a necessidade de construir um pêndulo a cada simulação que precise alterar os parâmetros físicos do dispositivo.

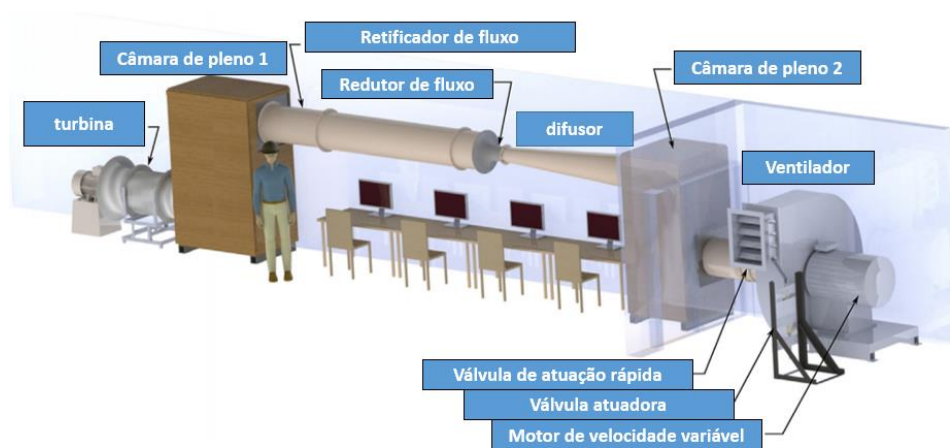
Figura 13: WEC fixa (a) e HIL representativo (b).



Fonte: Adaptado de (BERRIEL et al., 2020).

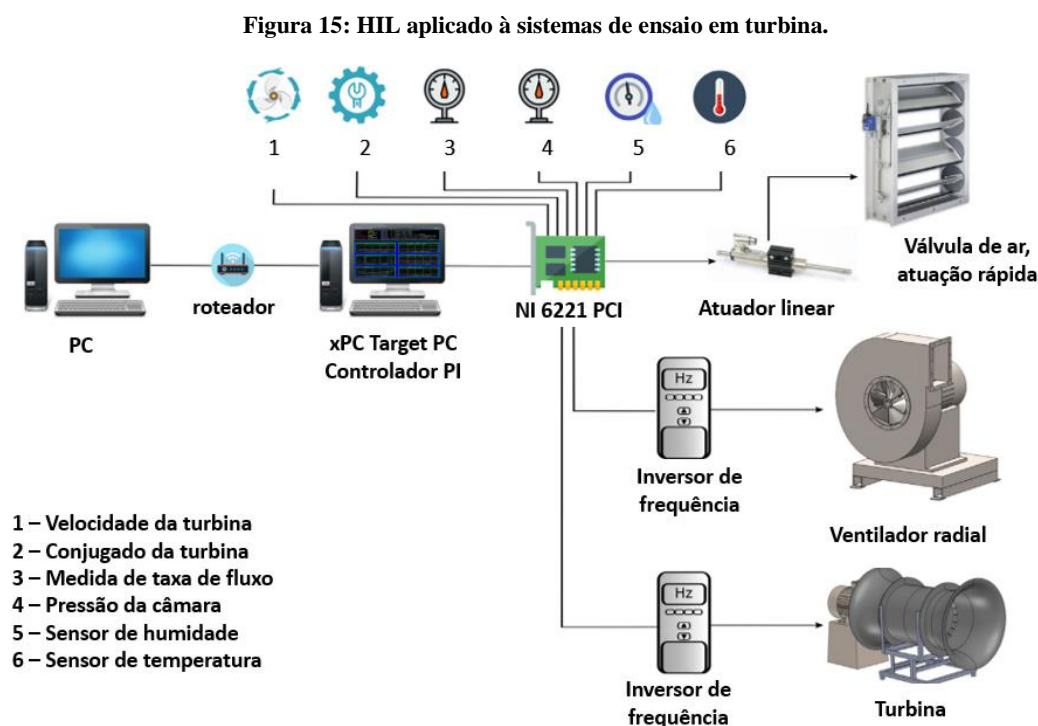
Exemplos de HIL podem ser encontrados em diversos trabalhos dentre os inúmeros tipos de conversores de energia por ondas, inclusive para emulação hidrodinâmica e aerodinâmica da boia OWC. Um exemplo interessante consiste na aplicabilidade do HIL no desenvolvimento de um dispositivo para ensaio de turbinas auto-retificadoras. Este dispositivo é constituído por um grande ventilador conectado a tubos e válvulas, capaz de criar um fluxo e controle da pressão de ar de forma similar às geradas dentro das câmaras OWC pelo movimento de ondas. O dispositivo de ensaio, por sua vez, é conectado à turbina e dados como velocidade do ar, conjugado e pressão do ar dentro da câmara são analisados para verificar o desempenho do sistema (FONSECA *et al.*, 2019), o qual pode ser observado conforme Figura 14.

Figura 14: HIL para ensaio de turbinas para aplicação em WEC.



Fonte: Retirado de (FONSECA et al., 2019).

Segundo FONSECA *et al.* (2019), conhecendo os coeficientes hidrodinâmicos da boia, o HIL do dispositivo controla a pressão dentro da câmara por meio das condições de fluxo e operação da turbina. O gerador da turbina e os fluxos de ar são controlados em tempo real, porém os componentes e estímulos circundantes, como a coluna de água oscilante, as ondas do mar que chegam e suas interações hidrodinâmicas, são simulados em um ambiente de software. As informações de controle tais como velocidade rotacional e conjugado da turbina, taxa de fluxo e pressão da câmara, temperatura e umidade, podem ser verificados na Figura 15, integrando o sistema juntamente com o algoritmo de simulação (PC), a placa de aquisição de dados (xPC Target), conversores, ventilador, válvula de controle de saída de ar e turbina. Este sistema em conjunto, portanto, foi capaz de realizar ensaios na turbina aplicados ao HIL do modelo hidrodinâmico da OWC flutuante com turbina bidirecional em ambiente simulado, validando o modelo de ensaio com o modelo matemático.



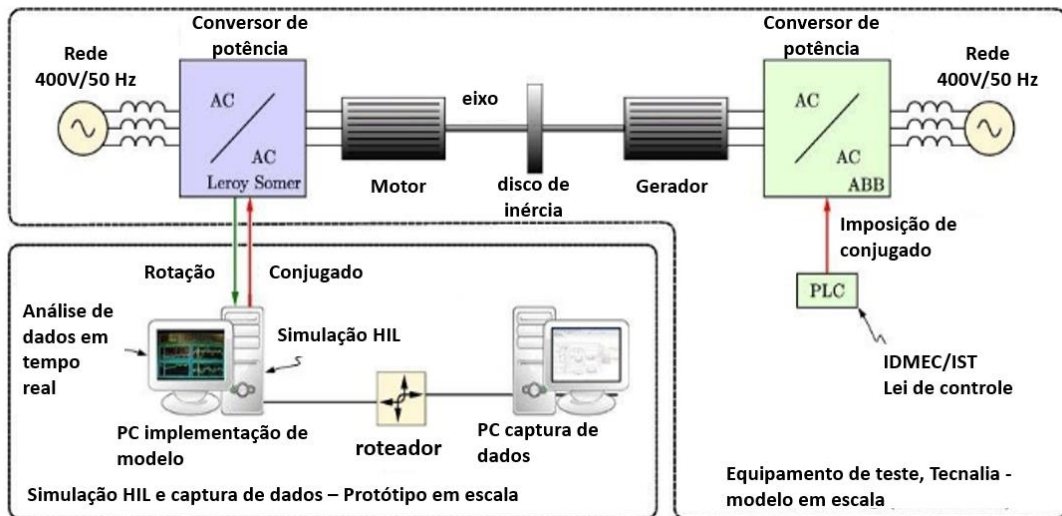
Fonte: Retirado de (FONSECA *et al.*, 2019).

Destaca-se também o estudo de HENRIQUES, GOMES, *et al.* (2016) para caracterizar o comportamento dinâmico da PTO e a validação de algoritmos de controle de sobrecarga e excedente de rotação. A partir da Figura 16, observa-se que o sistema é dividido em duas partes, sendo uma delas responsável pelo HIL e simulações, enquanto a outra corresponde ao sistema para ensaio de força situado no laboratório da empresa Tecnalía em Bilbao, Espanha. O modelo representativo do HIL é responsável por simular as condições do mar em consonância com a



hidrodinâmica da boia e aerodinâmica da turbina, aplicando um conjugado ao sistema e realizando a leitura de sua rotação. Quanto ao hardware, este é composto basicamente por duas máquinas de indução do tipo gaiola de esquilo, tanto em seu gerador quanto em seu motor, e um PLC que é informado a respeito da velocidade de rotação do gerador e transmite o conjugado de referência do gerador.

Figura 16: HIL simulando as condições do mar, conectado a um sistema de potência.

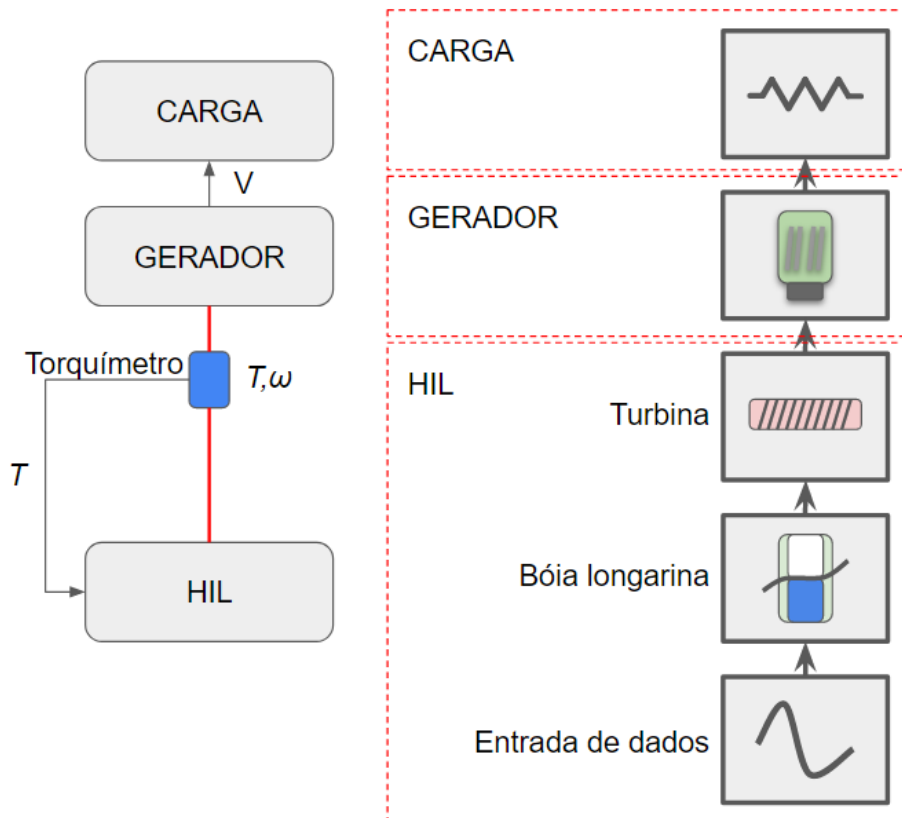


Fonte: Retirado de (HENRIQUES; GOMES et al., 2016).

### 3. SOLUÇÃO PROPOSTA

A partir dos estudos de HENRIQUES *et al.*, (2013), HENRIQUES *et al.*, (2016), FONSECA *et al.*, (2019), HENRIQUES *et al.*, (2016), FALCÃO *et al.*, (1999), FALCÃO (2010), GATO *et al.*, (1990), GOMES *et al.*, (2012), elaborou-se um modelo emulado de WEC-OWC flutuante com turbina a ar conectada em um gerador e uma carga, que pode ser verificado de acordo com a Figura 17. O HIL proposto é caracterizado por um modelo matemático para representar o conjugado da turbina de um WEC-OWC. Conforme a entrada de dados, caracterizada pelo tipo de onda ao qual a WEC-OWC está sujeita, a boia de longarina impõe à turbina uma rotação à PTO e, naturalmente, um conjugado consequente das interações com o gerador e carga. Neste trabalho, a proposta consiste em impor um referencial de conjugado que é dependente de uma dada condição de onda. Ou seja, a rotação é o resultado da relação entre o conjugado da PTO diante da carga aplicada ao gerador. Originalmente, os estudos relacionados à WEC-OWC caracterizam-se pelas relações de pressão, volume e fluxo atuantes dentro da boia de longarina capazes de impor uma rotação à turbina face à amplitude de onda a esta imposta.

Figura 17: Blocos de funcionamento do WEC-OWC emulado.



Fonte: Próprio Autor.

Embora seja possível controlar a potência convertida, este trabalho não faz uso de conversor eletrônico para este fim. Desta forma, utiliza-se cargas resistivas conectadas ao gerador e assim não se procura operar em pontos de máximo rendimento. Além disso, a modelagem do sistema hidrodinâmico e pneumático não será implementada neste trabalho, sendo que a determinação do conjugado será determinada a partir de dados obtidos de referências relevantes, conforme discutido na subseção subsequente. Destaca-se, no entanto, que com o desenvolvimento da bancada possibilita-se em trabalhos futuros fazer a implementação do modelos hidrodinâmico e pneumático do WEC-OWC e utilizar conversores estáticos que permitem controlar o sistema de geração para operar em pontos de máximo rendimento.

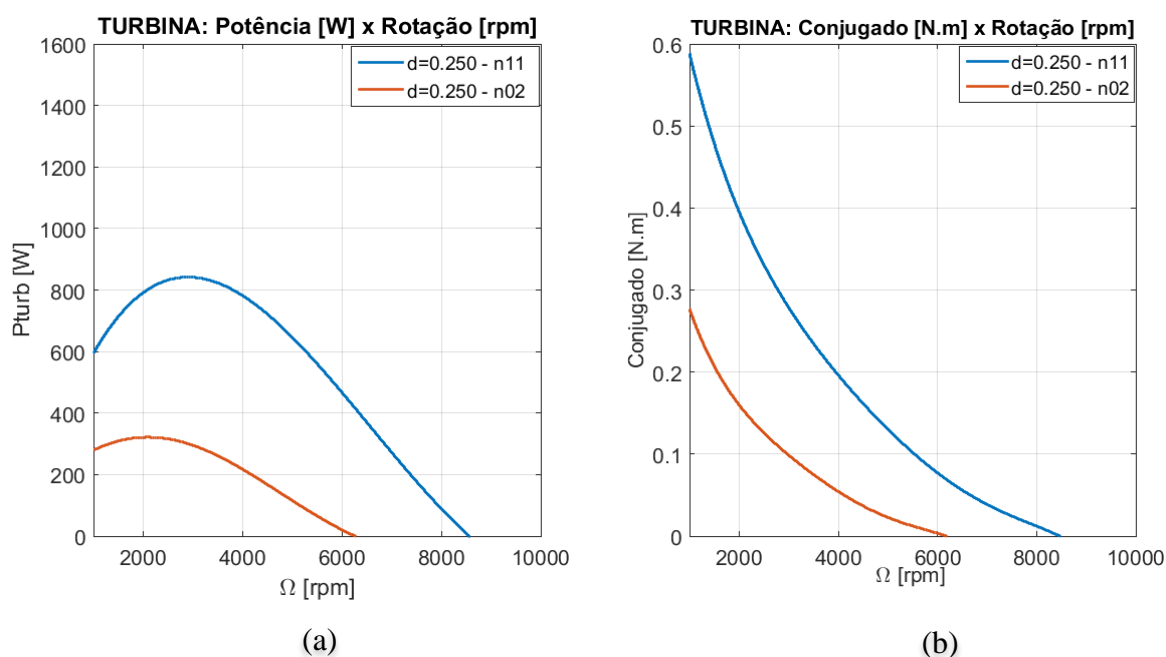
### 3.1. DADOS DE REFERÊNCIA CONJUGADO VERSUS ROTAÇÃO

Os dados referenciais de rendimento da turbina que relacionam potência *versus* conjugado foram obtidos através do trabalho de HENRIQUES, PORTILLO *et al.* (2016), conforme Figura 11. Através do software Matlab<sup>®</sup> e sua ferramenta *Basic Fitting*, foram extraídas as curvas de regressão e suas devidas equações para os estados do mar de números 2 e 11 para uma turbina de diâmetro de 0,250 cm. A partir da curva de potência do eixo na turbina *P<sub>turb</sub>*, obteve-se também suas respectivas curvas conjugado *versus* rotação  $\Omega$  dividindo a potência *P<sub>turb</sub>* pelo respectivo valor de rotação  $\Omega$ , conforme pode ser verificado na Figura 18 (a) e (b) respectivamente. As respectivas equações representativas dos estados do mar de amplitude 2 e 11 podem ser verificadas conforme equações 23 e 24 enquanto que suas curvas características são representadas por “ $d = 0,250 (n2)$ ” e “ $d = 0,250 (n11)$ ”, respectivamente. A escolha das amplitudes de onda considerou um modelo de baixa amplitude e outro de alta amplitude, desde que atendessem os limites de rotação máxima de 3000 rpm em regime permanente (limite imposto pelo servomotor que emula a turbina).

$$P_{turb} = -7,271 \cdot 10^{-17} \Omega^5 + 1,5831 \cdot 10^{-12} \Omega^4 - 8,4609 \cdot 10^{-9} \Omega^3 - 1,6057 \cdot 10^{-5} \Omega^2 + 0,12745 \Omega + 175,1 \quad (23)$$

$$P_{turb} = 1,6874 \cdot 10^{-18} \Omega^5 - 1,4596 \cdot 10^{-13} \Omega^4 + 7,5213 \cdot 10^{-9} \Omega^3 - 1,1501 \cdot 10^{-4} \Omega^2 + 0,4913 \Omega + 210,97 \quad (24)$$

Figura 18: Curvas de rendimento da turbina, relação potência *versus* rotação (a) e conjugado *versus* rotação (b). “ $d = 0,250$  (n02)” corresponde ao 2º estado do mar enquanto “ $d = 0,250$  (n11)” representa o 11º estado do mar.



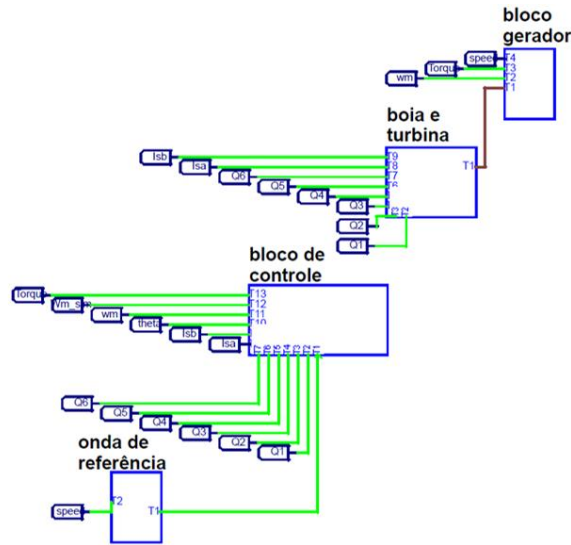
Fonte: Próprio Autor, adaptado de (HENRIQUES; PORTILLO et al., 2016).

### 3.2. SIMULAÇÃO DE MODELO ATRAVÉS DE SOFTWARE PSIM

Em posse das curvas de rotação *versus* conjugado, através do software PSIM® Professional Versão 12.0.4, a simulação do modelo a ser implementado foi dividida em 4 blocos: “boia e turbina”, que conecta-se através de um eixo mecânico ao PMSG e informa a referência de conjugado e rotação ao bloco “onda de referência” ao qual, de acordo com o modelo matemático de rendimento, irá repassar os parâmetros de referência de conjugado ao “bloco de controle”. Por fim, o “bloco de controle” controlará o bloco “boia e turbina”, conforme apresentado na Figura 19.

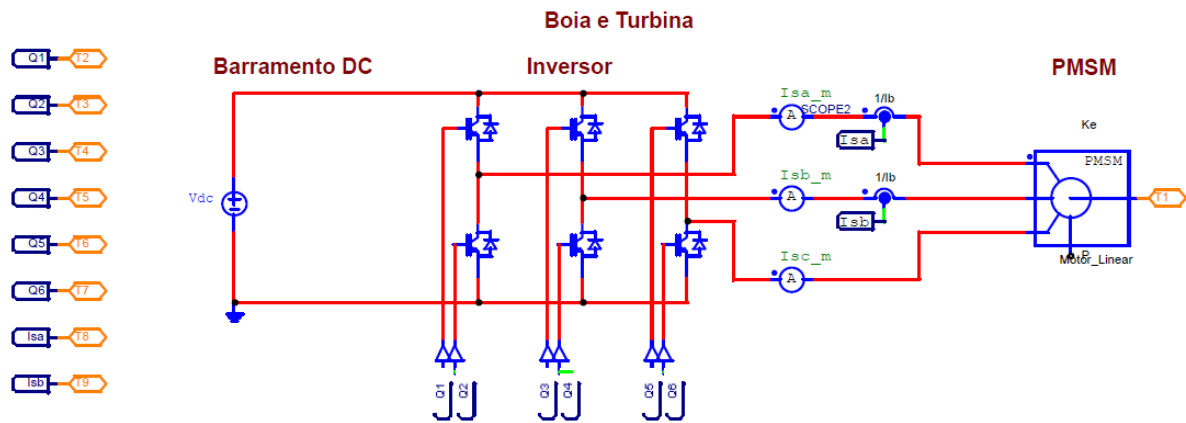
Através do bloco “boia e turbina”, o modelo matemático simulado da boia e turbina é emulado. Este bloco é composto de um inversor trifásico e um máquina síncrona de ímãs permanentes que opera como servomotor com controle de conjugado. O eixo desse motor é conectado ao bloco PMSG, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 19: Blocos dos modelos simulados em Software PSIM® Professional Versão 12.0.4.



Fonte: Próprio Autor.

Figura20: Bloco boia e turbina.



Fonte: Próprio Autor

O eixo proveniente do bloco “boia e turbina”, conectado ao eixo do bloco PMSG, está interligado com um sensor capaz de medir conjugado e velocidade e, seguindo ao mesmo eixo, conecta-se a um gerador de ímãs permanentes, ao qual alimenta uma carga resistiva trifásica. Os sensores de conjugado e velocidade, por sua vez, integram-se ao “bloco de controle”, conforme apresentado na Figura 21.

Os sensores de conjugado e rotação, assim como o valor de referência do bloco “onda de referência”, repassam seus valores de leitura para o “bloco de controle” o qual, através de uma modulação SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*), controla o conjugado através da modulação de sinal no bloco boia e turbina, conforme pode ser visto na Figura 22.

Figura 21: Bloco gerador.

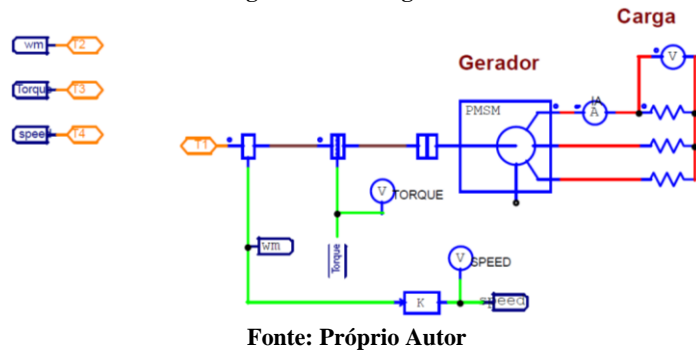
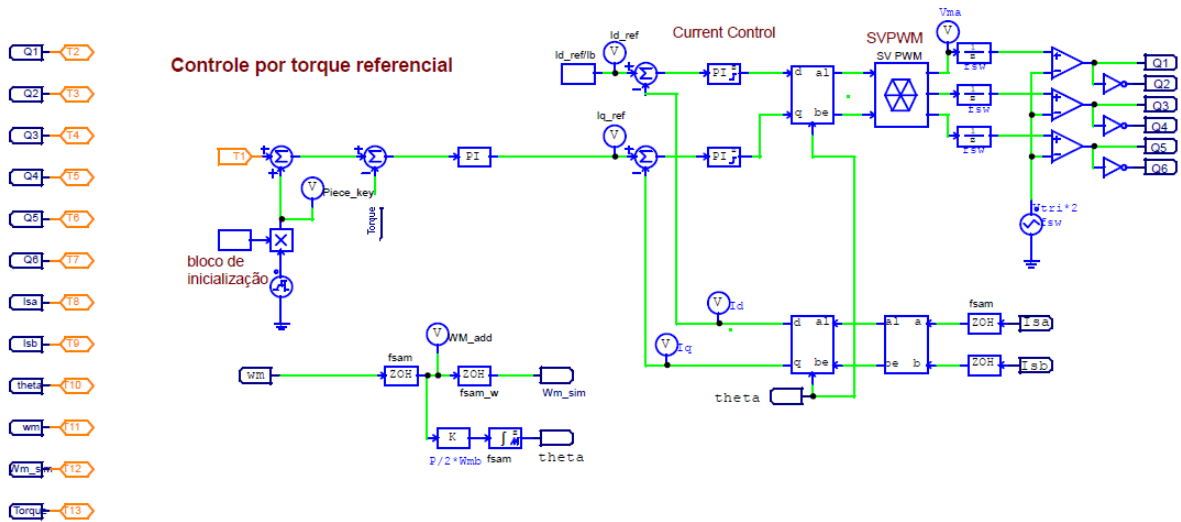
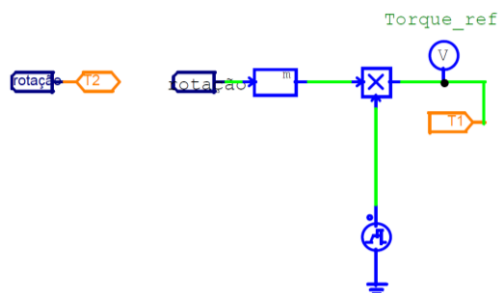


Figura 22: Bloco de controle.



O bloco “onda de referência”, por sua vez, carrega os dados do modelo matemático proveniente da relação conjugado *versus* rotação obtida das curvas de geração da WEC-OWC conforme Figura 18 e impõe uma referência de conjugado a ser seguida pelo “bloco de controle”, conforme apresentado na Figura 23.

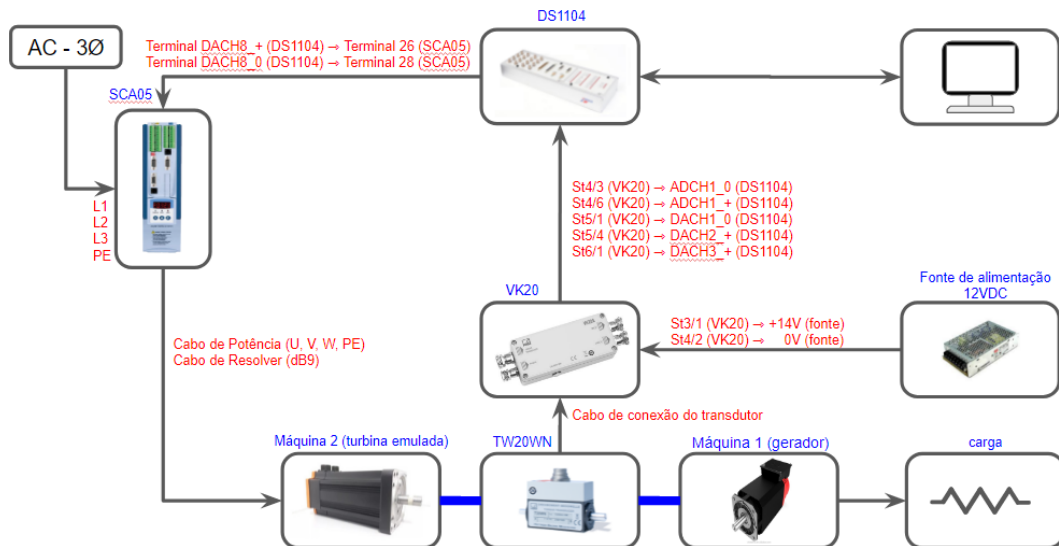
Figura 23: Bloco onda de referência.



### 3.3. IMPLEMENTAÇÃO HIL

O modelo de HIL WEC-OWC foi construído de acordo com a Figura 24, o qual consiste de duas máquinas síncronas de ímãs permanentes trifásicas, a máquina 1 simulando o gerador e a máquina 2 emulando a turbina. As duas máquinas têm seu eixo mecanicamente acoplado através de um torquímetro para leitura de conjugado e velocidade. A leitura dos sinais de conjugado e velocidade é realizada por meio de uma placa de aquisição de dados e controle em tempo real, DSpace DS1104. A turbina emulada é acionada por meio de um servoconversor, que também está conectado à placa de captura de dados DSpace DS1104. Os dados relevantes referentes às características do motor, gerador e torquímetro podem ser verificados na Tabela 1.

Figura 24: Esquema de ligações do HIL WEC-OWC.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 1: Dados das máquinas e do torquímetro.

Equipamento	Características	
Motor 1 - Gerador	<b>AC Brushless WEG SWA-56-2.5-30</b>	
	Tensão máxima	200 V
	Rotação máxima	3000 rpm
	Corrente máxima contínua eficaz	3,8 A
	Corrente máxima de pico	20 A
Motor 2 - Turbina emulada	<b>AC Brushless Reliance Electric F-4050-Q-H00AA</b>	
	Tensão máxima	240 V
	Rotação máxima	4000 rpm
	Corrente máxima contínua	9.0A
	Corrente máxima de pico	20A
Torquímetro	<b>T20WN, VK20A</b>	
	Velocidade nominal	10.000 rpm
	Conjugado máximo	20 N.m
	Sinal de saída para conjugado em 0 V	0 ± 0,2 V
	Conjugado nominal	10 N.m

### 3.4. GERADOR DE IMÃS PERMANENTES - ENSAIOS E MODELO

É importante destacar que neste trabalho não foi realizada a caracterização da máquina que deve operar em modo motor, emulando a turbina, pois esta máquina é controlada por um servoconversor. A partir da configuração adequada dos parâmetros deste servoconversor é possível operar com modo de controle de conjugado, seguindo uma dada referência desejada. Entretanto, é importante conhecer o modelo equivalente do gerador, pois a tensão induzida, corrente elétrica, potência dissipada na carga e velocidade de rotação para uma dada referência de velocidade dependem do modelo deste gerador.

A proposta de obtenção do modelo equivalente do gerador foi dividido em etapas, conforme apresentado no fluxograma da Figura 25. **Nas etapas de 1 a 3** foram obtidas as características essenciais do gerador, isto é, foi realizado o ensaio a vazio, além da medida de valores de resistência do estator  $R_s$  e número de polos da máquina. **A partir da etapa 4** a análise do gerador foi segmentada em duas partes, A e B, às quais tem como objetivo delinear a obtenção dos parâmetros para ensaios em máquinas síncronas de ímãs permanentes com saliência e com polos lisos, respectivamente. Cabe salientar que essa abordagem de considerar ensaios para determinação de parâmetros tanto de máquina de com saliência como de polos lisos foi uma estratégia adotado pois inicialmente não se conhecia a forma construtiva do rotor da máquina que deve operar como gerador. No Capítulo 4 será demonstrado que apenas as etapas designadas com final A na Figura 25 foram executadas, pois constatou-se que há diferença entre os valores de indutância de eixo direto e de quadratura, o que configura uma máquina com saliência.

**Na etapa 4** realizou-se o ensaio de curto-circuito na máquina para obtenção dos valores de indutância de eixo em quadratura e eixo direto, calculados **na etapa 5** a partir dos resultados de ensaio. Já **na etapa 6** foram realizadas simulações de operação com carga no gerador, considerando os parâmetros de modelo equivalente até então determinados.

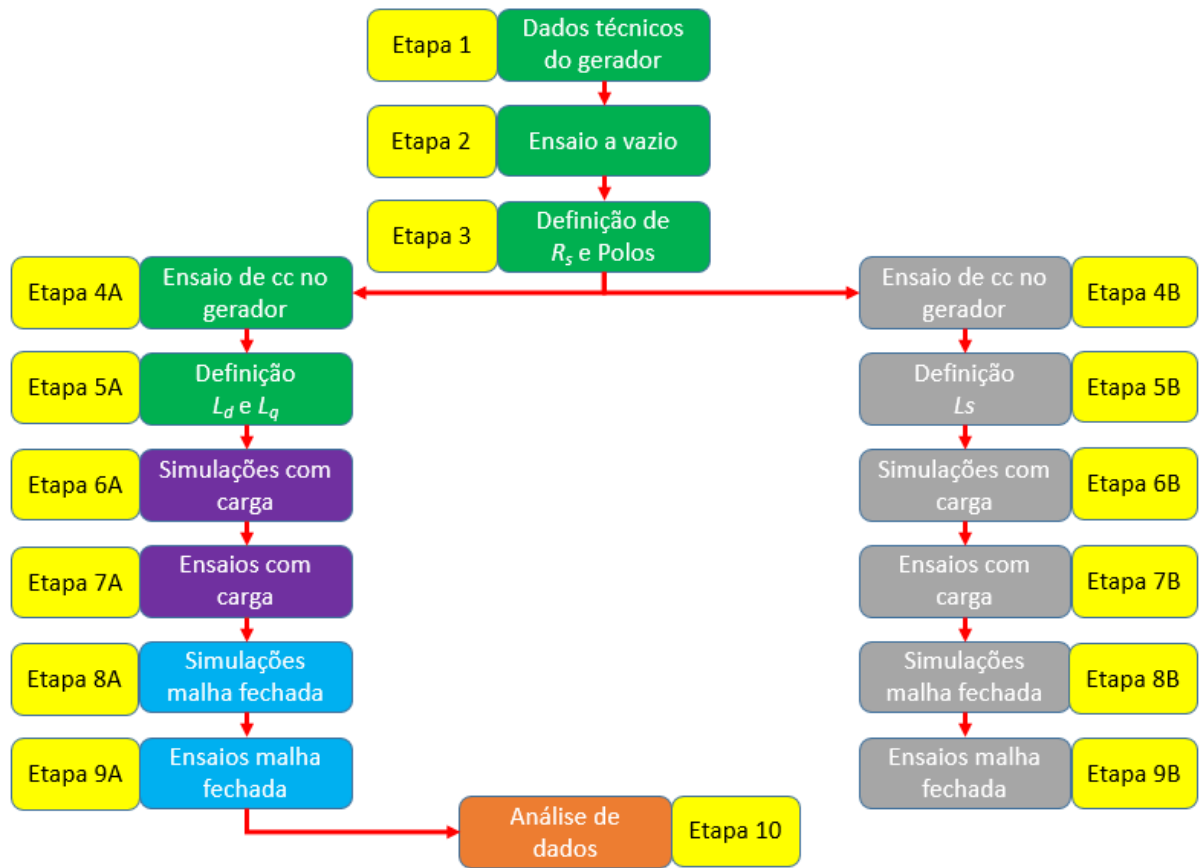
**A partir da etapa 7** foram realizados os ensaios experimentais com carga na máquina. **Nas etapas 8 e 9** foram realizados ensaios em malha fechada (MF), com a implementação do HIL do WEC-OWC. Por fim, **na etapa 10**, os dados foram analisados e comparados com as curvas obtidas na Figura 18.

A análise comparativa para obter os parâmetros de dois tipos diferentes de máquinas (com saliência e de polos lisos) permite verificar a similaridade entre os resultados de simulação e de ensaios para ambas. Sendo assim, ensaios em curto-circuito combinados com medidas de



circuito aberto são geralmente utilizados para determinar a indutância síncrona em máquinas de polos lisos. Para os casos de máquinas com ímãs permanentes internos, porém, estes ensaios podem ser usados apenas para determinar uma aproximação para valores de indutância de eixo direto, enquanto são necessárias medidas adicionais para definição da indutância de eixo em quadratura (RALLABANDI, *et al.*, 2019). No caso deste estudo, é considerado o procedimento para obtenção de parâmetros conforme a Std 1812 IEEE (2015).

Figura 25: Fluxograma adotado para obtenção dos parâmetros do gerador.



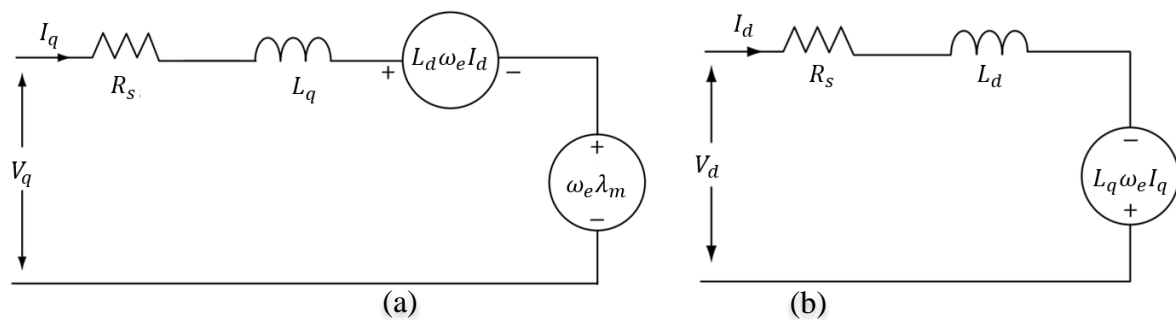
Fonte: Próprio Autor.

### 3.4.1. Modelo de Máquinas Síncronas de Ímãs Permanentes com Saliência

O modelo do gerador de ímãs permanentes, conforme circuitos elétricos equivalentes da Figura 26, apresenta suas tensões de eixo direto e quadratura de acordo com as equações 25 e 26, representadas pela tensão elétrica de eixo direto  $V_d$  e quadratura  $V_q$ , resistência elétrica  $R_s$ , corrente elétrica de eixo direto  $I_d$  e de quadratura  $I_q$ , frequência elétrica  $\omega_e$ , fluxo concatenado de eixo direto  $\lambda_d$  e de quadratura  $\lambda_q$ . O conjugado elétrico  $T_{em}$ , por sua vez, pode ser obtido através da equação (27), em que  $P$  representa o número de polos. Ao desconsiderar a saturação,

os fluxos concatenados  $\lambda_d$  e  $\lambda_q$  podem ser determinados por meio das equações (28) e (29), respectivamente. Logo, conforme RALLABANDI *et al.* (2019), alguns autores consideram o fluxo magnético permanente  $\lambda_m$  total, devido às ligações de fluxo de fase e conjugado definidos por meio de simulações em análise de elementos finitos em função do ângulo do rotor, para diferentes valores de corrente do estator, ao qual o efeito de  $I_d$  em  $\lambda_q$  é considerado desprezível e o efeito de acoplamento cruzado é refletido nas dependências de  $\lambda_m$  em  $I_q$ .

**Figura 26: Modelo de gerador, circuito equivalente. Diagrama de eixo em quadratura (a), diagrama de eixo direto (b).**



Fonte: Extraído de KRISHNAN (2010).

$$v_d = R_s I_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega_e L_d I_q \quad (25)$$

$$v_q = R_s I_q + L_q \frac{d}{dt} I_q + \omega_e L_d I_d + \omega_e \lambda_m \quad (26)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \quad (27)$$

$$\lambda_d = L_d I_d + \lambda_m \quad (28)$$

$$\lambda_q = L_q I_q \quad (29)$$

A análise em questão tem como objetivo não apenas demonstrar o modelo matemático representativo de uma máquina de ímãs permanentes com saliência, mas também dar início à abordagem dos ensaios e cálculos para obtenção dos parâmetros desse modelo, tratadas no Capítulo 4.

### 3.4.2. Indutância de Eixo Direto

Para obter uma aproximação dos parâmetros de indutância em eixo direto de uma máquina síncrona de ímãs permanentes, o procedimento definido pela Std 812 IEEE (2015)

determina os passos a serem realizados, os quais estão em conformidade com a obtenção da indutância síncrona de uma máquina de polos lisos. Ou seja, a partir do valor de pico da tensão de fase em circuito aberto  $V_{peak}$  em determinada velocidade e sua respectiva frequência elétrica  $f$ , obtém-se o valor de fluxo magnético  $\lambda_m$  definidos pela equação (30). Por sua vez, a impedância  $Z$  é obtida através da tensão a vazio rms  $V_{oc}$  e da corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  conforme equação (31) que, assim como a resistência de fase, obtém-se a reatância  $X_d$  da equação (32). Dessa forma, é possível obter a indutância de eixo direto  $L_d$  por meio da equação (33).

Para os ensaios de curto-circuito, RALLABANDI *et al.* (2019) sugere acoplar indutâncias em série com as fases da máquina no intuito de reduzir a corrente de curto-circuito e obter-se a variação da indutância de eixo direto  $L_d$  ao desmagnetizar a corrente de eixo direto. Nessa condição, é necessário que a impedância possua características reativa; pois, ao adicionar uma resistência ao circuito, surgiriam correntes de eixo direto e de eixo em quadratura, e a densidade de fluxo reduzida durante os ensaios de curto-circuito poderia resultar em um valor de indutância de eixo direto  $L_d$  superestimado. Essa condição pode ser verificada por meio da Figura 27 em que é apresentada uma análise de elementos finitos de um rotor sob carga nominal (à direita), um ensaio de curto-circuito convencional com corrente elétrica eficaz de aproximadamente 23 A (ao centro) e um ensaio com corrente elétrica eficaz de 11 A limitada por uma impedância externa. É perceptível na imagem ao centro da Figura 27 o efeito de desmagnetização e as linhas de fluxo fechando-se através do entreferro e das pontas do estator. Nessa condição, um simples ensaio de curto-circuito sem o acoplamento de uma impedância externa é capaz de sugerir valores de indutância que não correspondem ao modelo da máquina.

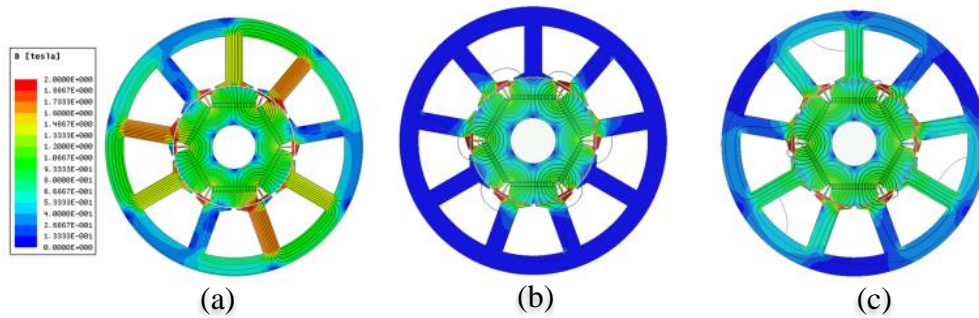
$$\lambda_m = \frac{V_{peak}}{2\pi f} \quad (30)$$

$$Z = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (31)$$

$$X_d = \sqrt{Z^2 - R_s^2} \quad (32)$$

$$L_d = \frac{X_d}{2\pi f} \quad (33)$$

Figura 27: Análise comparativa de densidade de fluxo magnético entre ensaio sob carga nominal (a), ensaio de curto-circuito (b), ensaio de curto-circuito com impedância reativa externa (c).



Fonte: Extraído de (RALLABANDI, et al., 2019).

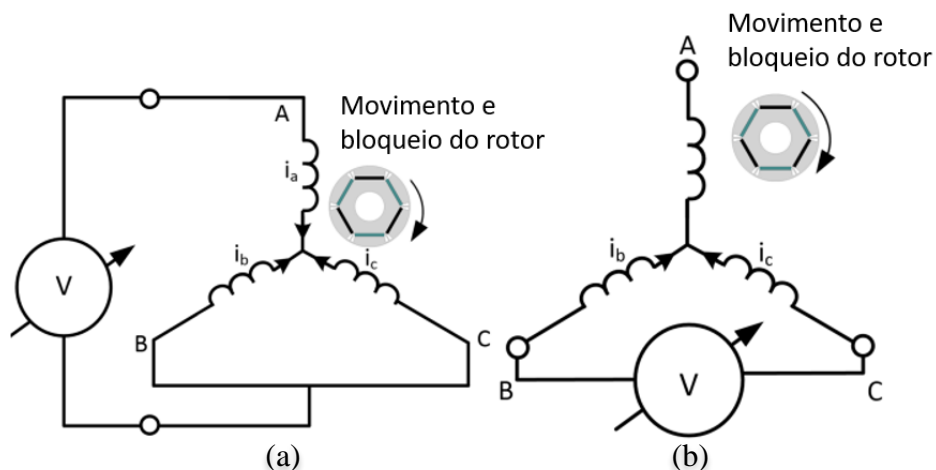
### 3.4.3. Indutância de Eixo de Quadratura

Para obtenção do valor de indutância de eixo em quadratura, aplica-se um ensaio de rotor bloqueado e realiza-se a montagem do circuito conforme apresentado na Figura 28, optando-se por um ou outro modelo de circuito representado conforme imagens apresentadas à esquerda e à direita e deverá ser considerado, conforme a escolha do circuito, as equações 34 e 35 para o cálculo das correntes elétricas, respectivamente. Aplica-se então um valor pré-determinado de corrente elétrica contínua às fases e mede-se o valor de seu respectivo conjugado (RALLABANDI, et al., 2019).

$$I_b = I_c = \frac{-I_a}{2} \quad (34)$$

$$I_b = -I_c \quad , \quad I_a = 0 \quad (35)$$

Figura 28: Ensaios de rotor bloqueado com alimentação por fonte de corrente controlada. Conexão com fase A e divisão entre fases B e C (a), conexão entre fases B e C (b).



Fonte: Adaptado de (RALLABANDI, et al., 2019).

Enquanto o ensaio da Figura 28 (a) impõe uma força magnetomotriz paralela ao eixo de fase A guiando o rotor ao pleno alinhamento com o eixo d, o ensaio da Figura 28 (b) determina uma excitação do eixo q com o rotor mantido na mesma posição e o torque estático é medido em diferentes posições intermediárias. Dessa forma, pode-se obter o valor do fluxo magnético concatenado  $\lambda_m$  através da equação (36). Sabendo o valor de indutância direta  $L_d$  obtida através do ensaio de curto-circuito, determina-se a indutância de quadratura  $L_q$  conforme equação (37). Segundo RALLABANDI *et al.* (2019), o bloqueio do eixo em duas posições intermediárias é suficiente para obter-se o valor da indutância de quadratura  $L_q$ .

$$\lambda_m = \frac{2T_m}{3I_q(P/2)} \quad (36)$$

$$L_q = L_d + \frac{\lambda_m}{I_d} - \frac{2T_m}{3I_q(P/2)} \quad (37)$$

#### 3.4.4. Relação entre Carga, Conjugado e Rotação

O valor de conjugado de um gerador geralmente é analisado associado às correntes elétricas de eixo direto e de eixo em quadratura. Porém, é incomum e, dentre os artigos analisados para operação como gerador, não foi identificado um modelo matemático que relaciona apenas parâmetros mecânicos de torque e rotação, com uma carga elétrica alimentada pelo gerador. No desenvolvimento deste trabalho, portanto, deduções matemáticas a partir dos parâmetros de máquina e relacionadas à equação de conjugado foram capazes de excluir os valores de corrente elétrica do modelo e dar ênfase aos parâmetros mecânicos como torque e rotação relacionados à carga elétrica alimentada pelo gerador. Dessa forma, as deduções matemáticas iniciam pela análise da tensão eficaz de fase induzida  $E_{oc}$ , que é dada pelo seu valor de constante  $K$  multiplicado pela rotação  $\Omega$ , conforme equação (38).

$$E_{oc} = K \cdot \Omega \quad (38)$$

Para obter o modelo matemático capaz de extrair o conjugado através da carga, rotação e parâmetros de máquina, extraiu-se o valor de frequência elétrica  $\omega_e$  a partir da quantidade de polos e da rotação  $\Omega$  da máquina, conforme equação (39).

$$\omega_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot \Omega}{120} \quad (39)$$

$$I_{rms} = \frac{K \cdot \Omega}{\sqrt{(R_s + R)^2 + (\omega_e \cdot L_s)^2}} \quad (40)$$

Através da corrente elétrica eficaz de fase  $I_{rms}$  apresentada pela equação (40) caracteriza-se a corrente de pico de fase, a qual pode ser igualada à  $I_q$  (considerando que se faz uma transformação de Park com amplitude constante), conforme equação (41). É importante ressaltar essa consideração de igualdade entre a corrente de fase e de quadratura se faz possível se a carga  $R$  é puramente resistiva e que a resistência equivalente  $(R_s + R)$  é significativamente maior que a reatância  $\omega_e \cdot L_s$ .

$$I_{pico} = I_q = I_{rms} \cdot \sqrt{2} \quad (41)$$

O fluxo concatenado dos ímãs permanentes  $\lambda_m$ , por sua vez, é apresentado conforme equação (42), a qual relaciona os valores de tensão de pico de linha por 1000 rpm  $V_{pk/krpm}$  e a quantidade de polos  $P$ .

$$\lambda_m = \frac{60 \cdot V_{pk/krpm}}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot P \cdot 1000} \quad (42)$$

A partir dos modelos equivalentes de máquinas síncrona se obtém a equação (43) para o conjugado eletromagnético.

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (43)$$

Para uma máquina de ímãs permanentes de polos lisos a indutância síncrona  $L_s$  apresenta-se com mesmo valor das indutâncias de eixo direto  $L_d$  e de eixo em quadratura  $L_q$ .

$$L_s = L_d = L_q \quad (44)$$

Portanto, sabendo que a corrente de quadratura pode ser substituída pela corrente de pico de fase para uma máquina de polos lisos, para este caso pode-se definir o conjugado eletromagnético  $T_{em}$  pode ser definido pela equação (45):

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda_m \cdot I_{rms} \cdot \sqrt{2}) \quad (45)$$

Dessa forma, ao substituir o valor de corrente elétrica eficaz  $I_{rms}$  na equação (45), obtemos sua nova equação conforme (46) que correlaciona parâmetros de máquina como polos  $P$ , tensão induzida  $E$ , rotação  $\Omega$ , indutância síncrona  $L_s$ , resistência síncrona  $R_s$  com parâmetros externos como rotação  $N$  e carga aplicada  $R$  aos terminais, sem a necessidade de analisar a corrente elétrica nos terminais.

$$T_{em} = \frac{3 \cdot P \cdot K \cdot \Omega \cdot \lambda_m \sqrt{2}}{4 \sqrt{(R_s + R)^2 + (\omega_e L_s)^2}} \quad (46)$$

Ou seja, se for imposta uma referência de conjugado no servomotor, é possível determinar a velocidade de operação do sistema conhecendo-se os parâmetros de circuito equivalente de um gerador síncrono de ímãs permanentes de polos lisos e a resistência de carga que o gerador alimenta, conforme equação (47)

$$\Omega = \frac{4T_{em} \sqrt{(R_s + R)^2 + (\omega_e L_s)^2}}{3PK\lambda_m \sqrt{2}} \quad \therefore \quad \Omega = \frac{R_s + R}{P} \left( \sqrt{\left( \frac{3K\lambda_m \sqrt{2}}{4T_{em}} \right)^2 - \left( \frac{2\pi L_s}{120} \right)^2} \right)^{-1} \quad (47)$$

É importante destacar que esse desenvolvimento foi realizado inicialmente considerando que se teria um gerador de polos lisos, como, por exemplo, projetado por SANTOS (2021) para a aplicação. No entanto, conforme discutido no Capítulo 4, verificou-se que as indutâncias de eixo direto e de eixo em quadratura são distintas no gerador utilizado na bancada.

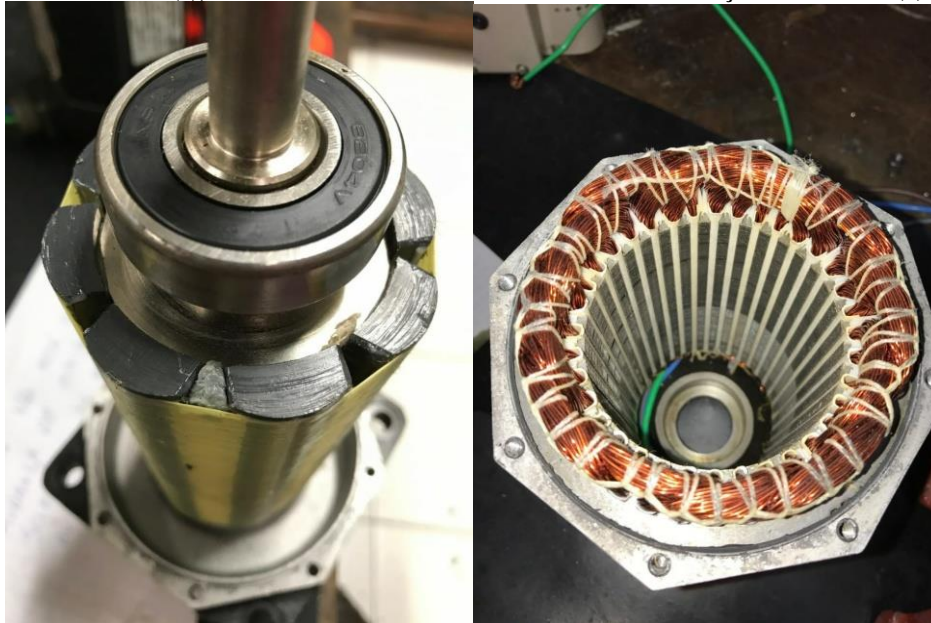
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através de ensaios seguiram o procedimento apresentado conforme Figura 25. Ao obter o modelo característico do gerador, foram realizados ensaios e simulações para sua validação. Por conseguinte, o gerador foi aplicado ao sistema HIL desenvolvido, tanto em simulações e ensaios, conforme detalhado neste capítulo.

### 4.1. GERADOR

Na Figura 29 (a) e (b) são apresentadas fotografias do rotor e do estator do gerador, respectivamente, utilizado no sistema HIL desenvolvido neste trabalho. Pode-se verificar que o rotor contém ímãs permanentes de ferrite distribuídos na superfície do rotor. É possível observar ainda que os ímãs permanentes apresentam uma superfície côncava, com raio de curvatura externo não concêntrico com o eixo da máquina. Essa técnica é geralmente empregada para reduzir a distorção harmônica na tensão contraeletromotriz da máquina. Já o estator, mostrado na Figura 29 (b), tem enrolamento distribuído e sem inclinação nas ranhuras. Após a inspeção visual e com o gerador montado, foram realizados ensaios experimentais para obtenção do modelo equivalente.

**Figura 29: Imagens da máquina síncrona de ímãs permanentes empregada como gerador no sistema HIL. Rotor com ímãs de ferrite (a), estator com enrolamento distribuído e sem inclinação de ranhuras (b).**



Fonte: Próprio Autor

(a)

(b)



Ao impor diferentes valores de rotação à máquina que emula a turbina através do servoconveror WEG SCA-05, foram realizadas medidas de tensão de fase a vazio no gerador através de sinal obtido em osciloscópio, conforme pode ser verificado na Tabela 2. O valor máximo de rotação foi definido em 3.000 rpm.

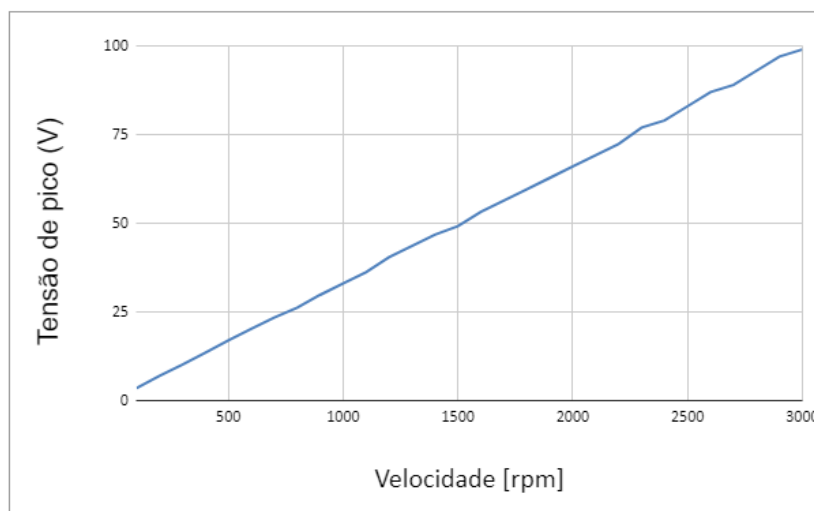
**Tabela 2: Medidas de tensão de pico de fase versus rotação.**

Velocidade (rpm)	Tensão de pico (V)	Velocidade (rpm)	Tensão de pico (V)	Velocidade (rpm)	Tensão de pico (V)
100	3,48	1100	36,2	2100	69,2
200	6,92	1200	40,4	2200	72,4
300	10,1	1300	43,6	2300	77,0
400	13,5	1400	46,8	2400	79,0
500	17,0	1500	49,2	2500	83,0
600	20,2	1600	53,2	2600	87,0
700	23,4	1700	56,4	2700	89,0
800	26,2	1800	59,6	2800	93,0
900	29,8	1900	62,8	2900	97,0
1000	33,0	2000	66,0	3000	99,0

Fonte: Próprio Autor

Os valores apresentados na Tabela 2 foram correlacionados através da Figura 30, a qual apresenta a relação de aumento de tensão do gerador a vazio à medida que aumenta a rotação imposta pelo motor.

**Figura 30: Relação tensão de fase de pico versus rotação com o gerador a vazio.**



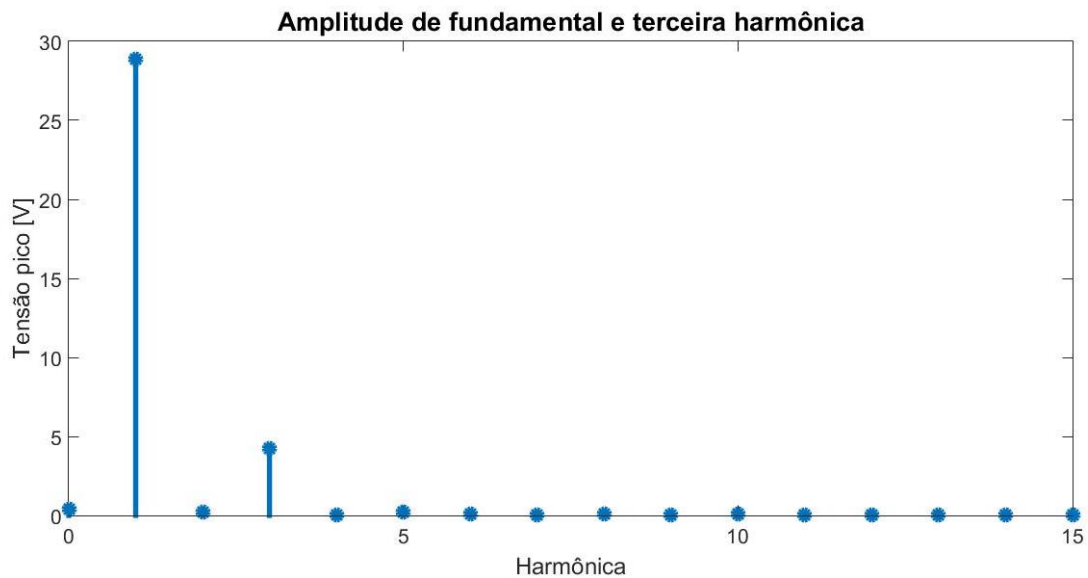
Fonte: Próprio Autor.

Um exemplo dos sinais de tensão de fase obtidos para os ensaios de gerador a vazio pode ser verificado conforme Figura 31 para uma rotação de 1.000 rpm. A respectiva

composição harmônica dos sinais de tensão é mostrada na Figura 32. Os demais sinais de tensão elétrica, para seus respectivos valores de rotação, podem ser verificados no Apêndice A.



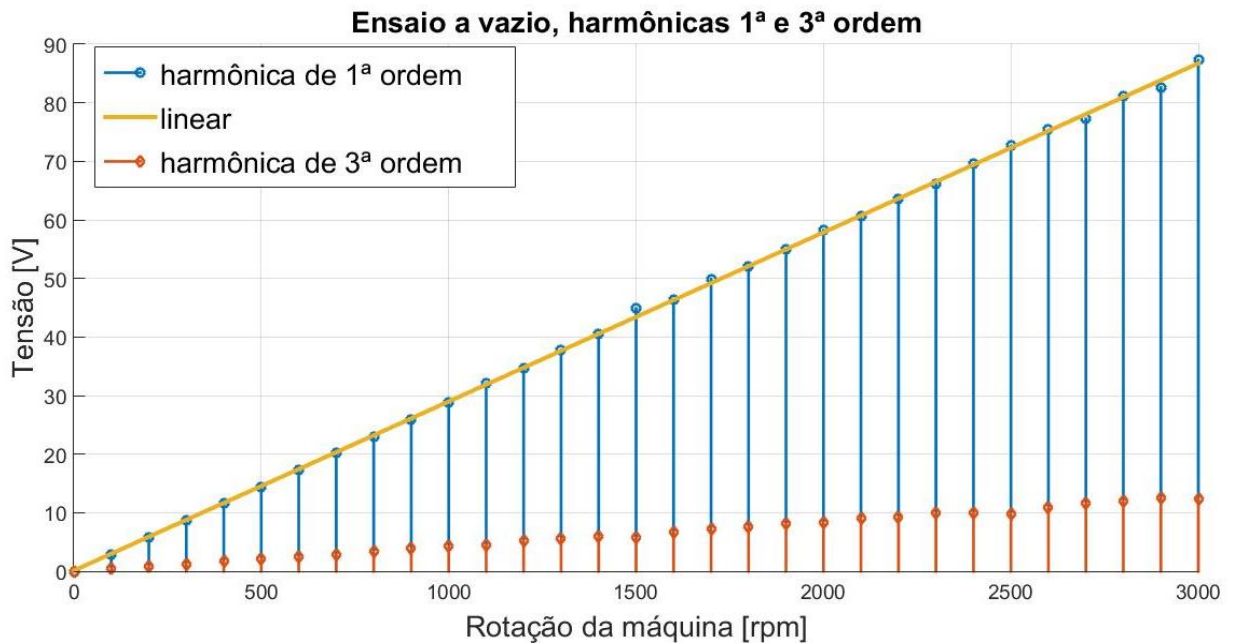
**Figura 32: FFT da tensão a vazio no gerador com rotação de 1.000 rpm, amplitude fundamental e 3º harmônica.**



Os modelos de frequência fundamental e 3º harmônica dos ensaios de rotação podem ser verificados conforme Figura 33, obtidos através de Software Matlab, os quais apresentam as respectivas amplitudes de suas componentes (primeira e terceira harmônica) da tensão de fase a vazio. O modelo matemático representativo da frequência fundamental é apresentado

através da equação (48), a qual foi obtida por meio da linearização de dados para uma equação de 1º grau. Sobre a reta que representa o modelo matemático de tensão de pico do sinal da frequência fundamental, são indicados pontos aleatórios com seus respectivos valores de tensão a vazio e rotação.

**Figura 33: Valor de pico da componente fundamental e de terceira harmônica da tensão de fase a vazio para ensaios de 100 a 3000 rpm.**



Fonte: Próprio Autor.

$$V_{fp1} = 0,028867 \cdot \Omega \quad (48)$$

As medidas de resistência de fase foram realizadas com um ohmímetro digital a 4 fios Cropico modelo DO5. Os valores podem ser verificados na Figura 34, e seus valores considerados são demonstrados conforme Tabela 3.

**Figura 34: Ensaio de reatância síncrona para as 3 fases do gerador em (a) fase A, (b) fase B, (c) fase C.**



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3: Medidas de resistência de fase.

Fase	Resistência [ $\Omega$ ]
A	0,45
B	0,45
C	0,45

Para determinar o número de polos do gerador, foram considerados os valores de frequência  $f$  [Hz] e rotação [rpm] do ensaio a vazio em 3000 rpm. A partir da velocidade de rotação imposta pelo servo conversor e da leitura de seu respectivo valor em frequência de 199,8 Hz, aplicou-se a equação (49) e obteve-se a quantidade de polos conforme a equação (50). Destaca-se que esta verificação foi realizada antes de desmontar o gerador, como mostrado na Figura 29. A inspeção visual do rotor também permite concluir que a máquina é de 8 polos.

$$\Omega = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (49)$$

$$\Omega = \frac{120 \cdot f}{P} \rightarrow P = \frac{120 \cdot 199,8 \text{ Hz}}{3000 \text{ rpm}} \rightarrow P = 8 \quad (50)$$

A realização dos ensaios de curto-circuito e circuito aberto seguiram as diretrizes da IEEE Std 1812 (2015). O ensaio a vazio foi realizado conforme apresentado na subseção 4.1.1. Já o ensaio de curto-circuito foi realizado com conexão de indutância de carga ligadas em estrela aos terminais do gerador. O uso destas indutâncias no ensaio visa operar com corrente majoritariamente de eixo direto, uma vez que a componente reativa do circuito equivalente no ensaio de curto-circuito passa a ser significativamente maior à componente resistiva. Sendo assim, foram utilizados três indutores com características construtivas idênticas.

Para determinar o valor da indutância de eixo direto  $L_d$  [H] foram realizadas medidas de rotação  $N_{cc}$  [rpm], tensão de linha pico a pico  $V_{l-pp}$  [V] e valor eficaz da corrente elétrica [A]  $I_{sc}$  em ensaios de curto-circuito. A frequência de curto-circuito  $f_{cc}$  [Hz] pode ser obtida através da equação (51) a qual relaciona o número de polos  $P$  da máquina com o valor de rotação  $N_{cc}$  [rpm]. Para obtenção dos valores de indutância externa  $L_{ext}$  [H] aplica-se a equação (52), enquanto que a tensão de circuito aberto  $V_{oc}$  [V] é caracterizada pela equação (53). A equação (54), por sua vez, representa a impedância  $Z_{cc}$  [ $\Omega$ ] do ensaio de curto-circuito com a indutância externa  $L_{ext}$  [H] acoplada. Desta forma é possível obter o valor da indutância direta  $L_d$  [H], conforme apresentado na equação (56).

$$f_{cc} = \frac{N_{cc}P}{120} \quad (51)$$

$$L_{ext} = \frac{V_{tphase}}{2\pi f_{cc} I_{sc}} = \frac{V_{l-pp}}{2.2\pi f_{cc} I_{sc} \sqrt{2}\sqrt{3}} \quad (52)$$

$$V_{oc} = \frac{E_{oc} N_{cc}}{I_{sc} 10^3 \sqrt{2}} \quad (53)$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (54)$$

$$L_{eq} = \frac{\sqrt{Z_{cc}^2 - R_s^2}}{2\pi f_{cc}} \quad (55)$$

$$L_d = L_{eq} - L_{ext} \quad (56)$$

Os ensaios estáticos de rotor bloqueado foram aplicados conforme apresentados na Figura 35. Na Figura 35 (a) está a bancada com a fonte de alimentação para aplicação de corrente e a base de elevação para ajuste da posição. Na mesma Figura 35 (b), é demonstrado em detalhe o acoplamento da chave para bloqueio do rotor. Neste ensaio, conforme determina a Std 812 IEEE (2015), aplicou-se uma corrente elétrica DC com valor abaixo de seu limite nominal.

Para determinar a posição de eixo direto para os ensaios, determinou-se a posição do eixo que resultava em um valor de conjugado igual a zero. A posição foi monitorada por meio da leitura do *resolver* (acoplado ao servomotor) disponível no servoconversor, que apresenta uma resolução de 16383 pontos por ciclo. A partir da posição inicial, sabendo que  $I_a = 5$  A e  $I_b = I_c = -2,5$  A, realizando as devidas transformações de posição do resolver (Tabela 4) para se obter o valor do ângulo elétrico ao aplicar a equação (57) para uma transformação abc-dq0, obtém-se os devidos valores de corrente direta  $I_d$  e de quadratura  $I_q$  para uma determinada posição aplicada ao eixo. Nessa condição, faz-se a leitura estática do conjugado mecânico e, aplicando a equação (58), obtém-se o valor de  $L_d$  associado ao  $I_q$  que, para defini-los, tomou-se como referência o valor intermediário de  $L_d$  e o maior conjugado nos ensaios de rotor bloqueado, conforme destacado na Tabela 5.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$L_q = L_d + \frac{\lambda_m}{I_d} - \frac{2T}{3PI_d I_q} \quad (58)$$

Tabela 4: Dados do ensaio de rotor bloqueado.

Posição do resolver	15270	15000	14750	14500
Medida de conjugado [N.m]	0,0	0,85	1,53	1,97

Tabela 5: Dados do ensaio de curto-circuito.

$N_{cc}$ [rpm]	$V_{1-pp}$ [V]	$V_{tfase}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$R_s$ [Ω]	$L_{ext}$ [mH]	$Z_{cc}$ [Ω]	$L_{eq}$ [mH]	$L_d$ [mH]	$L_q$ [mH]
119	1,05	0,2143	4,14	0,45	2,8	0,5869	7,6	4,7	3,6
138	1,36	0,2776	4,99		2,5	0,5647	5,9	3,4	2,4
161	2,78	0,5675	6,04		2,1	0,5442	4,5	2,4	1,4

Destaca-se que o valor da indutância externa  $L_{ext}$  difere do valor encontrado ao medir os indutores com uma ponte RLC. A diferença em relação ao valor encontrado nos ensaios é atribuída principalmente ao fato dos indutores utilizados serem sem entreferro e pelo fato do ensaio com ponte RLC ser realizada com frequência mais alta e corrente significativamente mais baixa do que aquela aplicada durante o ensaio de curto-circuito. Desta forma, considerou-se o valor  $L_{ext}$  constante na Tabela 5.

Figura 35: Fotografias da bancada para os ensaios de rotor bloqueado.



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

Os parâmetros obtidos do gerador a partir de seus ensaios, portanto, podem ser verificados na Tabela 6. São apresentados os valores de resistência de fase do estator  $R_s$ , indutância de eixo direto  $L_d$ , indutância de eixo em quadratura  $L_q$ , tensão elétrica de fase (pico)

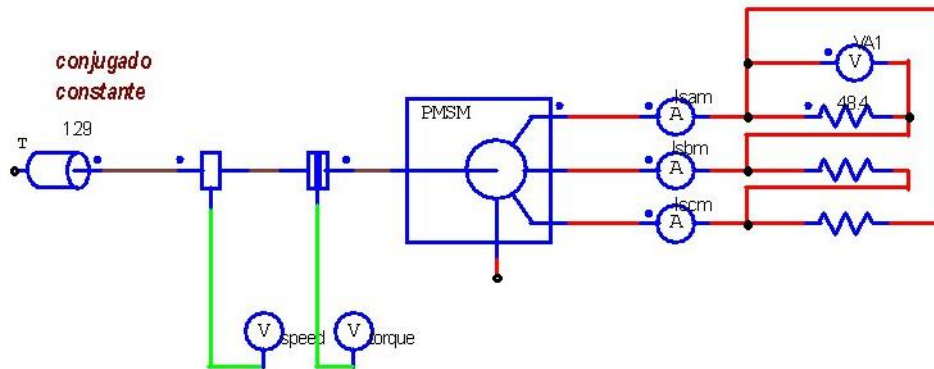
induzida para cada 1000 rpm ( $V_{pk}/krpm$ ), tensão elétrica de fase (pico) induzida ( $V_{pk}/krpm$  de 1° harmônica), número de polos  $P$  da máquina. O momento de inércia  $J$  foi obtido por meio de manual do equipamento.

**Tabela 6: Dados do gerador ( $R_s$ ,  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $V_{pk}/krpm$ ,  $P$ ,  $J$ ).**

<b>Grandezas</b>	<b>Valores obtidos</b>
Resistência do estator ( $R_s$ )	0,45 $\Omega$
$L_d$	3,4 mH
$L_q$	2,4 mH
$V_{pk}/krpm$ de fase	33,0 V
$V_{pk}/krpm$ 1° harmônica	28,8 V
Número de polos	8
Momento de inércia	0,0021 kg.m <sup>2</sup>

Em posse dos dados do gerador, obtidos e apresentados conforme Tabela 6, simulou-se o modelo em software PSIM® Professional Versão 12.0.4 de acordo com a Figura 36. Paralelamente, foram realizados ensaios no gerador seguindo o mesmo modelo simulado impondo um movimento rotacional de conjugado constante no eixo do gerador e verificados valores de rotação, conjugado, corrente e tensão elétrica. Conforme ilustra a Figura 36, foram conectadas cargas elétricas resistivas trifásicas e equilibradas em uma conexão delta aos terminais do gerador. Os valores de carga utilizados são apresentados na Tabela 7. Para os ensaios, devido às configurações dos instrumentos, foram definidos os parâmetros de carga através de um banco de cargas e imposição de conjugado através do servoconversor SCA-05 e realizadas as leituras de rotação, tensão e corrente elétrica. Tanto os valores medidos em simulação quanto em ensaios podem ser verificados na Tabela 7. A construção da bancada de ensaios pode ser verificada na Figura 37 (a) está o emulador de turbina, gerador e cargas, enquanto que em (b) situam-se as cargas em detalhe. Por meio das Figuras 38, 39 e 40 pode-se observar o quão próximo estão os dados obtidos por ensaio e simulados de corrente elétrica, tensão elétrica e rotação.

Figura 36: Modelo de simulação de gerador sob carga.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 7: Resultados experimentais e de simulação do gerador com carga para operação com imposição de conjugado no eixo pelo servomotor.

Grandezas Analisadas	Valores obtidos por ensaios					Valores obtidos por simulação				
	Carga: 48,4 Ω	Carga: 53,8 Ω	Carga: 60,5 Ω	Carga: 69,1 Ω	Carga: 80,7 Ω	Carga: 48,4 Ω	Carga: 53,8 Ω	Carga: 60,5 Ω	Carga: 69,1 Ω	Carga: 80,7 Ω
Ensaio número	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Conjugado [N.m]	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Rotação [rpm]	1821	2017	2223	2598	2937	1832	2034	2281	2598	3022
Corrente rms [A]	2,26	2,23	2,21	2,18	2,16	2,23	2,22	2,23	2,23	2,23
Tensão rms [V]	66,0	72,8	81,4	91,3	105,0	62,3	69,3	78,0	88,7	103,9
Ensaio número	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
Conjugado [N.m]	1,14	1,13	1,13	1,13	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Rotação [rpm]	1577	1741	1924	2183	2500	1596	1771	1987	2263	2633
Corrente rms [A]	1,95	1,92	1,90	1,87	1,85	1,94	1,94	1,94	1,95	1,95
Tensão rms [V]	56,2	61,7	68,9	77,5	88,5	54,4	60,5	68,1	77,8	91,0
Ensaio número	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
Conjugado [N.m]	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Rotação [rpm]	1302	1436	1598	1792	2070	1335	1481	1661	1892	2202
Corrente rms [A]	1,70	1,75	1,78	1,80	1,84	1,63	1,64	1,63	1,64	1,63
Tensão rms [V]	48,5	55,2	63,1	73,5	87,2	45,8	51,0	57,0	65,4	76,4
Ensaio número	16	17	18	19	20	16	17	18	19	20
Conjugado [N.m]	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Rotação [rpm]	1041	1150	1266	1435	1627	1078	1179	1323	1507	1754
Corrente rms [A]	1,33	1,30	1,29	1,29	1,28	1,32	1,30	1,30	1,30	1,30
Tensão rms [V]	37,5	41,0	46,1	52,1	59,9	36,9	40,6	45,6	52,1	60,6
Ensaio número	21	22	23	24	25	21	22	23	24	25
Conjugado [N.m]	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
Rotação [rpm]	783	858	938	1065	1210	795	881	988	1126	1311
Corrente rms [A]	1,05	1,08	1,10	1,13	1,17	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Tensão rms [V]	29,4	33,6	38,0	45,0	54,2	26,9	30,4	33,9	39,0	45,5
Ensaio número	26	27	28	29	30	26	27	28	29	30
Conjugado [N.m]	0,40	0,40	0,40	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Rotação [rpm]	527	577	642	713	804	557	617	692	788	918
Corrente rms [A]	0,66	0,66	0,69	0,70	0,71	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Tensão rms [V]	19,0	21,3	23,7	26,9	31,7	19,1	21,3	23,9	27,3	31,9
Ensaio número	31	32	33	34	35	31	32	33	34	35
Conjugado [N.m]	0,36	0,35	0,35	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Rotação [rpm]	393	428	475	529	600	487	539	605	689	803
Corrente rms [A]	0,51	0,51	0,51	0,50	0,48	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Tensão rms [V]	393	428	475	529	600	16,7	18,6	21,0	23,9	27,9



Figura 37: Ensaio de gerador sob carga. (a) bancada com cargas resistivas. (b) detalhamento da ligação em triângulo das cargas.

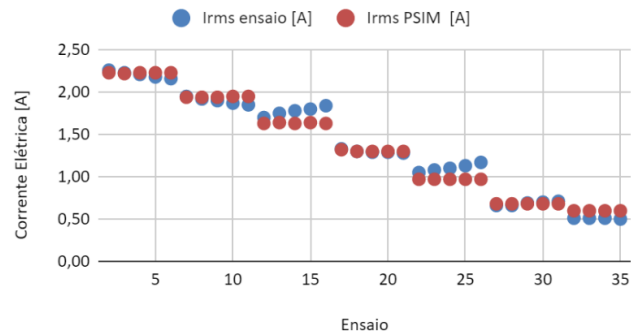


(a)

(b)

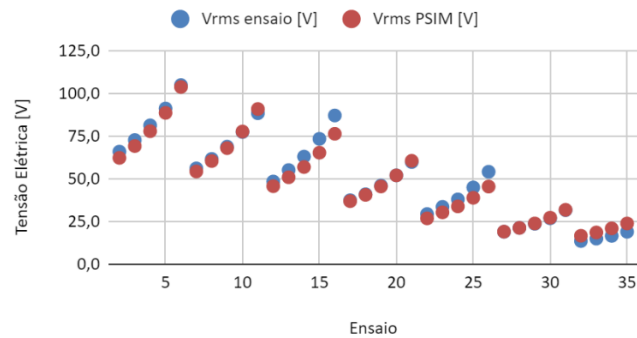
Fonte: Próprio Autor.

Figura 38: Comparação entre dados de corrente elétrica obtidas por ensaio e simulação.



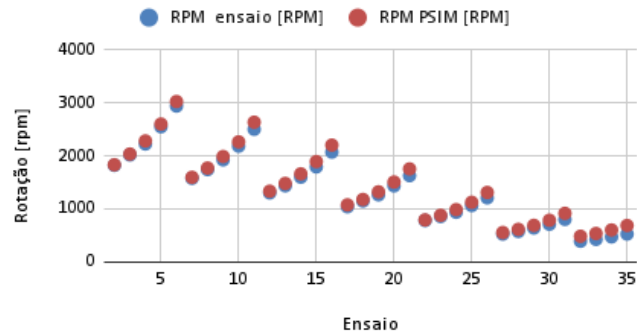
Fonte: Próprio Autor.

Figura 39: Comparação entre dados de tensão elétrica terminal obtidas, ensaio e simulação.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 40: Comparação entre dados de rotação obtidas por ensaio e simulação.



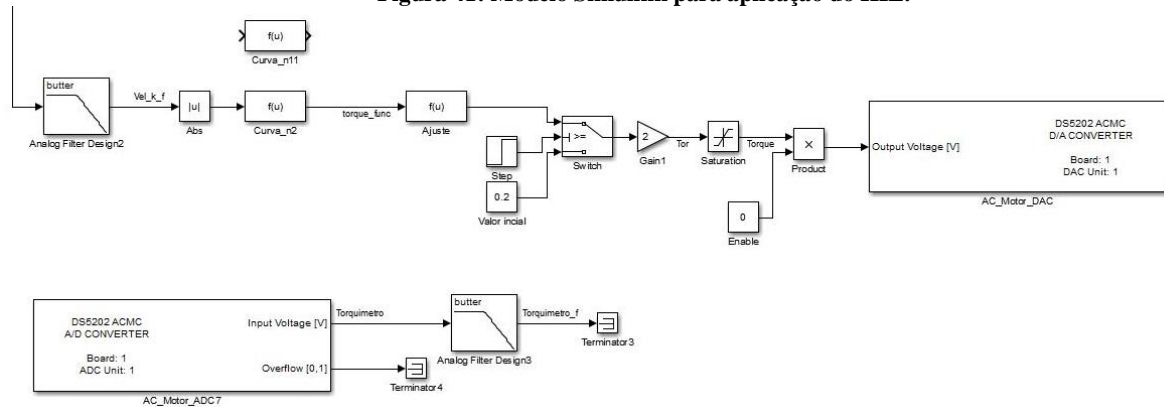
Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2. SIMULAÇÕES E ENSAIOS HIL

As simulações em malha fechada foram realizadas utilizando os modelos apresentados conforme Figura 19 e o gerador com suas características tal qual verificado nos ensaios, de acordo com a Tabela 8. Ao impor determinada carga, analisou-se o valor de conjugado e rotação do gerador. O mesmo procedimento foi realizado para o HIL físico, limitando os valores de análise em cargas entre 1000 rpm (valor mínimo de rotação apresentado conforme Figura 18) e 3000 rpm (limite máximo da rotação do motor emulador de turbina). Como os valores de conjugado, corrente e tensão elétrica obtidos ficaram abaixo dos limites do torquímetro, emulador de turbina e gerador, não houve limitação de seus valores nos ensaios e simulações.

Para realização dos ensaios, aplicou-se o modelo de HIL representado na Figura 41 em que foi dado destaque na imagem apenas os blocos de interesse. A partir de leitura de velocidade do bloco de controle do Simulink, o sinal é tratado pelos blocos *Analog Filter Design* e *Abs*, seu valor em rotações por minuto é transferido ao bloco que carrega a equação (23) e (24), blocos *Curva\_n2* ou *Curva\_n11*, respectivamente. O respectivo sinal de saída impõe um conjugado referencial o qual está conectado a um bloco de ajuste que corrige a não linearidade existente no HIL, conforme pode ser verificado no Apêndice B. A partir da saída do bloco de ajuste, há o chaveamento do sinal de saída através do bloco *switch*, capaz de inicializar o modelo, o respectivo ganho para adequar as tensões da Dspace à faixa de tensão do modelo aplicado e um bloco de saturação (*Saturation*) para controle de segurança dos sinais de saída. O bloco *Enable* e *Product*, por sua vez, são capazes de realizar o chaveamento manual do modelo, ativando ou desativando o sistema. Para leitura de valor do torquímetro, é realizada a leitura através do bloco *AC\_Motor\_ADC7*, seu sinal é tratado através do bloco *AnalogFilter Design3* e a leitura apresentada pelo terminal 3 (*Terminator 3*). Através do bloco de saída para controle do conjugado de referência, leitura de rotação e conjugado, as conexões da Dspace ao servoconversor e torquímetro podem ser verificados conforme Figura 41. Os valores obtidos através destes ensaios referentes às aplicações das equações de ondas n02 e n11, podem ser verificados na tabela 8 que, de acordo com o tipo de carga aplicada, apresenta valores de conjugado simulado pelo PSIM® Professional Versão 12.0.4 (Conjugado Simulação), referência de conjugado determinado pela resposta da equação e onda aplicada (Conjugado Referencial), valor de conjugado apresentado pelo torquímetro (Conjugado Ensaio) e rotação simulada e rotação obtida através de ensaio.

**Figura 41: Modelo Simulink para aplicação do HIL.**



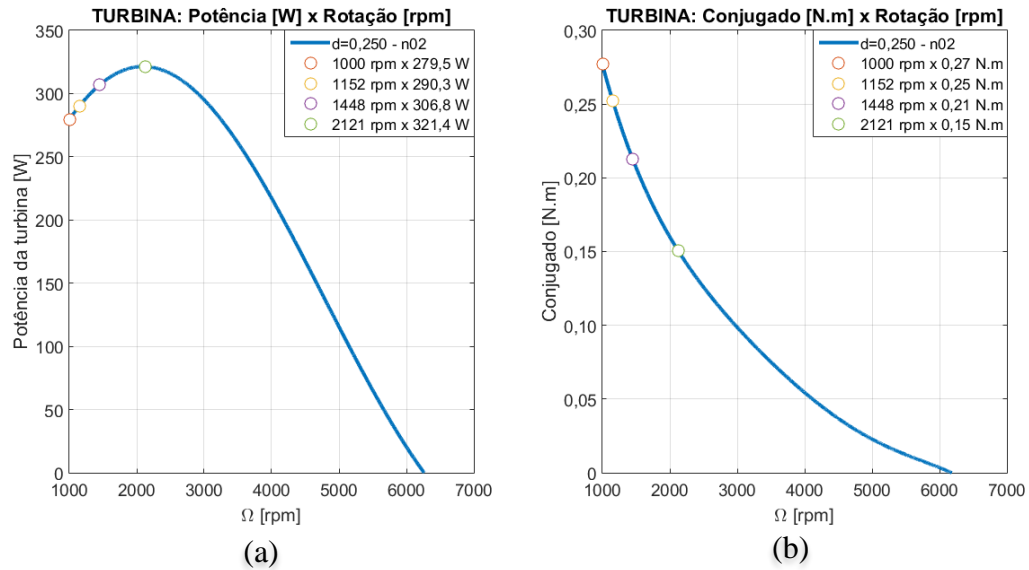
Fonte: Próprio Autor.

**Tabela 8: Simulações e ensaios a partir da aplicação de cargas em HIL.**

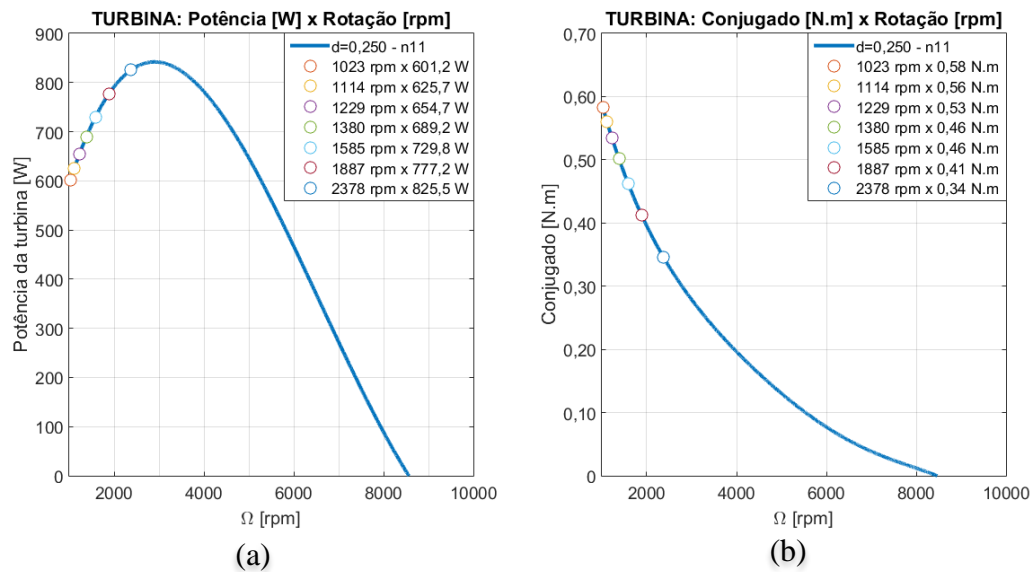
ENSAIO	CARGA	Conjugado [N.m] Simulação	Conjugado [N.m] Referencial	Conjugado [N.m] Ensaio	Rotação [rpm] Simulação	Rotação [rpm] Ensaio
Curva n02	121 $\Omega$	0,28	0,32	0,36	<1000	800
Curva n02	161,3 $\Omega$	0,25	0,32	0,26	1152	820
Curva n02	242 $\Omega$	0,21	0,28	0,25	1448	960
Curva n02	484 $\Omega$	0,15	0,24	0,22	2121	1200
Curva n11	60,5 $\Omega$	0,59	0,63	0,60	1023	964
Curva n11	69,1 $\Omega$	0,56	0,59	0,59	1114	1000
Curva n11	80,7 $\Omega$	0,53	0,58	0,58	1229	1018
Curva n11	96,8 $\Omega$	0,50	0,54	0,54	1380	1180
Curva n11	121 $\Omega$	0,46	0,50	0,50	1585	1348
Curva n11	161,3 $\Omega$	0,41	0,48	0,48	1887	1465
Curva n11	242 $\Omega$	0,35	0,41	0,41	2378	1864

Para cada medida obtida através de simulação apresentados conforme a Tabela 8, foram identificados seus valores de velocidade sobre as curvas que relacionam potência *versus* rotação e conjugado *versus* rotação das turbinas. Conforme Figura 42, são determinados os pontos sob a curva obtida por HENRIQUES, PORTILLO *et al.* (2016) para os valores de carga aplicados de acordo com o modelo matemático da curva n02 de acordo com a equação (23). Já para a Figura 43 aplica-se o mesmo procedimento, porém referente à curva n11 de acordo com a equação (24).

**Figura 42: Curvas de potência versus rotação (a) e conjugado versus rotação (b). Destaque aos pontos simulados em regime permanente na curva n02.**



**Figura 43: Curvas de potência versus rotação (a) e conjugado versus rotação (b). Destaque aos pontos simulados em regime permanente na curva n11.**

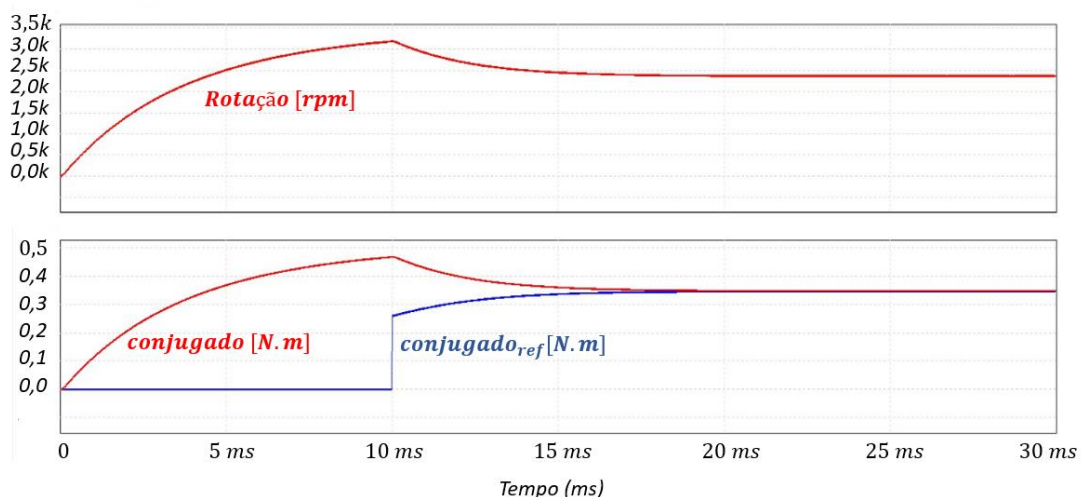


Os modelos de malha fechada sob carga simulada, quando comparados seus valores de torque e rotação com as curvas apresentadas nas Figuras 42 e 43, seguem fielmente a dinâmica da WEC OWC. Em malha fechada, as simulações foram realizadas dentro da faixa limite dos dispositivos HIL e corresponderam de forma satisfatória, como pode ser verificado a exemplo na Figura 44 em que são apresentados sinais de conjugado e rotação, obtidos através do software PSIM® Professional Versão 12.0.4, para uma carga de  $242 \Omega$  tomando como referência a equação (24), representativa da onda n11. Em regime permanente, percebe-se que os valores de rotação coincidem com sua respectiva onda, assim como seu valor de conjugado. Essa

condição repete-se para todos os demais valores de carga e para os dois modelos de onda aplicados, n02 e n11.

Quando a simulação do HIL é comparada com o modelo físico, são observadas duas situações diferentes em cada ensaio de onda. Para a onda n02 o modelo HIL acompanha as transições de carga. À medida que a carga reduz (maior resistência) seus valores de conjugado reduzem e a velocidade aumenta, porém o gerador do HIL não é capaz de seguir sua curva de onda respectiva de forma satisfatória. Tal condição é resultado de certos fatores limitantes, como apresentado no Apêndice B, além da pequena faixa de transição média entre os valores de conjugado (algo em torno de 40 mV), ruído de sinal e, acrescido a todos estes, pela característica de baixa potência da própria onda que, apesar de resultar em velocidades altas, impõe um valor muito baixo de conjugado. A dificuldade de obtenção das curvas em ensaio do HIL para a onda n02 é perceptível ao se comparar os três sinais de conjugado: simulação, referencial e ensaio. Nenhum destes é capaz de corresponder às mesmas medidas entre si e, ao somar todos estes fatores, é plausível afirmar que o modelo segue alguma referência mas que demonstra um alto grau de incerteza no controle de torque para esta onda e a aplicação de sua equação.

**Figura 44:** Curvas de conjugado (conjugado), Conjugado de referência (conjugado<sub>ref</sub>) do modelo matemático, e rotação (rotação) para uma carga de 242  $\Omega$  do modelo simulado de HIL para a curva n11.



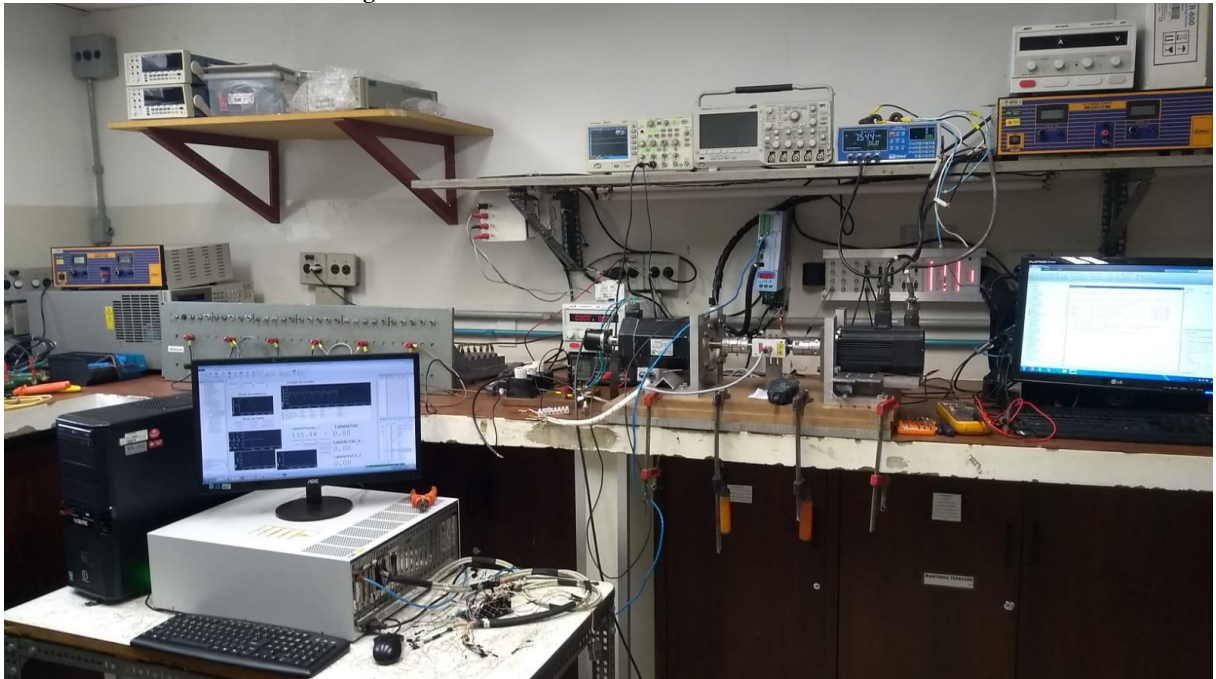
Fonte: Próprio Autor.

Ao considerar a onda de maior potência n11, o que se nota é a existência de um modelo capaz de seguir exatamente a equação obtida de sua respectiva curva. Os valores de torque simulado, referencial e ensaio correspondem entre si, assim como o valor de rotação, porém

seguindo uma carga abaixo do esperado. Ou seja, se a carga está selecionada em  $242 \Omega$ , seus valores de velocidade, conjugado referencial e ensaio correspondem aos valores da carga em  $161,3 \Omega$ , e assim sucessivamente. Ainda que não atingisse as condições esperadas, o HIL apresentou um desempenho satisfatório seguindo exatamente a curva conforme a transição de carga, exatamente com um passo abaixo. Essa condição não invalida o modelo aplicado, pois, ao considerar o que foi apresentado no Apêndice B, é compreensível a existência desta diferença. Cabe também considerar que, assim como na curva n02, os fatores de incerteza continuam presentes no HIL.

Por fim, apresenta-se na Figura 45 o modelo de HIL montado, o emulador de turbina, torquímetro, gerador, servoconversor, computadores e DSpace, além de banco de cargas, ferramentas, instrumentos e materiais utilizados no desenvolvimento do dispositivo.

**Figura 45: HIL do modelo de WEC OWC emulado.**



**Fonte: Próprio Autor.**

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo implementar 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. Realizou-se uma extensa pesquisa bibliográfica para a implementação do modelo de HIL, ao qual foram selecionados alguns artigos de interesse para esta aplicação e definido o modelo de WEC-OWC adequado à proposta deste trabalho.

Construiu-se a bancada para emulação da WEC-OWC e a ela conectada o gerador síncrono de ímãs permanentes por meio de um torquímetro para leitura de parâmetros. Através da literatura disponível, dos modelos simulados e do hardware implementado, foram realizadas simulações e ensaios a partir de modelos matemáticos, com e sem carga acoplada ao gerador. Em posse dos resultados, os dados foram analisados e comparados. Sendo assim, foram avaliadas duas curvas de geração que emulam diferentes condições de onda. Verificou-se que o modelo de simulação consegue reproduzir a operação exatamente sobre os pontos da curva, no entanto, o modelo HIL com componentes experimentais apresentou resultados satisfatórios apenas para a curva de maior potência. Constatou-se que o problema na bancada pode ser atribuído a operação com baixo conjugado que é susceptível a ruído e baixa sensibilidade nessa região de operação.

Dessa forma, sugere-se a continuidade deste projeto, porém com algumas atualizações:

- Mudanças na estrutura física do dispositivo, capaz de apresentar maior robustez às trepidações;
- Implantação de um servoconversor capaz de controlar o dispositivo com o mínimo de ruído de sinal;
- Aplicação de outros modelos de onda ao dispositivo;
- Controle de malha fechada em regime permanente com controladores P, PI, PID;
- Implementação e aprimoramento de controle de transitório;
  - Modelagem do modelo e seu sinal de controle;
- Implantação do modelo com outros geradores e análise de desempenho comparativo;
- Implantação de cargas reativas;
- Sensoriamento remoto do movimento oceânico e aplicação *on line* através do HIL;
- Modelagem aplicada ao desenvolvimento da Equação (47) para modelos de eixo direto e quadratura.

## REFERÊNCIAS

- BERRIEL, R.O; SHADMAN, M.; WU, Z. *et al.* Hardware-in-the-loop development of a heaving point absorber wave energy converter using inertia emulation. **Electrical Engineering**, 2021.
- BRACCO, G.; GIORCELLI, E.; MATTIAZZO, G.; ORLANDO, V.; RAFFERO, M. Hardware-In-the-Loop test rig for the ISWEC wave energy system, **Mechatronics**, v. 5, p. 11-17, 2015.
- DELLICOLLI, V.; CANCELLIERE, P.; MARIGNETTI, F.; DI STEFANO, R.; SCARANO, M. A tubular generator for marine energy direct drive applications, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 53, n. 4, p. 1473–1478, 2006.
- DREW, B.; PLUMMER, A.R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 223, p. 887–902, 2009.
- FALCÃO, A. F. O.; JUSTINO, P. A. P. Owc wave energy devices with air flow control. **Ocean Engineering**, [S.l.], v. 26, n.12, p. 1275-1295, 1999.
- FALCÃO, A. F. O.; JUSTINO, P. A. P. OWC wave energy utilization: A review of the Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. [S. l.], v. 26, n. 12, p. 1275-1295, 1999.
- FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.
- FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C.; CÂNDIDO, J. J. Dynamics and optimization of the OWC spar buoy wave energy converter. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 48, p. 369-381, 2012.
- FALCÃO, A. F. O.; GATO, L.M.C; NUNES, E.P.A.S. A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters. **Renew Energy**, v. 50, p. 289-298, 2013.
- FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 85, p. 1391-1424, Jan. 2016.
- FONSECA, F.X.C.; HENRIQUES; J.C.C.; GATO, L.M.C.; FALCÃO, A.F.O. Oscillating flow rig for air turbine testing. **Renewable Energy**, V 142, p. 373-382, 2019.
- GATO, L. M. C.; FALCAO, A. F. O. Performance of the Wells turbine with a double row of guide vanes. **JMESE international journal. Ser. 2, Fluids engineering, heat transfer, Power, combustion, thermophysical properties**, [S.l.], v. 33, n. 2, p. 265-271, 1990.
- GOMES, R. P. F. et al. Hydrodynamics optimization of naaxismmetric floating oscillating water column for wave energy conversion. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 44, p. 328-339, 2012.
- HENRIQUES, J.C.C.; et al. Air turbine and primary converter matching in spar-buoy oscillating-water-column wave energy device. **International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, Proceedings [...], Nantes, ASME, p. 1-9, 2013.



HENRIQUES, J. C. C.; PORTILLO, J. C. C.; GATO, L. M. C.; GOMES, R. P. F.; FERREIRA, D. N.; FALCÃO, A. F. O. Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys. **Energy**, Amsterdam, v. 112, p. 852-867, 2016.

HENRIQUES, J.C.C.; GOMES, R.P.F.; GATO, L.M.C.; FALCÃO, A.F.O.; CEBALLOS, E. ROBLES, S. Testing and control of a power take-off system for an oscillating-water-column wave energy converter. **Renewable Energy**, V 85, p. 714-724, 2016.

HOLLIS, T.; KARAYAKA, H. B.; YU, Y.; YAN, Y. Hardware-in-the-Loop Simulation for the Proposed Slider-Crank Wave Energy Conversion Device, **OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston**, p. 1-7, 2018.

"IEEE Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines," in *IEEE Std 1812-2014*, vol., no., pp.1-56, 24 Feb. 2015.

ISERMANN, R.; SCHAFFNIT, J.; SINSEL, S. Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems. *Control Engineering Practice*, v. 7, n. 5, p. 643-653, 1999.

KRISHNAN, R. **Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drivers**. Boca Raton, CRC Press, 2010.

KOKER, K. L.; CREVECOEUR, G.; MEERSMAN, B.; VANTORRE, M.; VANDEVELDE L. A wave emulator for ocean wave energy a Froude-scaled dry power take-off test setup, **Renewable Energy**, v. 105, p. 712-721, 2017.

MUETZE, A.; VINING J. G. **Ocean wave energy conversion – a survey**. In: IEEE Industry Applications Conference, 2006, Tampa. **Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting**. New Jersey: IEEE, Dez. 2006.

NEUMANN, V. A. de; **Conversor de Energia Elétrica a Partir de Movimento Mecânico Oscilatório**. 2016. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NUHRICH, L. B.; **Projeto, simulação e análise de conversores estáticos para geração de energia elétrica a partir do movimento de ondas oceânicas**. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

PARMEGGIANI, S.; JENS, P. K.; FRIIS-MADSEN, E. Experimental Update of the Overtopping Model Used for the Wave Dragon Wave Energy Converter. **Energies**, v. 6, p. 1961-1992, 1993.

PRAKASH, S. S.; MAMUN, K. A.; ISLAM, F. R.; MUDLIAR, R. R.; PAU'U, C.; KOLIVUSO, M.; CADRALALA, S. "Wave Energy Converter: A Review of Wave Energy Conversion Technology." **3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE)**, p. 71-77, 2016.

RALLABANDI, V.; TARAN, N.; IONEL D. M.; P. ZHOU, "Inductance Testing for IPM Synchronous Machines According to the New IEEE Std 1812 and Typical Laboratory

Practices." in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 55, no. 3, pp. 2649-2659, 2019.

SHEK, J. K. H.; MACPHERSON, D. E.; MUELLER, M. A. Phase and Amplitude Control of a Linear Generator for Wave Energy Conversion, **4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives**, p. 66-70, 2008.

SIGNORELLI, C.; VILLEGAS, C.; RINGWOOD, J.; Hardware-In-The-Loop Simulation of a Heaving Wave Energy Converter., **Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)**, School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, 2011.

SANG, Y.; KARAYAKA, H. B.; YAN, Y.; ZHANG, J. Z.; BOGUCKI, D.; YU, Y. A Rule-Based Phase Control Methodology for a Slider-Crank Wave Energy Converter Power Take-Off System. **International Journal of Marine Energy**, v. 19, p. 124-144, 2017.

SANTOS, I. M. dos; **Sistema de conversão de energia dedicado para geração de energia elétrica a partir de ondas marítimas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

SMIL, V. **Energy transitions: Global and National Perspectives**. Santa Barbara, CA: Praeger, 2017.

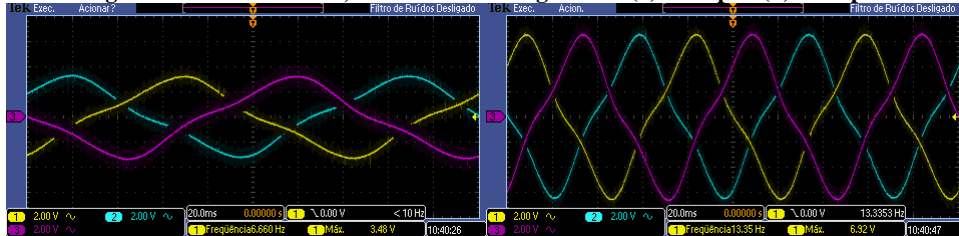
UIHLEIN, A.; MAGAGNA, D. Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 58, p.1070-1081, 2016.

VIOLA, A.; TRAPANESE, M. An innovative wave energy converter in the Mediterranean sea. **OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)**, p. 1-4, 2018.

ZHENG, C. W. et al. An overview of global ocean wind energy resources evaluations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 53, n. 667, p. 1240-1251, 2016.

## APÊNDICE A – TENSÕES OBTIDAS A VAZIO

Figura 46: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 100 rpm. (b) 200 rpm.

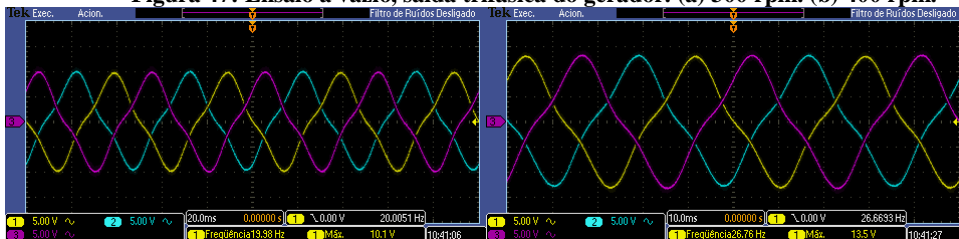


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

Figura 47: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 300 rpm. (b) 400 rpm.

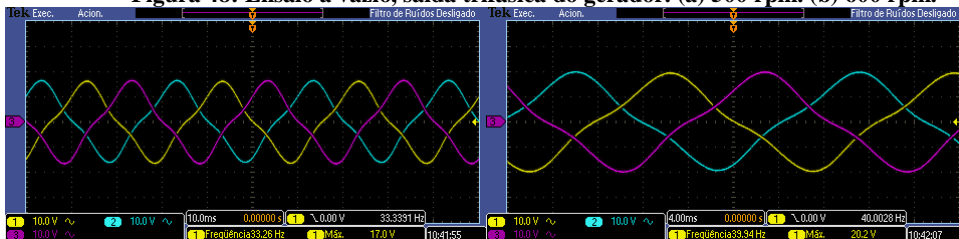


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

Figura 48: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 500 rpm. (b) 600 rpm.

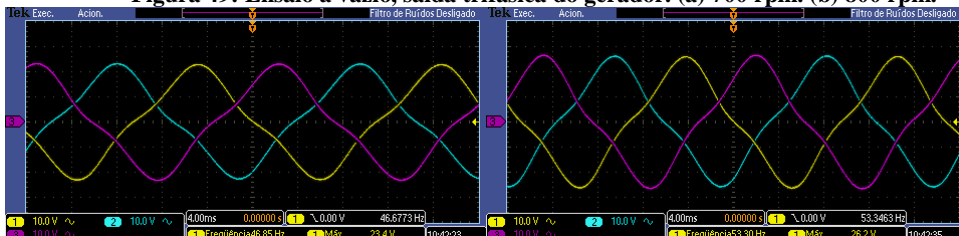


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

Figura 49: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 700 rpm. (b) 800 rpm.



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 50: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 900 rpm. (b) 1000 rpm.**

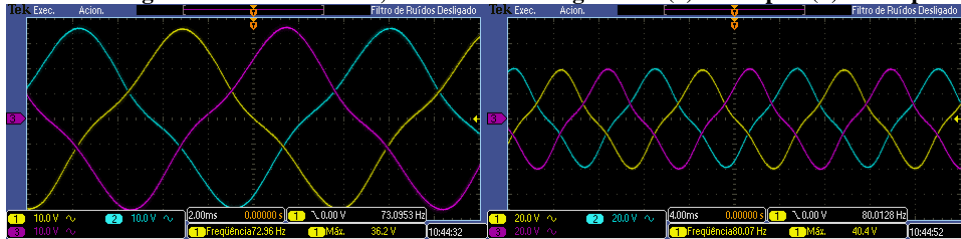


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 51: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1100 rpm. (b) 1200 rpm.**



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 52: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1300 rpm. (b) 1400 rpm.**

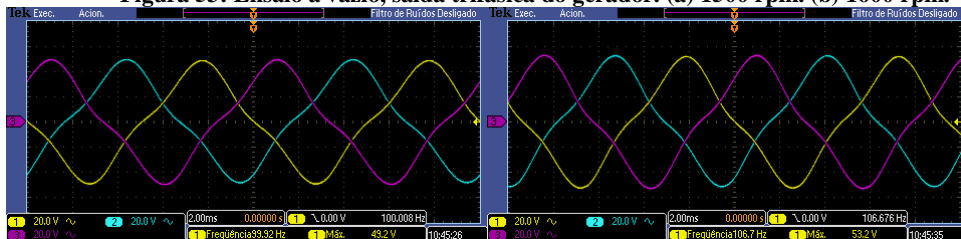


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 53: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1500 rpm. (b) 1600 rpm.**

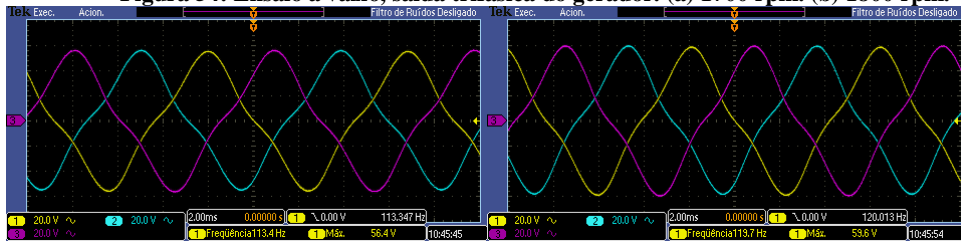


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 54: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1700 rpm. (b) 1800 rpm.**

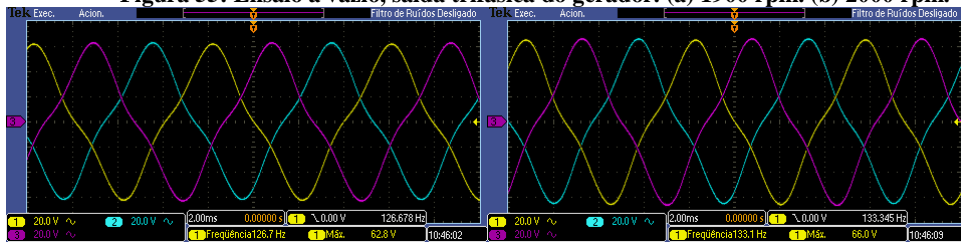


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 55: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 1900 rpm. (b) 2000 rpm.**



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 56: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2100 rpm. (b) 2200 rpm.**

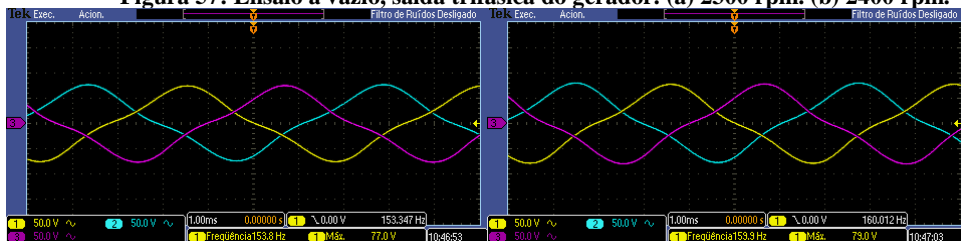


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 57: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2300 rpm. (b) 2400 rpm.**

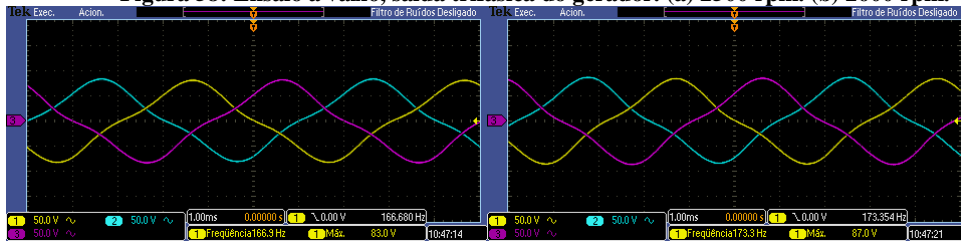


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 58: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2500 rpm. (b) 2600 rpm.**

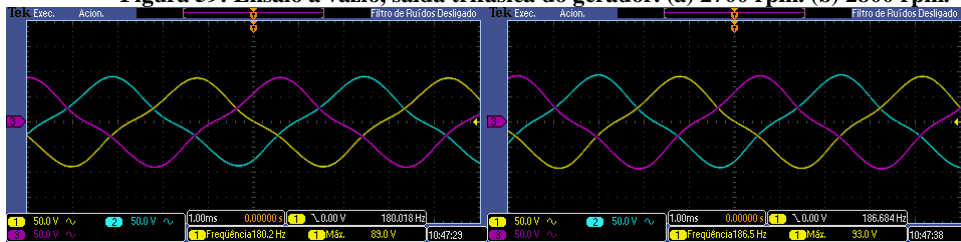


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 59: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2700 rpm. (b) 2800 rpm.**

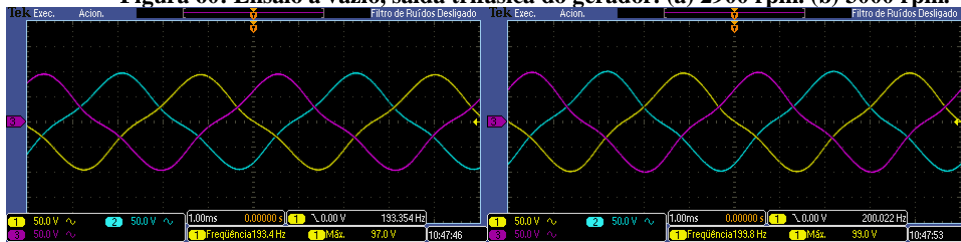


(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

**Figura 60: Ensaio a vazio, saída trifásica do gerador. (a) 2900 rpm. (b) 3000 rpm.**



(a)

(b)

Fonte: Próprio Autor.

## APÊNDICE B – NÃO LINEARIDADE DO CONTROLE DE CONJUGADO

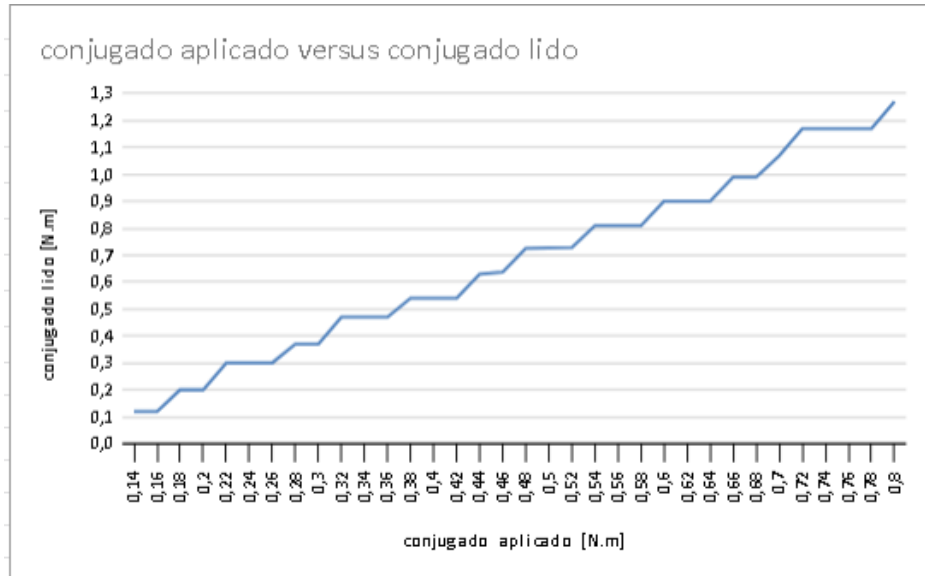
Ensaio realizados com o HIL em conjunto com o servoconversor SCA-05 demonstraram não linearidades no controle do dispositivo. Em ensaios realizados com uma fonte DC acoplada às entradas analógicas do servoconversor SCA-05, notou-se uma condição semelhante à zona morta encontrada em motores DC. Percebeu-se, portanto, que a largura de faixa para controle da SCA-05 era maior que a as faixas de transição necessárias ao controle do conjugado. A partir dessa condição, foram realizados ensaios através da Dspace para confirmar a condição, os quais podem ser verificados na tabela 9. Ao enviar um comando de conjugado de referência pela Dspace ( $T_{control}$ ), realizou-se a leitura de conjugado ( $T_{read}$ ) pelo torquímetro. A diferença também pode ser verificada através da Figura 61.

A SCA-05 possui um controle de corrente para manutenção de torque, enquanto o modelo HIL utiliza referencial de torque para controle. Nessa condição, os valores medidos e apresentados na Tabela 9 foram linearizados, e obtida sua equação característica (59).

**Tabela 9: Ensaios com DSpace e servoconversor SCA-05. Envio de sinal de referência de conjugado e leitura de conjugado no torquímetro.**

$T_{control}$	$T_{read}$	$T_{control}$	$T_{read}$	$T_{control}$	$T_{read}$	$T_{control}$	$T_{read}$	$T_{control}$	$T_{read}$
0,140	0,120	0,280	0,370	0,420	0,540	0,560	0,810	0,700	1,070
0,160	0,120	0,300	0,370	0,440	0,630	0,580	0,810	0,720	1,170
0,180	0,200	0,320	0,470	0,460	0,637	0,600	0,900	0,740	1,170
0,200	0,200	0,340	0,470	0,480	0,725	0,620	0,900	0,760	1,170
0,220	0,300	0,360	0,470	0,500	0,727	0,640	0,900	0,780	1,170
0,240	0,300	0,380	0,540	0,520	0,728	0,660	0,990	0,800	1,270
0,260	0,300	0,400	0,540	0,540	0,810	0,680	0,990		

Figura 61: Conjugado de referência versus conjugado lido pelo torquímetro.



$$T_{ap} = 0,034 \cdot T_r + 0,039$$

(58)



## APÊNDICE C – INDUTÂNCIA SEM IMPEDÂNCIA REATIVA ACOPLADA

Para determinação da indutância de eixo direto sem impedância acoplada, realizou-se um ensaio de curto-circuito com uma ponteira Fluke80i-110s ajustada para uma medida de 100 mV-A e conectada a um osciloscópio Tektronix DPO 2014B. A curva de sinal obtida representa a corrente com os terminais em curto-circuito a uma velocidade de rotação de 100 rpm, que foi medida através de um tacógrafo Minipa modelo MDT-2245B e verificada também através do servoconversor WEG SCA-05, conforme pode ser verificado na Figura 62, em que são apresentados as leituras de rotação na SCA-05 (à esquerda) e a medida do tacômetro (à direita). Ressalta-se que este ensaio não considerou o acoplamento de impedâncias reativas aos terminais do gerador, conforme definido pela Nova IEE STD 1812.

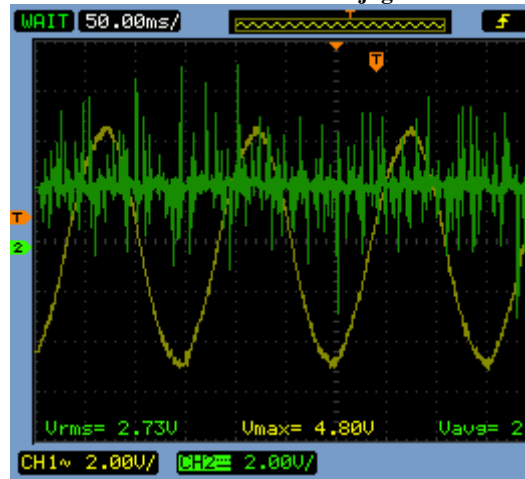
Figura 62: Medidas de rotação [rpm] em ensaio de curto-circuito.



Fonte: Próprio Autor.

Em 100 rpm o valor da corrente de fase (pico) obtida foi de 4,8A e seu sinal pode ser verificado conforme Figura 63, assim como o torque lido para a respectiva curva de corrente elétrica. As correntes do motor e gerador foram cuidadosamente analisadas de forma a não ultrapassar os limites estabelecidos pelo fabricante. Foi selecionado o modo de controle por conjugado para funcionamento do servoconversor, garantindo assim uma rotação constante independente da carga aplicada no gerador e mensurada sua velocidade através do tacômetro, além de verificada com a respectiva frequência obtida pelo osciloscópio.

Figura 63: Medida de corrente elétrica e sinal de conjugado em ensaio de curto-circuito.



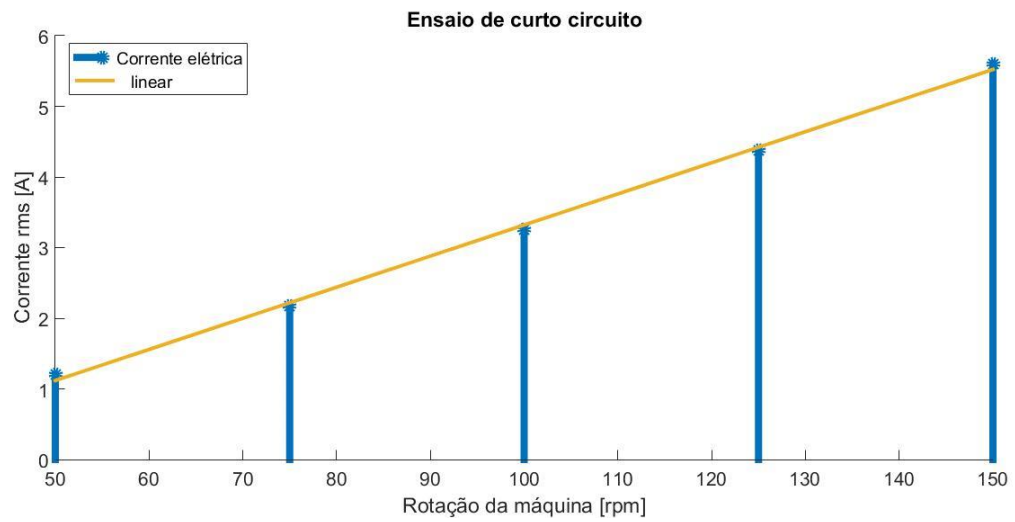
Fonte: Próprio Autor.

Conforme consta na Tabela 10, os ensaios de curto-circuito para as respectivas rotações foram apresentados com seus valores de conjugado, corrente de pico e eficaz. Tais informações podem também ser verificadas conforme Figura 64 a qual apresenta, para cada ensaio, seu respectivo valor de rotação face à corrente obtida pelo osciloscópio e a obtenção do modelo matemático linearizado, conforme Equação 60. Também é apresentado na Figura 65 os valores dos respectivos conjugados para cada rotação, e seu modelo linear conforme Equação 61.

Tabela 10: Medidas de corrente e conjugado em curto-circuito.

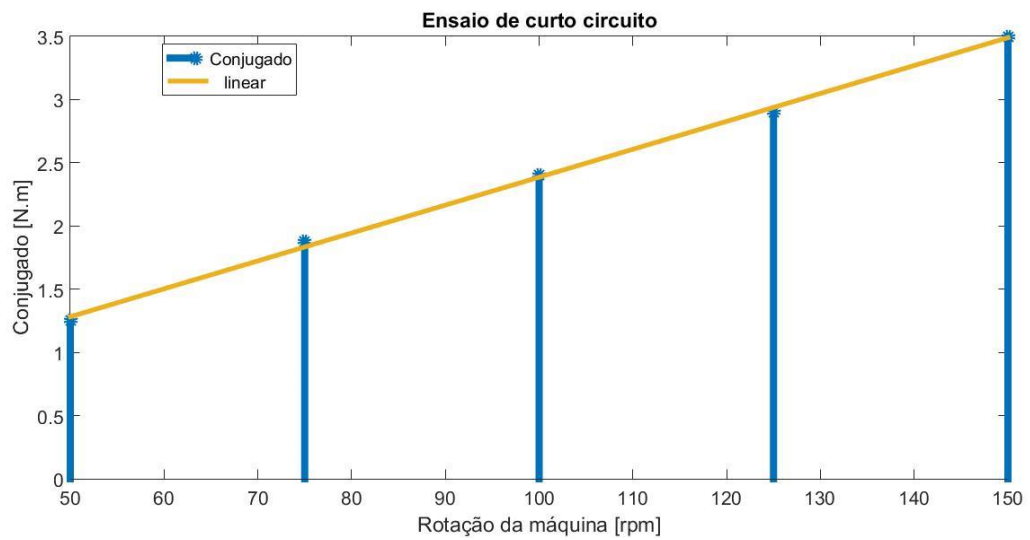
Rotação [rpm]	Conjugado [N.m]	Corrente, rms [A]	Corrente, pico [A]
50	1,25	1,20	1,84
75	1,88	2,17	3,36
100	2,40	3,25	4,80
125	2,90	4,38	4,38
150	3,50	5,60	5,60

**Figura 64: Ensaio de curto-circuito, corrente.**



Fonte: Próprio Autor.

**Figura 65: Ensaio de curto-circuito, conjugado.**



Fonte: Próprio Autor.

$$I_{1rms} = 0,04404 \cdot \Omega - 1,084 \quad (60)$$

$$T_{em} = 0,022208 \cdot \Omega + 0,178 \quad (61)$$

Sabendo que o valor de resistência síncrona  $R_s$  medida é  $0,45 \Omega$  e, através da Tabela 3, foram aplicados os respectivos valores de corrente e rotação enquanto que a tensão induzida  $E_{oc}$  foi determinada conforme os valores de tensão eficaz da frequência fundamental do ensaio a vazio e aplicada a respectiva equação obtida conforme apresentado na Figura 33. Ao aplicar a equação (60) com base no valor de inclinação obtido através dos ensaios de curto-circuito e apresentados na Figura 64, verificou-se então o respectivo valor de indutância síncrona, conforme demonstrado na Tabela 11, a qual apresenta os valores de rotação, tensão elétrica eficaz a vazio, corrente de curto-circuito, resistência síncrona e indutância síncrona.

$$V_{ind} = (R_s + j\omega \cdot L_s) \cdot I \quad (62)$$

$$\omega_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot \Omega}{120} \quad (63)$$

$$E_{oc} = K \cdot \Omega \quad (64)$$

$$L_s = \frac{\sqrt{\frac{E_{oc}^2}{I_{1rms}^2} - R_s^2}}{\omega_e} \quad (65)$$

Tabela 11: Relação de rotação, tensão elétrica a vazio, corrente elétrica de curto-circuito e resistência síncrona para obtenção de indutância síncrona.

Rotação [rpm]	Tensão elétrica a vazio, rms [V]	Corrente elétrica rms [A]	Resistência síncrona [ $\Omega$ ]	Indutância síncrona [mH]
50	1,02	1,30	0,45	37,0
75	1,53	2,37		18,5
100	2,04	3,39		12,4
125	2,55	4,58		8,6
150	3,06	5,65		6,7