

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

JULIA DOS SANTOS BATISTA

**ANÁLISE, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS DO OCEANO**

Araranguá, SC

2018

JULIA DOS SANTOS BATISTA

**ANÁLISE, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS DO OCEANO**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Engenheiro(a) de Energia.

Araranguá, 30 de novembro de 2018.

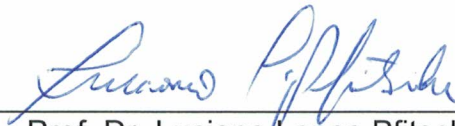
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Carla de Abreu D'Aquino
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher
Universidade Federal de Santa Catarina

Análise, simulação e controle de um sistema de geração de energia a partir das ondas do oceano

Julia dos Santos Batista *

2018

Resumo

Este trabalho visa dimensionar e projetar um sistema elétrico eficiente para um protótipo em pequena escala de geração de energia elétrica a partir da energia das ondas. O dimensionamento se deu a partir de simulações computacionais no *software* MATLAB para dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO ou OWC, do inglês *Oscillating Water Column*) utilizando de conceitos de modelagem matemática encontrados na literatura. Esse sistema de pequeno porte será considerado para instalação em uma plataforma de pesca na cidade de Balneário Arroio do Silva em Santa Catarina. O trabalho apresentado contará com o dimensionamento dos componentes do dispositivo (turbina e gerador) e com estratégias de controle de velocidade de rotação para que sua eficiência seja aumentada. Para a conversão do movimento do ar em energia mecânica, foi escolhida uma turbina *Wells* e, para conversão de energia mecânica em energia elétrica, considerou-se a utilização de um gerador de corrente contínua de ímãs permanentes. Os resultados obtidos apresentam uma proposta de como se obter a máxima eficiência disponível nesses dispositivos para um regime de ondas regulares, contribuindo para a viabilização da utilização dessa tecnologia.

Palavras-chaves: energia das ondas. coluna de água oscilante. controle.

Abstract

This paper proposes the design of an efficient electrical system for a small scale prototype that generates electrical energy from ocean waves and will be considered to be installed on a fishing pier, in Balneário Arroio do Silva/SC - Brazil. The mathematical modeling procedures are based on computational simulations in MATLAB considering Oscillating Water Column devices using

*julsbatista@gmail.com

concepts from the literature. This work aims to demonstrate the design of the device components (turbine and generator) and rotation speed control strategies to increase the energy conversion efficiency. In order to achieve the conversion of air flow energy to mechanical energy, a Wells turbine was used. For the conversion of mechanical energy into electrical energy, a permanent magnet direct current generator was chosen. In this context, it is proposed a methodology to obtain the maximum efficiency for these devices considering for regular waves, contributing to the viability of this technology.

Keywords: ocean wave energy. oscillating water column. control strategies.

1 Introdução e Justificativa

A matriz energética brasileira atual tem como protagonista a geração de energia elétrica utilizando usinas hidrelétricas. Essa fonte ainda representa um vetor importante de ampliação de oferta de energia elétrica no país até 2026 (MME, 2016). Todavia, cenários que consideram a restrição dessa oferta endossam a necessidade de diversificação das fontes de energia.

As formas de obtenção de energia elétrica dividem-se em renováveis e não renováveis. Denominam-se renováveis os meios de geração de energia que utilizam como subsídio recursos facilmente encontrados, que se renovam rapidamente no meio ambiente e que durante o processo não impactam o mesmo demasiadamente. Por sua vez, as não renováveis, são fontes de energia presentes na natureza em quantidades limitadas e que a sua extração e manuseio provocam grandes impactos ambientais (PORTAL ENERGIA, 2015).

Os oceanos, assim como o Sol, o vento e os cursos d'água, são capazes de fornecer energia de forma renovável. A energia oceânica pode ser aproveitada, em resumo, de cinco maneiras: a partir das ondas do mar, das marés, das correntes marítimas, do diferencial térmico ou, até mesmo, por processos osmóticos (PORTAL BIOSISTEMAS, 2018).

O foco desse trabalho será na energia proveniente das ondas, que é energia cinética resultante da ação do vento na superfície do oceano. As ondas são formadas pelo vento que, por sua vez, ocorre devido às diferenças de pressão e temperatura das camadas de ar e desencadeia uma agitação molecular que resulta em um processo de transferência de energia entre o ar e o mar (CENTRO DE ESTUDO DO MAR, 2005).

Levando em conta a extensão litorânea do Brasil, o aproveitamento da conversão de energia das ondas para energia elétrica se torna um agente capaz de impactar positivamente no setor energético do país. Segundo especialistas da CO-OPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), estima-se que o litoral brasileiro tem capacidade energética de 87 GW, onde, destes, 20% poderiam ser convertidos em energia elétrica. Todavia, a disseminação dessa prática no território brasileiro depende de maiores estudos em tecnologias que possam aumentar a eficiência dos sistemas para que possam ser comparados com as atuais fontes de conversão de energia elétrica utilizadas (FISCHER; BELUCO; ALMEIDA, 2013; SCHÄFER, 2012).

Dentre as diversas formas de geração de energia elétrica a partir das ondas

do mar, pode-se destacar a tecnologia de coluna de água oscilante (CAO ou OWC, do inglês *Oscillating Water Column*). A principal motivação para a escolha desta forma neste trabalho está no desenvolvimento de um dispositivo de pequena escala que possa suprir o fornecimento de cargas de baixa potência e possa ser instalado em estruturas já construídas, como plataformas pesqueiras, aumentando sua viabilidade.

Esse trabalho pretende dar sequência a pesquisas já realizadas na Universidade Federal de Santa Catarina. Como exemplo dessas pesquisas, têm-se [Schmidt \(2017\)](#), que é relacionada a caracterização das ondas do mar e potência de conversão no litoral sul do Brasil, e [Vecchia \(2016\)](#), que modela um dispositivo OWC para uma plataforma pesqueira em Balneário Arroio do Silva, Santa Catarina.

Como forma de dar continuidade as pesquisas citadas, o objetivo desta é apresentar a modelagem e simulação da conversão do movimento do ar dentro de um dispositivo OWC de pequena escala em formato cilíndrico, apresentado em [Vecchia, Scharlau e Abreu \(2015\)](#) e [Vecchia \(2016\)](#), em energia mecânica a partir de uma turbina *Wells* e, posteriormente, em energia elétrica utilizando um gerador de corrente contínua com ímãs permanentes.

Como todo esforço para melhorar o rendimento do sistema aumenta a sua viabilidade, são apresentadas estratégias que visam o controle da velocidade de rotação do sistema. Tais estratégias são propostas a partir da análise da velocidade de referência para a turbina e para o gerador e posterior controle através de controladores do tipo proporcional integral que visam manter a velocidade de rotação equivalente à referência.

O documento está estruturado da seguinte forma: na seção 2 é abordado o referencial teórico, citando os principais tópicos relacionados ao trabalho. Na seção 3 é vista a metodologia utilizada para a elaboração do trabalho. Na seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, a seção 5 traz as considerações finais desse projeto e são listadas algumas indicações de trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico

A seguir serão descritos os principais pressupostos teóricos relacionados à temática da pesquisa.

2.1 Sistema de Coluna de Água Oscilante

O sistema de coluna de água oscilante é classificado como um método para conversão de energia das ondas do oceano em energia elétrica na costa marítima. Esse dispositivo é formado por estruturas ocas parcialmente submersas em água, nas quais a parte superior da coluna é preenchida com ar e a parte inferior possui abertura para o mar. Além disso, no topo da estrutura é alocada uma turbina que impulsiona o rotor de um gerador (Figura 1), ([MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2016](#); [MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2018](#)).

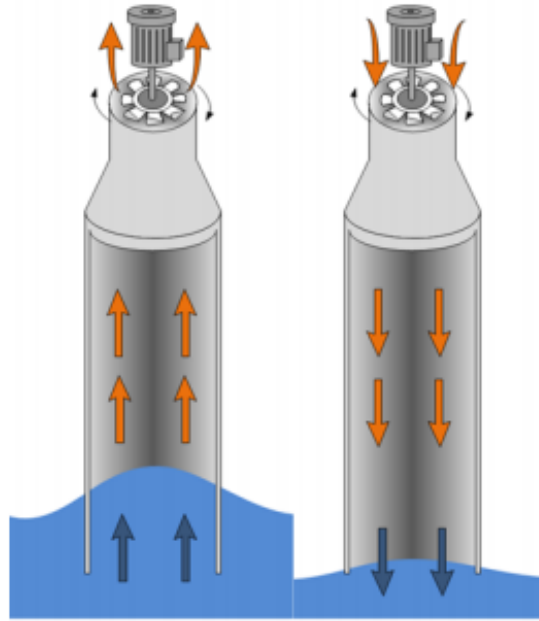


Figura 1 – Sistema OWC. Fonte: (VECCHIA; SCHARLAU; ABREU, 2015)

O funcionamento desse sistema consiste na aproximação da onda no dispositivo onde a água é forçada para dentro da câmara submersa, aplicando pressão no ar contido na mesma. Com o aumento da pressão, o ar é deslocado pela turbina. Já com o recuo da água para fora do dispositivo, a pressão decresce e o ar volta, passando pela turbina novamente no sentido oposto. A turbina, ao estabelecer o movimento de rotação, transfere esse movimento para o rotor de um gerador, convertendo energia mecânica em energia elétrica (MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2018; DREW; PLUMMER; SAHINKAYA, 2009).

2.2 Turbina *Wells*

A principal turbina utilizada para os dispositivos OWC é a turbina do tipo *Wells* devido a sua vantagem de operar a partir do fluxo bidirecional de ar que ocorre na câmara, convertendo o mesmo em um movimento rotatório unidirecional (Figura 2). Esse movimento unidirecional acontece devido a simetria do desenho das pás da turbina, nas quais a força resultante movimentava essas pás sempre na mesma direção, independente do sentido do fluxo do vento (Figura 3). Dessa forma, há a transformação do movimento do ar em energia mecânica tanto na pressurização quanto na despressurização da câmara (MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2016; SHEHATA; XIAO; SAQR, 2017).

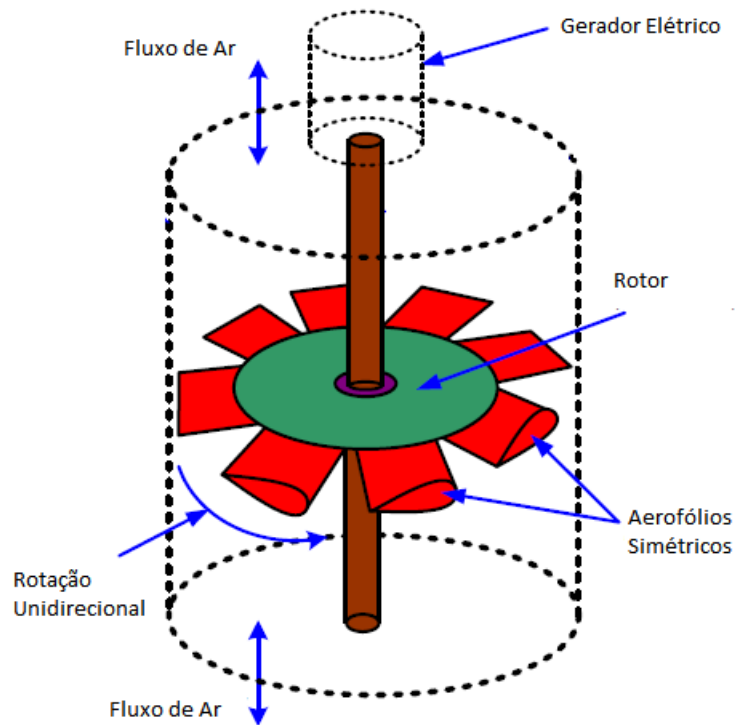


Figura 2 – Turbina Wells. Fonte: adaptado de (MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2018)

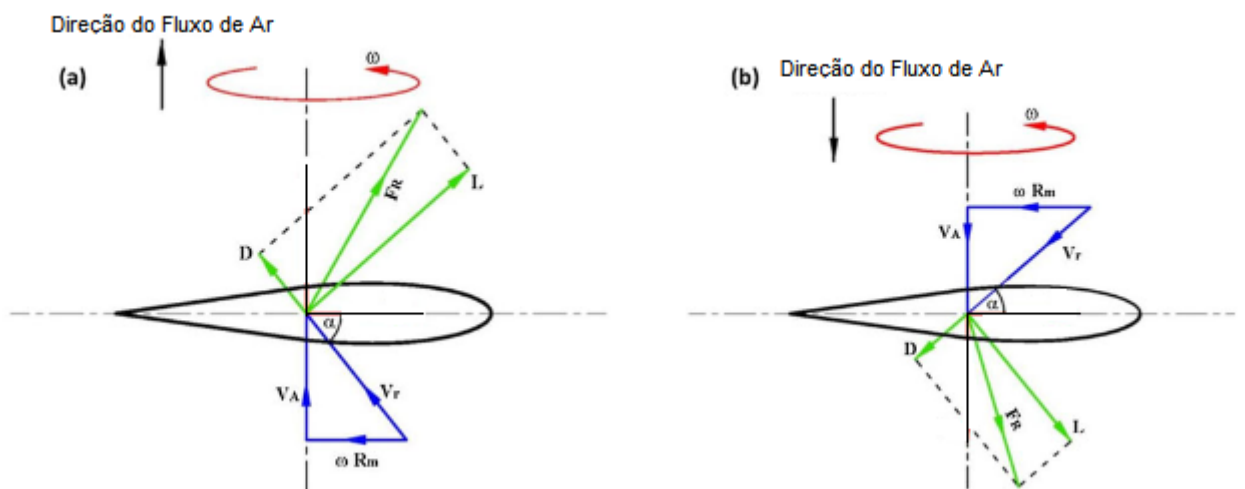


Figura 3 – Pá da Turbina Wells. a) Pressurização b) Despressurização Fonte: adaptado de (SHEHATA; XIAO; SAQR, 2017)

Apesar dessa característica vantajosa, essa topologia de turbina apresenta duas importantes limitações, ligadas ao ângulo de ataque de suas pás, que não permitem o aproveitamento total da energia disponibilizada pelo recurso oceânico. Essas limitações estão relacionadas a duas forças importantes geradas na movimentação

das pás, que podem ser observadas na Figura 3, sendo elas a força de sustentação (L) e a força de arrasto (D), ambas componentes da força resultante causada pelo fluxo de ar (F_R). A componente de sustentação é normal ao fluxo de ar na turbina, impulsionando seu movimento. Já a componente de arrasto é paralela ao fluxo (RAGHUNATHAN, 1995).

A Figura 3 também demonstra as velocidades absoluta (V_A) e relativa (V_r) do escoamento de ar.

Para ângulos de ataque (α) baixos, a componente de sustentação é da ordem da componente de arrasto, resultando em baixas eficiências (GATO; EÇA; FALCAO, 1991). Já com o aumento do ângulo de ataque das pás da turbina ocorre um aumento no coeficiente de sustentação da mesma. Todavia, esse aumento não ocorre infinitamente.

Como pode ser observado na Figura 4, que demonstra a relação entre o ângulo de ataque em graus e o coeficiente de sustentação, esse último cresce de forma aproximadamente linear até um limite máximo, quando começa a decair. Essa queda inicia a perda de sustentação (do inglês *stalling*) (BIASI, 2010).

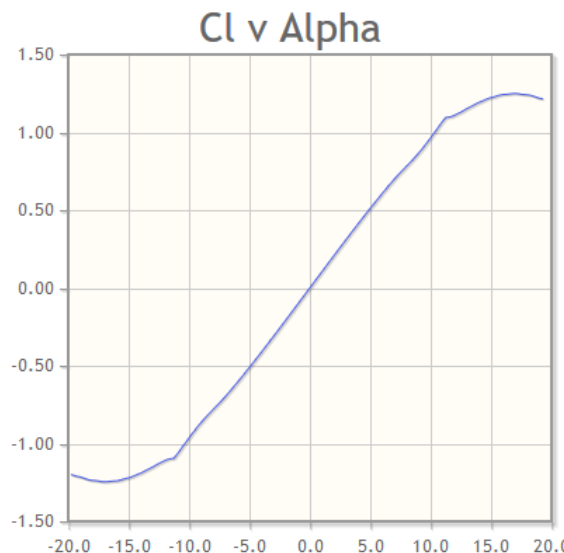


Figura 4 – Coeficiente de Sustentação em função do Ângulo de Ataque - Turbina Wells. Fonte: (AIRFOIL TOOLS, 2018)

Quando esse limite máximo é alcançado, ocorre o deslocamento do fluxo de ar na pá, ocorrendo a separação do escoamento e iniciando um regime turbulento. Com essa separação, o coeficiente de sustentação decai e o coeficiente de arrasto aumenta (Figura 5) (BIASI, 2010).

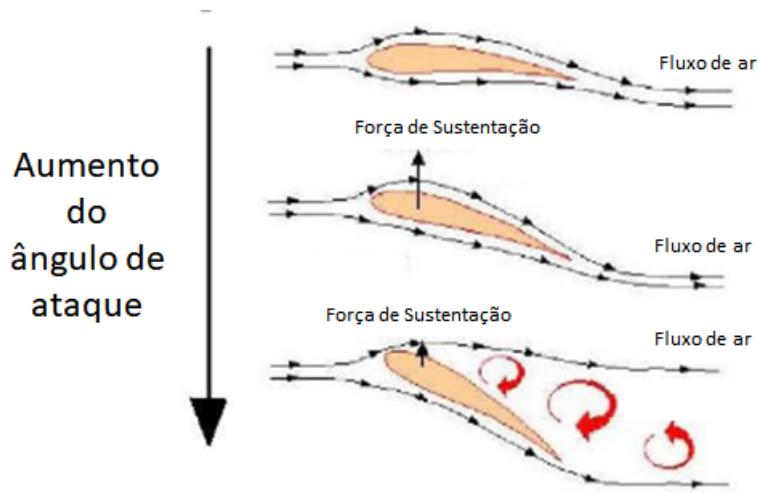


Figura 5 – Efeito do aumento do ângulo de ataque. Fonte: adaptado de (BIASI, 2010)

Outros fatores importantes relacionados à eficiência da turbina são o coeficiente de torque e o coeficiente de fluxo.

O coeficiente de fluxo (ϕ) é obtido a partir da tangente do ângulo de ataque e, como pode ser visto na Figura 3 é um parâmetro inversamente proporcional a velocidade angular (ω) e ao raio da turbina (R_m) e proporcional a velocidade do fluxo de ar (V_A). Dessa forma, quanto maior o coeficiente de fluxo, maior o ângulo de ataque e maior a probabilidade de ocorrência de perda de sustentação (DIAS; SANTOS; SANTOS, 2013).

O coeficiente de torque (C_t) é diretamente proporcional ao torque da turbina, que, por sua vez, é diretamente proporcional a potência de saída da mesma e a sua eficiência (MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2018).

A relação entre ϕ e C_t demonstra que, para baixos valores de coeficiente de fluxo, a eficiência da turbina decai devido a baixas velocidades do ar e diferença de pressão. Já para altos coeficientes de fluxo esse comportamento da eficiência é semelhante pois ocorre a perda de sustentação (Figura 6).

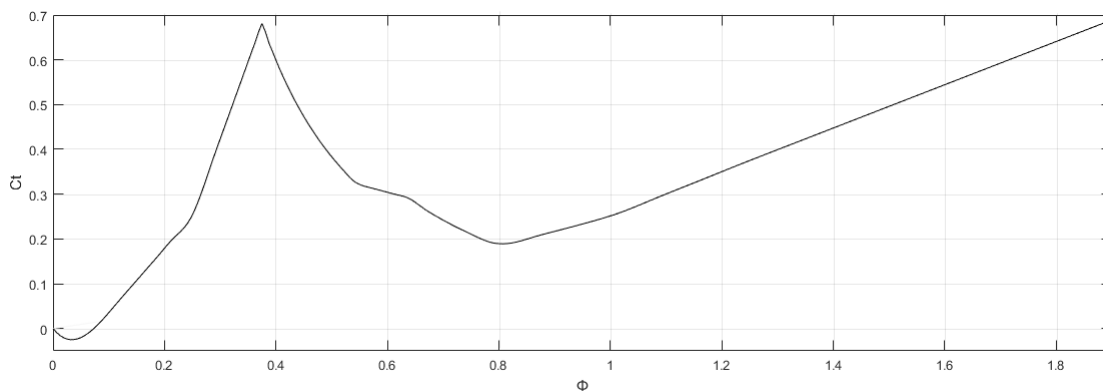


Figura 6 – Coeficiente de torque em função do Coeficiente de fluxo. Fonte: adaptado de (KIM; SETOGUCHI; TAKAO, 2002)

2.3 Geradores Elétricos

Dispositivos responsáveis por transformar energia mecânica em energia elétrica são chamados geradores elétricos. Seu funcionamento é baseado no fenômeno de indução eletromagnética, que ocorre quando um campo magnético variável induz corrente elétrica, e podem ser divididos em geradores de corrente alternada (CA) e de corrente contínua (CC) (NETO, 2000).

Nos sistemas de coluna de água oscilante encontrados na literatura, ambos os tipos de geradores são utilizados. Como exemplos têm-se Lekube, Garrido e Garrido (2017) e Mishra, Purwar e Kishor (2018), que realizam simulações com gerador de indução duplamente alimentado, e O'Sullivan, Griffiths e Egan (2011) que utilizam o gerador de corrente contínua de ímãs permanentes.

Por se tratar de uma aplicação de pequena escala, optou-se nesse trabalho por utilizar o gerador de corrente contínua de ímãs permanentes. Essa escolha se deu pois esse gerador conta com um sistema que possibilita um controle de fácil implementação, além de trabalhar em baixa tensão, aumentando a segurança do sistema e reduzindo a probabilidade de problemas com a umidade do meio inserido. No entanto, vale destacar que esses geradores também possuem uma importante limitação que é a exigência de manutenções periódicas devido ao desgaste das escovas em seu funcionamento (O'SULLIVAN; GRIFFITHS; EGAN, 2011).

A máquina CC é composta, principalmente, por rotor (armadura), anel comutador, estator e escovas.

O rotor é a parte girante da máquina, de material ferromagnético envolto pelo enrolamento de armadura e o anel comutador. Este gira pelo efeito de uma força mecânica externa. No caso do OWC, essa força mecânica vem da turbina. Com o movimento de rotação do rotor, ocorre a geração de tensão e, conseqüentemente, de corrente elétrica (MARQUES, 2010).

O anel comutador é responsável pela inversão da polaridade da tensão aplicada e do sentido da corrente que circula no enrolamento do rotor, sempre que os polos do estator e do rotor se alinharem, fechando o circuito entre as bobinas dos enrolamentos de armadura e as escovas. O mesmo se encontra junto ao eixo da máquina, fazendo com que o movimento de rotação produza a comutação entre os circuitos dos enrolamentos (PFITSCHER, 2018; MARQUES, 2010).

O estator é montado em volta do rotor e é considerado a parte estática da máquina. Ele tem como função produzir um campo magnético fixo para interagir com o do rotor. Já as escovas são feitas de grafite e responsáveis por amortecer o contato entre a parte móvel e a parte estática do gerador (PFITSCHER, 2018; MARQUES, 2010).

Nos geradores CC de ímãs permanentes o enrolamento de campo é substituído por um ímã permanente. Dessa forma, não é necessária excitação externa para criar campo magnético na máquina (UMANS, 2014).

2.4 Sistema de Controle

Buscando evitar a perda de sustentação nas pás da turbina e aumentar a eficiência da conversão de energia mecânica para elétrica, estratégias de controle são comumente empregadas em sistemas de coluna de água oscilante.

Lekube, Garrido e Garrido (2017) utilizaram um sistema de controle da velocidade de rotação da turbina através de um Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (RPMP), onde, a partir de uma velocidade de referência, um controle proporcional integral (PI) no gerador mantém e controla a velocidade final através do escorregamento de um gerador em corrente alternada (Figura 7).

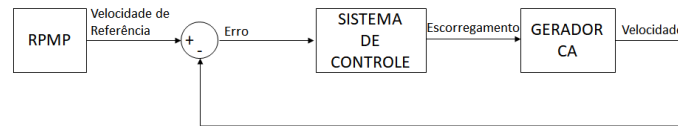


Figura 7 – Diagrama do Sistema de Controle (LEKUBE; GARRIDO; GARRIDO, 2017) Fonte: Elaborado pela autora

Ormaza, Goitia e Hernández (2009) e Mishra, Purwar e Kishor (2018) usaram técnicas de controle neural para regular a resistência do rotor do gerador, controlando o torque gerado e, conseqüentemente, a velocidade de rotação.

O’Sullivan, Griffiths e Egan (2011) utilizaram o controle da velocidade de rotação e da corrente do gerador a partir de controle proporcional integral (PI) que funciona pela imposição de tensão nos terminais da carga do gerador de corrente contínua (Figura 8).

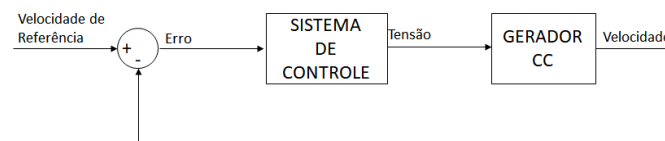


Figura 8 – Diagrama do Sistema de Controle (O’SULLIVAN; GRIFFITHS; EGAN, 2011) Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se, portanto, que, em sua maioria, as pesquisas relacionadas a controle em dispositivos OWC utilizam como estratégia primordial o controle da velocidade de rotação. Isso se dá pois, como citado anteriormente, ela é inversamente proporcional ao coeficiente de fluxo. Portanto, controlando a velocidade, controla-se esse coeficiente e, conseqüentemente, o ângulo de ataque que, como citado anteriormente, está relacionado com a eficiência da turbina devido ao processo de perda de sustentação.

2.5 Cenário Mundial

Exemplos de dispositivos de coluna de água oscilante no mundo serão apresentados nessa seção.

2.5.1 LIMPET

A planta LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter - Transmissor Marinho de Energia Elétrica Instalado em Terra*) localizada na ilha

Islay, na Escócia, foi a primeira central comercial de geração de energia elétrica a partir das ondas do mar (Figura 9). Ela funciona com base na tecnologia de duas turbinas *Wells* e tem potência instalada de 500 kW. É conectada a rede e fornece energia para a rede nacional da Escócia (HEATH, 2000).



Figura 9 – Central LIMPET. Fonte: (HEATH, 2000)

2.5.2 Central de Ondas do Pico

A Ilha do Pico, localizada no Oceano Atlântico Norte, é a segunda maior ilha do Arquipélago dos Açores. Ela foi selecionada como local para instalação de uma planta de coluna de água oscilante devido aos elevados níveis de energia na sua costa norte. Isso se dá pois essa localização possui diversas formações rochosas que naturalmente concentram energia (WAVEC OFFSHORE RENEWABLES, 2012).

Essa central (Figura 10), gerida pelo Centro de Energia das Ondas de Portugal, foi a primeira a ser construída utilizando uma turbina *Wells*, utiliza um gerador CA assíncrono e tem uma potência instalada de 400 kW (WAVEC OFFSHORE RENEWABLES, 2012).



Figura 10 – Central de Ondas do Pico. Fonte: (WAVEC OFFSHORE RENEWABLES, 2012)

Em 2016, devido a problemas estruturais, o Centro de Energia das Ondas desconectou a central da rede elétrica. Todavia, desde 2017 o governo dos Açores

estuda a viabilidade de recuperação e volta de operação do sistema ([DIÁRIO DE NOTÍCIAS, 2018](#)).

2.5.3 Mutriku

O porto do município de Mutriku, na Espanha, recebeu a construção de uma instalação de quebra mar devido a fortes tempestades que o atingem regularmente, danificando seus pilares. Com a construção do quebra mar, o governo aprovou um projeto de desenvolvimento de uma usina de energia das ondas em sua estrutura em 2006 (Figura 11) ([POWER TECHNOLOGY, 2011](#)).



Figura 11 – Usina OWC Mutriku. Fonte: ([POWER TECHNOLOGY, 2011](#))

O sistema OWC instalado entrou em operação em julho de 2011, utiliza uma turbina *Wells* e tem uma potência instalada de 300 kW ([POWER TECHNOLOGY, 2011](#)).

3 Metodologia

As etapas para a execução do projeto são descritas a seguir.

3.1 Modelagem da Onda Incidente e Velocidade do Ar

[Vecchia \(2016\)](#) apresentou a análise da onda incidente e a representação do comportamento físico do escoamento de ar no dispositivo. Dessa forma, a partir da incidência de ondas regulares com dados para a cidade de Tramandaí, no Rio Grande do Sul, o autor demonstrou a relação entre as velocidades do ar nas diferentes seções do tubo do dispositivo e a otimização do projeto visando obter a maior velocidade do ar na seção 3 (Figura 12).

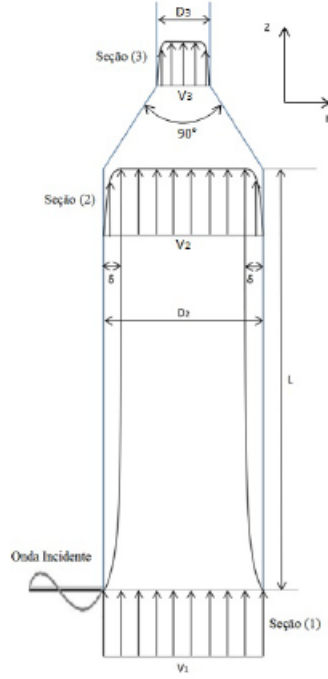


Figura 12 – Dispositivo OWC utilizado para modelagem. Fonte: (VECCHIA, 2016)

Para a análise da onda incidente no dispositivo, Vecchia (2016) utilizou a equação (1) para obtenção da velocidade da onda.

$$V_1 = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{16} \frac{H^2 \omega k \sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (1)$$

Onde H é a altura da onda, g a aceleração da gravidade, h a profundidade do local, x a posição da onda, t o tempo, k o número de onda, w a frequência da onda e z a variação da posição entre a superfície livre da água e o assoalho oceânico (VECCHIA, 2016).

A modelagem do comportamento físico do ar no interior do dispositivo foi realizada por Vecchia (2016) a partir das seguintes relações:

$$Re_L = \frac{V_1 L}{\nu} \quad (2)$$

$$\frac{\delta}{L} = \frac{5,48}{\sqrt{Re}} \quad (3)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = 2\left(\frac{y}{\delta}\right) - \left(\frac{y}{\delta}\right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{\delta}{L} = \frac{0,382}{Re^{(1/5)}} \quad (5)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{(1/7)} \quad (6)$$

$$V_3 = \frac{D_2^2}{D_3^2} V_2 \quad (7)$$

Onde Re_L é o número de *Reynolds*, ν a viscosidade do ar, L o comprimento do tubo, δ a espessura da camada limite, y a distância entre a parede e o ponto de análise, V_2 a velocidade do escoamento na distância y da parede do tubo, V_3 a velocidade do escoamento do ar no compartimento da turbina, e D_2 e D_3 os diâmetros na seção 2 e 3 do tubo. As equações (3) e (4) foram utilizadas para escoamentos laminares e as equações (5) e (6) foram utilizadas para escoamentos turbulentos (VECCHIA, 2016).

Como parâmetro de entrada para a turbina (V_x) utilizou-se a velocidade de escoamento do ar na turbina (V_3) resultante.

3.2 Modelagem da Turbina Wells

O modelo matemático para a turbina utilizado na realização do trabalho usa como parâmetro de entrada a velocidade do ar que passa pela mesma. Essa velocidade foi então utilizada para se obter como variável de saída o torque mecânico do sistema. O processo foi realizado a partir de modelagem matemática encontrada na literatura e simulação em MATLAB/*Simulink*.

Diversos trabalhos disponíveis na literatura apresentam equações que modelam o comportamento dinâmico da turbina. Para Lekube, Garrido e Garrido (2017) e Mishra e Patel (2017), por exemplo, esse comportamento é modelado matematicamente a partir do cálculo do coeficiente de fluxo (ϕ), sendo este, uma relação entre a velocidade do fluxo de ar (V_x), o raio (r_t) e a velocidade angular da turbina (ω_t) (Equação (8)).

$$\phi = \frac{V_x}{r_t \omega_t} \quad (8)$$

A partir do cálculo do coeficiente de fluxo (ϕ), se torna possível obter o torque mecânico da turbina (T_m) (Equação (9)).

$$T_m = C_t \frac{\rho b_t l_t n_t}{2} r_t [V_x^2 + (r_t \omega_t)^2] \quad (9)$$

Onde C_t é o coeficiente de torque e depende do modelo utilizado, ρ representa a densidade do ar, b_t o comprimento das pás, l_t a corda da turbina e n_t o número de pás.

3.3 Modelagem do Gerador CC de Ímãs Permanentes

A modelagem do gerador foi realizada a partir da análise do seu circuito equivalente (Figura 13).

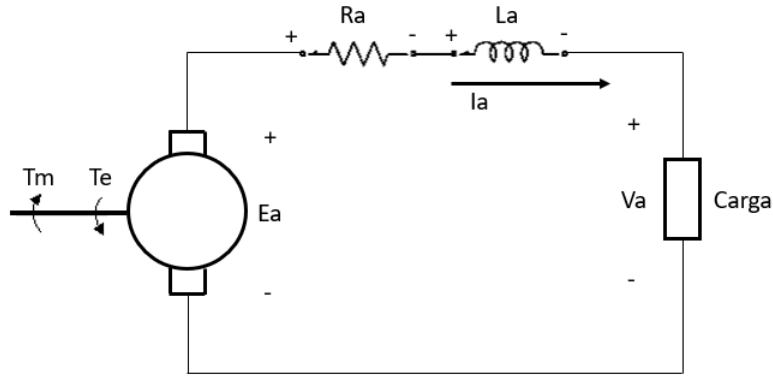


Figura 13 – Circuito Equivalente Gerador CC. Fonte: Elaborado pela autora

Através da análise da malha do circuito obtém-se a relação para a parte elétrica do gerador (Equação (10)).

$$-E_a(t) + R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + V_a(t) \quad (10)$$

Onde E_a é a força eletromotriz induzida, R_a e L_a são a resistência e indutância da armadura, I_a é a corrente de armadura do gerador e V_a é a tensão aplicada nos terminais da carga. E_a ainda pode ser representado como sendo diretamente proporcional a velocidade mecânica do rotor do gerador que, nessa aplicação, será igual a velocidade de rotação da turbina (ω_t) (Equação (11)).

$$E_a(t) = K_b \omega_t(t) \quad (11)$$

Onde K_b é a constante de força eletromotriz.

Substituindo (11) em (10) e aplicando a transformada de *Laplace*, obtém-se a expressão para a parte elétrica do gerador no domínio da frequência (Equação (12)).

$$I_a(s) = \frac{K_b \omega_t(s) - V_a(s)}{(R_a + sL_a)} \quad (12)$$

Para a parte mecânica tem-se a representação a partir do torque mecânico (T_m), do torque elétrico (T_e) e das parcelas de torque associadas ao momento de inércia do rotor (T_J) e ao atrito entre as partes fixas e móveis do gerador (T_B) (Equação (13)).

$$T_m(t) - T_e(t) = T_J(t) + T_B(t) \quad (13)$$

T_J e T_B podem ser representados como a relação entre a velocidade mecânica do rotor e o momento de inércia (J_m) e o coeficiente de atrito viscoso (B_m),

respectivamente. Além disso, o torque elétrico está relacionado com a constante de torque do gerador (K_t) e a corrente de armadura (Equação (14)).

$$T_m(t) - K_t I_a(t) = J_m \frac{d\omega_t(t)}{dt} + B_m \omega_t(t) \quad (14)$$

Aplicando a transformada de *Laplace* em (14) obtém-se a relação para a parte mecânica do gerador no domínio da frequência (Equação (15)).

$$\omega_t(s) = \frac{T_m(s) - K_t I_a(s)}{sJ_m + B_m} \quad (15)$$

3.4 Estratégia de Controle

Para o controle do dispositivo de coluna de água oscilante desse trabalho foram utilizadas algumas estratégias, tanto na turbina quanto no gerador.

No gerador, foi utilizado um controle proporcional integral (PI) a partir do valor de referência de velocidade. A ação de controle do controlador PI (Equação (16)) ocorre com duas componentes: uma proporcional ao erro e outra proporcional à integral do erro. A componente integral tem como função diminuir o erro para um sinal de referência, porém isolada tende a piorar a estabilidade do sistema. Dessa forma, utiliza-se a componente proporcional para contrabalançar os efeitos (SILVA, 2000; MADEIRA, 2016).

$$a(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (16)$$

Na Figura 14 está representado o diagrama de blocos de um controlador PI genérico. Nesse diagrama, há a entrada de um parâmetro de referência que é comparado com a saída do sistema, indicando um erro que o controlador tem como função minimizar.

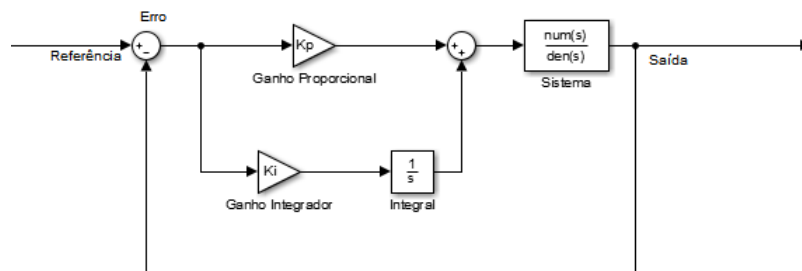


Figura 14 – Diagrama de Blocos do Controlador PI. Fonte: Elaborado pela autora

No sistema desse trabalho, o controle tem como função manter a velocidade de rotação do gerador constante e equivalente à velocidade de referência. Para atingir o controle dessa velocidade constante, a utilização de um controlador PI simples não se mostrou suficiente pois a variação do torque mecânico é considerada um distúrbio no sistema que afeta diretamente a corrente e a saída da velocidade angular. Dessa

forma, optou-se pela utilização de um cascadeamento de dois controladores PI para manter o desempenho. No cascadeamento de controladores (Figura 15) os distúrbios que afetam a malha secundária são corrigidos pelo controlador secundário antes que possam influenciar a variável primária. (SMITH; CORRIPIO, 1985).

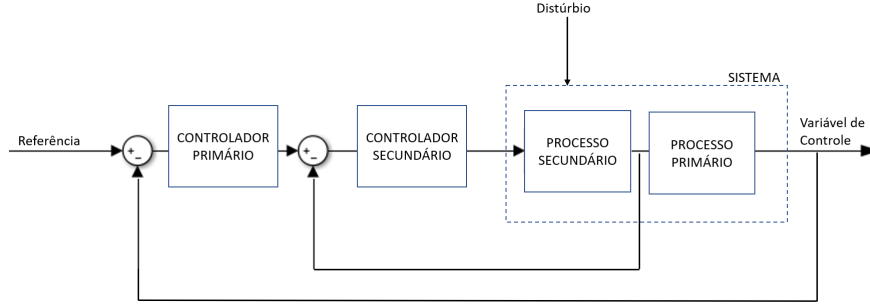


Figura 15 – Diagrama de Cascadeamento. Fonte: Elaborado pela autora

O controlador secundário realiza o controle de I_a através da atuação de uma chave eletrônica que regula V_a . Já o controlador primário, controla ω_t e tem como sinal de saída a referência para o controlador secundário.

A obtenção da velocidade de rotação de referência se deu a partir da análise da eficiência da turbina, que é a razão entre a potência de saída e a potência de entrada (cinética mais pneumática) (Equação (17)) (MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2018).

$$\eta_t = \frac{T_m \omega_t}{(dP + \rho \frac{V_x^2}{2}) V_x a_t} \quad (17)$$

Onde dP é a diferença de pressão no duto da turbina (Equação (18)) e a_t é a área desse duto (MISHRA; PURWAR; KISHOR, 2018).

$$dP = C_a \frac{\rho b_t l_t n_t}{2} \frac{1}{a_t} (V_x^2 + (r_t \omega_t)^2) \quad (18)$$

Na equação (18), C_a é o coeficiente de potência da turbina e depende do modelo utilizado.

A análise da eficiência se deu a partir de uma técnica semelhante ao perturba e observa do rastreamento de máxima potência, onde a velocidade de rotação foi variada enquanto a eficiência apresentasse valores maiores. O maior valor de eficiência representou, portanto, a velocidade de referência.

4 Resultados e Discussão

Nessa seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1 Modelagem no *Simulink*

Os processos dinâmicos do dispositivo de coluna de água oscilante foram modelados e simulados no *Simulink* a partir da velocidade do ar. A velocidade na extremidade superior do tubo (seção 3 da Figura 12) foi utilizada como parâmetro de entrada na turbina, que tem como parâmetro de saída o torque gerado. Este torque é relacionado ao movimento de rotação do rotor do gerador que fornece, ao final, potência elétrica

4.1.1 Velocidade de Entrada

Como abordado anteriormente, a velocidade de entrada do ar na turbina utilizada para a simulação foi a mesma obtida em Vecchia (2016) a partir de um regime regular de ondas (Figura 16). Essa velocidade foi obtida por Vecchia (2016) com base nos dados de onda apresentados na Tabela 1 e nas características construtivas do dispositivo apresentadas na Tabela 2.

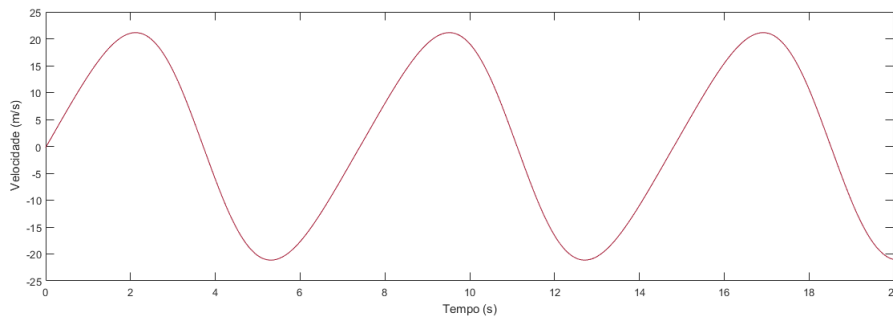


Figura 16 – Velocidade de entrada do ar Fonte: (VECCHIA, 2016)

Tabela 1 – Dados de onda. Fonte: adaptado de (VECCHIA, 2016)

Período Significativo - T (s)	7,4
Altura significativa - H (m)	1,2
Comprimento - L (m)	75,7
Profundidade - h (m)	17,0

Tabela 2 – Dados do Dispositivo. Fonte: adaptado de (VECCHIA, 2016)

Comprimento do tubo (m)	3
Diâmetro 2 (m)	0,79
Diâmetro 3 (m)	0,25
Ângulo Incluso ($^{\circ}$)	60

4.1.2 Modelagem da Turbina

A turbina NACA0021, utilizada para a modelagem e simulações foi a mesma do trabalho de VECCHIA (2016). Suas especificações podem ser observadas na tabela 3.

Tabela 3 – Especificações da turbina Fonte: Elaborado pela autora

Modelo	NACA 0021
Comprimento das Pás - b_t (m)	0,0735
Corda da Turbina - l_t (m)	0,105
Raio da Turbina - r_t (m)	0,1225
Número de pás	5

A partir das especificações e das equações (8) e (9) a turbina foi simulada no *Simulink*. A Figura 17 apresenta o diagrama de blocos implementado.

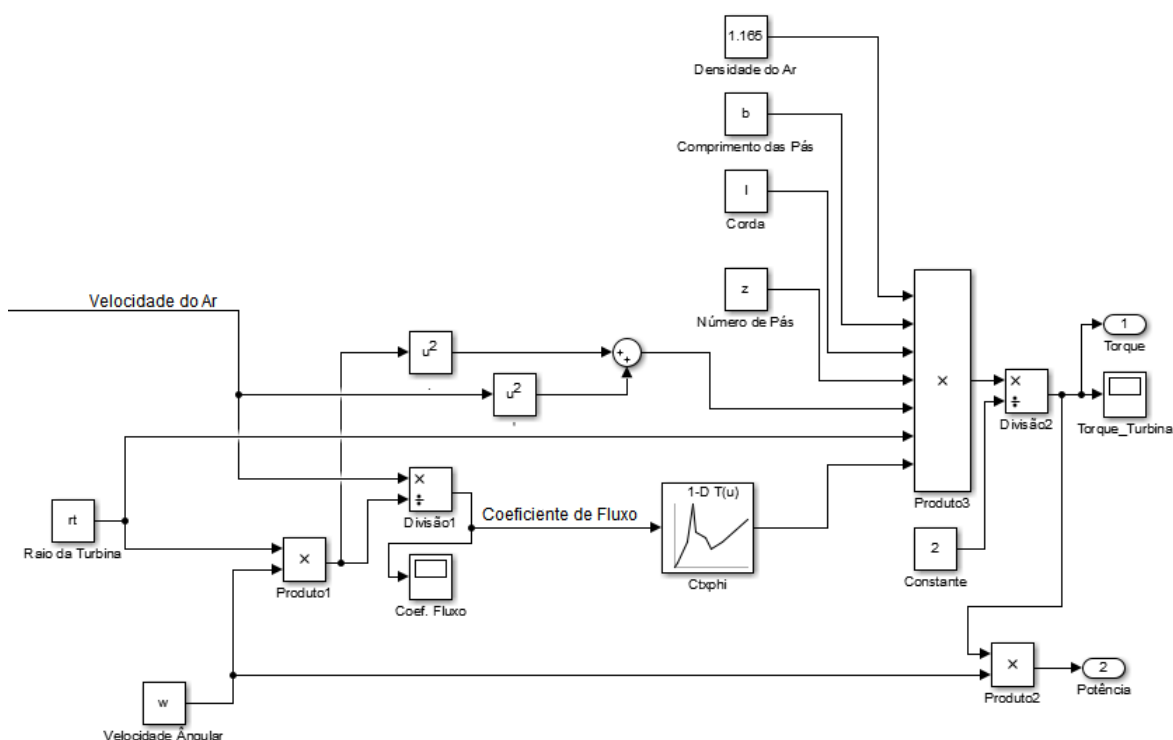


Figura 17 – Modelagem da Turbina no *Simulink* Fonte: Elaborado pela autora

Para a determinação do coeficiente de torque, partiu-se da relação entre o mesmo e o coeficiente de fluxo para a NACA0021, obtido em [KIM; SETOGUCHI; TAKAO \(2002\)](#). Na sequência, foi realizada uma aproximação desses dados através de um ajuste de curva que pode ser visto na Figura 6.

4.1.3 Modelagem do Gerador

O gerador escolhido para a aplicação foi o modelo 127 da linha LEM-170 da empresa *Lynch* ([LYNCH MOTORS AND GENERATORS](#)) e suas especificações e parâmetros podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações do gerador. Fonte: Elaborado pela autora

Resistência da Armadura - R_a ($m\Omega$)	24
Indutância da Armadura - L_a (μH)	23
Constante de Torque - K_t (Nm/A)	0,12
Inércia do Rotor - J_m ($kg\ m^2$)	0,0236
Fator de Amortecimento Viscoso - B_m (Nm s/rad)	0
Potência Nominal (W)	5540
Tensão Nominal (V)	48
Corrente Nominal (A)	140

A modelagem do gerador no *Simulink* foi realizada com as equações (12) e (15). A Figura 18 apresenta o diagrama de blocos do gerador já com os controladores em cascata, conforme descrito no item 3.4 da seção 3.

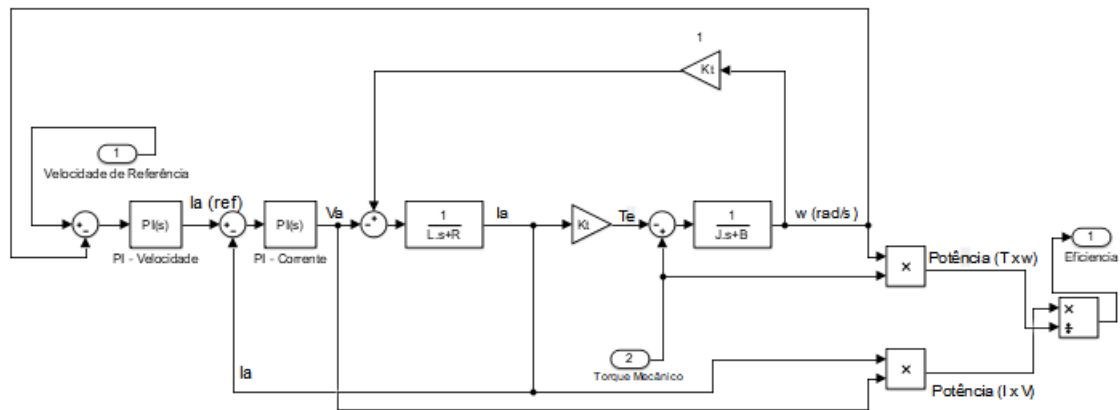


Figura 18 – Modelagem do Gerador no *Simulink*. Fonte: Elaborado pela autora

4.2 Perda de Sustentação e Velocidade de Referência pela Turbina

Como citado anteriormente, a velocidade de referência foi obtida a partir da análise da eficiência da turbina para velocidades distintas, sendo que, a maior faixa de eficiência se dá para valores de velocidade que evitam a perda de sustentação e mantém um fluxo que gere os maiores valores de potência mecânica possíveis. Na Figura 19 é possível observar a eficiência em função da velocidade angular. Essa relação demonstra a existência da faixa ótima de eficiência.

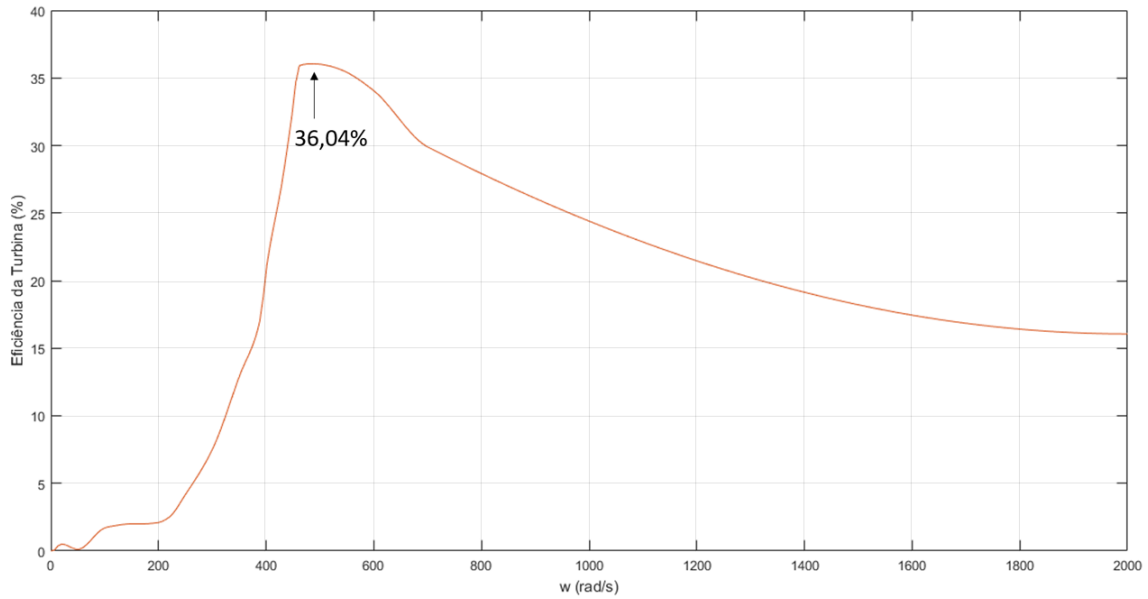


Figura 19 – Eficiência da Turbina em função da Velocidade Angular Fonte: Elaborado pela autora

Essa faixa de velocidade ratifica a relação entre o coeficiente de torque e coeficiente de fluxo apresentada anteriormente (Figura 6), onde os maiores coeficientes de torque se dão para valores de coeficiente de fluxo próximos a 0,35. Esses valores são correspondentes as velocidades de rotação indicadas na Figura 20.

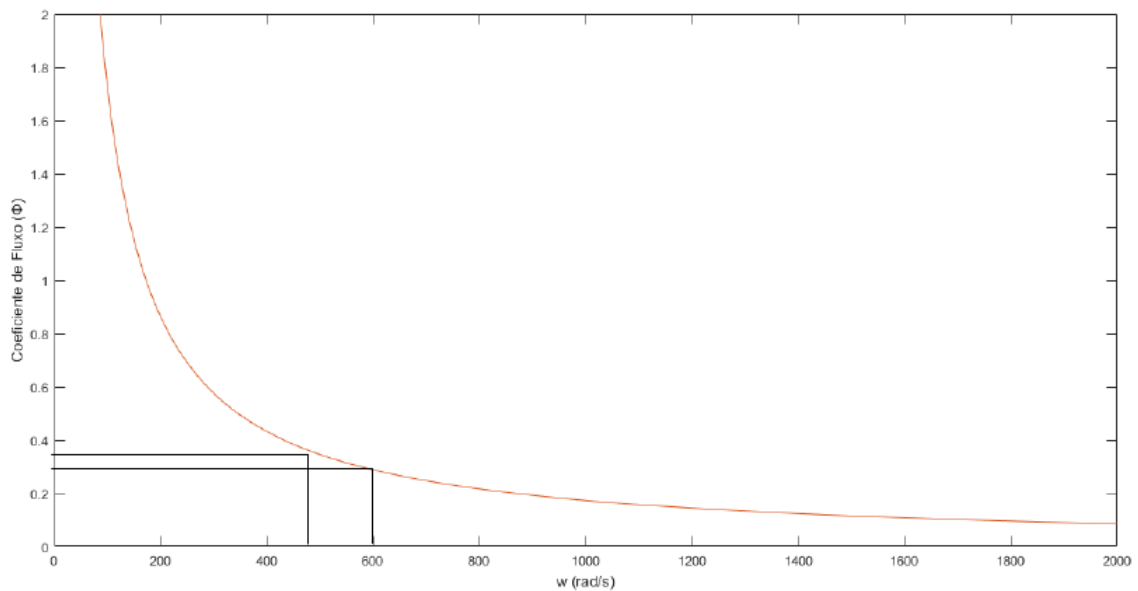


Figura 20 – Coeficiente de Fluxo em função da Velocidade Angular Fonte: Elaborado pela autora

Dessa forma, a maior eficiência da turbina NACA0021 equivale a velocidade de rotação de 490 rad/s com uma eficiência máxima de 36,04%. O ângulo de ataque

para essa velocidade é de aproximadamente 19° com um coeficiente de fluxo de 0,355.

O comportamento do torque para dois valores de ângulos de ataque (α) e coeficientes de fluxo podem ser comparados nas Figuras 21 e 22. Onde, na Figura 22 pode ser observado o efeito da perda de sustentação na curva de torque.

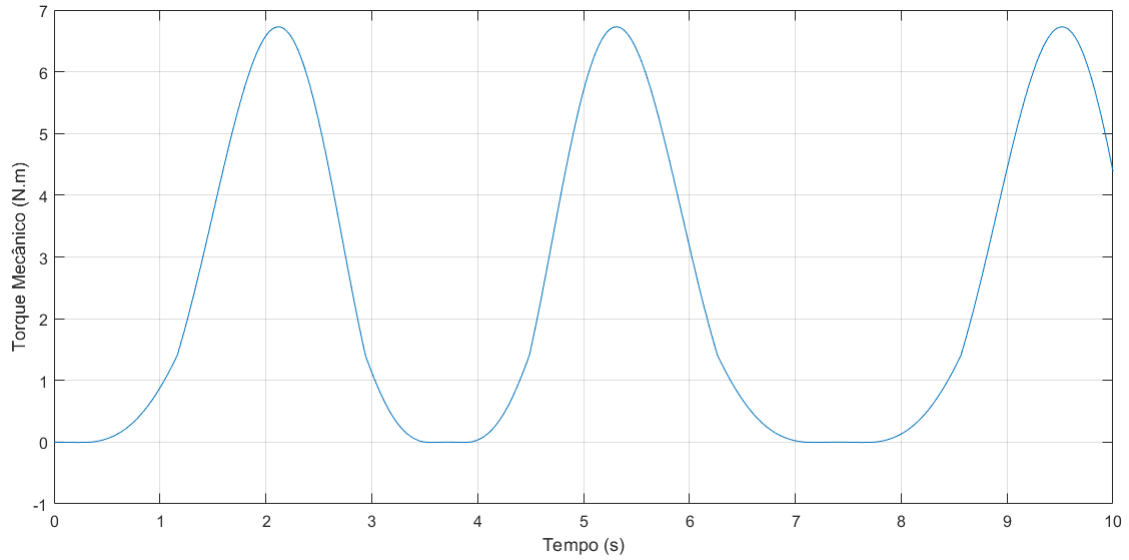


Figura 21 – Torque Mecânico em função do Tempo ($\alpha = 19^\circ$) Fonte: Elaborado pela autora

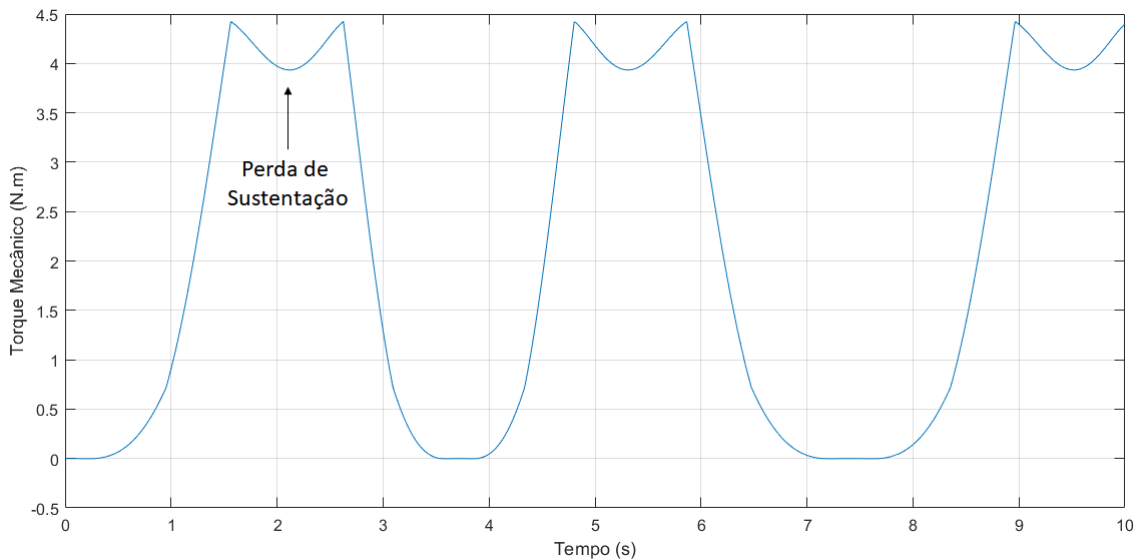


Figura 22 – Torque Mecânico em função do Tempo ($\alpha = 23^\circ$) Fonte: Elaborado pela autora

4.3 Controle de Velocidade de Rotação

O controle da velocidade de rotação foi efetuado a partir da entrada da velocidade ideal como parâmetro para referência do controlador PI utilizado. Com essa entrada, o controlador impõe uma tensão nos terminais da carga de forma a manter o parâmetro de saída equivalente com o de referência (Figura 23).

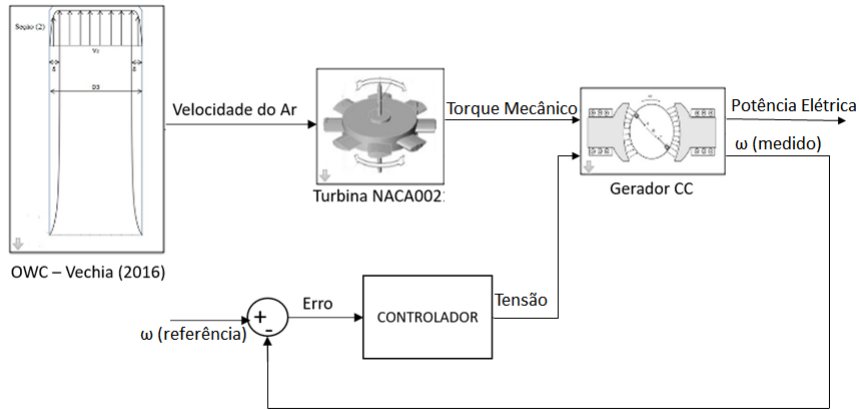


Figura 23 – Sistema de Coluna de Água Oscilante. Fonte: Elaborado pela autora

Para escolha dos ganhos proporcional e integral dos controladores em cascata, utilizou-se o bloco disponível na biblioteca do *Simulink* que permite a sintonia de acordo com o tempo de ação e robustez do controle. Essa sintonia foi feita de forma a atingir a velocidade de referência em um tempo razoável. Todavia, como a entrada do sistema é um torque não constante, manter uma velocidade constante a partir dele requer um controle um pouco mais agressivo, ou seja, um controle onde o sistema atinja erro nulo em um curto período de tempo (Figura 24).

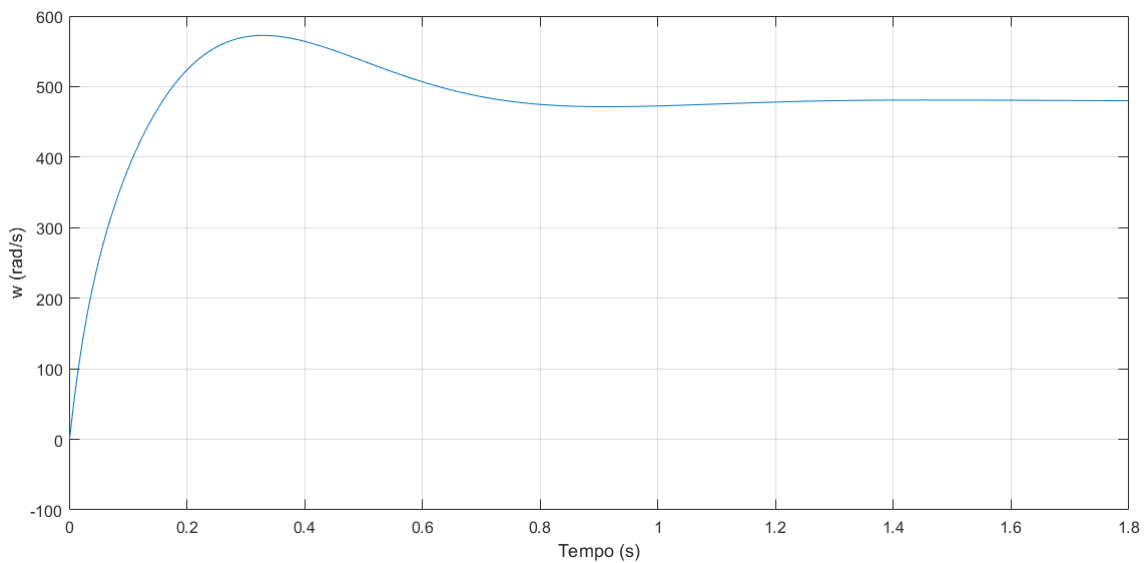


Figura 24 – Controle de Velocidade Angular. Fonte: Elaborado pela autora

O controle realizado, visando manter a velocidade de rotação constante e impondo tensão nos terminais da carga, permite que o sistema trabalhe com a máxima eficiência possível, fornecendo, assim, a maior potência elétrica para uma carga variável.

Os comportamentos em regime permanente das potências elétricas obtidas para um sistema controlado e para um sistema sem controle de velocidade, atingindo velocidades na faixa da perda de sustentação, podem ser observados nas Figuras 25 e 26. O comportamento da perda de sustentação faz com que a potência média do sistema decaia.

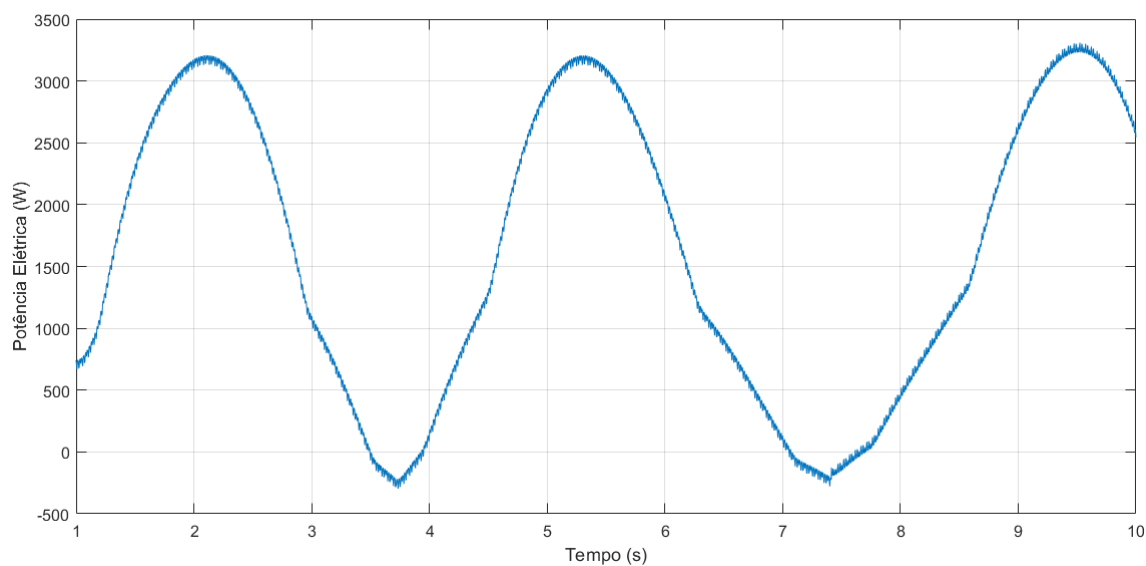


Figura 25 – Potência elétrica para a velocidade de rotação controlada. Fonte: Elaborado pela autora

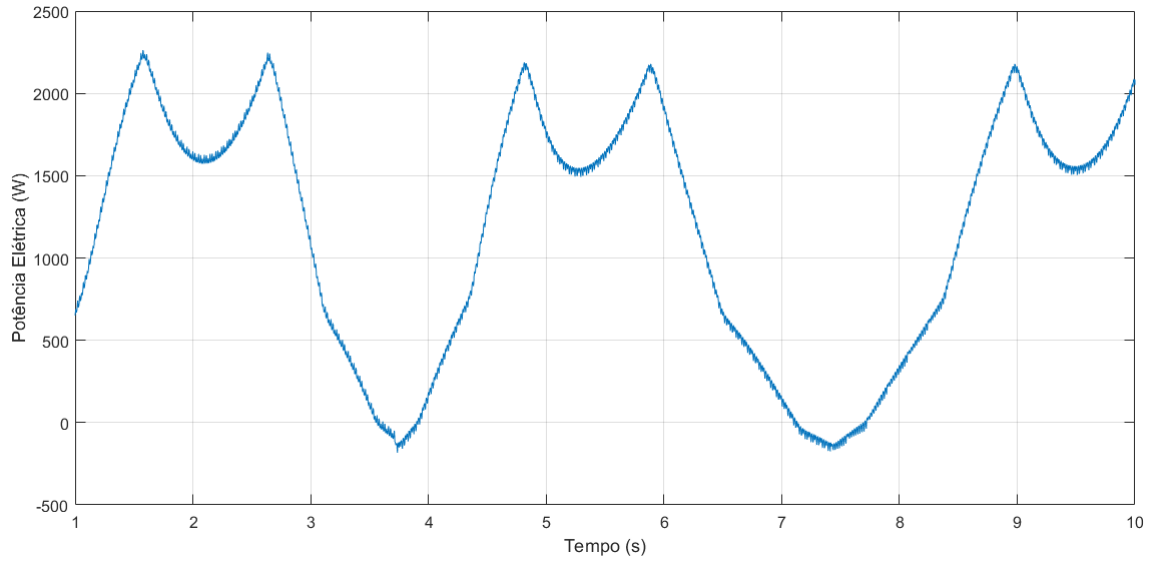


Figura 26 – Potência elétrica para a velocidade de rotação de perda de sustentação. Fonte: Elaborado pela autora

4.4 Velocidade de Referência pelo Gerador

Outra análise foi relacionada a obtenção da velocidade de referência utilizando como parâmetro a eficiência do gerador e não da turbina. Essa verificação foi realizada pois a eficiência da turbina é dependente da velocidade de rotação tanto na potência de entrada quanto na de saída, exigindo um par velocidade torque muito mais específico que o gerador.

Dessa forma, utilizando o mesmo conceito de perturbação e observação obteve-se a relação entre eficiência do gerador e velocidade angular na faixa que não permita perda de sustentação na turbina (Figura 27).

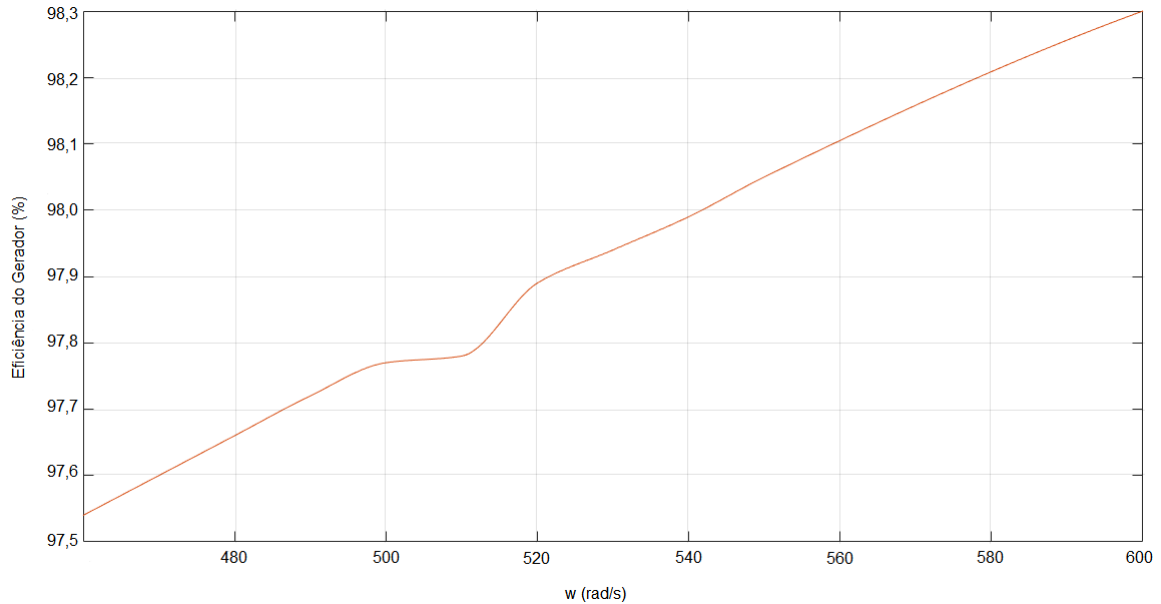


Figura 27 – Eficiência do Gerador. Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se, portanto, que para o gerador a eficiência aumenta com o aumento da velocidade de rotação. Todavia, na faixa de valores que apresentam os ângulos de ataque adequados para o funcionamento da turbina NACA0021, a diferença entre a máxima eficiência e a eficiência da velocidade de referência da turbina é de aproximadamente meio por cento.

5 Considerações Finais

Este trabalho apresentou um estudo de modelagem e simulação para um sistema de pequeno porte de conversão de energia cinética das ondas do oceano em energia elétrica.

A modelagem realizada visou estabelecer os parâmetros de simulação para a turbina (conversão de energia cinética em mecânica) e para o gerador (conversão de energia mecânica em elétrica) para um dispositivo de coluna de água oscilante, considerando sua instalação em uma plataforma pesqueira no sul do Brasil.

Além disso, estratégias de controle a partir da velocidade de rotação do rotor foram analisadas visando atingir valores viáveis de eficiência para o sistema. Para tanto, métodos de obtenção da velocidade de referência a partir da eficiência foram estudados tanto para a turbina quanto para o gerador.

Os resultados apresentados demonstram que, na obtenção da velocidade de referência, é importante trabalhar com valores que evitem a perda de sustentação nas pás da turbina para não correr riscos de danos a sua estrutura física. Todavia, devido a característica da turbina de necessitar de um par velocidade torque mais específico, os valores de referência na turbina e no gerador foram distintos.

Dessa forma, os resultados apresentam duas possibilidades de operação no

controle do sistema. Na primeira, controla-se a velocidade a partir da referência da turbina em uma faixa muito mais segura para evitar perda de sustentação. Na segunda, trabalha-se com o limite da faixa de perda de sustentação, mas aumenta-se a eficiência na conversão de energia mecânica para elétrica.

Todavia, a solução de obtenção de referência pelo gerador apresentou aumento na eficiência de apenas meio por cento. Por conseguinte, a primeira possibilidade se apresenta como a mais segura para o sistema e com uma eficiência bem razoável.

5.1 Indicação de Trabalhos Futuros

Nessa seção são indicadas algumas alternativas de trabalhos futuros.

5.1.1 Onda Incidente

A entrada da onda incidente no dispositivo OWC de Vecchia (2016) é referente a um regime ondas regulares. No entanto, as ondas apresentam um comportamento irregular e sazonal. Uma alternativa para aprimoramento dessa sequência de trabalhos é a análise do sistema para uma entrada de ondas mais próxima da realidade.

5.1.2 Eficiência da Turbina

A turbina Wells utilizada em Vecchia (2016) e nesse trabalho apresentou eficiência máxima de aproximadamente 36%. Indica-se a realização de simulações com outras turbinas para obter uma maior eficiência ou o projeto de uma turbina específica para esse propósito.

5.1.3 Atendimento da Geração

Após a geração de energia elétrica pelo gerador CC é importante estabelecer quais cargas serão atendidas para que estratégias de conversão possam ser analisadas. Dependendo da carga a se atender, um sistema de conversão de corrente contínua para alternada e de transformadores pode se tornar necessário para a efetiva utilização do sistema.

Referências

AIRFOIL TOOLS. *NACA0021*. 2018. Disponível em: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il>>. Acesso em: 30 de setembro de 2018. Citado na página 6.

BIASI, F. A. A. Características do estol nas asas das aeronaves. *São Paulo: Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia: Revista Eletrônica AeroDesign Magazine*, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

CENTRO DE ESTUDO DO MAR. *Como se formam as ondas*. 2005. Disponível em: <http://www.cem.ufpr.br/praias/pagina/pagina.php?menu=ondas_formacao>. Acesso em: 27 de agosto de 2018. Citado na página 2.

DIÁRIO DE NOTÍCIAS. *Central de ondas dos Açores vai ser desmantelada 19 anos depois*. 2018. Disponível em: <<http://www.pico-owc.net/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018. Citado na página 11.

DIAS, G. da C.; SANTOS, S. M. dos; SANTOS, E. D. dos. Análise teórica da influência de perfis sobre a potência de uma turbina wells empregada em dispositivos de conversão de energia das ondas. *VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, v. 23, n. 1, p. 44–56, 2013. Citado na página 7.

DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. *Technologies*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 1, n. 1, p. 8, 2009. Citado na página 4.

FISCHER, A.; BELUCO, A.; ALMEIDA, L. Preliminary determination of the energy potential of ocean currents along the southern coast of Brazil. *International Journal of Energy and Environment*, Directory of Open Access Journals, v. 4, n. 5, p. 879–894, 2013. Citado na página 2.

GATO, L.; EÇA, L.; FALCAO, A. d. O. Performance of the wells turbine with variable pitch rotor blades. *Journal of Energy Resources Technology*, American Society of Mechanical Engineers, v. 113, n. 3, p. 141–146, 1991. Citado na página 6.

HEATH, T. The development and installation of the limpet wave energy converter. In: ELSEVIER. *World renewable energy congress VI*. [S.l.], 2000. p. 1619–1622. Citado na página 10.

KIM, T. H.; SETOGUCHI, T.; TAKAO, M. Study of turbine with self-pitch-controlled blades for wave energy conversion. *International journal of thermal sciences*, Elsevier, v. 41, n. 1, p. 101–107, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 18.

LEKUBE, J.; GARRIDO, A. J.; GARRIDO, I. Rotational speed optimization in oscillating water column wave power plants based on maximum power point tracking. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 681–691, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 13.

LYNCH MOTORS AND GENERATORS. *Catálogo LEM-170*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://lynchmotors.co.uk/pdfs/lmc-lem-170.pdf>>. Citado na página 18.

MADEIRA, D. *Controlador PI estabilizando sistemas de primeira ordem*. 2016. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controlador-pi-primeira-ordem/>>. Acesso em: 30 de setembro de 2018. Citado na página 15.

MARQUES, T. P. *Gerador de Corrente Contínua*. Rio de Janeiro: Trabalho de Conclusão de Curso, 2010. Citado na página 8.

MISHRA, S. K.; PATEL, A. Wells turbine modeling and pi control scheme for owc plant using xilinx system generator. In: IEEE. *Power, Control & Embedded*

Systems (ICPCES), 2017 4th International Conference on. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado na página 13.

MISHRA, S. K.; PURWAR, S.; KISHOR, N. An optimal and non-linear speed control of oscillating water column wave energy plant with wells turbine and dfig. *International Journal of Renewable Energy Research*, v. 6, n. 3, p. 995–1006, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.

MISHRA, S. K.; PURWAR, S.; KISHOR, N. Maximizing output power in oscillating water column wave power plants: An optimization based mppt algorithm. *Technologies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 1, p. 15, 2018. Citado 7 vezes nas páginas 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 16.

MME. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026.* [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026.pdf/474c63d5-a6ae-451c-8155-ce2938fbf896>>. Citado na página 2.

NETO, L. F. *Geradores de Energia Elétrica.* 2000. Disponível em: <http://www-feiradeciencias.com.br/sala13/13_T02.asp>. Acesso em: 15 de setembro de 2018. Citado na página 8.

ORMAZA, M. A.; GOITIA, M. A.; HERNÁNDEZ, A. G. Neural control of the wells turbine-generator module. In: IEEE. *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on.* [S.l.], 2009. p. 7315–7320. Citado na página 9.

O’SULLIVAN, D.; GRIFFITHS, J.; EGAN, M. G. Development of an electrical power take off system for a sea-test scaled offshore wave energy device. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 36, n. 4, p. 1236–1244, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.

PFITSCHER, L. *Máquinas CC.* [S.l.]: Notas de Aula, 2018. Citado na página 8.

PORTAL BIOSSISTEMAS. *Energia das ondas no Brasil.* 2018. Disponível em: <<http://www.usp.br/portalbiossistemas/?p=7953>>. Acesso em: 30 de agosto de 2018. Citado na página 2.

PORTAL ENERGIA. *Fontes de energia renováveis e não renováveis.* 2015. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>>. Acesso em: 30 de agosto de 2018. Citado na página 2.

POWER TECHNOLOGY. *Mutriku Wave Energy Plant.* 2011. Disponível em: <<https://www.power-technology.com/projects/mutriku-wave/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018. Citado na página 11.

RAGHUNATHAN, S. A methodology for wells turbine design for wave energy conversion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 209, n. 3, p. 221–232, 1995. Citado na página 6.

SCHÄFER, L. B. Análise computacional e otimização geométrica de um dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante. 2012. Citado na página 2.

- SCHMIDT, N. L. Análise comparativa de conversores de energia de ondas oceânicas. Trabalho de Conclusão de Curso, 2017. Citado na página 3.
- SHEHATA, A. S.; XIAO, Q.; SAQR, K. M. Wells turbine for wave energy conversion: a review. *International Journal of Energy Research*, Wiley Online Library, v. 41, n. 1, p. 6–38, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- SILVA, J. M. G. da. *O controlador Proporcional-Integral*. 2000. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node28.html>>. Acesso em: 30 de setembro de 2018. Citado na página 15.
- SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. *Principles and practice of automatic process control*. [S.l.]: Wiley New York, 1985. Citado na página 16.
- UMANS, S. *Máquinas Elétricas*. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2014. 724 p. Citado na página 8.
- VECCHIA, L. C. D. *Modelagem e dimensionamento de um sistema de Geração de energia a partir das ondas do oceano*. Araranguá: Trabalho de Conclusão de Curso, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 3, 11, 12, 13, 17 e 26.
- VECCHIA, L. C. D.; SCHARLAU, C. C.; ABREU, D. Carla de. Modeling of wave energy absorption: A case study for a fishing pier in brazil. In: IEEE. *Power Engineering Conference (UPEC), 2015 50th International Universities*. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- WAVEC OFFSHORE RENEWABLES. *OWC Pico Power Plant*. 2012. Disponível em: <<http://www.pico-owc.net/>>. Acesso em: 10 de agosto de 2018. Citado na página 10.