

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ALIMENTAÇÃO DE SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE BOIAS BALIZADORAS
A PARTIR DE ENERGIA DE ONDAS**

por

Daniel Konig de Oliveira

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, dezembro de 2018.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ALIMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO DE BOIAS BALIZADORAS
A PARTIR DE ENERGIA DE ONDAS

por

Daniel Konig de Oliveira

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Chouhy Leborgne
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert

Banca examinadora:

Profa. Dra. Adriane Prisco Petry – DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert – DELET / UFRGS

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich – DELET / UFRGS

Porto Alegre, 12 de dezembro de 2018.

Fac quod in te est.

S. D. G.

OLIVEIRA, D. K. **Alimentação de Sistema de Iluminação de Boias Balizadoras a Partir de Energia de Ondas**. 2018. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo analisar a viabilidade técnica de um sistema autônomo de geração de energia capaz de alimentar as boias de sinalização da Lagoa dos Patos a partir das ondas da laguna. São utilizados dados de amplitude e frequência das ondas, bem como um modelo hidro-pneumático de conversor de coluna d'água oscilante do tipo *spar buoy* encontrado na literatura para estimar as dimensões do dispositivo conversor de energia bem como a potência entregue pela turbina no eixo. Em seguida, é desenvolvido um modelo elétrico no software PSIM no qual se alimenta um banco de capacitores e a carga elétrica a partir de um gerador de corrente contínua de ímãs permanentes conectado a um conversor estático com controle de tensão elétrica. Neste modelo há também uma representação da excitação fornecida pela turbina ao eixo do gerador. Entretanto, os modelos mecânico e elétrico não estão diretamente acoplados. Simulações do modelo mecânico apontaram que a potência no eixo para valores típicos de ondas da Lagoa dos Patos seria muito superior àquela demandada pela carga. Observou-se nas simulações do modelo elétrico que o sistema projetado é capaz de alimentar a carga de iluminação tanto em condições favoráveis de onda quanto nas não favoráveis.

PALAVRAS-CHAVE: Energia das ondas, coluna de água oscilante, *spar buoy*.

OLIVEIRA, D. K. **Supplying Buoy Illumination Systems with Wave Energy**. 2018. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The objective of this paper is to analyze the technical viability of an autonomous wave energy converter system capable of supplying enough electrical power to the leading lights of Lagoa dos Patos' navigation channel. The lagoon's wave amplitude and frequency data is used, as well as a spar buoy oscillating water column hydro-pneumatic model found in literature, to estimate the wave energy converter device dimensions and the power on turbine's shaft. Afterwards, the electrical system which is composed by the illumination load, a capacitor bank, a permanent magnet DC generator, a boost converter with output voltage control is modelled on PSIM. There is also a representation of turbine's rotational speed on this model. However, both models are not directly coupled. Simulations of the mechanic model point out a much larger shaft power than the demanded power, for typical waves found in Lagoa dos Patos. It was observed on simulations of the electric model that the designed system is able to supply the illumination load in both favorable and non-favorable wave conditions.

KEYWORDS: Wave energy converter, oscillating water column, spar buoy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Energia de Marés.....	3
2.2	Energia de Correntes	3
2.3	Diferencial de Temperatura.....	3
2.4	Diferencial de Salinidade	3
2.5	Energia de Ondas.....	3
2.6	Tecnologias de Conversores de Energia das Ondas	4
3	AValiação de Geração Energia a Partir de <i>SPAR BUOYS</i>	6
3.1	Tipos de Modelagens Utilizadas na Literatura	6
3.2	Modelagem Adotada	6
3.3	Simulação e Resultados.....	10
4	SISTEMA ELÉTRICO PARA ALIMENTAÇÃO DE ECLIPSORES	11
4.1	Modelo do Sistema Elétrico	11
4.2	Simulação para Condições Favoráveis	15
4.3	Simulação para Condições não Favoráveis	17
4.4	Simulação de Carregamento do Banco Capacitivo	20
5	CONCLUSÃO	22

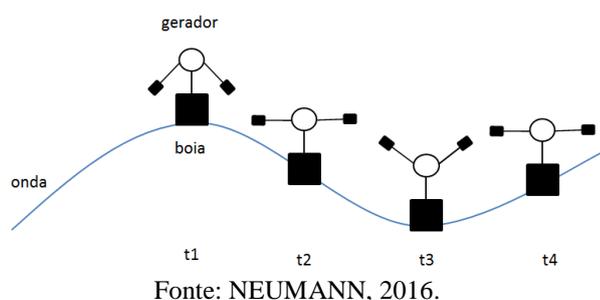
1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, há um empenho em viabilizar técnica e economicamente a utilização de fontes renováveis de energia devido, principalmente, à poluição emitida pelas fontes convencionais bem como à diminuição da disponibilidade das mesmas. Além de sua parcela de utilização cada vez maior em combustíveis e na matriz elétrica, fontes renováveis também são preferencialmente escolhidas para atender dispositivos ou consumidores de energia elétrica isolados de sistemas de distribuição, dado o seu apelo sustentável.

Este trabalho tem por objetivo propor uma alternativa sustentável para alimentar a iluminação do balizamento do canal de navegação da Lagoa dos Patos, que liga as cidades de Porto Alegre e Rio Grande no Rio Grande do Sul. Como descrito por Neumann (2016), a iluminação das boias que demarcam tal hidrovia é atualmente alimentada por um sistema fotovoltaico com baterias automotivas. Sabe-se que o descarte de baterias eletroquímicas é prejudicial ao meio ambiente devido aos materiais as compõem. Além disso, as boias de balizamento são constantemente depredadas por vândalos que furta as baterias.

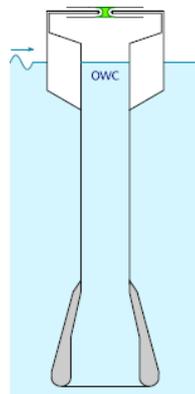
Ao deparar-se com a mesma motivação, Neumann (2016) propôs um conversor pendular caracterizado por uma massa descentralizada que oscilaria por inércia. A dinâmica de operação de tal conversor é apresentada na Figura 1.1. Diante das adversidades de acionamento características de tal configuração, optou-se por apresentar solução alternativa.

Figura 1.1 – Dinâmica de operação do conversor proposto por Neumann (2016).



Uma vez que os pontos de demanda elétrica se encontram num corpo d'água, a proposta deste trabalho é utilizar uma das fontes renováveis de energia presentes nesse ambiente para alimentar o sistema de iluminação. Essas fontes são usualmente divididas em: ondas, maré, correntes, diferencial de temperatura e diferencial de salinidade (KOOVERJI, 2014; CAMPOS, 2013). Após ponderar sobre essas possibilidades de fontes de energia, optou-se pela energia das ondas, ou seja, a energia contida na oscilação natural da superfície livre da laguna. Simulações a esse respeito só são possíveis uma vez que dados referentes à amplitude e período das ondas do local em questão encontram-se disponíveis na literatura (TOLDO Jr. *et al.*, 2006). Avaliou-se, então, as tecnologias existentes e decidiu-se pelo conversor flutuante de coluna de água oscilante (OWC), do modelo *spar buoy*, por este se assemelhar às boias de balizamento, como mostrado na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Seção transversal de conversor OWC do tipo *spar buoy*.



Para modelar o regime de operação adotou-se um modelo de frequência, pois trata-se de ondas de pequena amplitude as quais acarretam em fenômenos levemente não lineares os quais não invalidam uma aproximação linear. Tais modelos são extremamente úteis, pois permitem uma avaliação simples e rápida. Para isso, a excitação é considerada como uma forma harmônica simples, conseqüentemente todas as grandezas físicas variam sinusoidalmente com o tempo, de acordo com a frequência da onda incidente (PECHER e KOFOED, 2017). Entretanto, por se utilizar uma turbina bidirecional, a velocidade de rotação do eixo se comportará como uma onda senoidal em valor absoluto. Será proposta uma solução elétrica que alimente a carga a partir da potência fornecida pela turbina, por meio de um conversor estático regulado.

Utilizar-se-á o *software* MATLAB para estimar a potência mecânica da turbina, e o *software* PSIM para dimensionar o gerador elétrico, o conversor estático e o sistema de armazenamento de modo a atender à carga de iluminação das boias de auxílio à navegação.

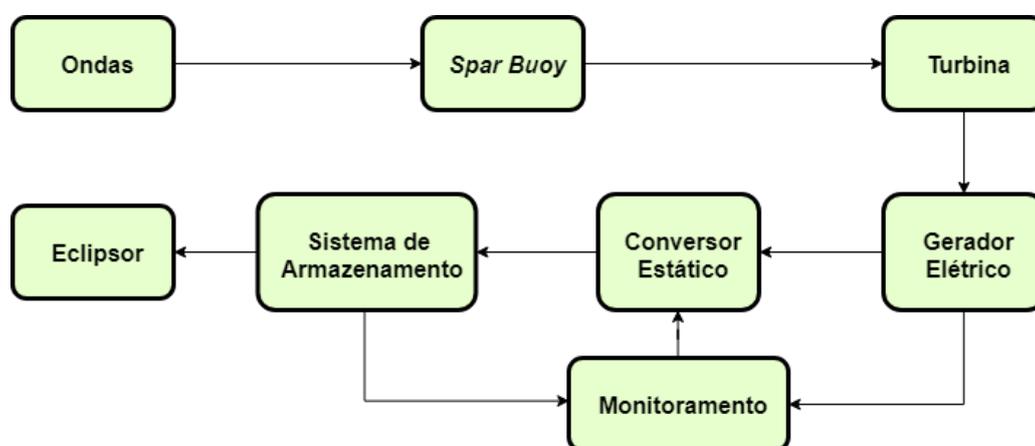
1.1 Motivação

Na Lagoa dos Patos, há um canal de navegação entre a cidade de Porto Alegre e o porto de Rio Grande que apresenta 315 km de extensão. Para demarcar a hidrovia, onde ocorrem dragagens periódicas para que seu calado seja mantido em 6 metros, são utilizadas cerca de 200 boias de balizamento. Estas boias apresentam um sistema de iluminação piscante, chamado de eclipsor, que atualmente é alimentado por sistemas de energia solar fotovoltaico com baterias automotivas (NEUMANN, 2016). As baterias além de serem alvo de furto, ainda causam danos ao meio ambiente ao serem descartadas.

1.2 Objetivos

Devido à necessidade de uma alternativa ao sistema fotovoltaico que seja confiável e não seja atraente a vândalos, propõe-se verificar a viabilidade técnica de um sistema autônomo capaz de energizar as boias de sinalização da Lagoa dos Patos a partir das ondas da laguna dentro das condições de amplitude, frequência e profundidade da mesma. Como objetivo específico, propõe-se desenvolver um sistema *wave-to-load*. Conforme mostrado na Figura 1.3, tal sistema inclui o dimensionamento de uma boia conversora do tipo *spar buoy* (câmara e flutuador), bem como a escolha da topologia e a especificação da turbina e do gerador elétrico, do conversor estático, do sistema de armazenamento e de seu monitoramento (controle) que sejam capazes de atender à carga de iluminação supracitada. Pelo conhecimento do autor, trata-se de um estudo pioneiro no assunto pois na literatura de sistemas de geração elétrica a partir de ondas encontram-se apenas aqueles cuja finalidade é de otimizar a geração, usualmente para alimentar uma rede de distribuição elétrica, ou seja, sistemas *wave-to-wire* os quais são descritos mais detalhadamente por Pecher e Kofoed (2017).

Figura 1.3 – Diagrama *wave-to-load*.



Fonte: AUTOR.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As fontes de energia encontradas em oceanos são usualmente divididas na literatura em: ondas, maré, correntes, diferencial de temperatura e diferencial de salinidade (KOOVERJI, 2014), sendo que a energia das correntes pode ser ainda dividida em correntes de marés e correntes oceânicas (CAMPOS, 2013). Vale ressaltar que tais fontes de energia não são encontradas exclusivamente em oceanos, embora sejam geralmente estudadas como componentes da energia oceânica.

2.1 Energia de Marés

A oscilação das marés é basicamente regida pela Lei da Gravitação Universal, sendo a Lua e o Sol os corpos celestes com maior influência sobre elas. Tal oscilação é previsível e de grande serventia para geração de energia elétrica sendo a sua mais comum aplicação em barragens de certas centrais hidrelétricas (CAMPOS, 2013).

2.2 Energia de Correntes

As correntes de marés são escoamentos de grande intensidade causadas pela atração gravitacional do Sol e da Lua. Por outro lado, as correntes oceânicas são geradas a partir da circulação oceânica, de vazões de rios e de gradientes de temperatura e de salinidade. Dispositivos para geração de energia a partir de correntes de marés se diferenciam dos de corrente oceânicas pela profundidade e pelo sentido e velocidade do escoamento. Enquanto os dispositivos de correntes de marés são bidirecionais, geralmente operam em menores profundidade e possuem maiores velocidades, os dispositivos de correntes oceânicas são unidirecionais, operam em maiores profundidades e possuem menores velocidades (CAMPOS, 2013).

2.3 Diferencial de Temperatura

Estima-se que o potencial da energia térmica do maior coletor solar – os oceanos – está entre 30.000 e 90.000 TWh/ano. A região intertropical é a mais propícia para este tipo de conversão, pois apresenta as maiores médias da temperatura de superfície, podendo chegar a 25 °C. Os projetos que visam gerar energia elétrica a partir desta fonte podem utilizar ciclos fechados, abertos ou híbridos. Geralmente, utiliza-se o ciclo de Rankine fechado onde o fluido de trabalho é amônia. Nestes ciclos, o fluido de trabalho é evaporado ao trocar calor com água de maior temperatura da superfície, então aciona uma turbina acoplada a um gerador elétrico, condensa ao trocar energia com água de menor temperatura das profundezas e é bombeada novamente para o trocador de calor com água da superfície. Outra forma de utilizar esta fonte é no resfriamento de ciclos de condicionadores de ar presentes em plataformas de petróleo (CAMPOS, 2013).

2.4 Diferencial de Salinidade

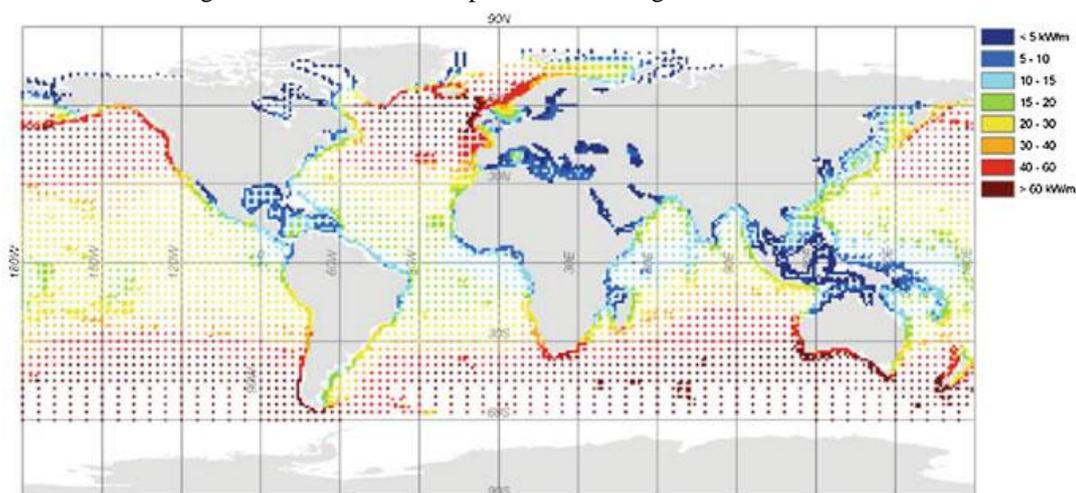
As interfaces de cursos e corpos d'água de diferentes salinidades, como as de rios e mares, são favoráveis à realização de osmose por meio de membranas semipermeáveis (CAMPOS, 2013). Pode-se utilizar membranas mais permeáveis à água que ao sal. Assim, moléculas da água de menor salinidade passarão através da membrana para o lado da água de maior salinidade, aumentando assim a pressão hidrostática que pode ser convertida em energia útil.

2.5 Energia de Ondas

As ondas são produzidas pela ação dos ventos que atuam sobre os oceanos (ASSIS, 2010). São, portanto, uma forma indireta de energia solar (FALCÃO, 2010) pois a origem dos ventos está diretamente relacionada às zonas de baixa e alta pressão as quais resultam, segundo García (2004), da radiação solar atuando sobre corpos que possuem diferentes capacidades térmicas na superfície terrestre.

As ondas são uma fonte regular de energia cuja intensidade pode ser prevista com vários dias de antecedência. Tal regularidade e conhecimento prévio das condições de operação permitem projetar e programar os dispositivos conversores de energia visando maximizar suas eficiências. No Brasil, as regiões Sul e Sudeste apresentam o maior potencial energético para esta fonte, conforme mostra a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Estimativa de potencial de energia de ondas no mundo.



Fonte: PECHER e KOFOED, 2017.

Como apresentado por Assis (2010) e Rusu e Onea (2018), a potência média de uma onda por unidade de comprimento de crista P_w é determinada por:

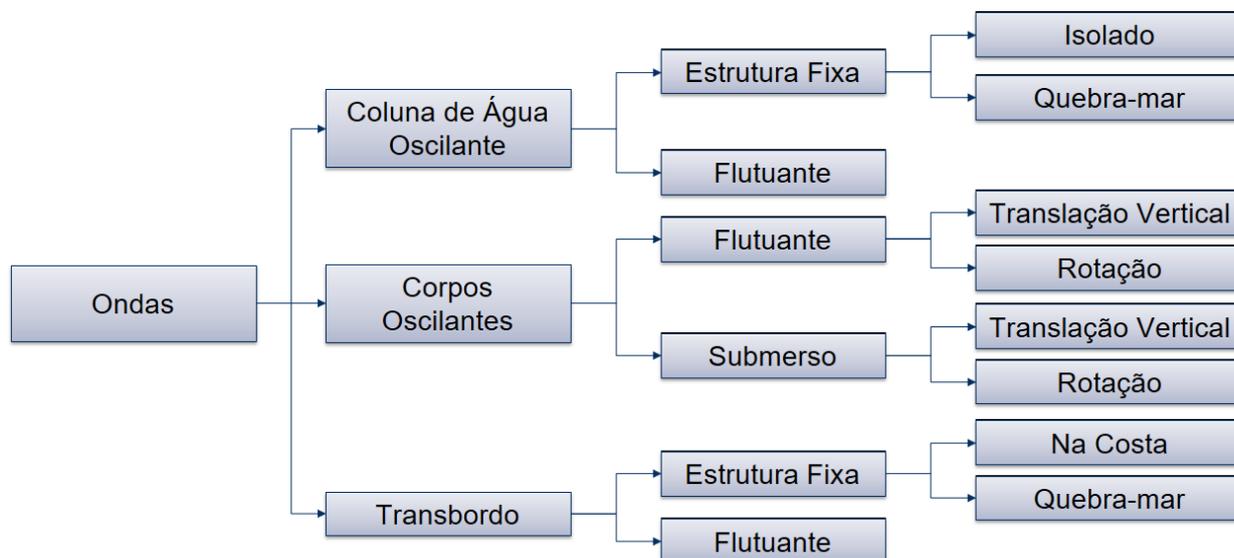
$$P_w = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T \quad (1.1)$$

onde ρ é a massa específica da água, g a aceleração da gravidade, H a altura da onda, e T o período da mesma. Portanto, pode-se afirmar que o potencial energético das ondas é diretamente proporcional ao período bem como ao quadrado da altura das ondas presentes no corpo d'água em questão.

2.6 Tecnologias de Conversores de Energia das Ondas

Dispositivos para geração de energia a partir de ondas são costumeiramente classificados em Coluna de Água Oscilante (OWC), Corpos Oscilantes e Transbordo (*run-up*). Conversores OWC podem ser estruturas fixas – tanto *onshore* quanto *offshore* – ou estruturas flutuantes. Já os dispositivos de corpos oscilantes podem ser flutuantes ou submersos, enquanto que os de transbordo geralmente são fixos, havendo também algumas tecnologias flutuantes. A Figura 2.2 apresenta a classificação de conversores de energia de ondas.

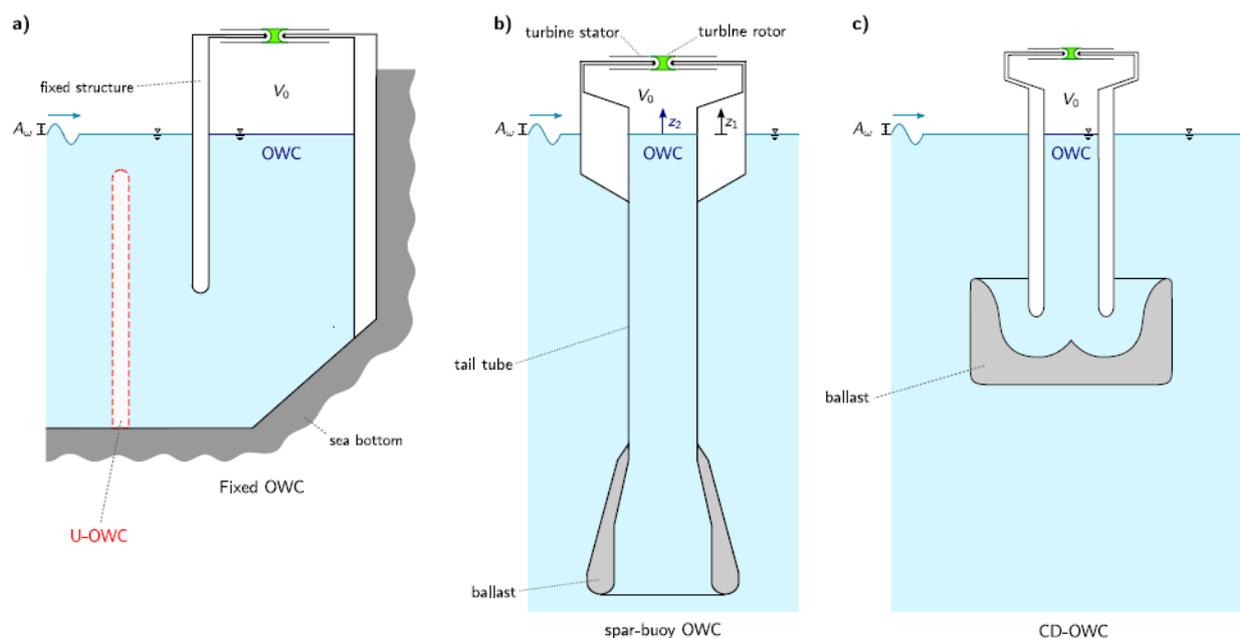
Figura 2.2 – Classificação de dispositivos para geração de energia a partir de ondas.



Fonte: Elaborado pelo Autor com base em CAMPOS, 2013.

Dispositivos OWC são estruturas ocas onde o ar é confinado numa câmara hidro-pneumática semi-submersa que é aberta à atmosfera em sua extremidade superior e ao corpo d'água na extremidade inferior por onde a superfície livre de sua coluna de água fica sujeita às ondas do meio. A oscilação da coluna de água comprime e descomprime o ar da câmara que, por sua vez, aciona uma turbina acoplada a um gerador elétrico (ASSIS, 2010; CAMPOS, 2013; RUSU e ONEA, 2018). A Figura 2.3 apresenta um modelo de OWC fixo, com uma estrutura opcional destacada em vermelho, e dois modelos de OWCs flutuantes.

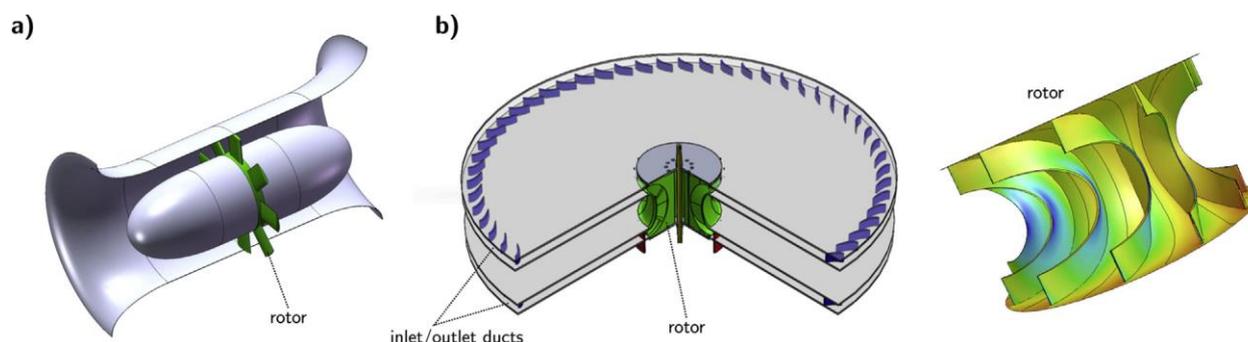
Figura 2.3 – a) Corte transversal de um OWC fixo. b) Vista de seção transversal de um OWC *spar buoy*. c) Vista de seção transversal de um OWC flutuante de duto coaxial.



Fonte: HENRIQUES *et al.*, 2016.

As turbinas utilizadas em conversores OWC são bidirecionais (auto-retificadoras), ou seja, o sentido de rotação do rotor independe do sentido de escoamento do ar, o qual varia em um OWC. Exemplos desse tipo de turbina são as turbinas Wells (escoamento axial) e as turbinas birradiais de impulso (escoamento radial), como mostra a Figura 2.4. O princípio de funcionamento das turbinas Wells baseia-se no perfil simétrico de suas pás que formam um plano perpendicular ao eixo de rotação e ao sentido do escoamento. Já nas turbinas birradiais, o escoamento pelas aletas e pás do rotor é radialmente centrífugo ou centrípeto, em dutos formados por discos paralelos, dependendo do ciclo da onda. Em ambas as turbinas, a força resultante empurra as pás do rotor na mesma direção, seja pela simetria de seu perfil como nas turbinas Wells, seja pela geometria do rotor como na turbinas birradiais. Mais informações sobre estas e outras turbinas bidirecionais são descritas por Henriques *et al.* (2013) e Falcão e Henriques (2016).

Figura 2.4 – a) Turbina Wells e b) turbina birradial.



Fonte: HENRIQUES *et al.*, 2016.

3 AVALIAÇÃO DE GERAÇÃO ENERGIA A PARTIR DE SPAR BUOYS

Nesta seção serão descritos a divisão das modelagens de dispositivos *spar buoys*, o modelo adotado no presente trabalho bem como os resultados obtidos através de simulação deste modelo.

3.1 Tipos de Modelagens Utilizadas na Literatura

Como descrito por Pecher e Kofoed (2017), a modelagem hidrodinâmica da interação entre as ondas e os dispositivos conversores de energia são usualmente divididos em três diferentes fases de acordo com as condições do corpo de água em questão:

1. Sob condições leves a moderadas, aproximações lineares para as ondas são válidas;
2. Para condições moderadas a extremas, uma modelagem hidrodinâmica parcialmente não-linear é necessária para modelar de maneira mais acurada a interação onda–dispositivo;
3. Sob condições extremas de tempestade, uma abordagem completamente não-linear é necessária para modelar a interação hidrodinâmica das ondas e do dispositivo.

O método de modelagem mais adequado depende de diversos fatores tais como a precisão requerida (a qual é inversamente proporcional ao tempo de computação), a condição do corpo de água (tempestuoso ou não), o regime do dispositivo (em operação ou modo de sobrevivência) e seu princípio de funcionamento (alguns conceitos exibem mais comportamentos não-lineares que outros). Por conseguinte, os métodos de modelagem são tipicamente divididos em 3 diferentes tipos:

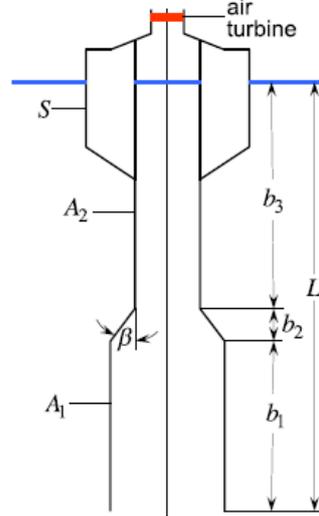
1. Modelagens no domínio da frequência: A interação hidrodinâmica pode ser simplificada para baixas amplitudes de oscilação do dispositivo e da onda. Neste caso, o problema hidrodinâmico é bem caracterizado por uma abordagem linear. O primeiro passo para modelar a dinâmica do conversor em tais abordagens – as quais são razoavelmente aceitáveis durante o regime de operação do dispositivo – é tradicionalmente executado no domínio da frequência onde a excitação é de uma forma harmônica simples. Consequentemente, todas as grandezas físicas variam sinusoidalmente com o tempo, de acordo com a frequência da onda incidente. Abordagens no domínio da frequência são extremamente úteis pois permitem avaliações simples e rápidas do desempenho do conversor.
2. Modelagens no domínio do tempo (*wave-to-wire*): Sob condições de ondas moderadas a extremas, efeitos não-lineares na interação hidrodinâmica onda–dispositivo são mais relevantes e o princípio da superposição não se aplica. Isto requer uma abordagem que represente tanto as dinâmicas do dispositivo conversor quanto a superfície livre do corpo de água no domínio do tempo. Esta abordagem descreve de maneira razoavelmente detalhada e precisa as dinâmicas do dispositivo. Por permitir uma modelagem da cadeia inteira de conversão de energia desde a interação onda–dispositivo até a alimentação da rede elétrica, os modelos no domínio do tempo são comumente chamado de *wave-to-wire*. Entre as vantagens de modelos *wave-to-wire* estão as estimativas de potência instantânea geradas sob condições irregulares, bem como as estimativas de posição, velocidade e aceleração do dispositivo. Além disso, modelos *wave-to-wire* são extremamente úteis para otimizar a estratégia de controle que visa maximizar a potência absorvida.
3. Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD): Devido ao grande tempo computacional requerido pelos modelos de CFD, a sua aplicação é tipicamente restrita a estudos de interação onda–dispositivo sob condições de ondas extremas, o que é um fenômeno fortemente não-linear. Normalmente, o objetivo principal neste caso é modelar as dinâmicas do dispositivo em modo de sobrevivência – quando este suspende a geração de energia – avaliando a eficácia da estratégia de sobrevivência.

3.2 Modelagem Adotada

Por tratar-se de uma monografia com escopo muito abrangente, evitou-se utilizar modelagens que exigissem simulação numérica. Uma vez que as ondas incidentes são de baixa oscilação, e o objetivo é modelar o regime de operação, buscou-se na literatura modelos no domínio da frequência. A modelagem da câmara hidro-pneumática e da turbina do dispositivo *spar buoy* apresentada por Falcão, Henriques e

Cândido (2012) atente a estes requisitos pois esta apresenta curvas adimensionais que possibilitam a reprodução do estudo para condições genéricas de onda. Portanto, tal modelagem foi adotada no presente trabalho. A Figura 3.1 apresenta a geometria da *spar buoy* e algumas das variáveis utilizadas nesta modelagem.

Figura 3.1 – Geometria da *spar buoy*.



Fonte: FALCÃO, HENRIQUES e CÂNDIDO, 2012.

Para simplificação do modelo, assumiu-se uma seção transversal interna uniforme, ou seja, $\beta = 0$. Sendo ω a frequência angular da onda, M_1 a soma das massas do flutuador (m_{1a}), do tubo (m_{1b}) e suas respectivas massas adicionais (μ_{1a} e μ_{1b} , respectivamente), X a amplitude complexa do descolamento vertical da superfície livre externa, B o coeficiente de amortecimento, ρ a massa específica da água, g a aceleração da gravidade, S a área da seção transversal do flutuador, A_1 a área da seção transversal da câmara, μ_e a amplitude complexa da força de excitação, P_c a amplitude complexa da diferença de pressão sobre a turbina, M_2 a soma da massa da coluna d'água e sua respectiva massa adicional, Y a amplitude complexa do descolamento vertical da superfície livre interna, k a constante de proporcionalidade da turbina, v_0 o volume de ar na câmara hidro-pneumática em condições não perturbadas, γ o coeficiente de expansão adiabática do ar, e p_{at} a pressão atmosférica. Segundo Falcão, Henriques e Cândido (2012), o seguinte sistema de equações pode ser utilizado para determinar X , Y e P_c :

$$-\omega^2 M_1 X + i\omega B X + \rho g(S - A_1)X = F_e + A_1 P_c, \quad (3.1)$$

$$P_c = (\omega^2 A_1^{-1} M_2 - \rho g A_1)(X + Y), \quad (3.2)$$

$$P_c = i\omega \left(1 + i\omega \frac{k v_0}{\gamma p_{at}}\right)^{-1} k A_1 Y. \quad (3.3)$$

onde

$$M_2 = \rho A_1 (L + l) \quad (3.4)$$

$$\frac{|F_e|}{A_w} = \left[\frac{2g^3 \rho B}{\omega^3}\right]^{1/2} \quad (3.5)$$

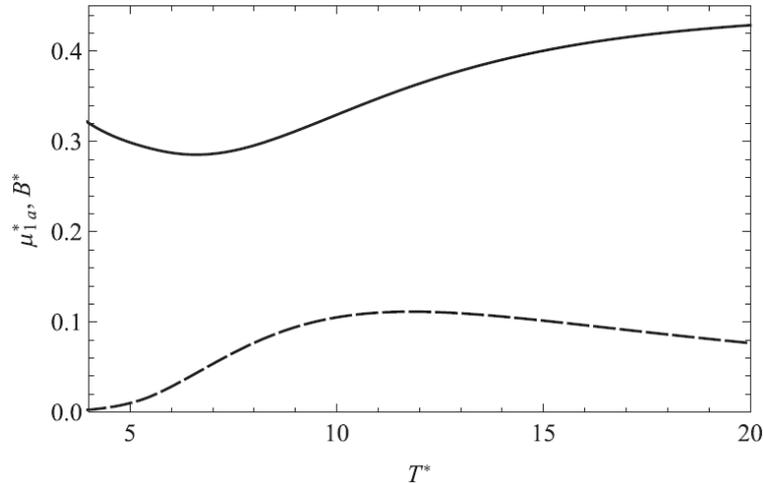
sendo L o comprimento de coluna d'água em condições não perturbadas, l o comprimento de coluna d'água adicional, e A_w a amplitude da onda incidente (metade de sua altura). De acordo com Evans (1978), há a seguinte correlação entre o comprimento adicional l e o raio da câmara r :

$$l = 0,6133 r \quad (3.6)$$

Para $r = 0,4a$, onde a é o raio do flutuador, Falcão, Henriques e Cândido (2012) traçou curvas entre grandezas adimensionais de *spar buoys*, ondas incidentes e turbinas Wells. Tais curvas visam a otimização da extração de potência a partir das ondas, possibilitando assim a avaliação do potencial de uma *spar buoy* dadas as condições de onda. Uma vez que há uma restrição física no comprimento máximo do

tubo submerso, a saber, 6 metros, buscou-se minimizar tal comprimento. Tal arbítrio deverá contribuir também para a diminuição dos gastos com matéria-prima na confecção das boias. A Figura 3.2 apresenta as curvas do coeficiente de amortecimento adimensionalizado $B^* = B/(\rho\pi a^3\omega)$ e da massa adicional do flutuador adimensionalizada $\mu_{1a}^* = \mu_{1a}/(\rho\pi a^3)$ pelo período de onda adimensionalizado $T^* = T(g/a)^{1/2}$, onde $T = 2\pi/\omega$. Nas Figuras 3.3–3.4, foram levantadas curvas para os seguintes valores de T^* : 10, 12,5 e 15, portanto apenas os respectivos valores de B^* e μ_{1a}^* serão relevantes. Contudo, nota-se um comportamento quase linear na curva referente a μ_{1a}^* , e um patamar quase constante na curva de B^* , dentro do domínio que contém os valores dos períodos adimensionais considerados ($T^* \in [10; 15]$).

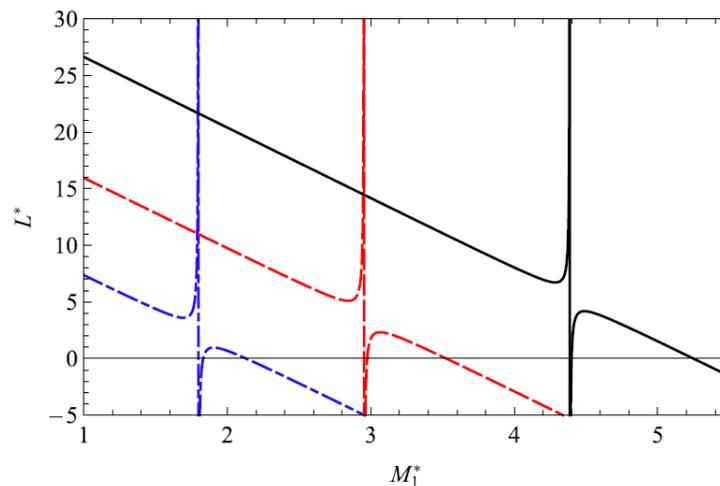
Figura 3.2 – Curvas adimensionais de massa adicional do flutuador μ_{1a}^* (curva contínua) e do coeficiente de amortecimento B^* (curva tracejada) pelo período de onda adimensional T^* .



Fonte: FALCÃO, HENRIQUES e CÂNDIDO, 2012.

A Figura 3.3 apresenta curvas otimizadas de comprimento de coluna d'água adimensionalizado $L^* = L/a$ pela massa adimensionalizada $M_1^* = (m_{1a} + m_{1b} + \mu_{1b})/(\rho\pi a^3)$ a qual não inclui μ_{1a} pois esta depende do período da onda, como mostrado na Figura 3.2. Percebe-se que em cada curva há um comportamento decrescente de L^* até atingir um valor mínimo, então há um crescimento abrupto seguido por uma singularidade. Após a singularidade, apenas parte da curva de L^* apresenta valores positivos.

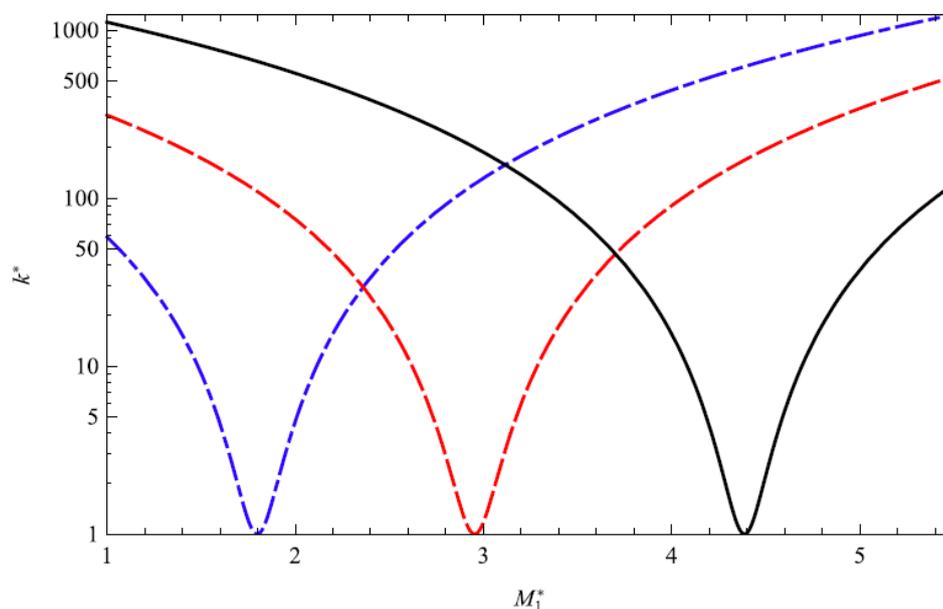
Figura 3.3 – Curvas adimensionais otimizadas de comprimento de tubo L^* pela massa total M_1^* para valores de período de onda $T^* = 15$ (curva contínua), $T^* = 12,5$ (curva tracejada) e $T^* = 10$ (curva ponto-tracejada).



Fonte: FALCÃO, HENRIQUES e CÂNDIDO, 2012.

A Figura 3.4 mostra que o valor ótimo do coeficiente de turbina adimensionalizado $k^* = k A_1^2/B$ é mínimo e igual à unidade na singularidade da curva de L^* , e aumenta para valores muito mais altos quanto mais se distancia desse ponto, tanto à esquerda quanto à direita.

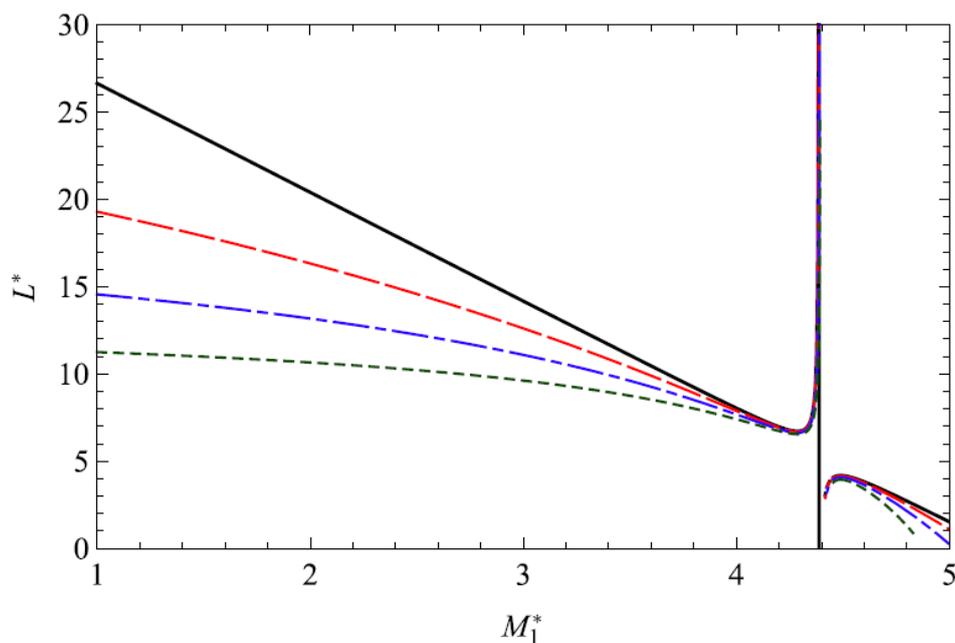
Figura 3.4 – Curvas adimensionais otimizadas de coeficiente de turbina k^* pela massa total M_1^* para valores de período de onda $T^* = 15$ (curva contínua), $T^* = 12,5$ (curva tracejada) e $T^* = 10$ (curva ponto-tracejada).



Fonte: FALCÃO, HENRIQUES e CÂNDIDO, 2012.

Embora as curvas das Figuras 3.3–3.4 tenham sido construídas para um limite teórico onde $v_0 = 0$, as respectivas curvas para diferentes valores de v_0 convergem entre si para valores de M_1^* próximos à singularidade (e ao valor mínimo) de L^* , como mostra a Figura 3.5 para o comprimento de coluna d'água adimensionalizado L^* .

Figura 3.5 – Curvas adimensionais otimizadas de comprimento de tubo L^* pela massa total M_1^* , para período de onda $T^* = 15$ e para os seguintes valores de volume de ar na câmara: $v_0^* = 0$ (curva contínua), $v_0^* = 0,2$ (curva tracejada), $v_0^* = 0,5$ (curva ponto-tracejada) e $v_0^* = 1,0$ (curva pontilhada).



Fonte: FALCÃO, HENRIQUES e CÂNDIDO, 2012.

3.3 Simulação e Resultados

Das Figuras 3.2–3.4, obtém-se os valores ótimos de μ_{1a}^* , B^* , L^* , M_1^* e k^* para qualquer relação de T e a que resulte nos valores de T^* considerados (10, 12,5 e 15). Como mencionado anteriormente, buscou-se minimizar o valor do comprimento de coluna d'água L . Os valores retirados das Figuras 3.2–3.4 que foram utilizados pelo autor encontram-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Parâmetros utilizados na simulação.

T^*	10	12,5	15
μ_{1a}^*	0,331	0,371	0,400
B^*	0,106	0,111	0,100
L^*	3,556	5,125	6,750
M_1^*	1,705	2,848	4,286
k^*	2,000	2,000	2,000

Fonte: AUTOR.

Utilizando as informações do quadro acima juntamente com as correlações de adimensionalização, as características da onda incidente (amplitude e frequência), bem como as Eq. 3.4–3.6, e projetando o volume de ar na câmara em condições não perturbadas v_0 , pode-se resolver o sistema das Eq. 3.1–3.3 obtendo assim o valor da amplitude complexa da diferença de pressão sobre a turbina P_c . Determina-se, então, a diferença de pressão instantânea sobre a turbina $p_c(t)$ através da Eq. 3.7:

$$p_c(t) = P_c e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

Assim, pode-se determinar a potência instantânea extraída pela turbina $P(t)$ utilizando a constante de proporcionalidade da turbina k , característica de turbinas lineares como as turbinas Wells (GATO e FALCÃO, 1988 e 1990). Vale ressaltar que estas turbinas, além de serem mais facilmente modeladas, apresentam valores de eficiência maiores que as turbinas de impulso em condições relativamente próximas às de projeto (FALCÃO e HENRIQUES, 2016).

$$P(t) = p_c(t)^2 / k \quad (3.8)$$

Toldo Jr. *et al.* (2006) estuda um histórico das características das ondas da Lagoa dos Patos. Os extremos anuais de amplitude e período ocorrem na época de outono e inverno. Assim como ocorre em outros corpos d'água, o período e a amplitude das ondas tendem a seguir o mesmo comportamento, crescendo e decrescendo conjuntamente. Considerando as medidas de tal estudo, o Quadro 3.2 apresenta os valores representativos mínimos, médios e máximos dos parâmetros das ondas desta laguna.

Quadro 3.2 – Características das ondas da Lagoa dos Patos.

	T [s]	A_w [m]
Valores Mínimos	2,4	0,2
Valores Médios	2,9	0,3
Valores Máximos	3,4	0,4

Fonte: Elaborado pelo Autor com base em TOLDO Jr. *et al.*, 2006.

Também de acordo com Toldo Jr. *et al.* (2006), a maior amplitude já registrada foi de 0,8 metros. Levando em consideração este fato, atribuiu-se uma altura de 1 metro – portanto um coeficiente de segurança de 25% – entre a superfície livre interna da câmara hidro-pneumática em condições não perturbadas e a posição da turbina eólica. Este valor foi utilizado para estimar o volume de ar na câmara v_0 .

Aplicou-se a metodologia anteriormente descrita para otimizar uma *spar buoy* para um período $T = 2,9$ s referente ao período adimensional $T^* = 12,5$. Determinou-se, assim, um raio do flutuador ótimo de $a \approx 0,53$ m e um comprimento submerso da câmara de $L \approx 2,70$ m. O Quadro 3.3 apresenta os valores dos períodos calculados para os demais períodos adimensionais com o mesmo valor de a . Nota-se que o período referente a $T^* = 10$ é levemente inferior ao período mínimo apresentado no Quadro 3.2, enquanto que o período referente a $T^* = 15$ é levemente superior ao máximo. Com as amplitudes de onda respectivas a tais períodos, determinou-se a potência média extraída pela turbina \bar{P}_{turb} em cada um dos três casos.

Quadro 3.3 – Potência média extraída pela turbina com *spar buoy* otimizada para parâmetros médios das ondas.

T^*	T [s]	A_w [m]	\bar{P}_{turb} [W]
10	2,32	0,2	484
12,5	2,90	0,3	2132
15	3,48	0,4	6552

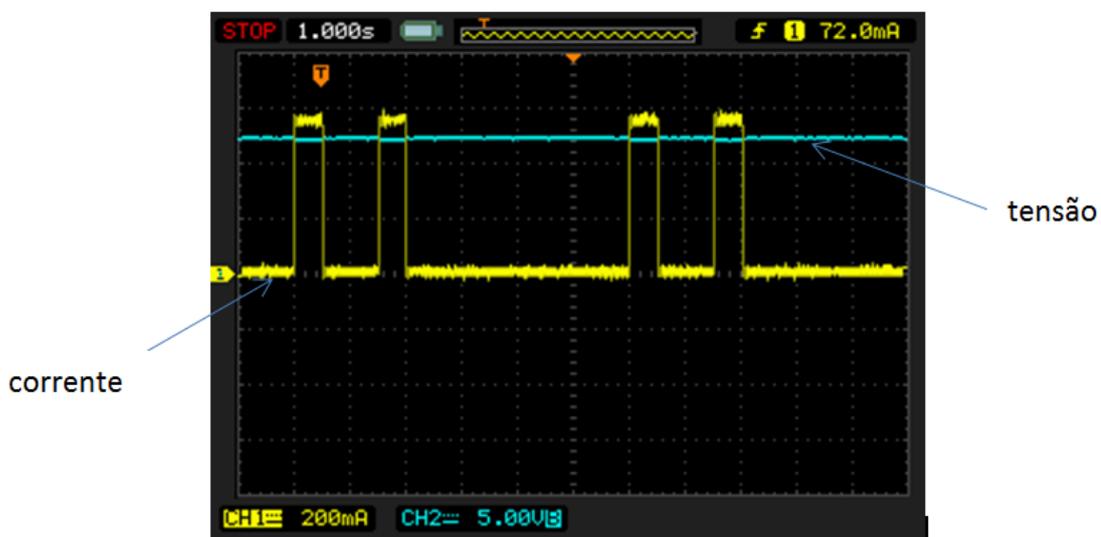
Fonte: AUTOR.

Como a potência elétrica necessária para alimentar os eclipsores que realizam a iluminação das boias é de apenas 1,1 W, é possível afirmar que há potencial suficiente nas ondas da Lagoa dos Patos para alimentar a iluminação de seu canal de balizamento através de *spar buoys*. Devido a limitações da metodologia adotada, pois esta busca otimização, projetou-se *spar buoys* sobredimensionadas. Portanto, caso houvesse um acoplamento com o modelo elétrico, far-se-ia necessário um dissipador de potência, o que é indesejado. Assim sendo, o modelo elétrico, descrito na seção seguinte, não estará diretamente acoplado com o modelo hidro-pneumático. Por fim, observa-se também que o limite de 6 metros para o comprimento da câmara submersa foi respeitado. Caso fosse necessário, poder-se-ia ainda utilizar segmentos de tubo de diferentes seções transversais para diminuir o comprimento da câmara, ou seja, $\beta \neq 0$ vide Figura 3.1 (FALCÃO, HENRIQUES e CÂNDIDO, 2012).

4 SISTEMA ELÉTRICO PARA ALIMENTAÇÃO DE ECLISORES

A função do sistema elétrico é alimentar os eclipsores das boias sinalizadoras a partir do movimento rotativo da turbina. Para isso, precisa-se saber o comportamento da carga. A Figura 4.1 apresenta a curva de corrente elétrica requerida pelo sinalizador quando alimentado por uma fonte de 12 V em corrente contínua num ensaio realizado por Neumann (2016).

Figura 4.1 – Curvas de corrente e tensão num eclipsor obtidas em ensaio.



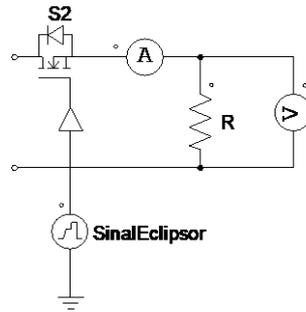
Fonte: NEUMANN, 2016.

Observa-se que a corrente elétrica se comporta como uma função periódica composta por dois degraus de aproximadamente 0,55 A, com duração de 0,5 segundos cada, espaçados no tempo por 1 segundo, seguidos por 4 segundos de corrente nula.

4.1 Modelo do Sistema Elétrico

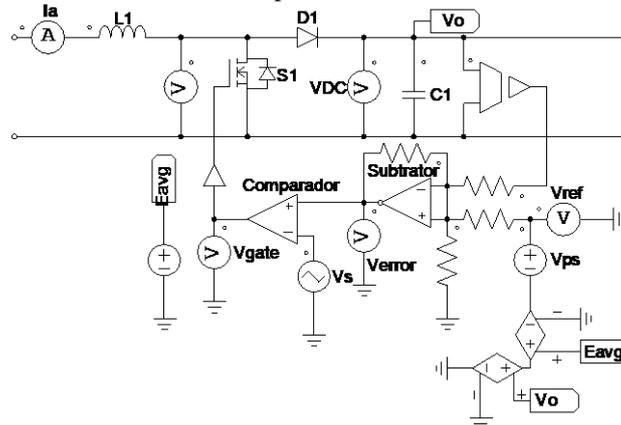
Tendo em vista o ensaio apresentado, a carga foi modelada no *software* PSIM como uma resistência constante de $R = 12 \text{ V} / 0,55 \text{ A} \approx 21,82 \Omega$ com uma chave (S2) que a inclui e retira do circuito de maneira a simular o comportamento observado no ensaio, como mostra a Figura 4.2. Nota-se, também, que essa carga de iluminação apresenta uma potência média \bar{P} de 1,1 W.

Figura 4.2 – Eclipsor modelado como resistência chaveada no sistema elétrico.



Fonte: AUTOR.

Em paralelo à carga está um banco de supercapacitores (C1) cuja respectiva tensão elétrica nominal é de 12 V. Em paralelo este, encontra-se um conversor estático CC-CC do tipo elevador de tensão (*boost*) composto pelos componentes L1, S1 e D1. A chave S1 do conversor *boost* é acionada por um circuito eletrônico de controle da tensão de saída do conversor estático, ou seja, a queda de tensão no banco capacitivo, de modo a mantê-la em 12 V. Tal chave conecta e desconecta o banco ao circuito que é alimentado por um gerador elétrico cuja tensão nominal também é de 12 V. A Figura 4.3 mostra a modelagem do conversor estático, do banco capacitivo e do circuito de controle que contém um amplificador de erro (subtrator) e um comparador PWM.

Figura 4.3 – Conversor *boost*, banco capacitivo e circuito de controle no sistema elétrico.

Fonte: AUTOR.

Uma vez que ambas as equações abaixo são válidas para modo de condução contínua.

$$\frac{\bar{E}}{V_{on}} = 1 - D \quad (4.1)$$

$$D = \frac{V_{ref} - V_o}{V_{ps}} \quad (4.2)$$

onde \bar{E} (ou E_{avg}) é o valor médio da tensão de entrada E que pode ser obtido de forma digital, V_o a tensão de saída instantânea do conversor *boost*, V_{on} a tensão de saída média nominal, D a razão cíclica, V_{ref} a tensão de referência, e V_{ps} o pico da tensão em formato dente de serra V_s . Então, V_{ref} pode ser descrita em função de um fonte de tensão constante e duas fontes de tensão controladas por tensão, respectivamente ao primeiro e aos dois últimos termos do lado direito da Eq. 4.3.

$$V_{ref} = V_{ps} - \frac{\bar{E} V_{ps}}{V_{on}} + V_o \quad (4.3)$$

onde V_{on} é o valor (constante) desejado da tensão de saída.

Atribuiu-se uma frequência de chaveamento no valor típico de 20 kHz, resistências do circuito de monitoramento de 100 k Ω , e indutância de entrada de 10 mH. Posteriormente, será verificado se este valor

de indutância é superior a indutância crítica. Para o banco capacitivo, baseou-se nas características do modelo de supercapacitor XT3585-3R0567-R da fabricante Eaton – Electronics Division, mostrado na Figura 4.4, cuja capacitância é de 555 F e queda de tensão nominal de 3 V.

Figura 4.4 – Supercapacitor adotado, modelo XT3585-3R0567-R.



Fonte: DIGI-KEY.

Para o banco capacitivo possuir 12 V de tensão nominal, ele deverá ser formado por arranjos de quatro capacitores desse modelo em série. Para dispor de uma capacidade de energizar o eclipsor por uma noite inteira, ou seja, por mais de 10 horas ininterruptas – útil em situações de extrema calma ou necessidade de manutenção da *spar buoy* – sugere-se que o banco capacitivo seja composto por quatro desses arranjos em paralelo. O tempo de autonomia do banco pode ser então determinado pela equação da energia de um elemento capacitivo:

$$E_C = \frac{1}{2} CV^2 = Pt \quad (4.4)$$

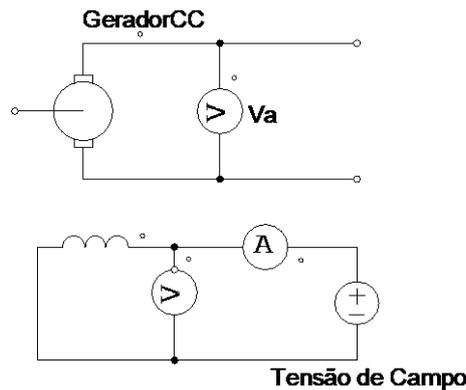
$$t = \frac{CV^2}{2P} \quad (4.5)$$

$$t = \frac{555 \text{ F} \cdot (12 \text{ V})^2}{2 \cdot 1,1 \text{ W}} \approx 10 \text{ h } 5 \text{ min}$$

onde E_C é a energia armazenada, C é a capacitância, V a queda de tensão na carga, P a potência da carga, e t o tempo de autonomia do banco capacitivo.

Para o gerador elétrico, adotou-se a topologia de máquina de corrente contínua de ímãs permanentes. Entretanto, foi utilizado o modelo de máquina elétrica CC com enrolamento de campo independente mostrado na Figura 4.5 pois não há modelo da topologia escolhida no *software* PSIM.

Figura 4.5 – Modelo do gerador CC no sistema elétrico.



Fonte: AUTOR.

Tal modelo de gerador CC é descrito pelas seguintes equações:

$$V_a = E_a - L_a \frac{d}{dt} I_a - I_a R_a \quad (4.6)$$

$$V_f = I_f R_f + L_f \frac{d}{dt} I_f \quad (4.7)$$

$$E_a = L_{af} I_f \omega_m \quad (4.8)$$

$$\tau_{em} = L_{af} I_f I_a \quad (4.9)$$

$$J \frac{d}{dt} \omega_m = -\tau_{em} + \tau_{carga} \quad (4.10)$$

onde V_a é a tensão terminal, E_a a tensão de armadura, L_a a indutância de armadura, I_a a corrente de armadura, R_a a resistência de armadura, V_f é a tensão de campo, I_f a corrente de campo, R_f a resistência de campo, L_f a indutância de campo, L_{af} a indutância mútua entre campo e armadura, ω_m a velocidade mecânica de rotação, τ_{em} o torque eletromagnético, J o momento de inércia, e τ_{carga} o torque da carga.

Adotou-se o modelo DC054B-5 da fabricante Pittman Motors – AMETEK, mostrado na Figura 4.6, que apresenta uma tensão terminal nominal de 12 V, rotação nominal de 2620 rpm ou 274 rad/s, corrente de armadura nominal de 6,4 A, resistência de armadura de 0,3 Ω , indutância de armadura de 0,45 mH, momento de inércia de 31 $\mu\text{kg}\cdot\text{m}^2$, e constante de tensão induzida $k_\phi = L_{af}I_f$ de 3,88 V/krpm ou 37,1 mV/(rad/s).

Figura 4.6 – Máquina elétrica adotada, modelo DC054B-5.



Fonte: PITTMAN MOTORS.

Henriques *et al.* (2013) utilizou em seus estudos conjuntos de turbinas e geradores para *spar buoys* que operam numa faixa de rotação de 1900 a 4500 rpm, portanto considera-se aceitável a rotação do modelo de gerador adotado no presente trabalho.

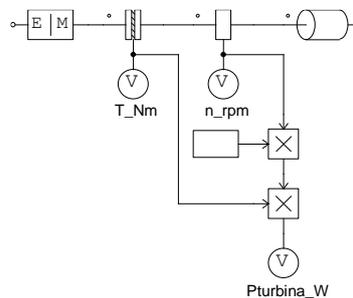
Uma vez que a indutância mútua L_{af} é determinada pela Eq. 4.11, pode-se determinar a corrente nominal de campo I_f do modelo de máquina elétrica de rotor bobinado equivalente à máquina elétrica de ímãs permanentes:

$$L_{af} = \frac{V_t + I_a R_a}{I_f \omega_m} \quad (4.11)$$

$$I_f = \frac{12 \text{ V} - 6,4 \text{ A} \cdot 0,3 \Omega}{3,88 \text{ V/krpm} \cdot 2,62 \text{ krpm}} \approx 0,992 \text{ A}$$

No modelo elétrico, o eixo do gerador CC está conectado a uma carga mecânica – a qual permite incluir momento de inércia da turbina – e sensores de torque, rotação e potência mecânica. Há também uma interface elétrico-mecânica que permite a conexão à excitação da turbina, como mostra a Figura 4.7.

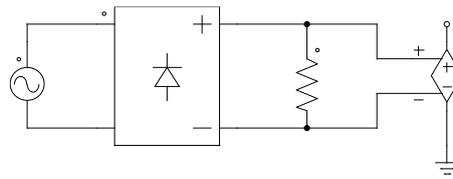
Figura 4.7 – Modelo do eixo no sistema elétrico.



Fonte: AUTOR.

A excitação da turbina, por sua vez, é modelada como uma fonte de tensão em corrente alternada cuja amplitude é igual à velocidade de rotação máxima na qual a turbina está operando. Na sequência há um retificador que retificada a tensão de modo a simular a rotação de turbinas bidirecionais. Por fim, a tensão retificada é acoplada à interface elétrico-mecânica por uma fonte de tensão controlada por tensão. Observa-se que tal interface interpreta o sinal de tensão como velocidade de rotação; caso fosse uma corrente, o interpretaria como torque. A Figura 4.8 apresenta este segmento do modelo elétrico.

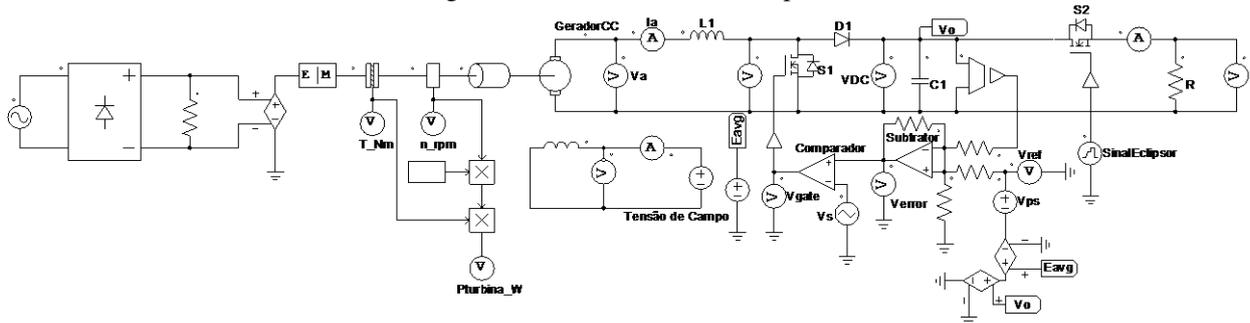
Figura 4.8 – Modelo da excitação da turbina no sistema elétrico.



Fonte: AUTOR.

O modelo elétrico completo pode ser visto na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Modelo elétrico completo.

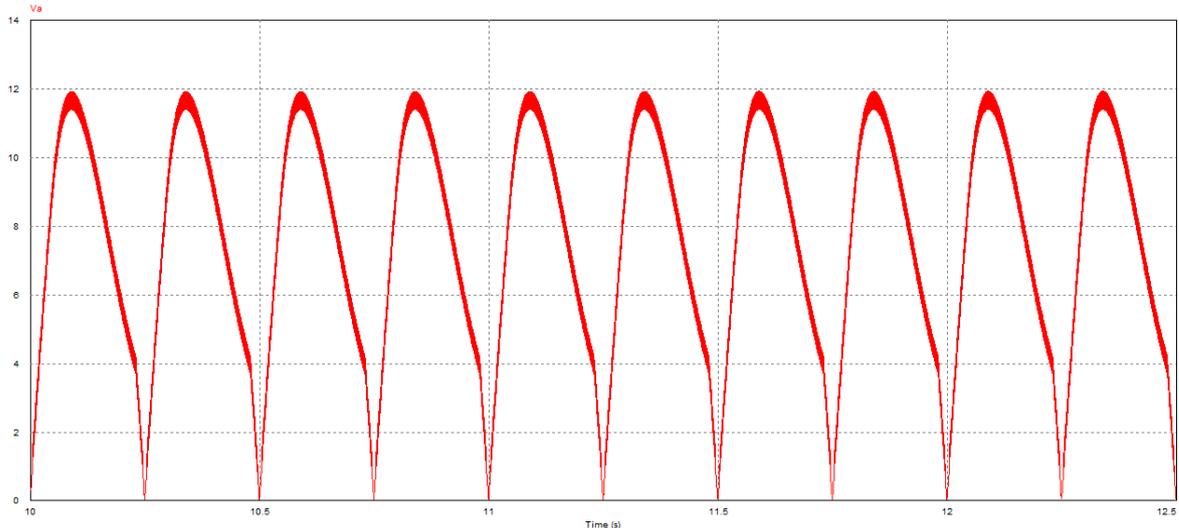


Fonte: AUTOR.

4.2 Simulação para Condições Favoráveis

Simulou-se o sistema elétrico para o caso de condições favoráveis (onda com amplitude $A_w = 0,4$ m e período $T = 3,48$ s) no qual a rotação média da turbina bidirecional é igual a rotação nominal do gerador, de modo que o valor de pico da rotação da turbina é de $(2620 \pi/2)$ rpm ≈ 4115 rpm. A Figura 4.10 mostra o comportamento da tensão terminal para condições favoráveis. Em regime permanente, ou seja, com o capacitor carregado, o gerador apresenta um valor médio da tensão terminal de 7,52 V.

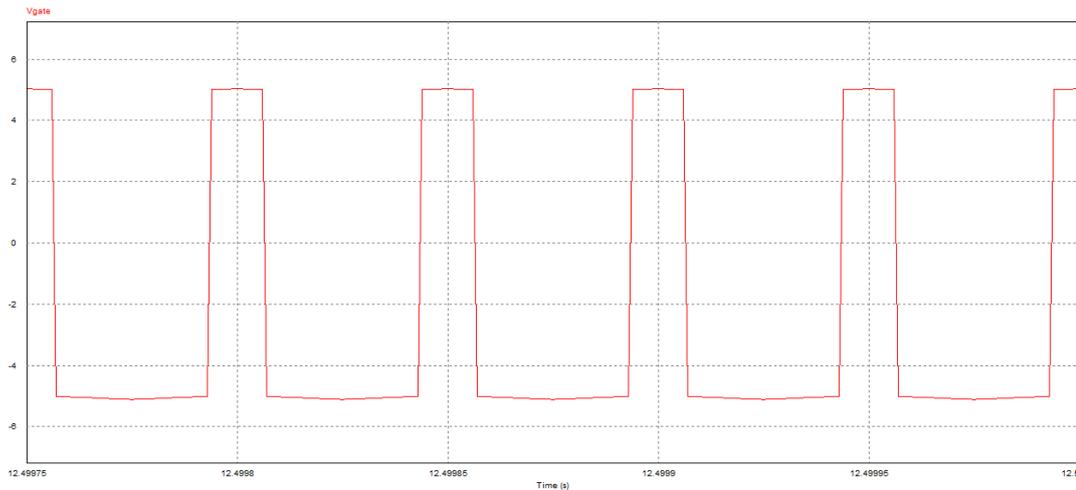
Figura 4.10 – Curva da tensão terminal do gerador para condições favoráveis.



Fonte: AUTOR.

A Figura 4.11 mostra o comportamento da chave do conversor estático. Em regime permanente, observa-se um valor de razão cíclica (*duty cycle*) de aproximadamente 0,281.

Figura 4.11 – Curva da tensão que faz o monitoramento da chave do conversor *boost* para condições favoráveis.



Fonte: AUTOR.

De acordo com Martins e Barbi (2008), para garantir condução contínua, o valor da indutância de entrada de um conversor *boost* deve ser maior que a indutância crítica L_{cr} definida pela Eq. 4.12:

$$L_{cr} = \frac{\bar{E}}{2f\bar{I}_0} D(1 - D) \quad (4.12)$$

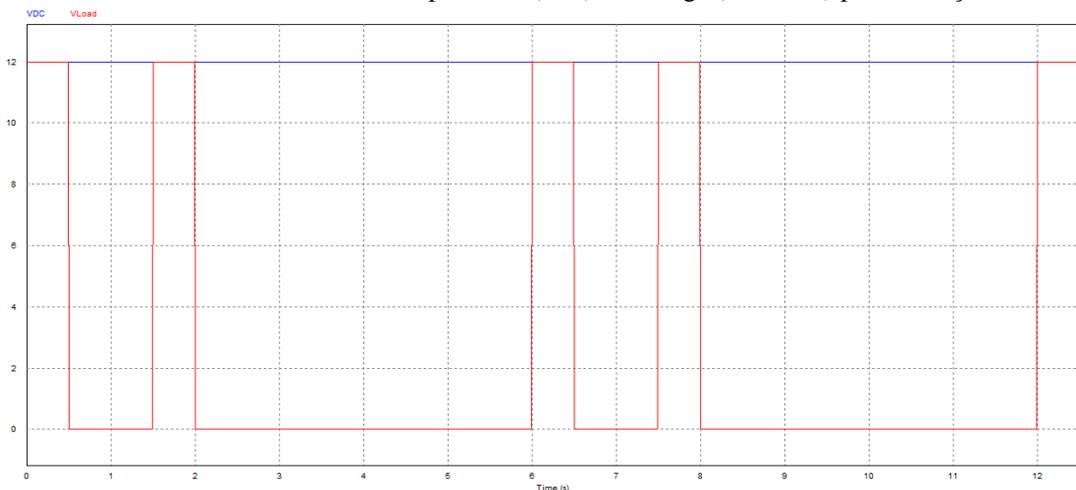
onde \bar{E} é a tensão média terminal do gerador, f a frequência de chaveamento, \bar{I}_0 a corrente média da carga, e D a razão cíclica (*duty cycle*). Substituindo os respectivos valores encontrados em regime permanente, obtém-se:

$$L_{cr} \approx \frac{7,52 \text{ V}}{2(20 \text{ kHz})(91,7 \text{ mA})} 0,281(1 - 0,281) \approx 0,41 \text{ mH}$$

Por se tratar de valor inferior à indutância previamente assumida de 10 mH, pode-se afirmar que o conversor estático operará em modo de condução contínua, considerando o valor da tensão de entrada médio e a corrente média sem ondulação. Como no caso estudado ambos apresentam ondulação, poderá haver intervalos de condução descontínua.

A Figura 4.12 apresenta as curvas de tensão no banco capacitivo e na carga de iluminação para esta simulação. Constata-se que o comportamento dessas grandezas segue o esperado, ou seja, a carga é chaveada com o sinal composto por degraus, conforme experimental apresentado na Figura 4.1, enquanto que a tensão no banco mantém-se no patamar de 12 V.

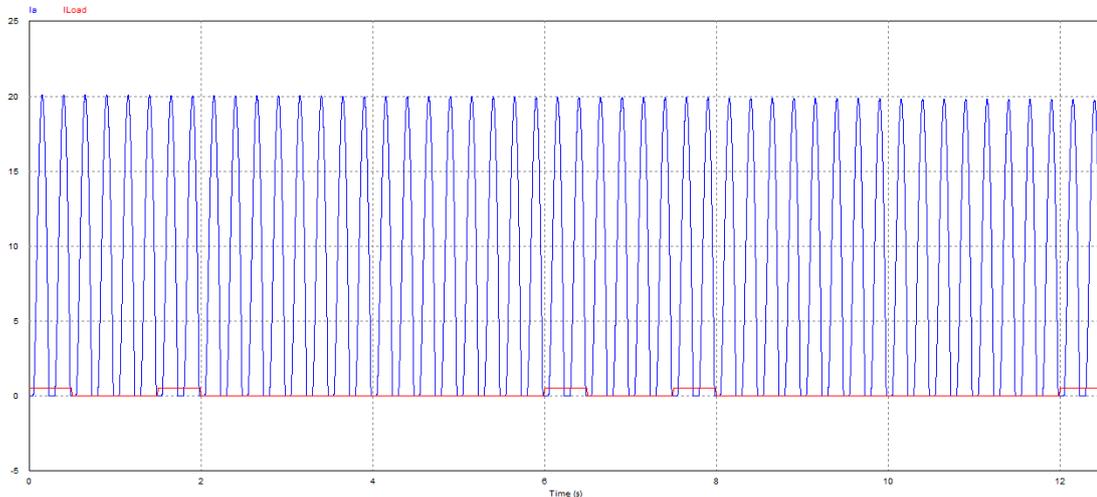
Figura 4.12 – Curvas de tensão no banco de capacitores (azul) e na carga (vermelha) para condições favoráveis.



Fonte: AUTOR.

A curvas de corrente de armadura e da carga para condições favoráveis são apresentadas na Figura 4.13. Observa-se que o comportamento da corrente da carga é controlado pelo chaveamento do sinal composto por degraus, alimentando assim o eclipsor com uma corrente de 0,55 A. Nota-se também que a corrente de armadura possui um valor médio de 8,65 A, atingindo valores de pico de 20,1 A.

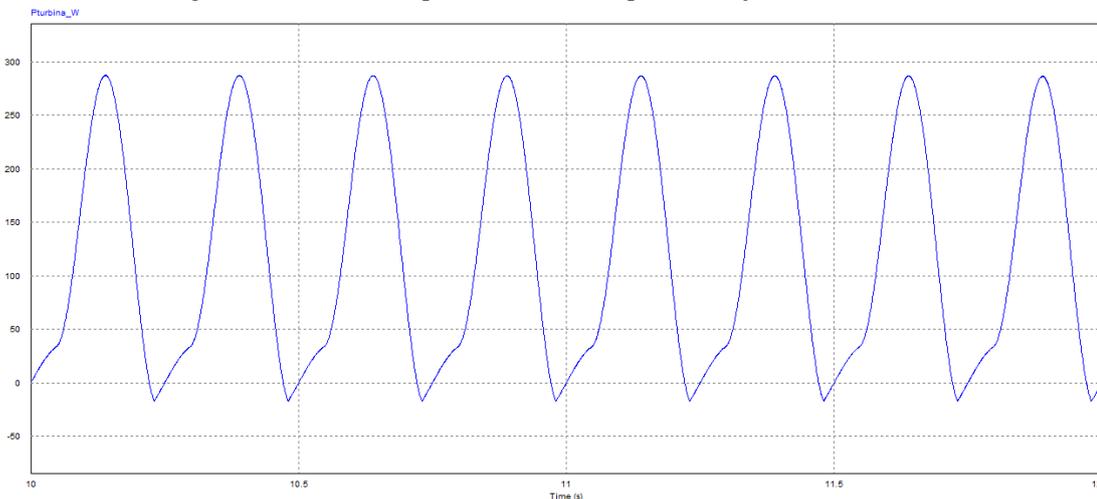
Figura 4.13 – Curvas de corrente de armadura (azul) e da carga (vermelha) para condições favoráveis.



Fonte: AUTOR.

A Figura 4.14 apresenta a curva de potência mecânica no eixo da turbina e do gerador para condições favoráveis em operação durante regime transitório de carga do banco capacitivo. Consta-se que o comportamento da potência possui valores de pico de 291 W, e um valor médio de 116 W. Em regime permanente de operação, o valor da potência mecânica de entrada deve ser significativamente reduzido, chegando a patamares ligeiramente superiores a 1,1 W, que é a potência da carga elétrica. Entretanto, destaca-se que este nível de potência de entrada favorece o rápido carregamento do banco capacitivo.

Figura 4.14 – Curva de potência mecânica para condições favoráveis.



Fonte: AUTOR.

4.3 Simulação para Condições não Favoráveis

Simulou-se o sistema elétrico também para um caso de condições não favoráveis (onda com amplitude $A_w = 0,2$ m e período $T = 2,32$ s), no qual buscou-se relacionar a razão das potências médias para boas e más condições de onda, calculadas no capítulo 3, com a razão entre as velocidades de rotação. De acordo com Henriques *et al.* (2013), a potência extraída pela turbina P_{turb} e sua velocidade de rotação ω_m se correlacionam através da Eq. 4.13.

$$\Pi = \frac{P_{turb}}{\rho \omega_m^3 d^5} \quad (4.13)$$

onde Π é a potência adimensional da turbina, ρ a massa específica do ar e d o diâmetro da turbina.

Da Eq. 4.13, tem-se para uma determinada turbina a seguinte correlação

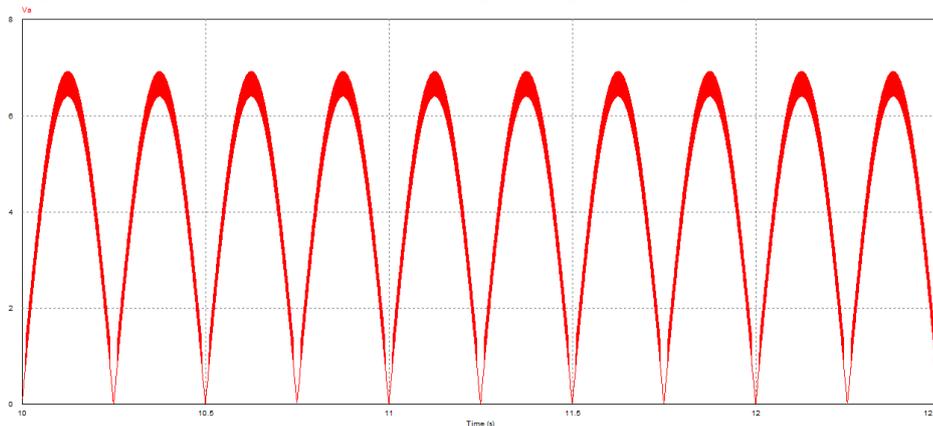
$$\frac{\omega_{m,1}}{\omega_{m,2}} = \left(\frac{P_{turb,1}}{P_{turb,2}} \right)^{1/3} \quad (4.14)$$

Logo, para condições não favoráveis, tem-se

$$\bar{\omega}_{m,nf} = \sqrt[3]{\frac{484}{6552}} \cdot 2620 \text{ rpm} \approx 1099 \text{ rpm}$$

Desse modo, o valor de pico da rotação da turbina é de aproximadamente 1727 rad/s. A Figura 4.15 mostra o comportamento da tensão terminal para o caso de condições não favoráveis em regime permanente, ou seja, com o capacitor carregado, no qual o gerador apresenta um valor médio de tensão terminal de 4,32 V.

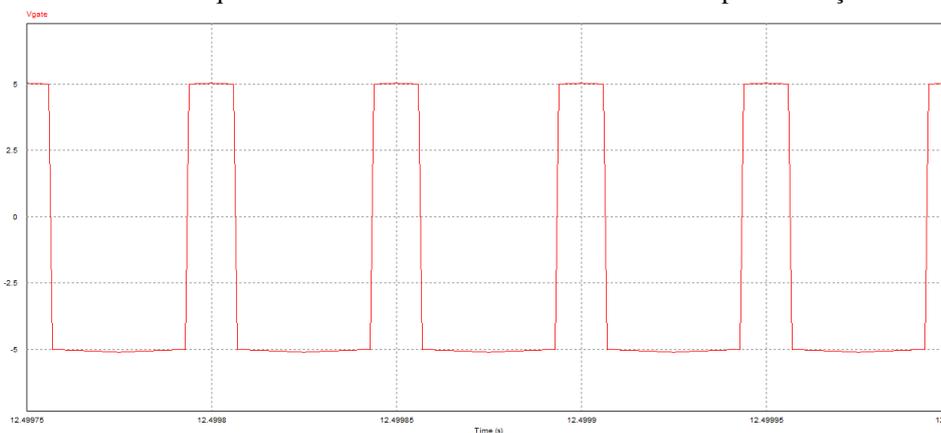
Figura 4.15 – Curva da tensão terminal do gerador para condições não favoráveis.



Fonte: AUTOR.

Na sequência são apresentadas figuras com resultados para operação com o banco capacitivo já carregado em 12 V, isto é, após regime transitório. O comportamento da chave do conversor estático para condições não favoráveis segue comportamento semelhante ao observado para condições favoráveis, como mostra a Figura 4.16, devido a ambos os casos estarem em regime permanente. Observa-se, inclusive, o mesmo valor de razão cíclica (*duty cycle*) de aproximadamente 0,281.

Figura 4.16 – Curva da tensão que faz o controle da chave do conversor *boost* para condições não favoráveis.



Fonte: AUTOR.

Utilizando a Eq. 4.12, determina-se o valor da indutância crítica de entrada para condições não favoráveis $L_{cr,nf}$:

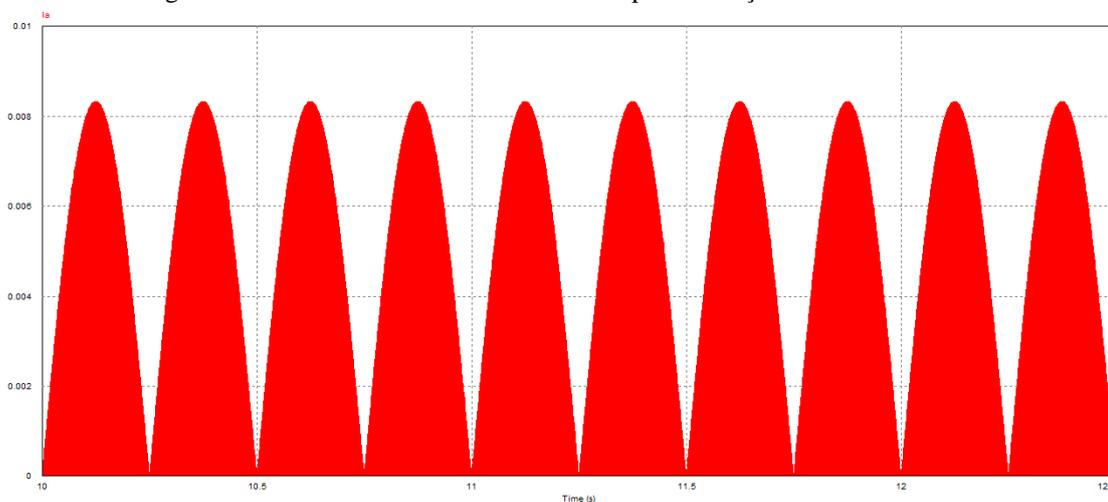
$$L_{cr,nf} \approx \frac{4,32 \text{ V}}{2(20 \text{ kHz})(91,7 \text{ mA})} 0,281(1 - 0,281) \approx 0,24 \text{ mH}$$

Observa-se que esta indutância é inferior àquela calculada para o caso favorável. Entretanto, ressalta-se que a ondulação tanto da corrente de carga como a ondulação da tensão de entrada podem levar a operação em modo descontínuo.

Como a presente simulação considerou o banco capacitivo carregado, as curvas de tensão no banco e na carga de iluminação bem como a curva da corrente da carga terão o comportamento esperado, assim como mostrado nas Figuras 4.12 e 4.13 da seção 4.2.

A curva de corrente de armadura para condições não favoráveis é apresentada na Figura 4.17. Observa-se que a corrente de armadura possui um valor médio de apenas 2,7 mA, atingindo valores de pico de 8,3 mA.

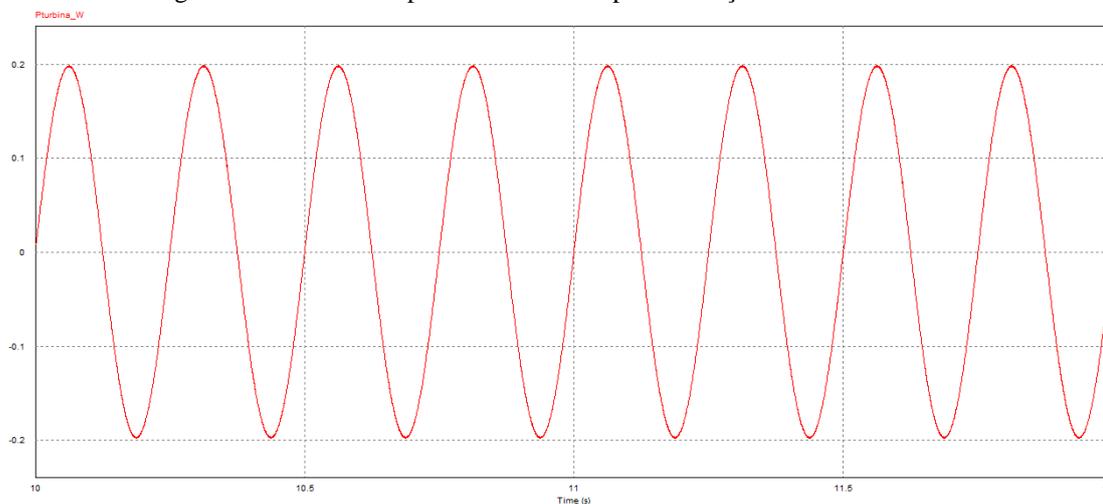
Figura 4.17 – Curva da corrente de armadura para condições não favoráveis.



Fonte: AUTOR.

A Figura 4.16 apresenta a curva de potência mecânica no eixo para condições não favoráveis e operação com o banco capacitivo carregado. Constata-se uma potência líquida aproximadamente nula, o que é um indício de que os capacitores estão alimentando a carga sem que um nível considerável de potência seja absorvido do gerador.

Figura 4.16 – Curva de potência mecânica para condições não favoráveis.



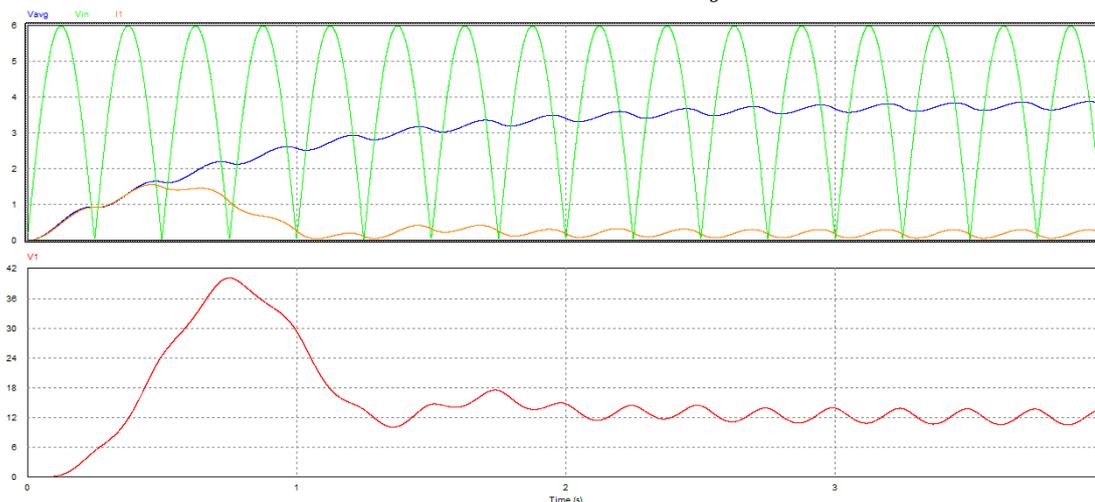
Fonte: AUTOR.

4.4 Simulação de Carregamento do Banco Capacitivo

Na construção do modelo de controle de tensão do banco capacitivo, aumentou-se a frequência e reduziu-se a capacitância para diminuir o tempo de simulação. Além disso, simplificou-se o circuito através da substituição do gerador CC por uma fonte sinusoidal com retificador, e da remoção do chaveamento da carga. Entretanto, todos os modelos de regulação que se demonstraram bem-sucedidos para esta topologia não se mostraram tão eficazes na topologia original.

Analisou-se o comportamento do modelo de regulação durante regime de carregamento do banco capacitivo de 1 mF inicialmente descarregado para uma carga não chaveada. A Figura 4.17 apresenta, para uma entrada de 6 V, as curvas de tensão no capacitor (V_1), a corrente de armadura (I_a), a tensão de entrada (V_{in}) e a média da tensão entrada (V_{avg}) calculada por um circuito à parte.

Figura 4.17 – Curvas de V_1 (vermelho), I_a (laranja), V_{in} (verde) e V_{avg} (azul) para regime de carregamento.

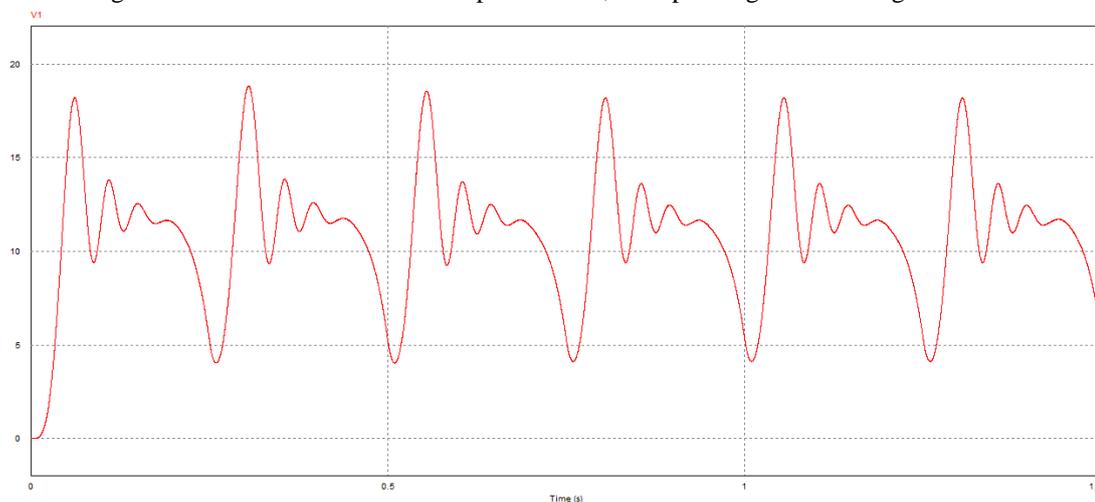


Fonte: AUTOR.

Ao longo da simulação, o valor da tensão média V_{avg} aproxima-se do valor médio da tensão de entrada (3,82 V). Como esperado, o valor médio da tensão de saída V_1 aproxima-se de 12 V. Após 4 segundos de simulação, V_{avg} oscila em torno de 3,76 V enquanto que V_1 oscila em torno de 12,1 V. Observa-se também que o conversor estático opera em modo de condução contínua, uma vez que I_a não assume valor nulo em regime permanente.

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram a regulação de tensão no capacitor para capacitâncias de 0,1 mF e 1 F, respectivamente.

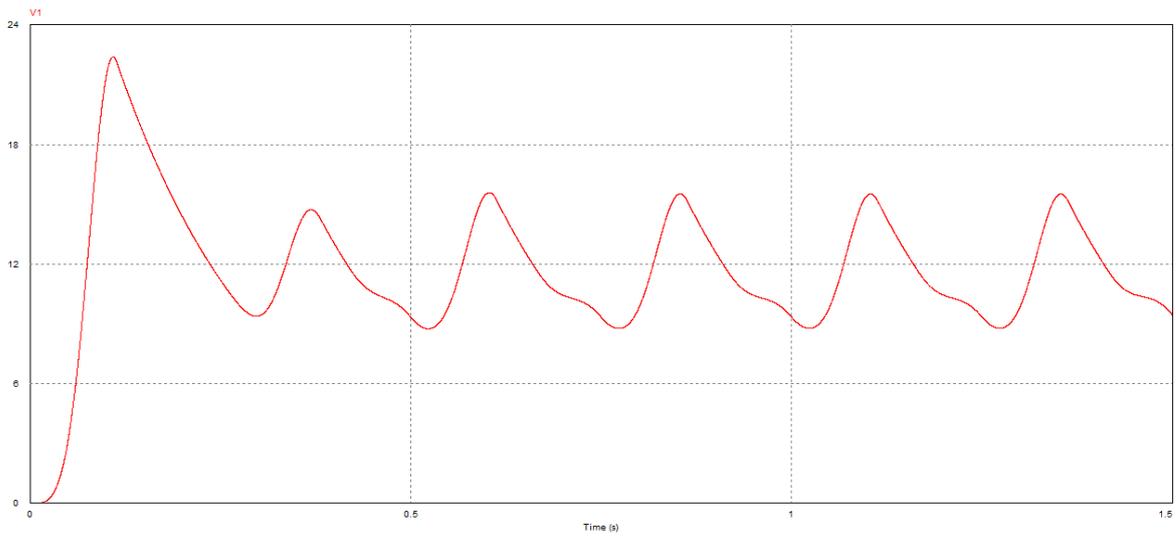
Figura 4.18 – Curva da tensão no capacitor de 0,1 mF para regime de carregamento.



Fonte: AUTOR.

Em ambas as simulações, a tensão no capacitor demonstrou-se tender a oscilar em torno de 11,5 V ao invés do valor esperado de 12 V.

Figura 4.19 – Curva da tensão no capacitor de 1 mF para regime de carregamento.



Fonte: AUTOR.

5 CONCLUSÃO

Ao longo do presente trabalho, buscou-se uma alternativa autônoma e tecnicamente viável aos sistemas fotovoltaicos utilizados para alimentação do sistema de sinalização de boias balizadoras da Lagoa dos Patos que não degrade tanto o meio ambiente tampouco seja atraente a vândalos. Tal preocupação decorre da utilização de baterias automotivas como armazenamento de energia de tais sistemas, as quais são constituídas de materiais tóxicos e atraem depredações às boias por parte de vândalos. Os danos à essa sinalização prejudicam aqueles que percorrem a hidrovia em condições de má visibilidade – os colocando em risco de saírem da faixa navegável e virem a encalhar – além de causar custos financeiros envolvidos com a manutenção dos sistemas de sinalização.

Após estudar as fontes de energia disponíveis nesse ambiente bem como suas respectivas tecnologias de dispositivos conversores, julgou-se que o conversor flutuante de coluna d'água oscilante (OWC) do tipo *spar buoy* seria uma alternativa adequada para extinguir o problema em questão. Através de modelo hidro-pneumático, obtiveram-se as dimensões otimizadas do dispositivo bem como a estimativa de potência convertida das ondas da Lagoa dos Patos – com seus períodos e amplitudes correspondentes – em potência mecânica no eixo da turbina. Verificando que tal potência é muito superior àquela demandada pelo sistema de iluminação, inferiu-se que o OWC projetado seria capaz de atender à carga.

Modelou-se, também, o sistema elétrico constituído pela excitação da turbina no eixo, o próprio eixo, um gerador CC, um conversor estático com controle de tensão de saída, um banco capacitivo para armazenamento da energia, e a carga de iluminação. Adotou-se, então, um gerador cujas tensão e rotação nominais são coerentes com a sua finalidade. Também foi selecionado um modelo comercial de supercapacitor e dimensionado o banco capacitivo para uma autonomia de aproximadamente uma noite na latitude da laguna. Simulou-se o sistema elétrico considerando: (1) uma turbina projetada para fornecer uma rotação média equivalente à rotação nominal do gerador sob condições de ondas favoráveis da Lagoa dos Patos, e (2) a mesma turbina operando sob condições não favoráveis. Observou-se, por fim, que o sistema elétrico é capaz de alimentar a carga elétrica em ambas as situações.

Assim sendo, julga-se que foi alcançado com êxito o objetivo geral de verificar a viabilidade técnica de uma alternativa ao sistema autônomo atualmente utilizado para energizar a iluminação de boias balizadoras. Já os objetivos específicos de modelagem foram divididos em duas etapas: uma mecânica e outra elétrica. O modelo mecânico adotado possui limitações, como já mencionado, pois um modelo mais complexo dependeria de simulações numéricas, o que está fora do escopo do presente trabalho. Por isso, uma integração dos dois sistemas não foi possível. O sistema elétrico proposto também pode ser refinado e alternativas de conversores reguladores podem ser avaliadas.

A partir do que foi apresentado neste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

1. Aquisição de dados de amplitude e período das ondas da Lagoa dos Patos por um maior período de modo a apresentar maior confiabilidade para o estudo;
2. Análise numérica do modelo hidro-pneumático para consideração de efeitos não lineares;
3. Projeto dedicado de turbina com dimensionamento adequado para atendimento da carga;
4. Acoplamento entre modelos mecânico e elétrico;
5. Refinamento do método de controle e regulação;
6. Reconsideração do tempo de autonomia necessário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, L. E. **Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Oceânicas no Litoral do Rio Grande do Sul**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CAMPOS, G. A. P. **Estudo de Mecanismo Aplicado na Geração de Energia A Partir de Correntes Oceânicas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- DIGI-KEY. **XT3585-3R0567-R Eaton**. Disponível em: <<https://www.digikey.com/product-detail/en/eaton-electronics-division/XT3585-3R0567-R/283-4792-ND>> Acesso em: 27 novembro 2018.
- EVANS, D. V. The oscillating water column wave-energy device. **Journal of the Institute of Mathematics and its Applications**, v. 22, p. 423-433, 1978.
- FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization - A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 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**, 2012.
- FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, Jan. 2016.
- GARCÍA, F. H. **Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- GATO, L. M. C.; FALCÃO, A. F. O. Aerodynamics of the Wells turbine. **International Journal of Mechanical Sciences**, Jan. 1988.
- GATO, L. M. C.; FALCÃO, A. F. O. Performance of the Wells turbine with double row of guide vanes. **JSME International Journal Series II**, May 1990.
- HENRIQUES, J. C. C. *et al.* In: 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2013, Nantes, France. Air Turbine and Primary Converter Matching in Spar-Buoy Oscillating Water Column Wave Energy Device. **Proceedings ... ASME**, June 2013.
- HENRIQUES, J. C. C. *et al.* Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys. **Energy**, 2016.
- KOOVERJI, B. **Pneumatic Power Measurement of an Oscillating Water Column Converter**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculty of Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2014.
- MARTINS, D.C.; BARBI, I. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. Ed. dos Autores, 3ª edição, 2008.
- NEUMANN, V. A. **Conversor de Energia Elétrica a Partir de Movimento Mecânico Oscilatório**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- PECHER, A.; KOFOED, J.P. **Handbook of Ocean Wave Energy**. Springer Open, 2017.
- PITTMAN MOTORS. **DC054B Brushed Rotary Motor**. Disponível em: <<https://www.haydonkerkpittman.com/products/motors/brushed-dc-motors/dc054b>> Acesso em: 27 novembro 2018.
- RUSU, E.; ONEA, F. A review of the technologies for wave energy extraction. **Clean Energy**, v. 2, n. 1, p. 10-19, Mar. 2018.
- TOLDO Jr., E. R. *et al.* **Wave Prediction Along Lagoa do Patos Coastline, Southern Brazil**. 2006.