

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

LUCAS BIZOTTO NÜHRICH

**PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERSORES ESTÁTICOS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO MOVIMENTO DE ONDAS
OCEÂNICAS**

Porto Alegre

2019

LUCAS BIZOTTO NÜHRICH

**PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERSORES ESTÁTICOS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO MOVIMENTO DE ONDAS
OCEÂNICAS**

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert

Porto Alegre

2019

LUCAS BIZOTTO NÜHRICH

**PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CONVERSORES ESTÁTICOS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO MOVIMENTO DE ONDAS
OCEÂNICAS**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert

BANCA EXAMINADORA

Prof. Paulo Roberto Eckert, UFRGS

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

Eng. Ígor Martins dos Santos

Engenheiro pelo Instituto Federal Sul-rio-grandense – Pelotas, Brasil

Prof. Igor Pasa Wiltuschnig, UFRGS

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me incentivou a estudar e apoiou minhas escolhas, visando meu crescimento pessoal, profissional e minha felicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Flávio Roberto Nührich e Mercedes Bizotto Nührich pelo apoio e paciência durante toda minha vida acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, pelos inúmeros momentos passados juntos na busca pela formação em engenharia elétrica, discutindo dúvidas e compartilhando conhecimentos já aprendidos, sem os quais a caminhada teria sido muito mais complicada.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade e apoio durante o curso.

À todos os professores, pela contribuição na minha formação.

“I am a walking affirmation that imagination,
focus and patience get you closer to your
aspiration.”

Tariq Luqmaan Trotter

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma visão geral de sistemas de geração de energia elétrica a partir do movimento de ondas oceânicas e segue com foco em um desses sistemas, o de coluna de água oscilante. São expostos dados sobre estado da arte na área e sobre plantas instaladas pelo mundo, assim como as principais vantagens e impactos ambientais desse tipo de método de geração. Diferentes artigos elaborados na última década são citados e brevemente analisados para evidenciar os avanços que a comunidade científica tem realizado na área. É proposto um circuito de potência composto de conversores estáticos controlados e bateria para armazenamento de energia com vistas à utilização em sistema de coluna de água oscilante de forma a controlar diversos elementos de interesse, entre eles a tensão em uma carga, tensão de entrada do sistema através da variação de corrente de enrolamento de campo no gerador e otimização da potência entregue ao sistema. Variáveis de projeto desse circuito são evidenciadas e diferentes tipos de simulação são realizados e analisados a fim de chegar a conclusões sobre seu funcionamento. De forma geral, a solução proposta apresenta desempenho satisfatório para valores elevados de velocidade de rotação no gerador, com baixo erro entre valores reais e valores de referência das variáveis do sistema. Conforme a referida velocidade de rotação decresce, esse erro aumenta, começando a apresentar desvios significativos em situações que modelam um evento de oceano calmo e ondas fracas. Entretanto, entende-se que isso não representa um problema, pois esta condição representa uma situação onde o potencial de conversão de energia é muito baixo. Portanto, a solução proposta apresenta potencial de aplicabilidade em sistema de conversão de energia de ondas em energia elétrica em sistemas com coluna de água oscilante de operação isolada, isto é, sem interconexão com uma rede elétrica externa.

Palavras-Chaves: Armazenamento de energia; Coluna de água oscilante; Conversores estáticos; Energia das ondas; Geração de energia.

ABSTRACT

This work presents an overview of electric power generation systems based on ocean waves and focuses on one of these systems, the oscillating water column system. Data are presented on state of art in this field and on plants installed around the world, as well as the main advantages and environmental impacts of this type of generation method. Different articles written in the last decade are cited and briefly analyzed to highlight the advances the scientific community has made in the area. A power circuit consisting of controlled converters and battery for energy storage for use in an oscillating water column system is proposed to control various elements of interest, including load voltage, system input voltage due to generator field winding current variation and optimization of the power delivered to the system. Design variables of this circuit are highlighted and different types of simulations are performed and analyzed in order to reach conclusions about its behavior. In general, the proposed solution presents satisfactory performance for high values of generator rotation speed, with low error between real values and reference values of system variables. As the speed of rotation decreases, this error increases, starting to show significant deviations in situations that model an event of calm ocean and weak waves. However, it is understood that this is not a problem, as this condition represents a situation where the energy conversion potential is very low. Therefore, the proposed solution has potential applicability in the wave energy conversion system in electrical energy using oscillating water column with isolated operation, i.e., without interconnection with an external power grid.

Keywords: Energy generation; Energy storage; Oscillating water column; Static converters; Wave energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As várias tecnologias de energia de ondas.....	18
Figura 2 - Princípio de funcionamento de um sistema coluna de água oscilante.....	19
Figura 3 - Representação da turbina de Wells.....	20
Figura 4 - a) Exemplo de OWC fixo <i>onshore</i> . b) Exemplo de OWC flutuante.....	21
Figura 5 - Planta OWC LIMPET, 500 kW nominal, instalada no ano 2000 na ilha da Islay, Escócia.....	23
Figura 6 - Estação flutuante Oceanlinx MK3, Austrália.....	23
Figura 7 - Sistema de conversão de energia de ondas com elemento de armazenamento de energia por baterias proposto.....	27
Figura 8 - Circuito com armazenamento de energia com bateria proposto para suavização de potência de saída para a rede e controle de velocidade de rotação da turbina.....	28
Figura 9 - Modelo de controle preditivo para retificador ativo e inversor proposto.....	29
Figura 10 - Circuito com supercapacitor proposto para controle de velocidade da turbina....	30
Figura 11 - Sistema de controle do conversor CA/CC.....	31
Figura 12 - Sistema de controle do conversor CC/CA do lado do gerador.....	32
Figura 13 - Circuito de armazenamento híbrido com bateria e supercapacitor proposto para suavização de potência de alimentação para carga isolada.....	34
Figura 14 - Circuito e sistema de aquisição proposto para otimização de fluxo de potência utilizando o método MPPT.....	34
Figura 15 - Topologia de circuito de potência proposta para solução do problema.....	37
Figura 16 - Diagrama de blocos da solução proposta.....	39
Figura 17 - Ponte de Graetz.....	40
Figura 18 - Conversor CC/CC buck-boost.....	40
Figura 19 - Conversor CC/CC <i>buck</i>	42
Figura 20 - Controle do conversor <i>buck</i> empregando modulação PWM.....	45
Figura 21 - Controle do conversor <i>buck-boost</i> empregando modulação PWM.....	45

Figura 22 - Potência <i>versus</i> velocidade de rotação para diferentes estados marítimos (linhas azuis) e máxima potência para cada valor de velocidade de rotação (linha vermelha) para uma turbina com rotor de diâmetro $d = 0,20$ m.....	46
Figura 23 - Topologia completa do circuito proposto.....	49
Figura 24 - Diagrama de blocos do sistema em condição de ω assumindo valores livres.....	51
Figura 25 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 4500$ rpm: (a) ω ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;	53
Figura 26 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 4500$ rpm: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;	54
Figura 27 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 2500$ rpm: (a) ω ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;	55
Figura 28 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 2500$ rpm: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;	56
Figura 29 - Simulação com velocidade de rotação variando entre constante conhecidas: (a) ω ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;	59
Figura 30 - Simulação com velocidade de rotação variando entre constantes conhecidas: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;	60
Figura 31 - Simulação com velocidade de rotação livre para único tipo de onda: (a) ω e ω_{ref} ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;	63
Figura 32 - Simulação com velocidade de rotação livre para único tipo de onda: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;	64
Figura 33 - Simulação com velocidade de rotação livre para diversos tipos de onda: (a) ω e ω_{ref} ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;	67
Figura 34 - Simulação com velocidade de rotação livre para diversos tipos de onda: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;	68

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω fixado em valores únicos.....	56
Quadro 2 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω variando entre valores predefinidos.....	60
Quadro 3 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω livre sob efeito de única intensidade de onda.....	64
Quadro 4 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω livre sob efeito de diversas intensidades de onda.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BES	Armazenamento de energia por bateria (<i>Battery Energy Storage</i>)
CA	Corrente alternada
C_{bat}	Capacitor que modela de forma simplificada uma bateria (F)
C_{buck}	Capacitor do conversor <i>buck</i> (F)
$C_{buck-boost}$	Capacitor do conversor <i>buck-boost</i> (F)
CC	Corrente contínua
D	<i>Duty cycle</i>
E	Tensão de entrada em um conversor CC/CC (V)
ESS	Sistema de armazenamento de energia (<i>Energy Storage System</i>)
f	Frequência de chaveamento da chave estática (Hz)
$f_{gerador}$	Frequência da tensão induzida do gerador (Hz)
I_{campo}	Corrente de enrolamento de campo do gerador (A)
I_o	Corrente de saída em um conversor CC/CC (A)
L_{buck}	Indutor do conversor <i>buck</i> (H)
$L_{buck-boost}$	Indutor do conversor <i>buck-boost</i> (H)
MAF	Filtro de média móvel (<i>Moving Average Filter</i>)
MPC	Controle de modelo preditivo (<i>Model Predictive Control</i>)
MPPT	Rastreamento de ponto de máxima potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
OWC	Coluna de água oscilante
P_{inst}	Potência instantânea entregue à bateria (W)
P_{ref}	Potência de referência (W)
PTO	<i>Power take off</i>
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse-Width Modulation</i>)
R_{carga}	Resistor de carga do circuito (Ω)

t	Tempo de simulação (s)
V_a	Tensão eficaz na fase a (V)
V_b	Tensão eficaz na fase b (V)
V_{bat}	Tensão da bateria (V)
V_c	Tensão eficaz na fase c (V)
V_{erro}	Tensão de saída do comparador de erro (V)
V_{fase}	Tensão eficaz de fase do gerador (V)
V_{linha}	Tensão eficaz de linha do gerador (V)
V_{maxDS}	Amplitude máxima da onda dente de serra (V)
V_o	Tensão de saída (V)
VOC	Controlador orientado por tensão (<i>Voltage Oriented Control</i>)
V_{ref}	Tensão de referência (V)
WEC	Conversor de energia das ondas (<i>Wave Energy Converter</i>)
ΔV_{Cmax}	Ondulação máxima de tensão no capacitor (V)
ΔI_{Lmax}	Varição máxima de corrente no indutor (A)
ΔI_{max}	Ondulação máxima da corrente de saída (A)
ω	Velocidade de rotação da turbina (rpm)
ω_{nom}	Velocidade nominal de rotação da turbina (rpm)
ω_{ref}	Velocidade de referência de rotação da turbina (rpm)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	16
1.1.1. SISTEMAS DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE.....	18
1.1.2. EXEMPLOS DE PLANTAS EM OPERAÇÃO.....	22
1.1.3. IMPACTOS AMBIENTAIS.....	23
1.2. OBJETIVO.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1. SISTEMAS CONECTADOS À REDE.....	26
2.1.1. CONTROLE EM CONJUNTO COM BANCO DE BATERIAS.....	27
2.1.2. CONTROLE DE MODELO PREDITIVO EM CONJUNTO COM BANCO DE BATERIAS.....	28
2.1.3. CONTROLE DE VELOCIDADE DA TURBINA EM CONJUNTO COM SUPERCAPACITOR.....	29
2.2. SISTEMAS EM OPERAÇÃO ISOLADA.....	33
2.2.1. SISTEMA COM ELEMENTOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	33
2.2.2. MAXIMUM POWER POINT TRACKING.....	34
3. SOLUÇÃO PROPOSTA.....	37
3.1. CONVERSOR CA/CC DE ENTRADA.....	39
3.2. CONVERSOR CC/CC PARA CARREGAMENTO DA BATERIA.....	40
3.3. CONVERSOR CC/CC PARA ALIMENTAÇÃO DA CARGA.....	41
3.4. CONVERSOR CC/CC PARA ALIMENTAÇÃO DO ENROLAMENTO DE CAMPO.....	43
3.5. CONTROLE DOS CONVERSORES CC/CC.....	44
3.5.1. CONTROLE DO CONVERSOR CC/CC BUCK-BOOST PARA CARREGAMENTO DA BATERIA.....	45
3.5.2. CONTROLE DO CONVERSOR CC/CC BUCK PARA ALIMENTAÇÃO DA CARGA.....	47
3.5.3. CONTROLE DO CONVERSOR CC/CC BUCK PARA ALIMENTAÇÃO DO ENROLAMENTO DE CAMPO.....	47
3.6. SOLUÇÃO COMPLETA.....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR FIXADA.....	51
4.2. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR VARIÁVEL COM VALORES PREDEFINIDOS.....	57
4.3. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR LIVRE SOB EFEITO DE UMA ÚNICA INTENSIDADE DE ONDA.....	62

4.4. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR LIVRE SOB EFEITO DE DIVERSAS INTENSIDADES DE ONDA.....	65
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

Com o advento do conceito de sustentabilidade, a ideia de uso dos recursos naturais para a satisfação das necessidades presentes sem comprometer a satisfação das necessidades futuras passou a ser algo discutido em primeira ordem pelas principais nações. Um dos mecanismos desenvolvidos para uma melhor eficiência na conservação é o uso de fontes de energias renováveis que tenham pouco ou nenhum impacto direto ao meio ambiente.

A energia das ondas é uma fonte de energia renovável vasta, sustentável e de baixo impacto ambiental que está ganhando popularidade na comunidade científica. Numerosos estudos têm sido conduzidos e diversas tecnologias foram desenvolvidas para converter energia de ondas em eletricidade desde o meio do século XX. Entretanto, a implementação prática dessas tecnologias tem se mostrado desafiadora, resultando em variados graus de sucesso.

No mundo, existem inúmeras boias espalhadas pelo oceano pelos mais diversos motivos, entre eles a medição de condições climáticas e geográficas de determinado local, sinalizações visuais e sonoras, entre outros. Para essas aplicações, sensores de variados tipos são utilizados acoplados às boias. Esses sensores são, muitas vezes, alimentados por baterias, que por sua vez devem ser carregadas periodicamente. Para essa recarga ser feita, muitas vezes a remoção da bateria é necessária, gerando custo adicional e horas de trabalho gastas.

Tendo em vista o movimento incessante das ondas oceânicas e o potencial energético presente neste movimento, este trabalho visa estudar a viabilidade de fornecer carga às baterias de maneira eficiente a partir desse fenômeno. A implementação das alternativas propostas implicaria em maior confiabilidade do sistema devido ao menor risco de descarregamento, redução de custo para carregamento de bateria e redução da necessidade de interferência humana para manutenção, além de ser uma ideia eco-amigável e sustentável .

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

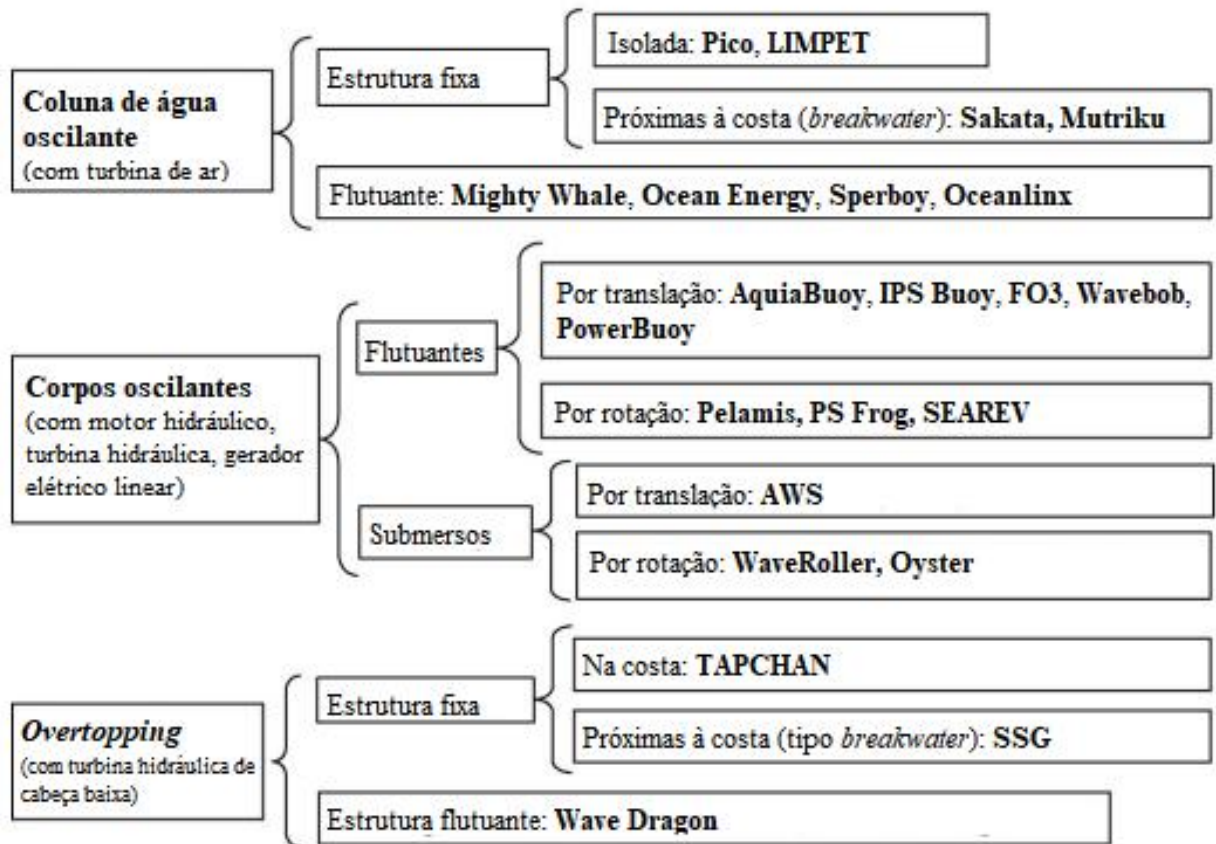
Segundo Muetze e Vining (2006): “O oceano contém uma tremenda quantidade de energia inexplorada. Embora a crise do petróleo da década de 1970 tenha aumentado o interesse em energia oceânica, relativamente poucas pessoas ouviram falar dele como alternativa de energia viável.” De fato, as represas hidroelétricas são, de longe, o tipo mais conhecido de produção em massa de energia elétrica à base de água; porém, o oceano é também uma fonte de energia baseada em água altamente explorável. A energia oceânica vem

em uma variedade de formas, como aberturas geotérmicas, correntes oceânicas e ondas. A maioria dos recursos comercialmente viáveis que foram estudados até agora são correntes oceânicas e ondas, que sofreram com desenvolvimento comercial limitado. As estimativas concluem que correntes de marés combinadas contêm cerca de 5 TW de energia, que fica na escala do consumo total de energia do mundo. Há aproximadamente 8.000-80.000 TWh/ano ou 1-10 TW de energia das ondas em todo o oceano, e a energia das ondas fornece 15-20 vezes mais energia disponível por metro quadrado em relação a de vento ou solar (MUETZE; VINING, 2006).

As ondas do oceano surgem da transferência de energia do sol ao vento e depois à água. A energia solar cria vento que sopra sobre o oceano, convertendo energia eólica em energia em forma de onda. Essa energia das ondas pode viajar milhares de quilômetros com poucas perdas. Mais importante, as ondas são regulares fonte de energia com uma intensidade que pode ser prevista vários dias antes de sua chegada, mais previsível do que a energia eólica ou solar. Apesar disso, a grande variabilidade da característica das ondas continua sendo uma das maiores desvantagens do estudo do fenômeno, já que apresenta variação em função do tempo em diversas escalas: de onda para onda, com o estado do mar e de mês para mês - apesar de padrões com variações sazonais poderem ser reconhecidos (MUETZE; VINING, 2006).

De acordo com Campos (2015), conversores de energia das ondas (*Wave Energy Converters* ou WECs) são costumeiramente classificados em Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column* ou 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. A Figura 1 ilustra as diferentes classificações de WECs e indica nomes de instalações que utilizam cada uma das tecnologias.

Figura 1 - As várias tecnologias de energia de ondas.

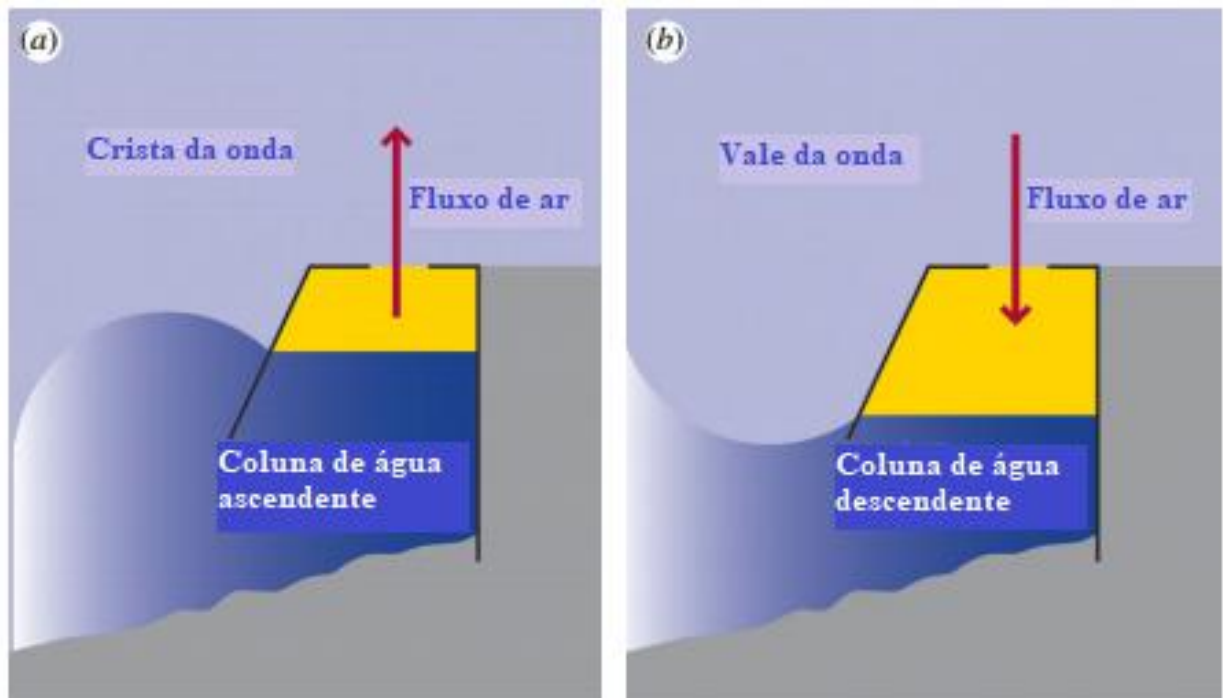


Adaptada de: Falcão (2009).

1.1.1. SISTEMAS DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

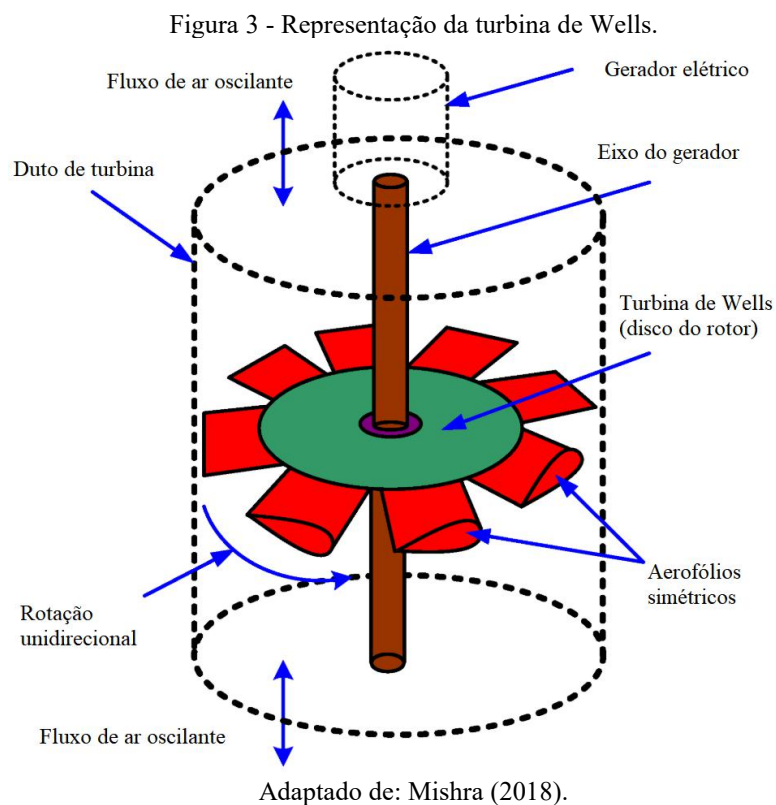
Um OWC compreende dois elementos principais: uma câmara coletora, na qual a energia das ondas é transferida para o ar dentro da câmara, e um sistema de tomada de força (*power take off* ou PTO), que converte a energia pneumática em energia mecânica de rotação. A pressão no coletor é alternadamente pressurizada à medida que a coluna de água sobe e é rarefeita à medida que a coluna de água cai (Figura 2).

Figura 2 - Princípio de funcionamento de um sistema coluna de água oscilante.



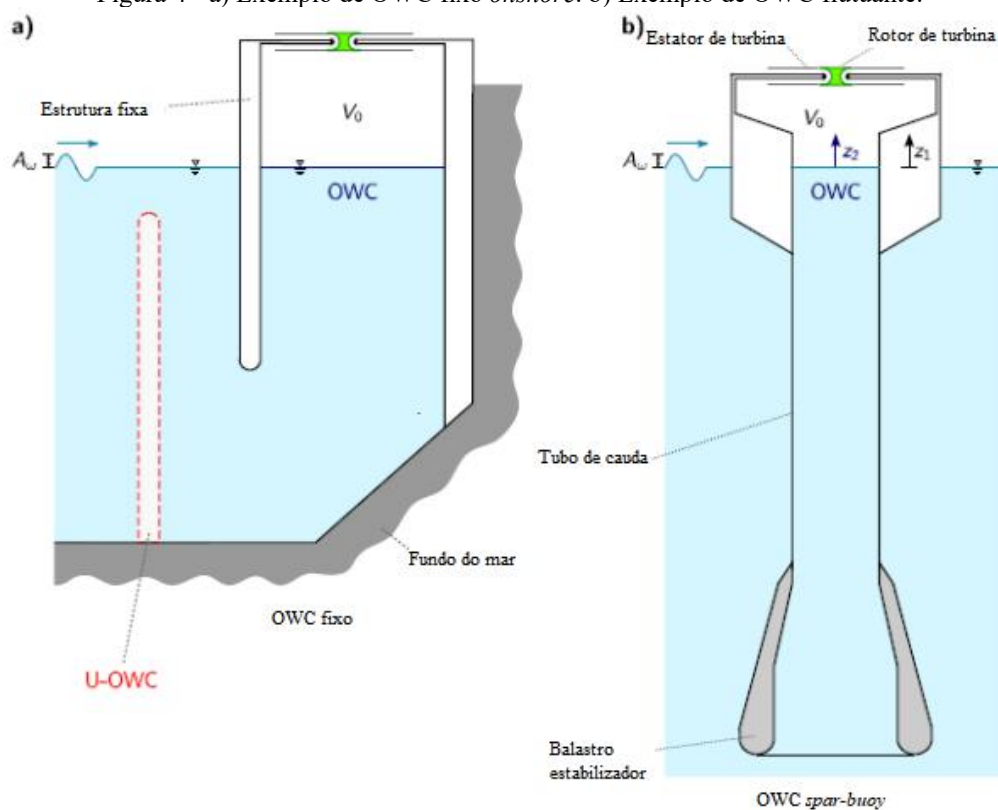
Adaptado de: Heath (2012).

O PTO é tipicamente uma turbina a ar (embora bombas de água já tenham sido consideradas como alternativa) e, de forma geral, pode-se dizer que a turbina normalmente utilizada apresenta forma auto-retificadora, de modo que seu rotor gira na mesma direção (sentido horário ou anti-horário) independente da direção do fluxo de ar que a atravessa, ou seja, independente se a coluna de água está subindo ou descendo dentro da câmara coletora. A forma mais comum de PTO usado nesta aplicação é a combinação de turbina de Wells (ilustrada na Figura 3) acoplada a um gerador elétrico. Outros tipos de turbinas auto-retificadoras, mais notavelmente as máquinas de impulso, tem sido exploradas para a aplicação.



Sistemas de coluna de água oscilante podem ser instalados *onshore*, preferencialmente em costas rochosas; próximas à costa, em até profundidades de 10 m de água; ou *offshore*, em águas de 40-80 m de profundidade. Exemplos de sistemas *onshore* e *offshore* são mostrados na Figura 4.

Figura 4 - a) Exemplo de OWC fixo *onshore*. b) Exemplo de OWC flutuante.



Adaptado de: Henriques (2016).

Em resumo, o principal atrativo do conceito OWC com uma turbina a ar decorre de sua simplicidade, pois:

- existem muito poucas partes móveis;
- o conceito é adaptável, podendo ser utilizado em diversas formas de coletor, seja situado na costa, em regiões próximas à costa ou flutuando em alto mar;
- o uso de uma turbina a ar elimina a necessidade de engrenagens;
- é confiável;
- é fácil de manter; e
- utiliza o espaço marítimo de forma eficiente.

Salienta-se que a capacidade de aplicar o conceito OWC em diferentes locais e em diferentes plataformas de coletores é extremamente importante, pois permite o desenvolvimento gradual da tecnologia.

1.1.2. EXEMPLOS DE PLANTAS EM OPERAÇÃO

Os primeiros registros de sistemas OWC ocorreram no final do século dezenove, mais especificamente em 1885, quando 34 boias equipadas com dispositivos de aviso audíveis operavam na costa dos Estados Unidos. Somente mais de cinquenta anos depois, em 1947, foi feito o próximo desenvolvimento significativo na área de energia das ondas, quando o japonês Masuda desenvolveu e instalou a primeira OWC conectado a uma turbina de impulso para produzir eletricidade, utilizada para alimentar luzes para navegação. A operação era garantida por baterias recarregáveis que utilizavam potência da turbina/gerador quando disponível. Uma leva comercial de boias foi desenvolvida a partir deste projeto original e dispositivos que utilizam este conceito são comercializados nos dias atuais. Enquanto a potência de operação de cada unidade é pequena, de 70 a 500 W, esta ainda representa a aplicação mais comum de uma usina de energia das ondas (Heath, 2012).

No fim do século XX, diversos países, como Japão, Reino Unido, Canadá, Irlanda, Estados Unidos, Índia, China, Noruega e Portugal colaboraram em projetos para pesquisa, construção e teste de diferentes tipos de OWCs, avaliando diferentes estilos de construções, localidades, tipos de turbinas e materiais.

Em 1991, a Comissão Europeia decidiu incluir o tópico de energia das ondas no seu programa de pesquisa e desenvolvimento. Isso levou a estudos básicos, seguidos pelo projeto e construção de duas grandes plantas OWC de estrutura fixa (chamadas plantas piloto Europeias), uma na ilha de Pico, Azores, Portugal, e outra na ilha de Islay, Escócia. Ambas eram equipadas com turbinas de Wells. A planta de Pico, de 400 kW de potência, teve sua construção finalizada em 1999 e ainda é operacional, provendo dados importantes para desenvolvimentos atuais. A LIMPET, que é a OWC localizada na costa de Islay, Escócia, consegue operar à capacidade total de 500 kW. Esses valores de capacidade geradora fazem a energia das ondas economicamente viável e uma possível competidora no mercado comercial (Carbon Trust, 2010). Esta planta é hoje utilizada como local de teste contínuo para novos desenhos de turbinas a serem utilizados em outros projetos comerciais, já tendo mais de 60000 horas de teste registrados em 2012.

Atualmente, temos exemplos de locais na Índia onde foram construídos OWCs perto da costa operando a 150 kW. A MK3, estação flutuante construída pela Oceanlinx e instalada em 2010 na Austrália, tem capacidade nominal de 2,5 MW. As grandes diferenças entre valores dependem da construção, turbina de ar e energia de onda disponível. Esse tipo de energia é atualmente consideravelmente cara devido ao alto custo de instalação e

desenvolvimento da tecnologia. Eventualmente, conforme o uso de energia das ondas se tornar mais comum e utilizado no mundo, é previsto que o custo tenda a abaixar a um preço comparável a de energia eólica. A título de exemplo, a Figura 5 e Figura 6 ilustram usinas OWC instaladas na Escócia e Austrália, respectivamente.

Figura 5 - Planta OWC LIMPET, 500 kW nominal, instalada no ano 2000 na ilha da Islay, Escócia.



Fonte: Falcão (2015).

Figura 6 - Estação flutuante Oceanlinx MK3, Austrália.



Fonte: Heath (2012).

1.1.3. IMPACTOS AMBIENTAIS

Os impactos ambientais de dispositivos de coluna de água oscilante não parecem ser tão grandes quanto outros dispositivos de energia renovável instalados no oceano, e são certamente mais limpos do ponto de vista ambiental do que não-renováveis. Avaliações de ciclo de vida de sistemas OWC calculam que a emissão de carbono durante 25 anos, incluindo construção, instalação, operação e desmantelamento seria de 24 gramas de dióxido de carbono (Oceanlinx, 2012). Sistemas OWC não têm nenhuma parte móvel abaixo da água, o que significa que nenhum organismo vai ser pego dentro da turbina. Diversos possíveis problemas têm sido discutidos em relação ao aspecto visual de ter um sistema OWC *onshore* ou próximo

à costa: iria destruir a vista e geraria poluição sonora. Entretanto, se localizado em alto mar, ficaria longe o suficiente da costa para que não fosse visto ou escutado. A instalação da OWC tem, inclusive, o potencial de operar como um recife artificial, contribuindo para o aumento da quantidade de espécies marinhas na área.

1.2. OBJETIVO

Usando como base estudos na parte mecânica do movimento oceânico e do comportamento das boias, deseja-se projetar, simular e analisar uma topologia de circuito conversor controlado para realizar o carregamento de baterias, alimentação de carga e funcionamento do circuito de forma eficiente para diversas condições de operação ao qual o sistema possa estar exposto. Um modelo de fonte de trifásica variável em amplitude e frequência será usada como alimentação do circuito, portanto as diversas condições de operação entrarão como variáveis no circuito na forma do movimento do gerador, mais especificamente pela velocidade angular de rotação do rotor (ω). O laço de controle é fechado com as informações instantâneas do estado da própria bateria, na qual se busca controlar o valor de potência fornecida, do enrolamento de campo, no qual se pretende controlar a corrente para manter a tensão entregue pelo gerador dentro de uma faixa específica, e na carga presente no circuito, para a qual o objetivo é de fornecer tensão constante.

Tendo isso em vista, o trabalho tem como objetivo estudar e identificar uma topologia de circuito que possa ser usada para a implementação proposta, com finalidade de verificar pontos positivos e negativos por meio de simulação computacional do circuito em questão. Pretende-se avaliar os resultados de simulação, quantificando características do circuito e chegando a uma resposta sobre a viabilidade e pontos a serem melhorados na topologia.

O resultado esperado do trabalho é o projeto de um circuito que consiga transmitir potência de um gerador para uma bateria de forma que, conforme os valores das variáveis de entrada mudam, o circuito se adapta e consegue transmitir o novo valor de potência gerada de forma a otimizar a conversão de energia. Não foi colocada uma meta de eficiência do sistema, visto que isso envolve análise individual de componentes eletrônicos e de partes que não compõe o foco do trabalho, como o próprio gerador. Além disso, a ideia do trabalho é a análise de viabilidade de aplicação de topologias e identificação de pontos positivos e negativos da topologia proposta, não necessariamente buscando um circuito que atenda detalhes físicos para implementação marítima em termos de robustez na sua confecção.

O projeto e aplicação de um circuito controlado para fornecimento de carga a baterias a partir do movimento de ondas oceânicas tem potencial para contribuir com o avanço de pesquisas na área de energias renováveis, mais especificamente no tópico de energia das ondas com enfoque em sistemas de colunas de água oscilante. Esse tópico ainda é pouco explorado na comunidade e apresenta grande possibilidade de desenvolvimento no futuro, além de ser promissor pelo fato de envolver uma fonte de energia renovável muito abundante.

Em termos de aplicação, considera-se que caso haja desejo de implementação do circuito desenvolvido nesse trabalho, sua versão inicial tenha aplicação limitada a testes de laboratório e avaliação da viabilidade do sistema como um todo. Possivelmente, em caso otimista, essa primeira versão possa ser testada de forma prática em um sistema com boia, porém, durante o projeto e desenvolvimento da topologia, não estarão sendo levados em conta questões de proteção contra água e outros fatores desse tipo que podem ser essenciais em aplicação prática no mar. De forma geral, em fases posteriores ao trabalho, acredita-se que o circuito tenha possibilidade de ser empregado em diversos sistemas de coluna de água oscilante já existentes, mais especificamente naqueles que comportam algum tipo de sensor ou iluminação alimentados por bateria. Visto que a previsão é que o tamanho físico do circuito não seja muito grande, as modificações necessárias nas boias a que ele seria adaptado não seriam muito significativas (possibilidade de baixo custo e baixo tempo gasto para retrabalho), tornando a ideia viável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores na área de WECs, mais especificamente para sistemas de coluna de água oscilante. Foram buscados, além disso, trabalhos que apresentam um enfoque em elementos de armazenamento de energia, seja por bateria, supercapacitores ou híbridos. Serão analisados o problema a ser solucionado, a topologia de circuito proposta, o sistema de controle proposto e as conclusões encontradas.

Os trabalhos e artigos contemplados serão divididos em dois grandes grupos: sistemas conectados à rede e sistemas em operação isolada. Pesquisas relacionadas a sistemas conectados à rede são mais abundantes devido ao grande desejo e busca de integrar a energia gerada a partir dos OWCs na rede elétrica de forma funcional e com custo atrativo. Apesar de o presente trabalho tratar de um circuito presente em um sistema de operação isolada, é possível tirar conclusões muito úteis de pesquisas relacionadas a sistemas conectados a rede, já que diversos deles utilizam sistemas de armazenamento de energia para suavização da tensão de saída e, portanto, discutem fatores aplicáveis a operação isolada. Sistemas em operação isolada são interessantes devido ao fato de apresentarem maior abrangência em termos de localidade de implementação, porém apresentam possibilidade de utilização mais limitada e, devido a isso, a pesquisa prévia é mais escassa quando comparado a sistemas conectados à rede.

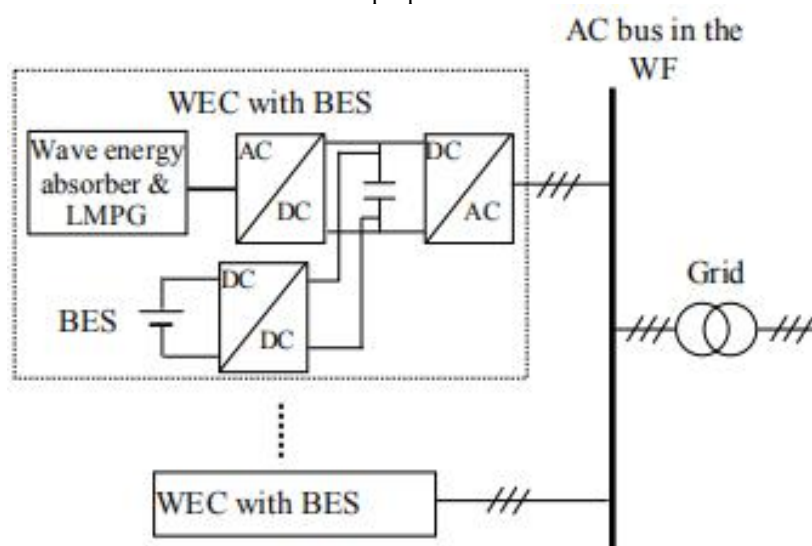
2.1. SISTEMAS CONECTADOS À REDE

Um dos motivos pelo qual sistemas de conversão de energia das ondas ainda não se popularizaram como tecnologia de energia renovável são os problemas de variações na potência extraída que podem levar a instabilidades na rede elétrica (RAJAPAKSE, et al., 2017). Além disso, manter a velocidade da turbina dentro da faixa ideal sob condições variáveis das ondas é outro desafio no ponto de vista de controle, especialmente em sistemas WEC do tipo coluna de água oscilante. Essa seção mostra, de forma geral, alguns estudos, pesquisas e trabalhos já realizados sobre o assunto, oferecendo uma visão generalizada das soluções propostas pelo meio científico para contornar esses problemas e tornar a geração de energia das ondas para a rede elétrica um método viável, tanto em termos práticos de funcionamento, quanto em termos de acessibilidade de custo.

2.1.1. CONTROLE EM CONJUNTO COM BANCO DE BATERIAS

Wu e Zhang (2009) propõem a utilização de armazenamento de energia em baterias para tornar a potência elétrica de saída para a rede mais suave e projetam malhas de controle reativas para os conversores. A Figura 7 apresenta a solução proposta.

Figura 7 - Sistema de conversão de energia de ondas com elemento de armazenamento de energia por baterias proposto.



Fonte: Wu, Zhang (2009).

O elemento de armazenamento de energia por bateria (*Battery Energy Storage*, ou BES) é acoplado ao barramento CC do conversor *back-to-back*, através de um conversor CC/CC. A potência de saída é suavizada usando a bateria, para que a potência de saída convertida possa ser mantida em um nível constante. Na topologia mostrada na Figura 7, o BES é usado para equilibrar a diferença de potência entre o a potência instantânea de saída do gerador e sua potência média de saída para a rede elétrica.

O controle do WEC com o BES compreende o controle do conversor CA/CC do lado do gerador, o controle do conversor CC/CA do lado da rede e o controle do conversor CC/CC para BES. O objetivo de controle do conversor do lado do gerador é extrair potência máxima da onda e minimizar a perda no gerador. Os controles do conversor do lado da rede e o conversor para o BES são projetados de forma a manter a tensão terminal e a potência de saída para a rede constantes e manter a tensão do barramento CC constante para garantir a operação dos conversores.

Neste sistema, uma vez que o conversor do lado da rede é acoplado diretamente à rede, o controle do mesmo visa manter a tensão terminal e a potência ativa de saída. Utilizando o princípio de controle de desacoplamento, a tensão terminal e potência ativa de saída podem

ser controladas independentemente.

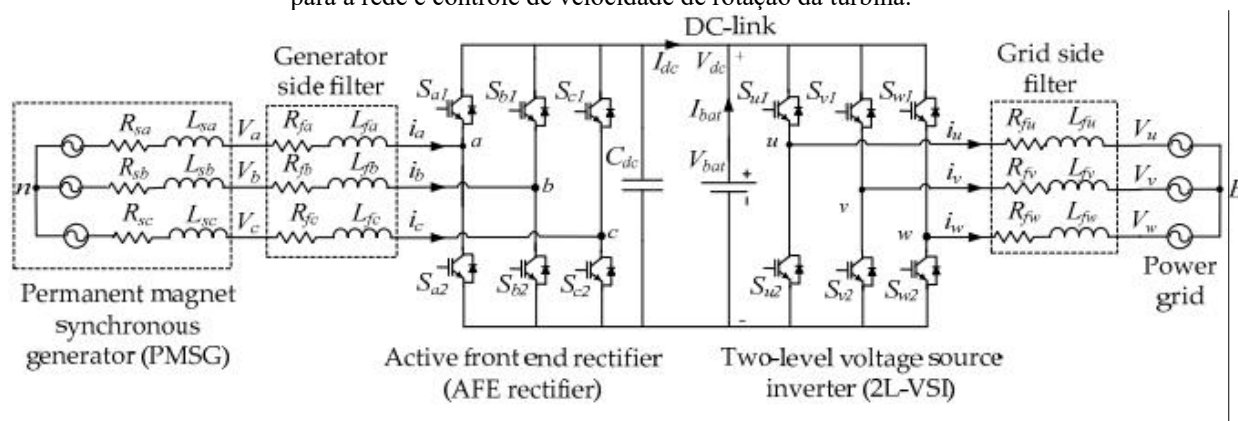
Aqui, a bateria é usada para equilibrar a diferença de potência instantânea entre o terminal de entrada e o terminal de saída do conversor. A partir dos fluxos de energia dos conversores *back-to-back*, pode-se concluir que, se o fluxo de potência no conversor é balanceado, a tensão do barramento CC deve ser mantida constante. Portanto, o controlador do conversor CC/CC para o BES é projetado de forma a manter a tensão do barramento CC constante.

A partir de simulações, Zhang e Wu (2009) concluem que, com aplicação da solução proposta, a potência ativa do WEC se torna suave e a qualidade da energia se torna aceitável, que são as características desejáveis para a integração do sistemas de geração das ondas na rede elétrica. Mesmo sob pequeno distúrbio, o sistema pode rastrear mudanças na referência de controle da tensão terminal e o desempenho da resposta dinâmica é satisfatório.

2.1.2. CONTROLE DE MODELO PREDITIVO EM CONJUNTO COM BANCO DE BATERIAS

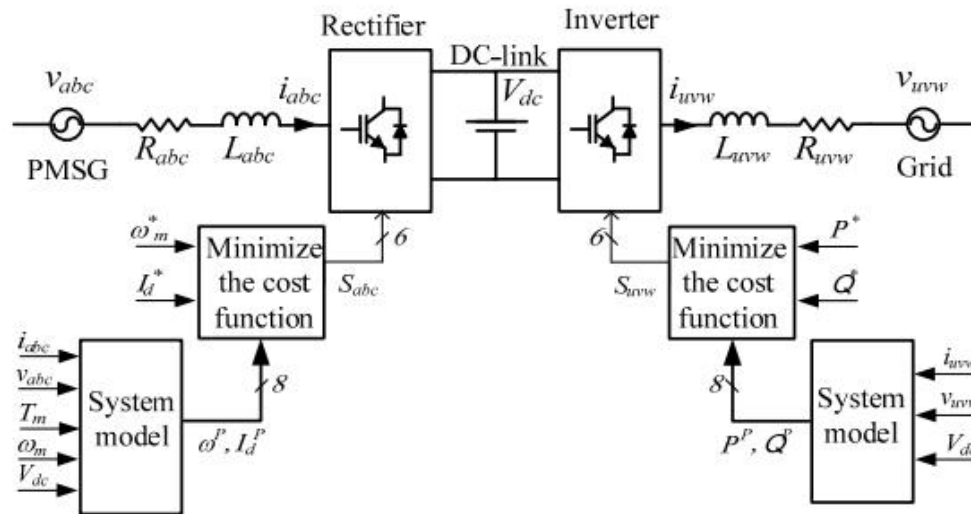
Para solucionar os problemas citados de variação de potência elétrica na saída para a rede e velocidade de operação da turbina, Rajapakse, et al. (2017) propõem a conexão direta de um banco de baterias ao barramento CC do conversor de energia, suavizando assim a energia fornecida à rede (Figura 8). Também desenvolvem controle de modelo preditivo (*Model Predictive Controls*, ou MPCs) para o retificador e o inversor do sistema conversor com o objetivo de manter a velocidade da turbina dentro de sua faixa de operação ideal. Além disso, os controladores MPC são projetados para controlar também a corrente da bateria, tanto em condição de carregamento quanto em descarregamento (Figura 9).

Figura 8 - Circuito com armazenamento de energia com bateria proposto para suavização de potência de saída para a rede e controle de velocidade de rotação da turbina.



Fonte: Rajapakse, et al. (2017).

Figura 9 - Modelo de controle preditivo para retificador ativo e inversor proposto.



Fonte: Rajapakse, et al. (2017).

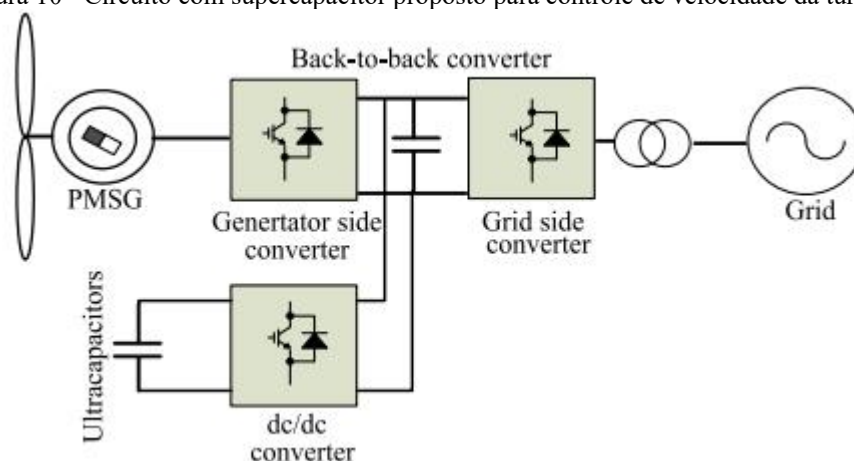
O objetivo do controle é que as variáveis de potência elétrica ativa e reativa para que atinjam valores predefinidos. O controlador MPC prevê a potência ativa e reativa no próximo intervalo de amostragem para todas as combinações de comutação do inversor e seleciona a combinação que possui o menor erro de potência.

Os resultados da simulação mostram que as soluções integradas propostas de armazenamento e controle de energia são capazes de fornecer potência suave à rede mantendo a velocidade da turbina dentro de sua faixa ideal sob condições variadas de tipo de onda.

2.1.3. CONTROLE DE VELOCIDADE DA TURBINA EM CONJUNTO COM SUPERCAPACITOR

Ceballos, et al. (2015) propõem uma lei de controle que otimiza a eficiência do PTO por meio de um controlador de velocidade instantâneo que permite variação da velocidade de rotação da turbina conforme variação das ondas. Além disso, o perfil da energia injetada na rede é suavizada, de modo que uma alta incidência da energia das ondas não comprometeria a estabilidade da rede. Essa estratégia de controle é indicada para dispositivos OWC de turbinas de baixa inércia que incluem ultracapacitores. A Figura 10 apresenta o esquema que representa a proposta do sistema com supercapacitores, sem uso de baterias.

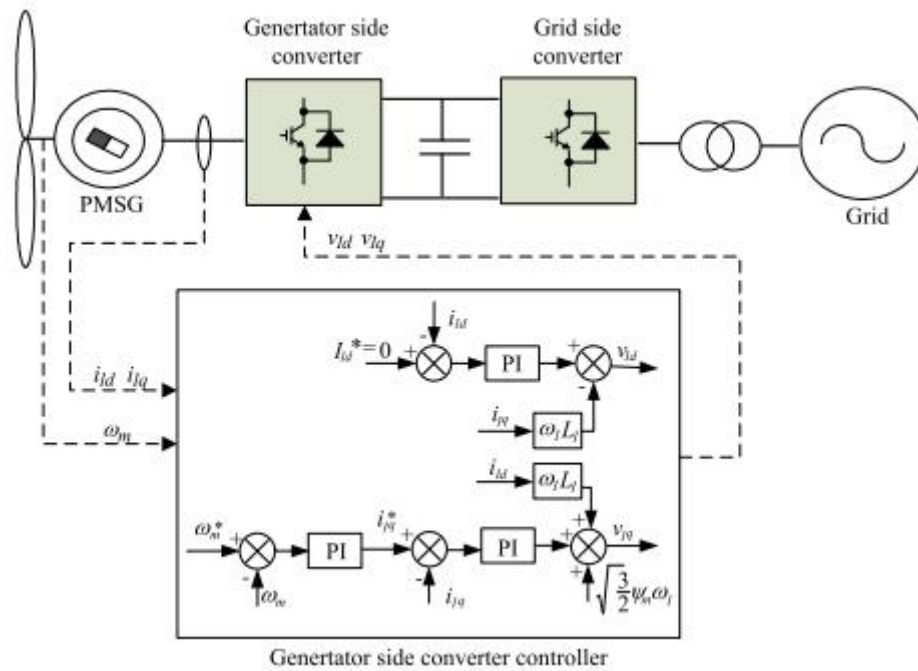
Figura 10 - Circuito com supercapacitor proposto para controle de velocidade da turbina.



Fonte: Ceballos, et al. (2015).

Os ultracapacitores são conectados ao barramento CC através de um conversor estático CC/CC. Para controlar tal sistema, são necessários três controladores diferentes; um para cada conversor de potência. Desses três controladores, apenas o lado do gerador e o do lado da rede possuem elementos específicos para essa aplicação. O terceiro controlador, o controlador CC/CC, mantém a tensão do barramento CC fixada em um valor constante. O controlador do conversor do lado do gerador garante que a velocidade de rotação do sistema mecânico rastreie a velocidade de rotação de referência. A referência de velocidade rotacional usada como entrada é calculada com o objetivo de otimizar a eficiência da turbina durante períodos de onda. O esquemático de controle do conversor CA/CC, ao lado do gerador, é ilustrado pela Figura 11.

Figura 11 - Sistema de controle do conversor CA/CC.



Fonte: Ceballos, et al. (2015).

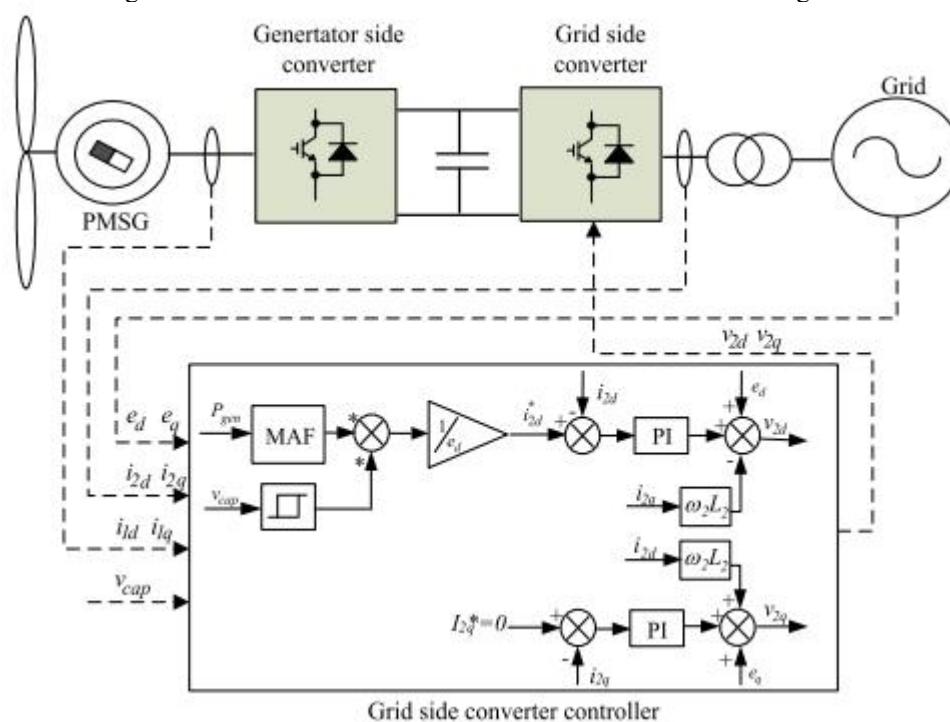
Em aplicações típicas em que conversores de energia *back-to-back* são utilizados, o controlador do conversor CC/CA do lado da rede geralmente mantém a tensão do barramento CC fixada em um valor constante. Um controlador orientado por tensão (*Voltage Oriented Controller*, ou VOC) pode ser usado com esta finalidade.

No entanto, quando ultracapacitores são usados, o esquema do VOC deve ser modificado. Para se beneficiar das capacidades de armazenamento de energia do ultracapacitor, a tensão do barramento CC não é mais controlada com o conversor da rede.

O regulador de tensão do VOC é removido e a referência da corrente ativa que o conversor injeta na rede agora é calculada por um filtro de média móvel (*Moving Average Filter*, ou MAF) aplicado sobre a potência elétrica do gerador. O MAF fornece o valor médio da potência elétrica do gerador entre dois instantes de tempo. A Figura 12 ilustra o esquemático.

Portanto, a potência injetada na rede é igual à potência média do gerador durante uma certa janela de tempo. Conseqüentemente, a potência injetada é suavizada, evitando elevados picos. Esses picos de alta potência são absorvidos pelos ultracapacitores, dado que o conversor CC/CC mantém a tensão DC fixada em um valor constante.

Figura 12 - Sistema de controle do conversor CC/CA do lado do gerador.



Fonte: Ceballos, et al. (2015).

Ceballos, et al. (2015) concluem que esta lei de controle é capaz de regular a turbina velocidade rotacional em uma base de onda por onda, maximizando assim a eficiência da turbina. No entanto, o uso de ultracapacitores e as necessidade de equipamentos que suportem sobrecorrente, tanto no gerador elétrico quanto no conversor CC/CC devido a altos picos durante o funcionamento aumentam o custo do sistema elétrico em cerca de 50%. O aumento do custo inicial é compensado com um crescimento da eficiência de até 8%, o que contribui para recuperar o aumento no valor inicial investimento em cerca de dez anos (dependendo do clima das ondas e o preço da energia do local específico onde o OWC é colocado). Além disso, alguns outros aspectos que devem ser levados em consideração quando esta solução implementada são:

- Maior risco de confiabilidade com a adição de supercapacitores e mais eletrônica de potência.

- A necessidade de usar sistemas de baixa inércia, o que significa a provável necessidade de projetos de turbinas de diâmetro pequeno, velocidade alta de materiais caros e avançados.

Dadas essas considerações e as conclusões acima, é improvável que os ultracapacitores sejam uma boa solução a curto prazo, mas podem se tornar uma solução interessante a médio prazo.

2.2. SISTEMAS EM OPERAÇÃO ISOLADA

Apesar de a grande maioria dos estudos realizados até o momento serem focados na geração a partir da energia das ondas para injeção na rede elétrica, quando se trata de energia marítima e boias não se pode deixar de abordar aplicações isoladas, em que o sistema fica em alto mar e deve ser auto-suficiente para alimentar uma carga, seja ela um sensor, um alarme ou um sistema de iluminação. Essa seção mostra, de forma geral, alguns estudos, pesquisas e trabalhos já realizados sobre o assunto, oferecendo uma visão das soluções propostas pelo meio científico para utilização de sistemas de forma isolada e de maneira eficiente, controlada e segura. Essa seção não foi limitada a estudos em que o sistema proposto contenha elementos de armazenamento de energia, já que não existem muitas pesquisas disponíveis para consulta sobre o assunto.

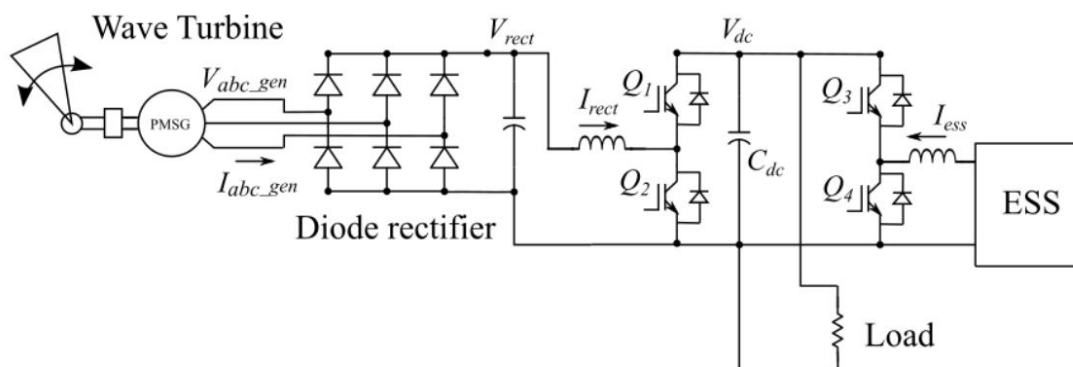
2.2.1. SISTEMA COM ELEMENTOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Ondas do mar são oscilatórias por natureza e, portanto, geram fluxo de potência oscilante. Para fornecer energia constante a uma carga isolada, é necessário filtrar as oscilações usando um sistema de armazenamento de energia (*Energy Storage System*, ou ESS). Kamat, Hazra, Bhattacharya (2015) propõem um projeto de controlador, simulação do modelo e desenvolvimento de hardware que pode ser feito de forma relativamente simples. Também propõem o controle do sistema híbrido de armazenamento de energia para obter melhor suavidade de potência de saída. A saída de tensão do gerador é retificada por uma ponte retificadora a diodo. Para manter a potência constante é necessário controlar a tensão do barramento CC e as potências individuais vindas do gerador e do ESS. A tensão do barramento CC é regulada por Conversor DC-DC *boost* do lado ESS. A tensão do barramento CC de saída é geralmente controlada para um valor maior que a tensão retificada. Outro conversor *boost* é usado para controlar a corrente retificada. Essa corrente é controlada para gerar potência ótima a partir do gerador. A referência de corrente do retificador é gerada proporcionalmente à referência de velocidade do WEC. Essa suposição é necessária, segundo os autores, porque a impedância de saída do sistema precisa ser igual a sua impedância de fonte para gerar potência ideal.

Assim, o controle geral do sistema é alcançado controlando o fluxo de corrente vindo do retificador e do ESS, que é composto por armazenamento híbrido usando supercapacitor e bateria. O conversor *boost* do supercapacitor será usado para controlar a tensão do barramento

CC e fornecer os requisitos para que seja atingida a potência de pico. A bateria vai carregar ou descarregar com controle adequado, a fim de prover diferença de potência média e também para limitar a tensão nos supercapacitores. De forma geral, a energia do ESS é controlada de tal maneira que essa carga deve sempre obter energia constante. O ESS irá carregar ou descarregar sempre que a energia gerada estiver acima ou abaixo da potência média da carga, respectivamente.

Figura 13 - Circuito de armazenamento híbrido com bateria e supercapacitor proposto para suavização de potência de alimentação para carga isolada.



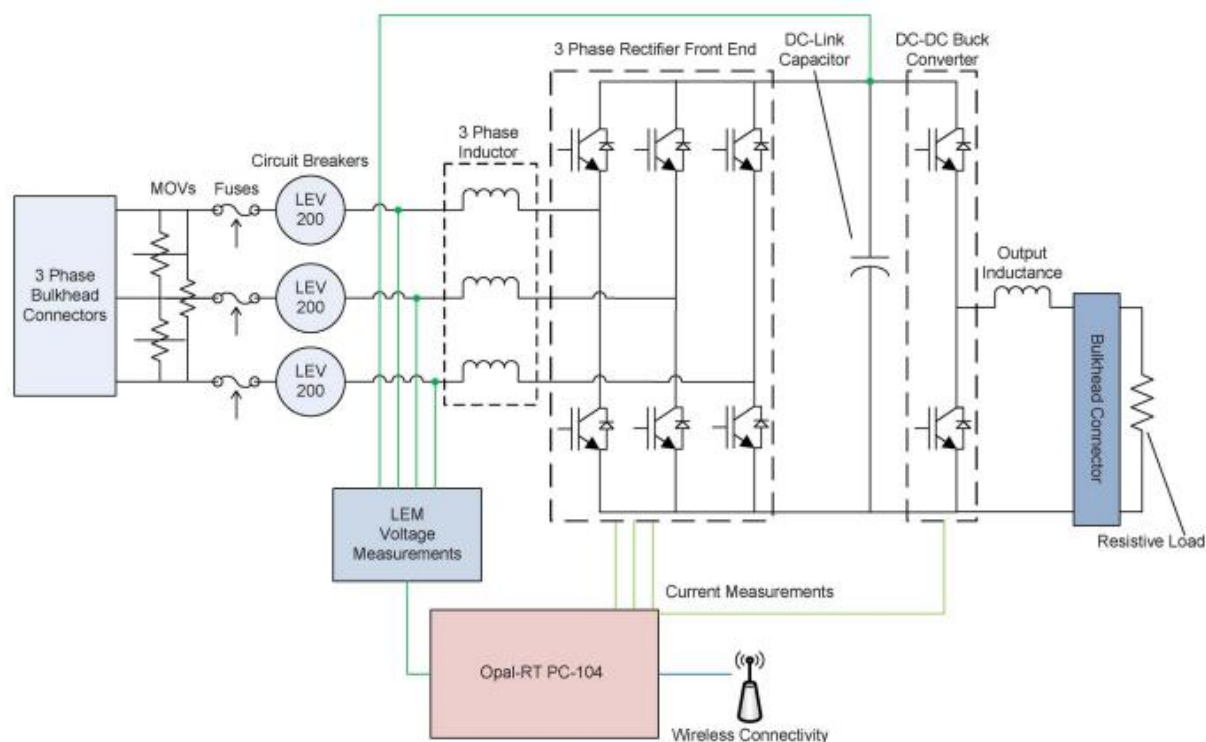
Fonte: Kamat, Hazra, Bhattacharya (2015).

Baixo custo é alcançado através do uso de retificador a diodo em comparação a retificador ativo. O controle de armazenamento de energia híbrida é obtido usando supercapacitor e fonte de alimentação CC como bateria. Simulação e testes em *hardware* são realizados para demonstrar a suavização da potência de saída para carga resistiva. Os resultados em *hardware* são comparáveis com os resultados de simulação segundo Kamat, Hazra, Bhattacharya (2015).

2.2.2. MAXIMUM POWER POINT TRACKING

O *Maximum Power Point Tracking*, ou MPPT, é uma estratégia de controle adaptativo bem conhecida que foi usado com grande sucesso em outras formas de energias renováveis, principalmente a solar. No entanto, até o momento, há poucas publicações sobre o uso de técnicas MPPT para ondas oceânicas energia. Amon, Brekken e Schacher (2012) apresentam uma estratégia MPPT projetada para maximizar conversão de energia das ondas oceânicas em um ambiente real de ondas, demonstrando a viabilidade das técnicas de MPPT para conversão de energia das ondas. Observa-se, no entanto, que a publicação em questão não abrange o tópico de carregamento de baterias, porém considera-se interessante para o assunto devido a possibilidade de maximização de potência convertida, também objetivo do presente trabalho.

Figura 14 - Circuito e sistema de aquisição proposto para otimização de fluxo de potência utilizando o método MPPT.



Fonte: Amon, Brekken, Schacher (2012).

O circuito possui dois componentes principais de eletrônica de potência: um retificador trifásico *active front-end* e um conversor de saída *buck*. O retificador trifásico fornece um caminho para o fluxo de energia em um barramento CC comum. O conversor *buck* de saída conectado à parte traseira do capacitor de barramento CC fornece controle do fluxo de energia para uma carga resistiva fixa. O controle da taxa de serviço do conversor *buck* e do retificador é fornecida por um sistema de prototipagem rápida Opal-RT PC/104, que também lida com todos os registros de dados.

Existem dois modos principais de operação para o sistema: passivo e ativo.

1) Modo passivo: No modo passivo, os sinais de *gate* do retificador trifásico estão desligados e o retificador opera como uma ponte trifásica passiva, usando os diodos de roda livre nos módulos de transistor bipolar de porta isolada. A potência extraída do WEC é controlada pelo *duty cycle* do conversor *buck*, que, no sentido médio, reflete efetivamente a resistência da carga através do barramento CC.

2) Ativo: No modo ativo, os transistores bipolares de porta isolada do retificador trifásico são chaveados de acordo com alguns objetivos de controle e o *duty cycle* do conversor *buck* é usado para controlar o nível do barramento CC. Se a posição do gerador é conhecida ou pode ser estimada, o retificador trifásico pode controlar a corrente através de técnicas de controle vetorial. Na pesquisa apresentada por Amon, Brekken e Schacher (2012),

é utilizada uma abordagem de controle resistivo, na qual o *duty cycle* de comutação de uma fase do retificador trifásico é definido como sendo proporcional à corrente de fase. Desse modo, o circuito aparece como um controlador eletrônico de carga resistiva trifásica conectada em estrela.

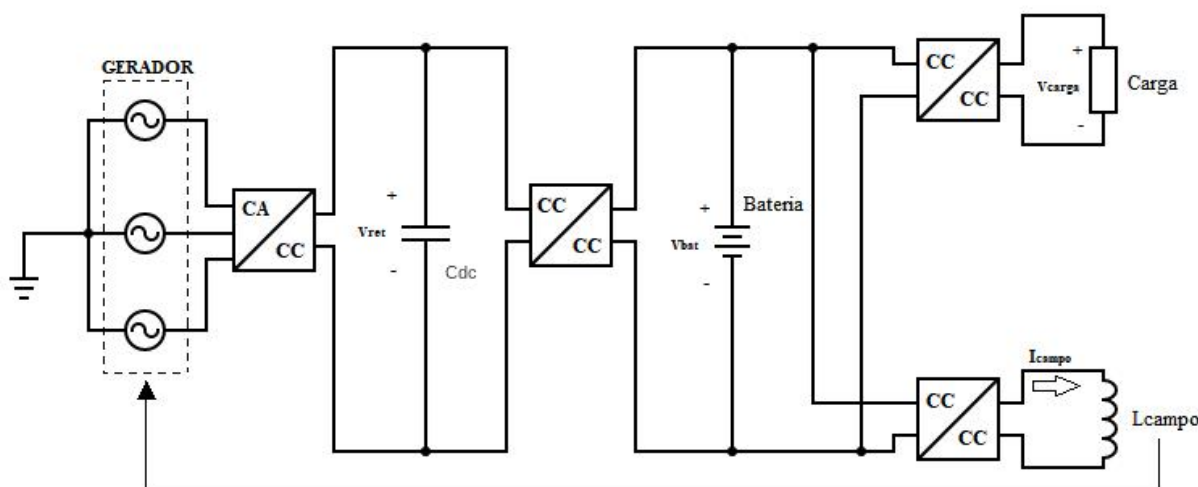
De forma geral, o algoritmo de controle compara a potência média atual de entrada (ou seja, potência de saída do WEC) com o potência média de entrada de um certo intervalo de tempo anterior. Se a potência média de entrada aumentou, a direção da potência máxima é positiva e deve-se seguir nesse sentido. A suposição é que a direção da mudança causada pela ação de controle do MPPT está aumentando a produção de energia do WEC e, portanto, deve permanecer inalterada. Se a potência média de entrada diminuiu em relação ao intervalo de tempo anterior, supõe-se que a direção da mudança causada pela ação de controle do MPPT está diminuindo a produção de energia e, portanto, seu sentido será alterado e um novo ponto de operação no sentido oposto deve ser encontrado na próxima iteração.

Os resultados encontrados tanto em simulações, quanto experimentalmente por Amon, Brekken e Schacher (2012) se mostraram apropriados e efetivos para a aplicação em questão. A operação com retificador trifásico passivo, que é de construção mais simples e não requer controle ativo, demonstrou diferença negligenciável em termos de desempenho quando comparado com o retificador de modo ativo. Entretanto, de forma geral, a qualidade da energia gerada será pior, com muita distorção harmônica e sem controle de fator de potência, pontos que potencialmente podem ser melhorados utilizando a retificação ativa.

3. SOLUÇÃO PROPOSTA

Tendo em vista as topologias estudadas por pesquisadores e seus respectivos resultados encontrados até o momento, em conjunto com novas ideias e possibilidades que podem vir a ser exploradas dentro da temática de dispositivos OWC em operação isolada com armazenamento de energia em bateria, é proposta a topologia de circuito para operação do sistema ilustrada na Figura 15.

Figura 15 - Topologia de circuito de potência proposta para solução do problema.



Fonte: Autor.

A tensão de entrada do circuito é dada por um gerador com enrolamento de campo cuja tensão de saída é proporcional a sua velocidade de rotação ω (determinada pela intensidade das ondas que movimentam a turbina conectada ao gerador) e ao fluxo magnético no gerador. O fluxo magnético, por sua vez, é proporcional à corrente que circula no enrolamento de campo da máquina, I_{campo} . Portanto, a tensão eficaz de linha de alimentação é dada por

$$V_{linha} = K_1 \cdot \omega \cdot I_{campo} \quad (1)$$

Definindo o valor eficaz V_{fase} nominal como 127 V (ou V_{linha} como 220 V), I_{campo} nominal como 0,6 A e ω nominal como 3600 rpm, temos a constante $K_1 = 0,1$ (valor que pode ser ajustado por meio do projeto do gerador). Esses valores são escolhidos com base em tensões e correntes de operação usuais de geradores e velocidades padrão de operação de turbinas em sistemas OWC mencionados em capítulos anteriores.

A frequência de tensão de entrada gerada também depende da velocidade de rotação do gerador ω . Pode ser representada por

$$f_{\text{gerador}} = K_2 \cdot \omega \quad (2)$$

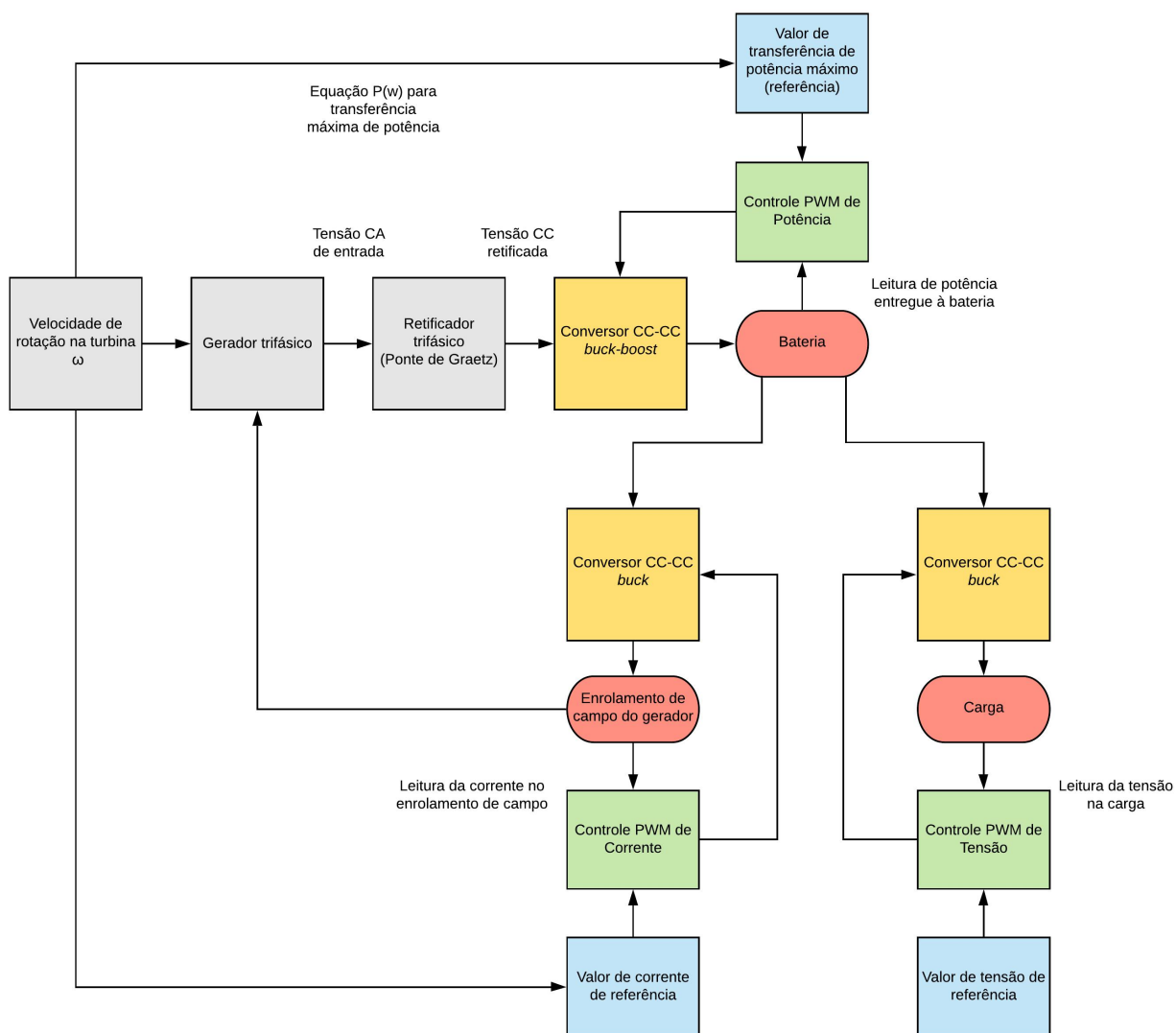
Definindo-se f_{gerador} nominal como 60 Hz e dado o valor de ω nominal especificado acima, temos $K_2 = 0,01666$.

A carga presente no circuito é genérica, sendo definida como puramente resistiva, e podendo representar um sensor, lâmpadas, sistema de alarme, entre outras possíveis aplicações. Foi definida uma potência desejada para a carga de 100 W com tensão de 12 V, portanto, utilizando a Lei de Ohm tem-se $R_{\text{carga}} = 1,44 \Omega$.

A bateria é representada, para fins de simulação, como um capacitor de valor relativamente elevado, definido como $C_{\text{bat}} = 450 \text{ mF}$. Salienta-se que o valor do capacitor escolhido para modelar a bateria apresenta valor muito maior do que os capacitores de filtragem presentes no circuito (que serão apresentados em seções subsequentes) e que o capacitor de barramento CC, assim apresentando um tempo de carregamento mais lento que os demais, servindo como modelo para simulação em intervalos de tempos curtos sem perder a propriedade de apresentar regime de carregamento mais lento que os demais componentes do circuito. O valor nominal da tensão da bateria utilizado é de 36 V.

Conforme informado na Seção 1.2, deseja-se fornecer a maior quantidade instantânea de potência possível para a bateria, manter a tensão na carga constante (e, para uma carga puramente resistiva, conseqüentemente a potência se mantém constante) e controlar a corrente do enrolamento de campo do gerador de forma a manter a tensão nos terminais do gerador aproximadamente constante, próxima ao seu valor nominal. Para isso, serão aplicadas técnicas de controle nos conversores CC/CC que serão detalhadas na Seção 3.5. Uma visão geral do objetivo descrito é ilustrado na Figura 16. A análise será realizada para o circuito operando em modo de condução contínua.

Figura 16 - Diagrama de blocos da solução proposta.

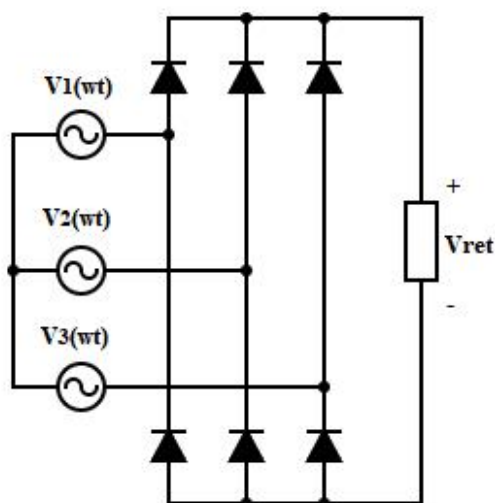


Fonte: Autor.

3.1. CONVERSOR CA/CC DE ENTRADA

Como conversor CA/CC de entrada, optou-se por um retificador trifásico de ponte completa não controlado, circuito também conhecido como Ponte de Graetz, conforme mostrado na Figura 17. Essa topologia é muito empregada em diversas aplicações. Foi feita a escolha por essa topologia em relação a topologias alternativas controladas devido ao baixo custo de implementação, simplicidade de análise e aplicação adequada para o problema em questão, já que teremos controle individualizados para os elementos de interesse do circuito através dos conversores CC/CC. Destaca-se que a tensão retificada será mantida aproximadamente constante dentro de uma ampla faixa de velocidade de turbina uma vez que o controle de tensão de entrada é realizado pela excitação de campo do gerador.

Figura 17 - Ponte de Graetz.

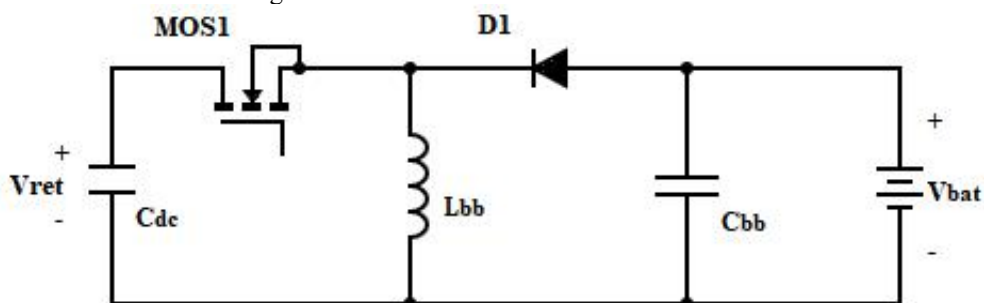


Fonte: Autor.

3.2. CONVERSOR CC/CC PARA CARREGAMENTO DA BATERIA

Depois de entrar no circuito através do gerador e passar pelo conversor CA/CC, a energia elétrica convertida deve passar por um conversor CC/CC antes de chegar à bateria para que o nível de tensão existente seja o desejado para o carregamento da mesma. Como nesse caso a carga do conversor é a própria bateria, que apresenta característica de fonte de tensão, devemos empregar um conversor com acumulação de energia, mais especificamente à acumulação indutiva, que é o conversor *buck-boost*. A topologia do conversor *buck-boost* é ilustrada na Figura 18.

Figura 18 - Conversor CC/CC buck-boost.



Fonte: Autor.

Os valores de componentes escolhidos para essa parte do circuito serão apresentadas abaixo, juntamente com uma breve dedução matemática da escolha dos mesmos.

O ciclo de trabalho (ou *duty cycle*) da topologia *buck-boost* é definido por

$$D_{bb} = \frac{V_{bat}}{V_{ret} + V_{bat}} \quad (3)$$

onde V_{bat} é a tensão de saída e V_{ret} é a tensão de entrada. Nos valores nominais, tem-se $V_{bat} = 36$ V e $V_{ret} = 297,18$ (alimentação trifásica com tensão de fase de 127 V retificada por uma ponte de Graetz). Com esses dados, encontra-se um duty cycle $D_{bb} = 0,108$ ou 10,8%. Este valor representa apenas uma condição definida como nominal, uma vez que a partir deste *duty cycle* será controlado o fluxo de potência do gerador para a bateria. O valor deste varia de forma a buscar um ponto ótimo de conversão de energia, conforme será discutido na Subseção 3.5.1.

Agora deve-se determinar o valor do indutor. O valor do indutor $L_{buck-boost}$ é dado pela expressão

$$L_{buck-boost} = \frac{D_{bb} \cdot V_{ret}}{f \cdot \Delta I_{max}} \quad (4)$$

onde f é a frequência de chaveamento do semicondutor e ΔI_{max} é a ondulação máxima na corrente de saída. A frequência de chaveamento utilizada em todos os semicondutores do circuito é definida em $f = 40$ kHz e a ondulação máxima na corrente de saída, levando em conta as grandes variações de potência entregues pelo circuito nas diferentes condições de velocidade de rotação de turbina ω , é escolhida como $\Delta I_{max} = 10$ A. Com isso, tem-se o valor da indutância do filtro de saída do conversor *buck-boost* $L_{buck-boost} = 80,24$ uH.

Por último, o valor do capacitor $C_{buck-boost}$ do filtro de saída do conversor é dado pela expressão

$$C_{buck-boost} = \frac{D_{bb} \cdot I_o}{f \cdot \Delta V_{Cmax}} \quad (5)$$

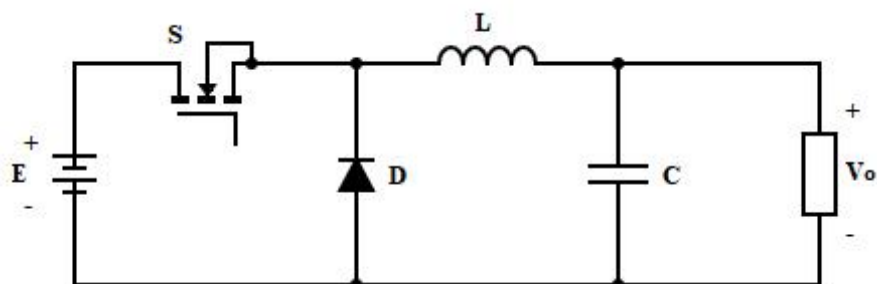
onde ΔV_{Cmax} é o valor máximo de ondulação de tensão no capacitor. A corrente de saída é assumida como $I_o = 15$ A e a tensão $\Delta V_c = 8$ V é escolhida já que o capacitor em questão está em paralelo com a bateria do circuito, e portanto essa variável representa também a variação máxima de tensão a ser sofrida pela bateria. Após quantificar todos os fatores, tem-se $C_{buck-boost} = 5,06$ uF.

3.3. CONVERSOR CC/CC PARA ALIMENTAÇÃO DA CARGA

Para alimentação da carga a partir da tensão da bateria (conforme visto anteriormente na Figura 15), necessita-se de um conversor CC/CC abaixador de tensão, visto que a tensão

nominal da bateria é de 36 V enquanto a tensão nominal da carga, que se deseja manter constante, é de 12 V. O conversor CC/CC abaixador de tensão adotado é conhecido como conversor *buck*, e é ilustrado pela Figura 19.

Figura 19 - Conversor CC/CC *buck*.



Fonte: Autor.

Os valores de componentes escolhidos para essa parte do circuito serão apresentadas abaixo, juntamente com uma breve dedução matemática da escolha dos mesmos.

O *duty cycle* da topologia *buck* é definido por

$$D = \frac{V_o}{E} \quad (6)$$

onde V_o é a tensão de saída e E é a tensão de entrada. Nos valores nominais, tem-se $V_o = V_{carga} = 12 \text{ V}$ e $E = V_{bateria} = 36 \text{ V}$. Com esses dados, encontra-se um *duty cycle* $D_{buck_carga} = 0,3333$ ou 33,33%. Este é um valor nominal, que pode variar ligeiramente com a variação da tensão da tensão na bateria, uma vez que a tensão na carga deve sempre ser mantida fixa em 12 V.

Na sequência, deve-se determinar os valores do indutor e do capacitor, elementos que compõe o filtro de saída do conversor. O valor do indutor L_{buck} é dado pela expressão

$$L_{buck} = \frac{E}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{L_{max}}} \quad (7)$$

onde E é a tensão de entrada, f é a frequência de chaveamento do semicondutor e $\Delta I_{L_{max}}$ é a variação máxima desejada de corrente no indutor. A variação máxima de corrente no indutor, levando em conta a necessidade de se manter o valor de carga com tensão constante durante a operação do circuito, é escolhida como 5% do valor nominal da corrente na carga. Esse valor é dado por $\Delta I_{L_{max}} = 0,42 \text{ A}$. Com isso, tem-se o valor da indutância do filtro de saída do conversor *buck* da carga $L_{buck_carga} = 535,71 \text{ uH}$.

Finalmente, o valor do capacitor C_{buck} do filtro de saída do conversor pode ser determinado pela expressão

$$C_{buck} = \frac{E}{31 \cdot L_{buck} \cdot f^2 \cdot \Delta V_{C_{max}}} \quad (8)$$

onde $\Delta V_{C_{max}}$ é o valor máximo de ondulação de tensão no capacitor. A variação máxima de tensão no capacitor, levando em conta que o componente está em paralelo com a carga que se deseja manter com tensão constante no valor de 12 V, é definida como 5% desse valor nominal de tensão. Portanto, tem-se $\Delta V_{C_{max}} = 0,6$ V. Após quantificar todos os fatores, tem-se o valor do capacitor do filtro de saída do conversor *buck* da carga $C_{buck_carga} = 2,26$ uF.

3.4. CONVERSOR CC/CC PARA ALIMENTAÇÃO DO ENROLAMENTO DE CAMPO

Para alimentação do enrolamento de campo a partir da tensão da bateria (conforme visto anteriormente na Figura 15), necessita-se de outro conversor CC/CC abaixador de tensão. Tendo em vista que o enrolamento de campo é definido como uma indutância que apresenta resistência elétrica intrínseca de 10 Ω e, como sua corrente I_{campo} apresenta valor nominal de 0,6 A (para valores muito altos de velocidade de rotação da turbina/gerador esse valor tende a diminuir, e mesmo para valores muito baixos - menores que 1000 RPM - a corrente de campo chega no máximo à 2,5 A), a tensão no enrolamento de campo vai ser sempre menor que o valor da tensão da bateria. Devido a isso, se opta pela utilização de outro conversor *buck*.

Os valores de componentes escolhidos para essa parte do circuito serão apresentadas abaixo, juntamente com uma breve dedução matemática da escolha dos mesmos. Os elementos a serem determinados são os mesmos que foram encontrados para o conversor *buck* para alimentação da carga (Seção 3.3), portanto será poupado a repetição das expressões matemáticas para os valores dos componentes, chegando diretamente aos valores finais a serem determinados.

O *duty cycle* do conversor nas condições nominais é dado por $D_{buck_campo} = 0,167$ ou 16,7%, já que $E = V_{bat} = 36$ V e $V_o = V_{campo} = 6$ V, determinado a partir da multiplicação da corrente nominal da campo $I_{campo} = 0,6$ A e da resistência de 10 Ω do enrolamento de campo. Sendo a variação máxima de corrente no indutor escolhida como 5% do valor nominal da corrente no enrolamento de campo, tem-se $\Delta I_{L_{max}} = 0,03$ A e, portanto, $L_{buck_campo} = 7,5$ mH. Assumindo a variação máxima de tensão no capacitor do filtro de saída escolhida como 5%

do valor nominal da tensão no enrolamento de campo, tem-se $\Delta V_{C_{max}} = 0,3 \text{ V}$ e, portanto, $C_{buck_campo} = 322,6 \text{ nF}$.

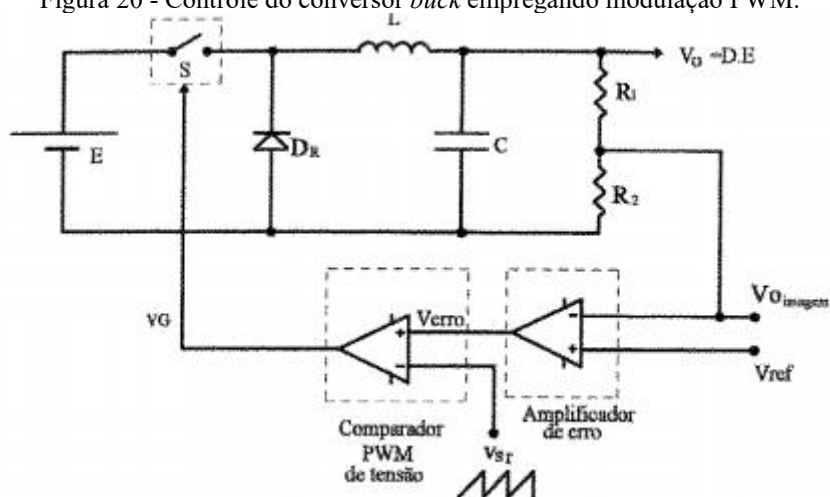
3.5. CONTROLE DOS CONVERSORES CC/CC

Nas seções anteriores foram projetados os valores dos componentes dos conversores CC/CC presentes no circuito e os respectivos períodos de *duty cycle* para operação apropriada dos mesmos quando os valores de entrada e saída se encontram nas suas quantidades nominais. Porém, como os elementos do sistema apresentam variação em função de mudanças na entrada devido à variação da rotação da turbina provocada, na aplicação, por movimento de diversos tipos de ondas, é necessário que os valores de *duty cycle* sejam controlados para cada um dos conversores de forma a corrigir essas variações e manter os valores desejados nas saídas.

O modelo de controle proposto é o de ajuste da largura de pulso por meio de realimentação que utiliza um amplificador de erro e um comparador. Nesse modelo de controle, uma referência é definida e comparada ao sinal de saída, gerando um sinal de erro. Esse sinal de erro, por sua vez, é comparado a um sinal de formato dente-de-serra, que, se devidamente projetado, deve fazer com que seja gerado na saída, conectada ao terminal de *gate* do semiconductor, um sinal PWM de forma com que faça com que o *duty cycle* do sistema seja tal que o valor de saída atinja o valor de referência.

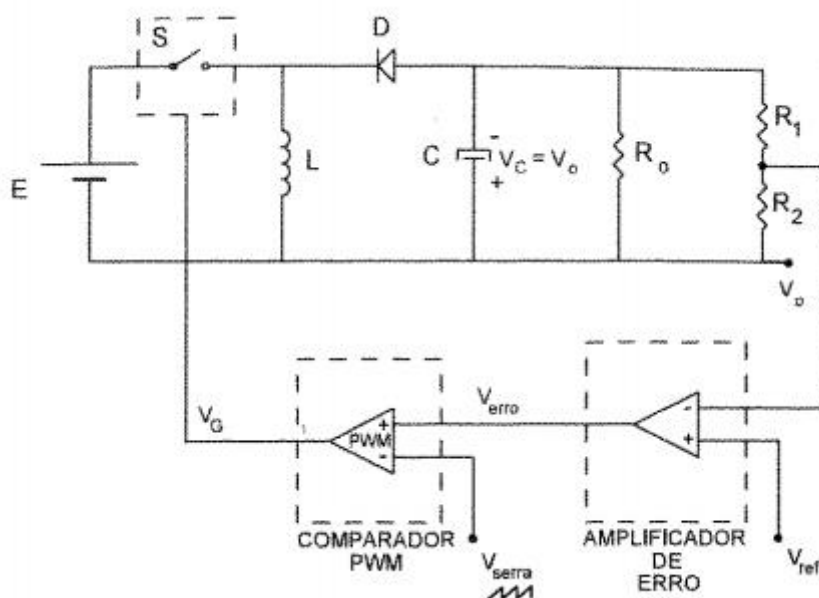
A Figura 20 e a Figura 21 ilustram os conversores *buck* e *buck-boost*, respectivamente, conectados ao sistema de controle.

Figura 20 - Controle do conversor *buck* empregando modulação PWM.



Fonte: Barbi (2006).

Figura 21 - Controle do conversor *buck-boost* empregando modulação PWM.



Fonte: Barbi (2006).

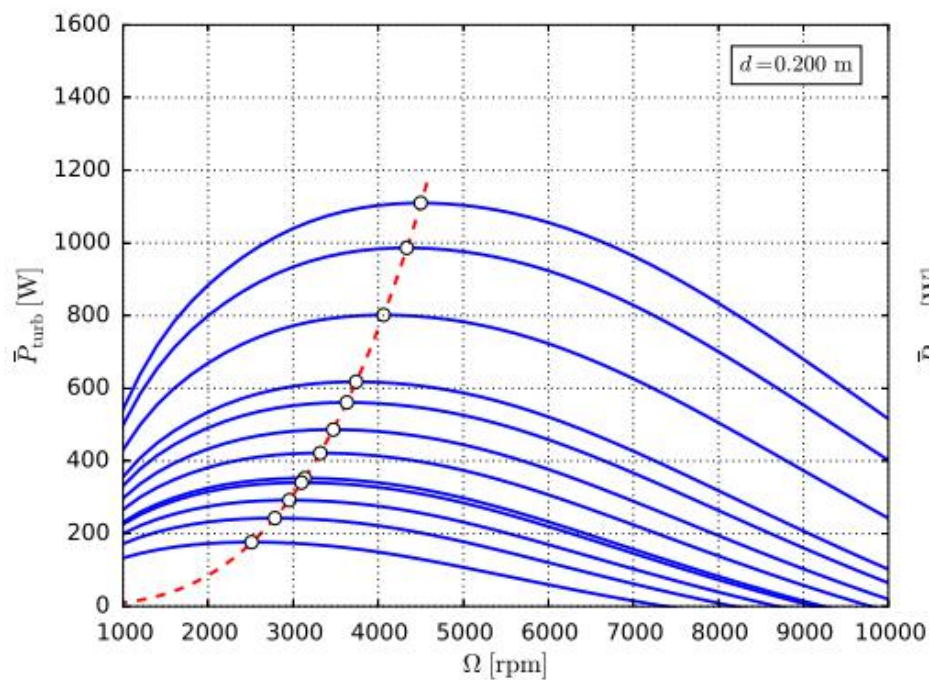
Nas próximas seções serão definidas as estratégias de controle específicas para cada um dos conversores CC/CC do circuito, explicitando os valores de componentes, definição de amplitude dos sinais dente-de-serra e escolhas de referências.

3.5.1. CONTROLE DO CONVERSOR CC/CC BUCK-BOOST PARA CARREGAMENTO DA BATERIA

Para realizar o controle do conversor *buck-boost*, cujo objetivo é obter a máxima transferência de potência para a bateria, é necessário determinar o valor da potência na saída para servir como uma das entradas do amplificador de erro. Isso é feito a partir de um bloco de simulação de leitura de potência.

Na outra entrada do amplificador de erro tem-se o sinal de referência. Como a potência máxima do sistema depende do valor da velocidade de rotação da turbina, é necessário quantificar e equacionar essa função de forma que a referência se adeque a condição de operação instantânea do sistema. Henriques et al. (2016) realizaram um estudo sobre pontos de operação ótimos para diferentes estados marítimos, velocidades de rotação de turbina e diâmetros de rotor de turbina. Como base para a referência utilizada nesse trabalho, optou-se por utilizar as curvas apresentadas na Figura 22, em que são ilustradas as relações de potência *versus* velocidade de rotação para diferentes estados marítimos e, a partir disso, traçada uma curva de máxima potência para diversos estados marítimos (ondas do mar com diferentes amplitudes e frequências) para uma turbina com rotor de diâmetro $d = 0,20$ m.

Figura 22 - Potência *versus* velocidade de rotação para diferentes estados marítimos (linhas azuis) e máxima potência para cada valor de velocidade de rotação (linha vermelha) para uma turbina com rotor de diâmetro $d = 0,20$ m.



Fonte: Henriques, et al. (2016).

Com o auxílio do software MATLAB, utilizando a ferramenta *Curve Fitting*, foi equacionada a curva em vermelho a partir dos pontos apresentados na Figura 22. Essa curva é utilizada como referência presente na entrada do amplificador de erro do conversor *buck-boost*.

$$P_{ref}(\omega) = 3,192 \cdot 10^{-9} \cdot \omega^{3,159} \quad (9)$$

Os resistores presentes no circuito comparador de erro foram equacionados de forma a manter um valor de sinal de saída de erro $V_{erro_buck-boost} = 2,5$ V para condição nominal do

circuito. Dessa forma, pode-se determinar a amplitude do sinal dente-de-serra do comparador PWM de acordo com a equação

$$V_{\max DS} = \frac{V_{\text{erro}}}{D} \quad (10)$$

onde V_{erro} é o valor do sinal de saída do comparador de erro (igual a 2,5 V para condições nominais) e D é o valor de *duty cycle* de condução do semiconductor para o circuito em condições nominais (definido na Seção 3.2. como $D_{bb} = 10,8\%$). Portanto, tem-se o sinal dente-de-serra no comparador PWM do conversor *buck-boost* com amplitude igual a $V_{\max DS_bb} = 23,15$ V. Outra abordagem possível seria definir o valor da amplitude do sinal dente-de-serra e então determinar os resistores para que a amplitude de V_{erro} resulte em um *duty cycle* desejado.

3.5.2. CONTROLE DO CONVERSOR CC/CC BUCK PARA ALIMENTAÇÃO DA CARGA

Considerando que se deseja manter um valor de tensão constante na carga, a referência utilizada no comparador de erro do conversor *buck* para alimentação da carga é simplesmente uma constante com o valor desejado $V_{\text{ref_carga}} = 12$ V. A outra entrada do comparador de erro é composta pelo valor instantâneo da tensão na carga, capturada através de um elemento de leitura de tensão. Os resistores presentes no circuito comparador de erro foram equacionados de forma a manter um valor de sinal de saída de erro $V_{\text{erro_carga}} = 2,5$ V para condição nominal do circuito. Dessa forma, pode-se determinar a amplitude do sinal dente-de-serra do comparador PWM com o mesmo procedimento realizado para o conversor *buck-boost* na seção anterior. Como nesse caso tem-se *duty cycle* $D_{\text{buck_carga}} = 33,33\%$ (conforme definido na Seção 3.3.), é encontrado a amplitude máxima do sinal dente-de-serra no comparador PWM do conversor *buck* de alimentação da carga $V_{\max DS_carga} = 7,5$ V.

3.5.3. CONTROLE DO CONVERSOR CC/CC BUCK PARA ALIMENTAÇÃO DO ENROLAMENTO DE CAMPO

Para realizar o controle do conversor *buck* para alimentação do enrolamento de campo, para o qual desejamos que a corrente no enrolamento seja ajustada de forma a manter a tensão de entrada do circuito constante no seu valor nominal, é necessário capturar a o valor da corrente instantânea na saída para servir como uma das entradas do amplificador de erro. O valor instantâneo da corrente no enrolamento de campo é capturado através de um elemento sensor de corrente e inserido em uma das entradas do amplificador de erro.

Na outra entrada do amplificador de erro tem-se o sinal de referência. Como a tensão de entrada do sistema fornecida pelo gerador depende tanto da corrente de campo quanto do valor da velocidade de rotação da turbina, é necessário equacionar essa função de forma que a referência se adeque a condição de operação instantânea do sistema. Dessa forma, tem-se

$$I_{ref_campo} = \frac{V_{linha}}{K_1 \cdot \omega} = \frac{219,97}{0,1 \cdot \omega} \quad (11)$$

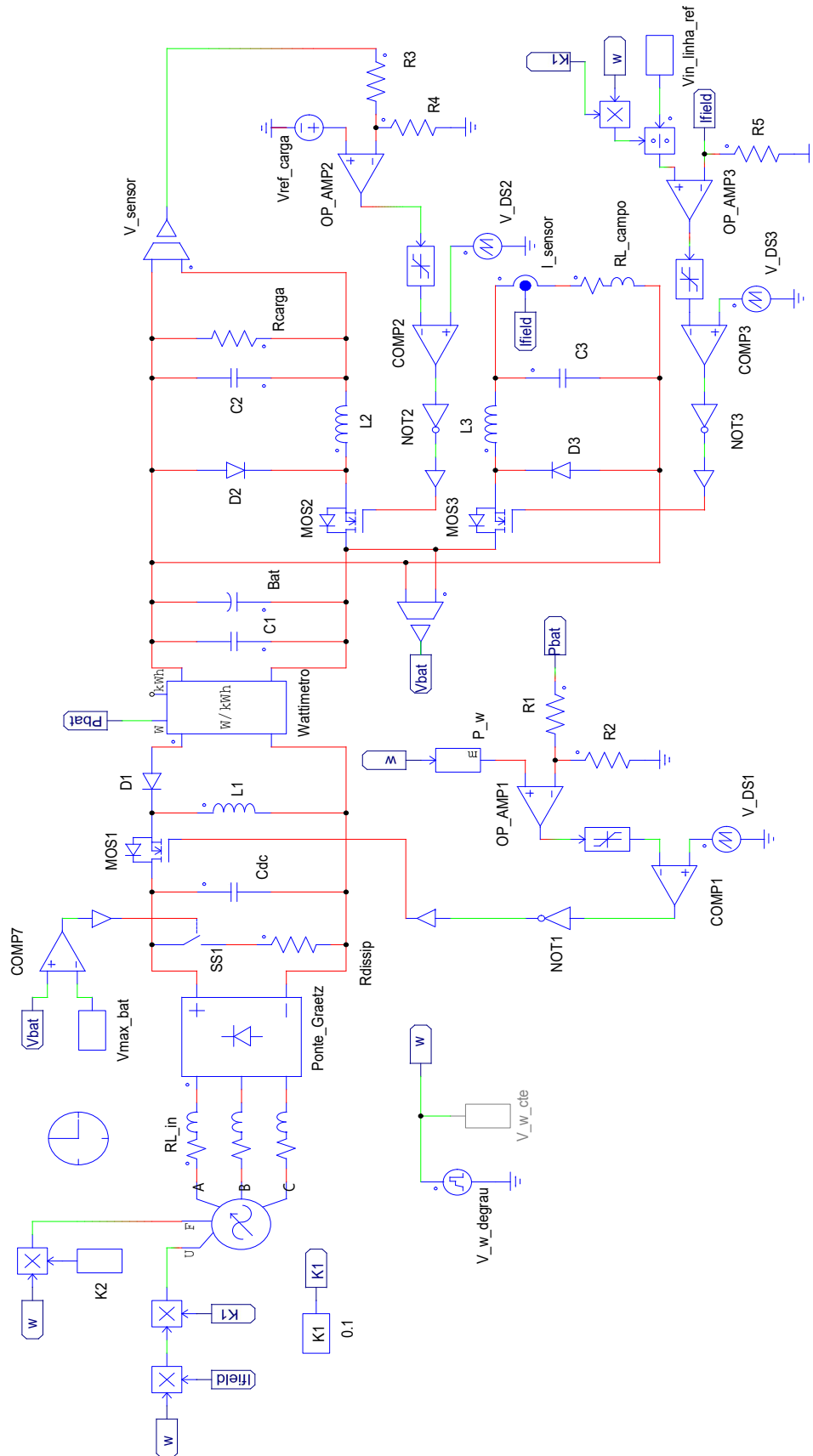
Salienta-se que o valor de V_{linha} usado na determinação da referência é justamente o valor desejado que seja mantido na entrada do sistema.

Os resistores presentes no circuito comparador de erro foram equacionados de forma a manter um valor de sinal de saída de erro $V_{erro_campo} = 2,5$ V para condição nominal do circuito. Dessa forma, pode-se determinar a amplitude do sinal dente-de-serra do comparador PWM com o mesmo procedimento realizado para os outros conversores nas seções anteriores. Como nesse caso tem-se duty cycle $D_{buck_campo} = 16,7\%$ (conforme definido na Seção 3.4.), é encontrado a amplitude máxima do sinal dente-de-serra no comparador PWM do conversor *buck* de alimentação do enrolamento de campo $V_{maxDS_campo} = 15$ V.

3.6. SOLUÇÃO COMPLETA

A Figura 23 apresenta o esquemático completo do circuito proposto, contendo as topologias de conversores e as malhas de controle apresentadas nas seções anteriores.

Figura 23 - Topologia completa do circuito proposto.



Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

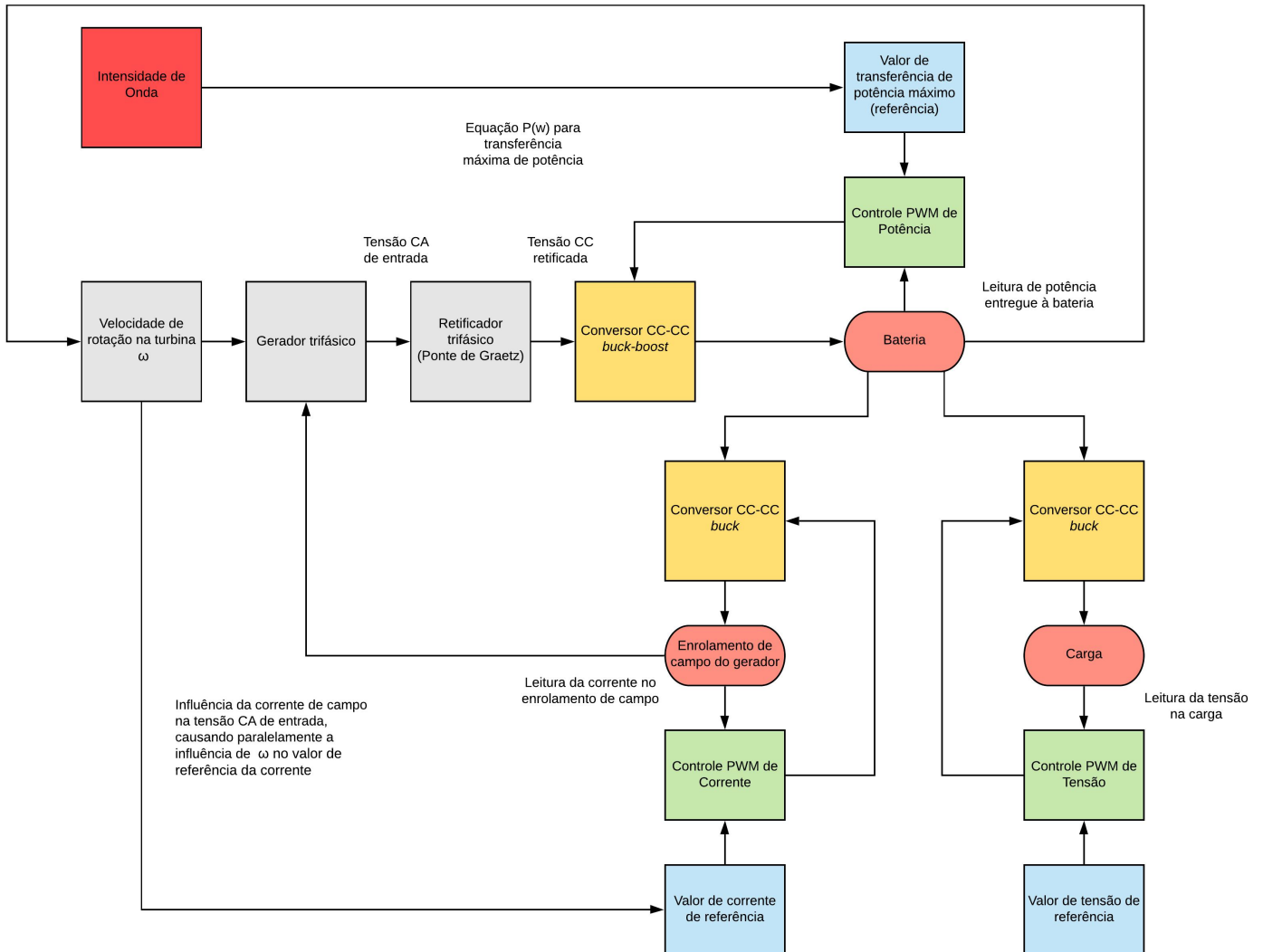
Neste capítulo são apresentadas e explicadas as diferentes simulações realizadas com o circuito proposto apresentado na Seção anterior, assim como os respectivos resultados de interesse. Esses resultados são discutidos e analisados de forma a se possibilitar chegar a conclusões sobre o funcionamento do modelo proposto e seu comportamento durante a operação a qual foi submetida.

Dois diferentes tipos de análise são realizados nesse capítulo. Em um deles, a velocidade de rotação da turbina assume valores predeterminados durante a simulação, apresentando uma situação simplificada em que não estão sendo considerados os fatores de tipo de onda incidindo sobre o sistema e influência do fluxo de potência no circuito no valor de ω . Apesar disso, a análise é válida para avaliar o seguimento dos valores de referência dos três conversores e a visualização da influência entre variáveis de forma clara quando um dos principais fatores do sistema é fixado em condições conhecidas. Essa metodologia de simulação é ilustrada pela Figura 16 e apresentada na Seção 4.1 e Seção 4.2.

No segundo tipo de análise, a velocidade de rotação da turbina deixa de assumir valores conhecidos e pode variar livremente durante a simulação, apresentando relação direta com a potência instantânea (filtrada em 500 Hz) entregue ao circuito através da expressão

$$\omega(P_{conv}) = 407,5 \cdot P_{conv}^{0,3451} \quad (12)$$

Nessa situação, são considerados diferentes tipos de onda incidindo sobre o sistema, aparecendo no problema como diferentes valores de velocidade de rotação de referência para o cálculo da potência ótima em cada situação. Esses referidos valores foram determinados a partir da detecção do ponto de máximo para três diferentes condições de onda escolhidas baseados nas formas de onda em azul da Figura 22. Essa metodologia de simulação é ilustrada pela Figura 24 e apresentada na Seção 4.3 e Seção 4.4.

Figura 24 - Diagrama de blocos do sistema em condição de ω assumindo valores livres.

Fonte: Autor.

4.1. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR FIXADA

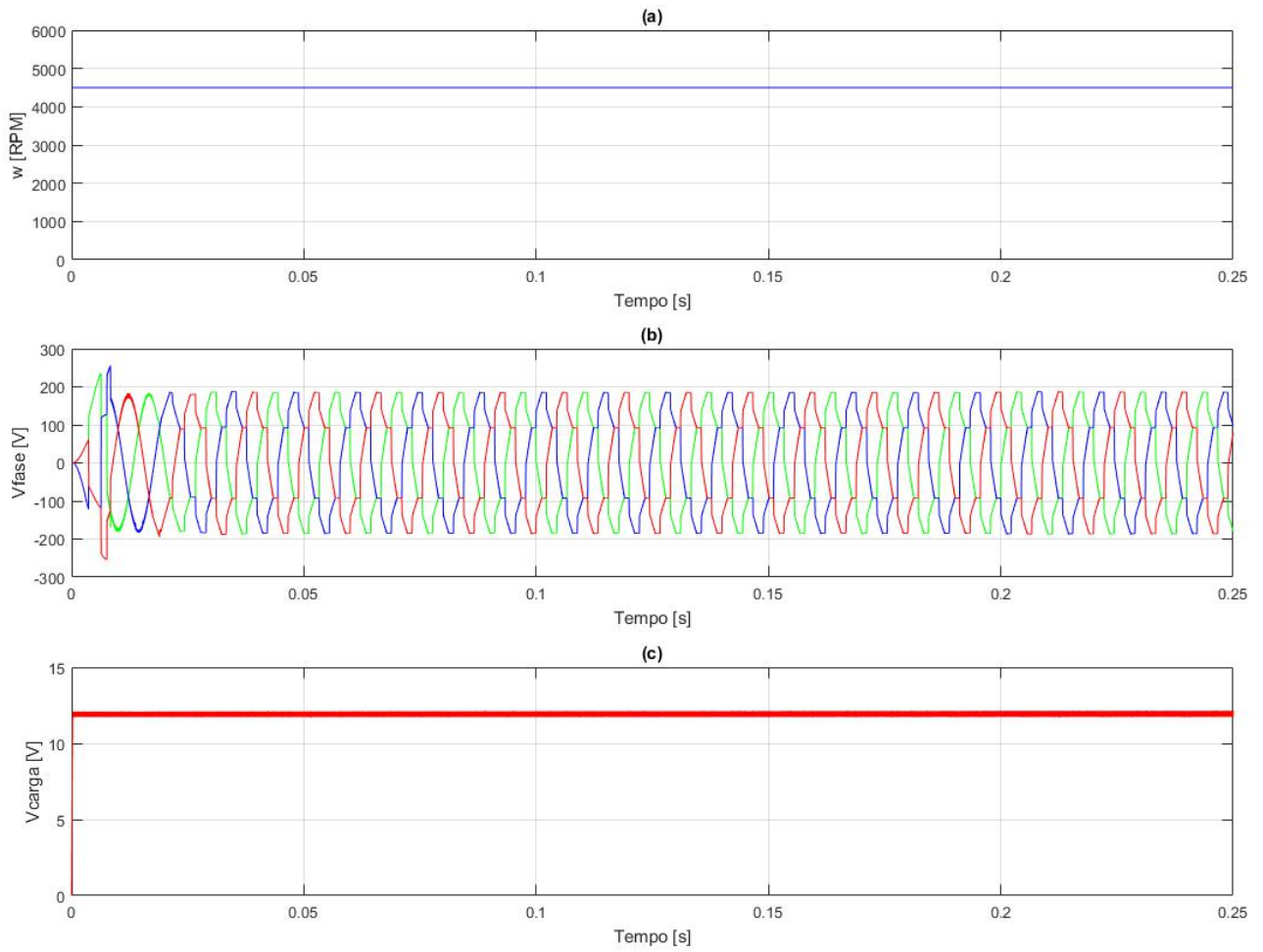
A primeira proposta de simulação para análise do funcionamento do circuito consiste em fixar a velocidade de rotação do gerador em um único valor predefinido, ou seja, definir uma velocidade de rotação constante. Essa abordagem é a mais simples para se iniciar a análise, pois não leva em conta o efeito de diferentes tipos e intensidades de onda do mar afetando as variáveis da tensão de entrada do circuito e nem mesmo faz com que essas variáveis sejam alteradas de forma forçada na simulação. Dessa forma, a amplitude e a frequência da tensão de alimentação trifásica de entrada do circuito serão mantidas constantes durante todo o período de simulação.

Duas simulações serão apresentadas a seguir, sendo a primeira com velocidade de rotação $\omega_1 = 4500$ rpm e a segunda com $\omega_2 = 2500$ rpm, representando situações com rotação relativamente alta e relativamente baixa, respectivamente. Salienta-se que nenhum desses valores coincide com a velocidade de rotação nominal definida durante o projeto do circuito e apresentada no Capítulo 3, $\omega_{nom} = 3600$ rpm. A simulação é realizada durante uma duração de 0,25 segundo, com amostragem a cada 1×10^{-7} segundos.

Em ambos os casos, a tensão inicial da bateria é definida em 36 V. Recapitulando o objetivo de controle do circuito: a carga busca se manter com tensão igual a 12 V. A corrente do enrolamento de campo se mantém em um valor tal qual faça com que a tensão de fase entrada do circuito seja igual à 127 V. A potência entregue a bateria segue a curva de potência ótima (curva vermelha da Figura 22), no presente caso ignorando os tipos de onda (curvas azuis) e simplesmente achando o ponto de potência máxima para a velocidade de rotação definida.

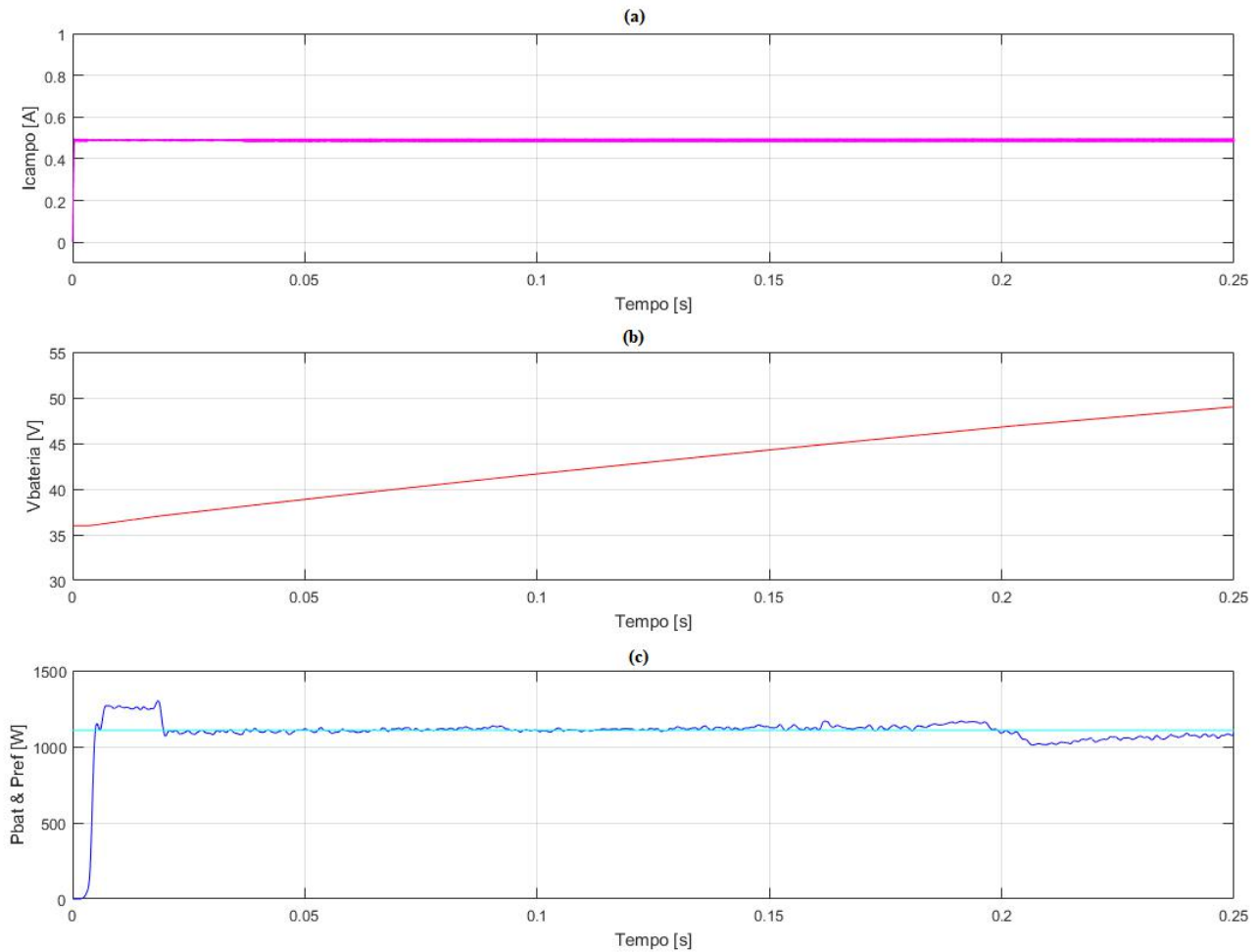
As variáveis de interesse após simulação com velocidade de rotação $\omega = 4500$ rpm são apresentadas na Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 4500$ rpm: (a) ω ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;



Fonte: Autor.

Figura 26 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 4500$ rpm: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;



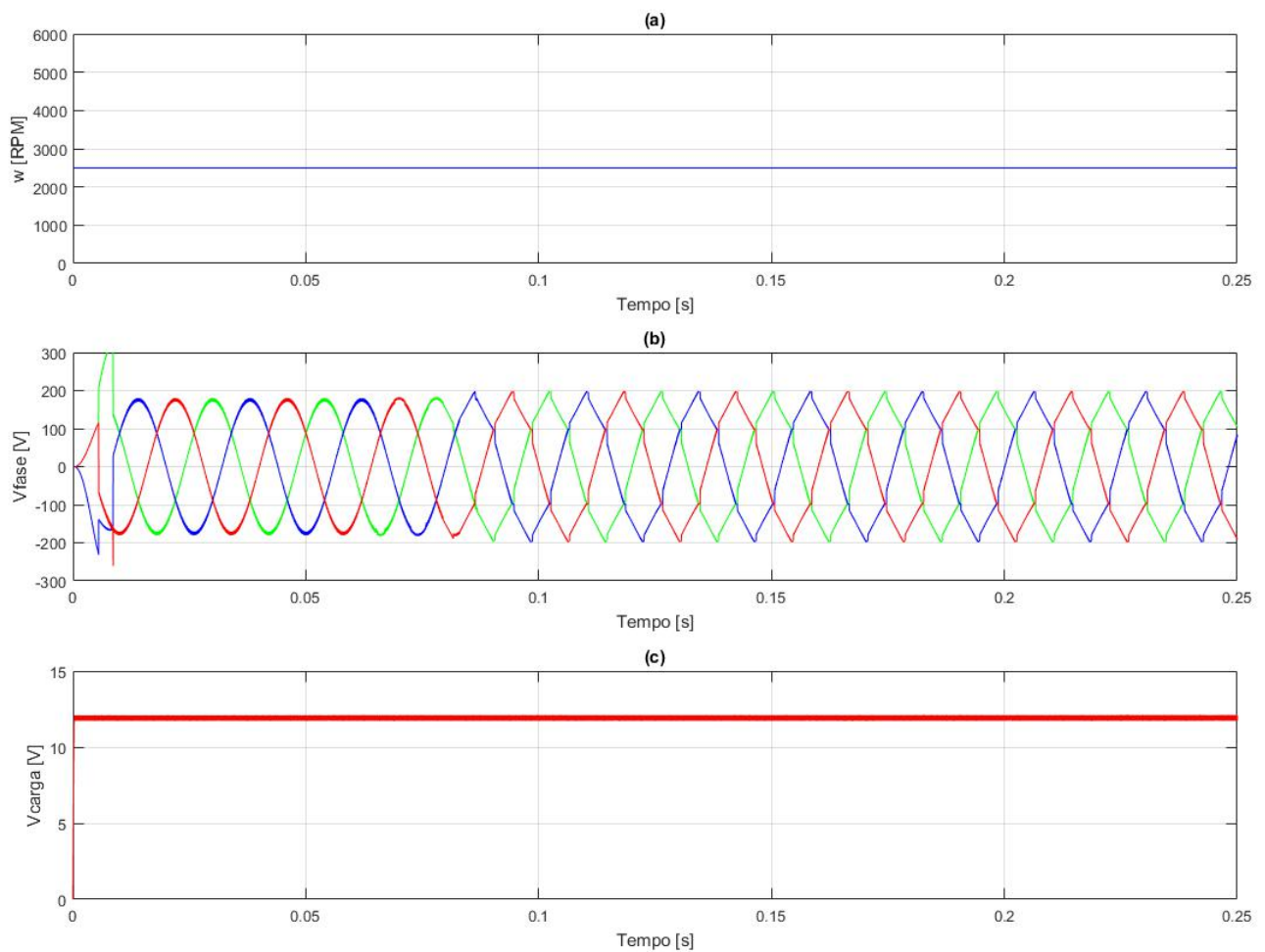
Fonte: Autor.

Percebe-se que a velocidade de rotação do gerador se mantém no valor de 4500 rpm inicialmente definido durante todo o período de simulação (Figura 25 - a). As tensões de fase fornecidas pelo gerador se mantém com frequência constante após o período inicial de estabilização e valores eficazes de $V_a = 124,43$ V, $V_b = 123,99$ V e $V_c = 123,93$ V durante a duração completa da simulação, caracterizando um erro de aproximadamente 2,3% quando comparado a média das três fases com o valor desejado de 127 V (Figura 25 - b). A tensão na carga se mantém com valor muito próximo dos 12 V desejados durante toda a simulação, apresentando variações entre 11,7 V e 12,1 V, o que é está dentro da variação prevista no projeto (Figura 25 - c). A corrente de campo do gerador apresenta valor médio de 489 mA durante a duração completa da simulação, apresentando *ripple* de aproximadamente 4,3% (Figura 26 - a). A tensão na bateria inicia em 36 V e aumenta com o decorrer do tempo devido à potência entregue para a bateria ser maior que o necessário para o funcionamento dos elementos do circuito, possibilitando o carregamento da mesma (Figura 26 - b). Com o valor

de rotação proposto, seguindo à equação de potência otimizada aplicada no projeto do circuito, a potência entregue a bateria deveria se estabilizar em aproximadamente 1108 W. Para a presente situação, o valor médio da potência entregue após estabilização do circuito foi 1103 W, caracterizando erro de 0,45%. O valor de pico registrado foi de 1169 W e valor mínimo de 1010 W (Figura 26 - c).

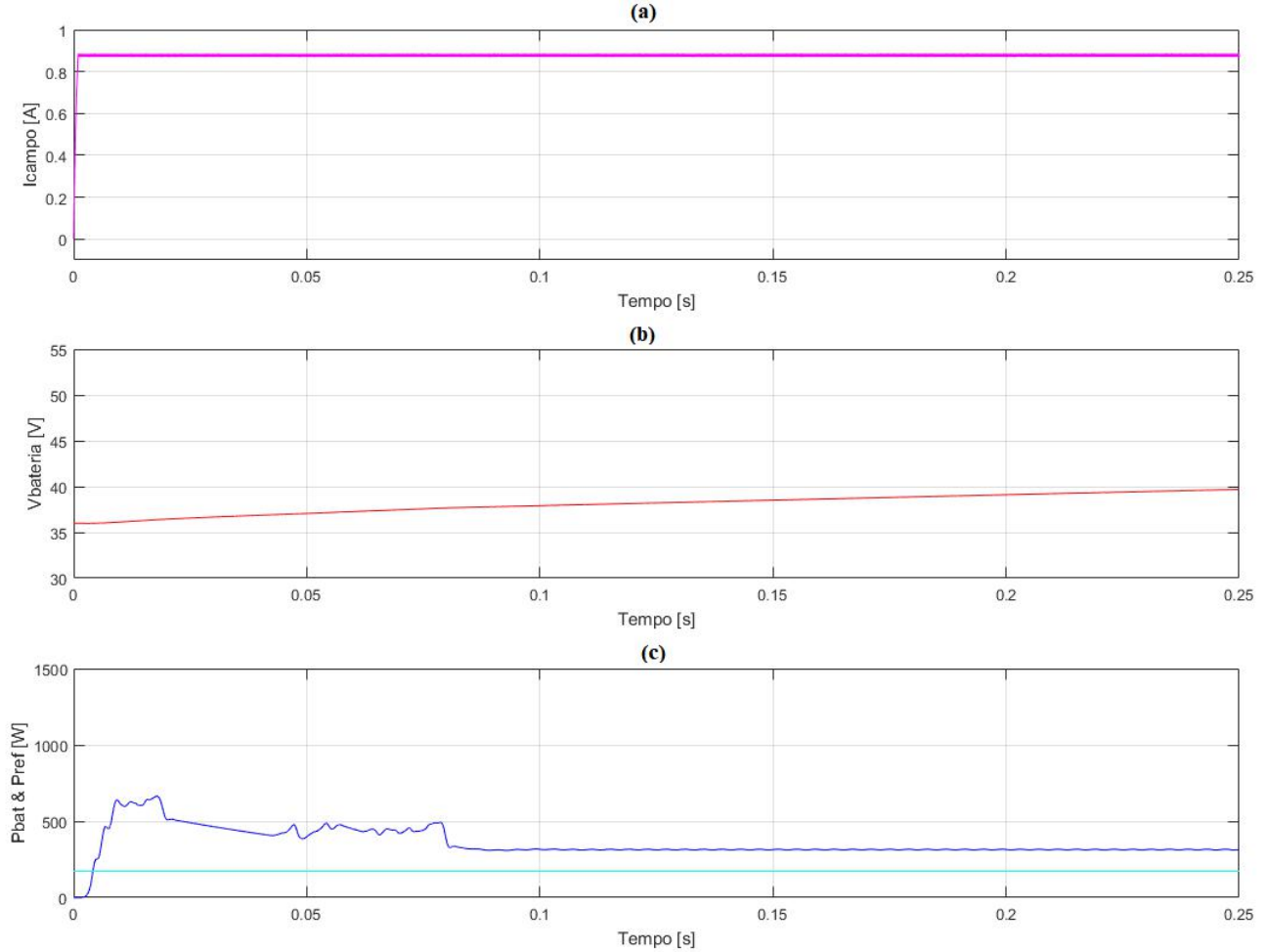
As variáveis de interesse após simulação com velocidade de rotação $\omega = 2500$ são apresentadas na Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 2500$ rpm: (a) ω ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;



Fonte: Autor.

Figura 28 - Simulação com velocidade de rotação fixada em $\omega = 2500$ rpm: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;



Fonte: Autor.

O Quadro 1 apresenta o resumo dos valores das variáveis de interesse para as simulações em questão.

Quadro 1 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω fixado em valores únicos.

Tempo [s]	ω [rpm]	V_{fase} [V]	V_{carga} [V]	I_{campo} [A]	$P_{bateria}$ [W]	P_{ideal} [W]
0 - 0,25	4500	124,12	11,9	0,489	1103	1010
0 - 0,25	2500	125,29	11,9	0,878	314	173

Fonte: Autor.

Percebe-se que a velocidade de rotação do gerador se mantém no valor de 2500 rpm inicialmente definido durante todo o período de simulação (Figura 27 - a). As tensões de fase

fornecidas pelo gerador se mantêm com frequência constante após período inicial de estabilização e valores eficazes de $V_a = 127,02$ V, $V_b = 124,85$ V e $V_c = 123,99$ V durante a duração completa da simulação, caracterizando um erro de aproximadamente 1,3% quando comparado a média das três fases com o valor desejado de 127 V (Figura 27 - b). A tensão na carga se mantêm com valor muito próximo dos 12 V desejados durante toda a simulação, apresentando variações entre 11,7 V e 12,1 V, o que é está dentro da variação prevista no projeto (Figura 27 - c). A corrente de campo do gerador apresenta valor médio de 879 mA, apresentando *ripple* de aproximadamente 1,8% (Figura 28 - a). A tensão na bateria inicia em 36 V e aumenta com o decorrer do tempo devido à potência entregue para a bateria ser maior que o necessário para o funcionamento dos elementos do circuito, possibilitando o carregamento da mesma (Figura 28 - b). Com o valor de rotação proposto, seguindo à equação de potência otimizada aplicada no projeto do circuito, a potência entregue a bateria deveria se estabilizar em aproximadamente 173 W. Entretanto, para a presente situação, esse valor ficou em torno de 314 W, 81,5% acima do proposto (Figura 28 - c). Isso evidencia a dificuldade de rastreabilidade da referência em situações de valores de ω relativamente pequenos. A causa desse fenômeno é a perda de rastreamento apropriado no comparador PWM, já que a potência instantânea lida pelo comparador de erro tende a apresentar variação em frequência menor do que a da onda dente de serra usada para gerar os pulsos, fazendo períodos inteiros de chaveamento não apresentarem níveis de tensão para efetuar o controle de condução do semicondutor de forma apropriada.

4.2. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR VARIÁVEL COM VALORES PREDEFINIDOS

Após análise inicial com ω constante durante todo o período de simulação, é proposta uma situação em que a velocidade de rotação varia ao decorrer do tempo, alternando o seu valor entre constantes conhecidas predefinidas, ou seja, definir uma velocidade de rotação $\omega_1 = K_1$ para $t_0 \leq t < t_1$, $\omega_2 = K_2$ para $t_1 \leq t < t_2$ e $\omega_3 = K_3$ para $t_2 \leq t \leq t_3$. Essa abordagem é similar à utilizada na seção anterior no sentido de que também não leva em conta o efeito de diferentes tipos e intensidades de onda do mar afetando as variáveis da tensão de entrada do circuito, porém faz com que essas variáveis sejam alteradas de forma forçada na simulação através das mudanças no valor de ω . Dessa forma, a amplitude e a frequência da tensão de alimentação trifásica de entrada do circuito serão afetadas pelas mudanças na variável de velocidade de rotação do gerador durante o período de simulação, possibilitando a avaliação

do comportamento e da resposta do circuito em casos transitórios e de mudança das variáveis de interesse.

Os valores escolhidos foram $\omega_1 = 5000$ rpm, $\omega_2 = 3000$ rpm e $\omega_3 = 1000$ rpm, cada um com uma duração de 0,1 segundo, totalizando uma simulação de 0,3 segundos. Salienta-se que nenhum desses valores coincide com a velocidade de rotação nominal definida durante o projeto do circuito e apresentada no Capítulo 3, $\omega_{nom} = 3600$ rpm. A simulação é realizada com período de amostragem de 1×10^{-7} segundos.

A tensão inicial da bateria é definida em 36 V. Novamente, busca-se manter a tensão da carga igual a 12 V. A corrente do enrolamento de campo se mantém em um valor tal qual faça com que a tensão de fase entrada do circuito seja igual à 127 V. A potência entregue a bateria segue a curva de potência ótima (curva vermelha da Figura 22), no presente caso ignorando os tipos de onda (curvas azuis) e simplesmente encontrando o ponto de potência máxima para cada um dos valores de velocidade de rotação definidos.

As variáveis de interesse após simulação são apresentadas na Figura 29 e Figura 30.

Figura 29 - Simulação com velocidade de rotação variando entre constante conhecidas: (a) ω ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;

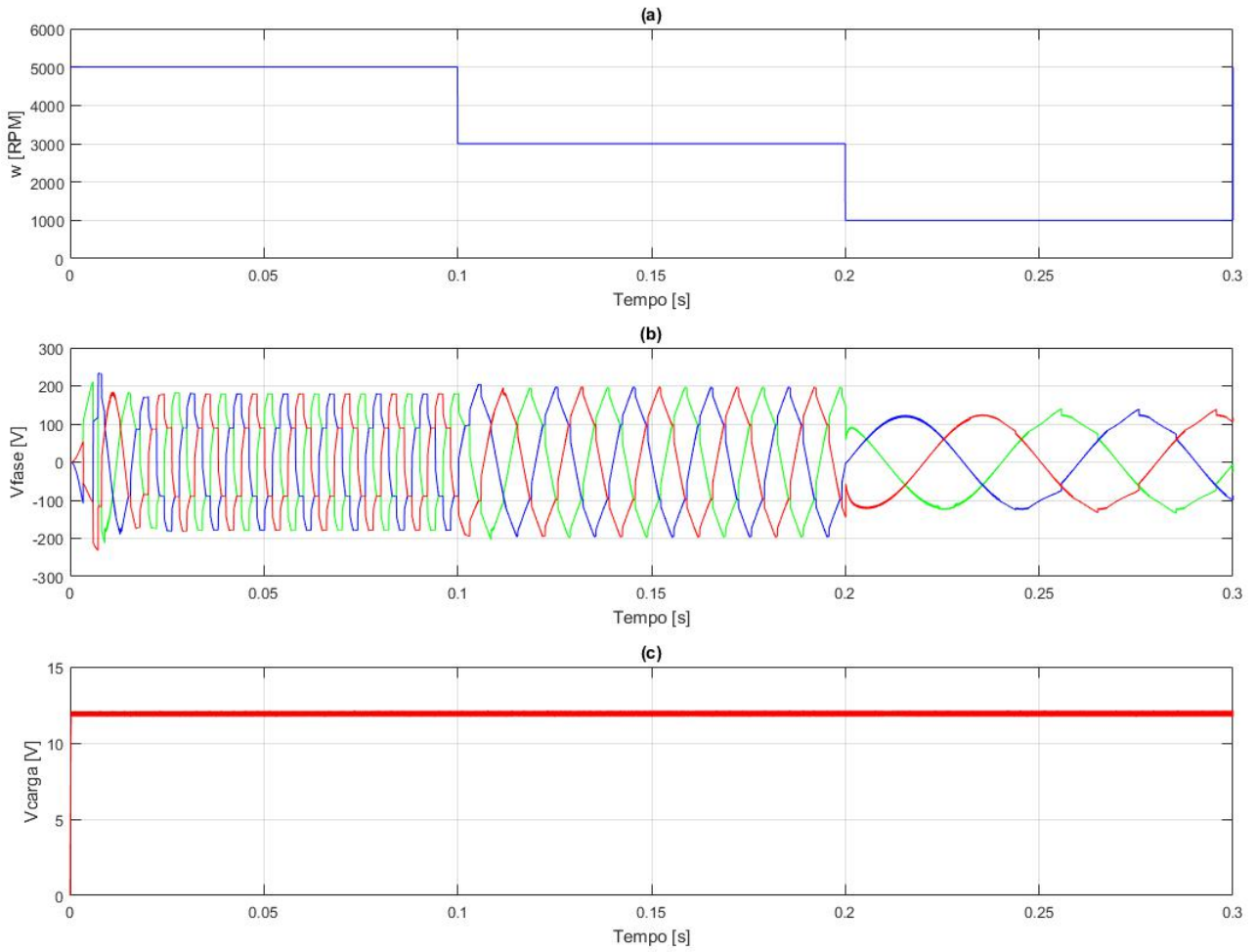
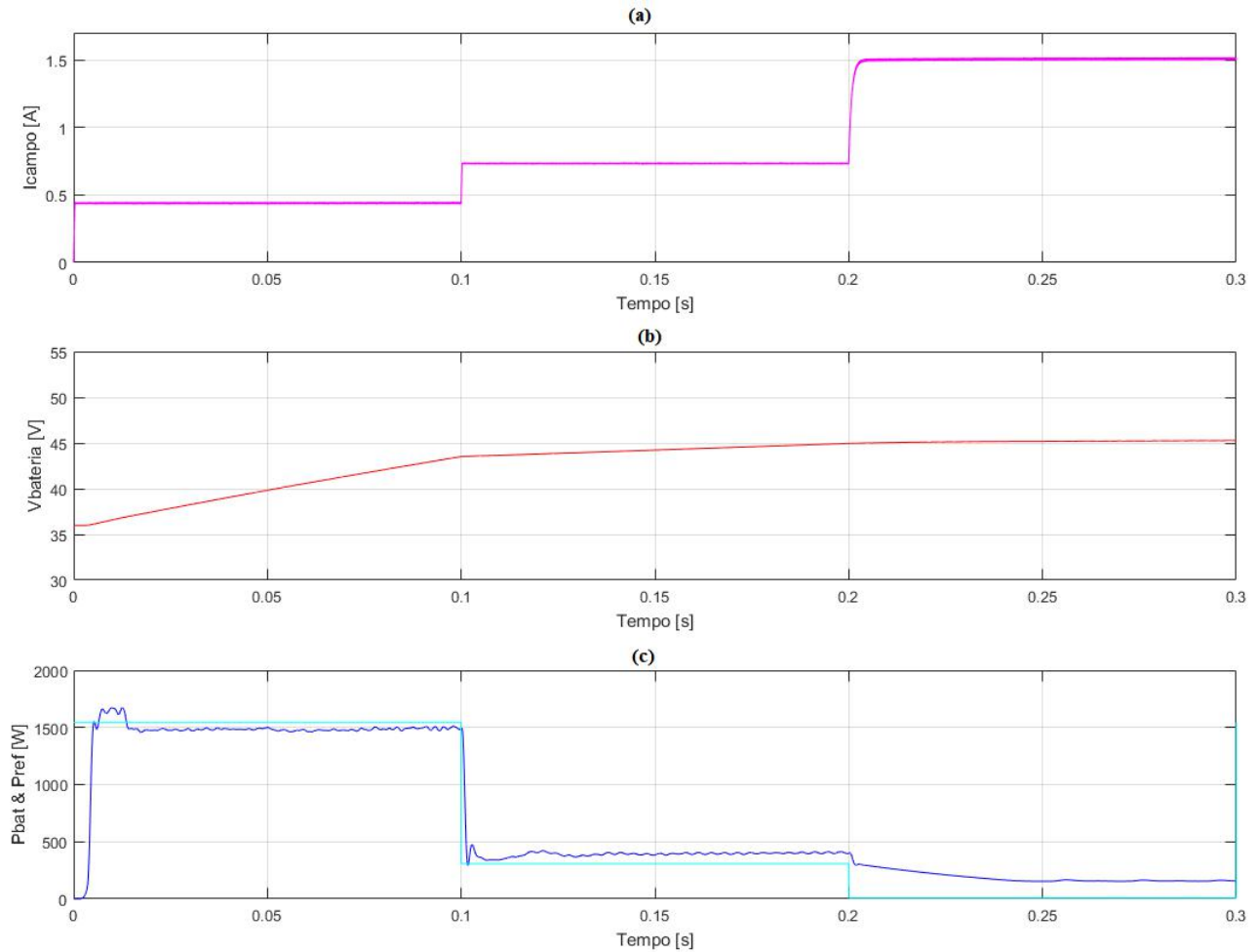


Figura 30 - Simulação com velocidade de rotação variando entre constantes conhecidas: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;



Fonte: Autor.

O Quadro 2 apresenta o resumo dos valores das variáveis de interesse para as simulações em questão.

Quadro 2 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω variando entre valores predefinidos.

Tempo [s]	ω [rpm]	V_{fase} [V]	V_{carga} [V]	I_{campo} [A]	$P_{bateria}$ [W]	P_{ideal} [W]
0 - 0,1	5000	122,28	11,9	0,440	1483	1546
0,1 - 0,2	3000	126,55	11,9	0,734	396	308
0,2 - 0,3	1000	86,32	11,9	1,510	167	10

Fonte: Autor.

Percebe-se que a velocidade de rotação do gerador muda a cada 0,1 segundos, iniciando com o valor de 5000 rpm e variando para 3000 rpm e 1000 rpm, respectivamente (Figura 29 - a). As formas de onda das tensões fornecidas pelo gerador apresentam frequência variável, mudando de forma diretamente proporcional a ω , conforme previsto no projeto.

Os valores eficazes das tensões de fase variam para cada valor de ω , conforme: $V_a = 123,47$ V, $V_b = 121,99$ V e $V_c = 121,38$ V entre 0,02 segundo e 0,1 segundo de simulação, $V_a = 126,54$ V, $V_b = 126,58$ V e $V_c = 126,54$ V entre 0,12 segundo e 0,2 segundo de simulação e $V_a = 88,92$ V, $V_b = 81,70$ V e $V_c = 88,34$ V entre 0,22 segundo e 0,3 segundo de simulação (Figura 29 - b). Isso explicita o menor índice de erro de convergência em valores próximos à rotação nominal de 3600 rpm para que o circuito foi projetado. Valores considerados muito baixos, como 1000 rpm, tendem a apresentar erros grandes devido a saturação dos elementos de controle, enquanto o mesmo fenômeno não é tão perceptível para valores de velocidade de rotação considerados altos, como 5000 rpm, em que a taxa de erro da média das tensões de fase é menor do que 5%.

A tensão na carga se mantém com valor muito próximo dos 12 V desejados durante toda a simulação, apresentando variações entre 11,7 V e 12,1 V, o que é está dentro da variação prevista no projeto (Figura 29 - c).

Conforme esperado, a corrente de campo do gerador tenta acompanhar as variações de ω com o objetivo de manter a amplitude de tensão do gerador constante, apresentando os seguintes valores médios durante a duração da simulação: 440 mA entre 0,01 e 0,1 segundo, apresentando *ripple* de aproximadamente 4,1%, 734 mA entre 0,11 e 0,2 segundo, apresentando *ripple* de aproximadamente 1,9% e 1,51 A entre 0,21 e 0,3 segundo, apresentando *ripple* de aproximadamente 1,9% (Figura 30 - a).

A tensão na bateria inicia em 36 V e aumenta com o decorrer do tempo devido à potência entregue para a bateria ser maior que o necessário para o funcionamento dos elementos do circuito, possibilitando o carregamento da mesma (Figura 30 - b). Apesar disso, percebe-se que com o menor valor de ω proposto, a tensão da bateria se estabiliza e o elemento começa a apresentar característica de início de descarregamento devido à estabilização do fluxo de potência com o novo valor de rotação do gerador inserido no sistema.

Com os valores de rotação propostos, seguindo à equação de potência otimizada aplicada no projeto do circuito, a potência entregue a bateria deveria se estabilizar em aproximadamente 1546 W para o valor de ω mais alto, 308 W para o valor intermediário e

10 W para o valor mais baixo. Para a presente situação, o valor médio da potência entregue após estabilização do circuito foi 1483 W para $\omega = 5000$ rpm (caracterizando erro de 4,1%), 396 W para $\omega = 3000$ rpm (caracterizando erro de 28,6%) e 167 W para $\omega = 1000$ rpm (caracterizando erro de 1570%) (Figura 30 - c). Isso evidencia a facilidade de convergência na parte de regulação do sistema para rotações mais altas, e, em contrapartida, a total perda de rastreabilidade da referência em situações de velocidade de rotação do gerador muito baixas devido a mal funcionamento do comparador PWM nessa faixa de operação, em que a potência instantânea lida pelo comparador de erro apresenta resposta muito lenta, não podendo ser comparada de forma apropriada a onda dente de serra usada para gerar os pulsos e fazendo períodos inteiros de chaveamento não apresentarem níveis de tensão para efetuar o controle de condução do semicondutor.

4.3. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR LIVRE SOB EFEITO DE UMA ÚNICA INTENSIDADE DE ONDA

Nessa seção é proposto o caso de simulação em que a velocidade de rotação do gerador não é fixada em valores conhecidos, mas sim controlada de forma a chegar ao valor de referência que faz com que o máximo valor de potência seja fornecido para determinado tipo de onda. Para isso, equações que representam diferentes intensidades de movimento oceânico foram geradas usando como base curvas presentes na Figura 21 (em azul). Para cada uma das curvas geradas, foi identificado o valor de ω para o ponto de maior potência, que foi utilizado de referência para a potência transmitida à bateria na malha de controle do conversor *buck-boost*. A potência instantânea transmitida à bateria, por sua vez, serve como referência para se determinar o valor de ω para cada instante de tempo, fazendo com que a potência que está sendo transmitida ao circuito tenha relação direta com a velocidade de rotação do gerador, o que não acontecia nas simulações realizadas nas Seções 4.1 e 4.2. De forma geral, isso torna a análise mais completa e fiel ao problema, já que está sendo levado em conta o tipo de onda que está incidindo sobre o sistema e o impacto do valor de potência absorvida na velocidade de rotação do gerador.

Na presente seção, será apresentado um caso em que um único tipo de onda está sendo aplicado sobre o sistema; portanto, o ponto de potência máxima e conseqüentemente o valor de ω de referência se mantém constante durante toda a duração da simulação em questão.

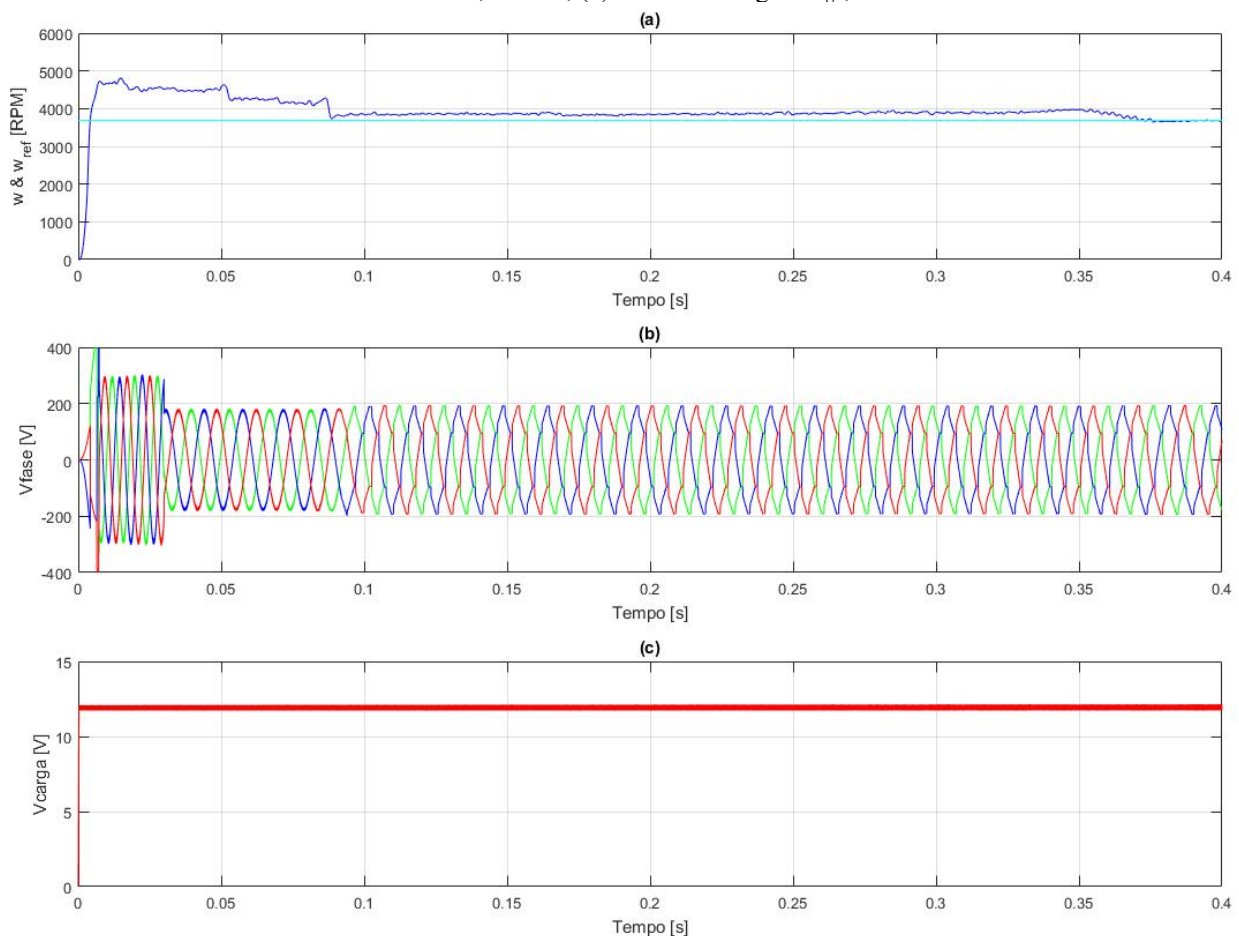
O tipo de onda escolhido para a simulação foi de intensidade intermediária, em que o ponto de potência máxima coincide com $\omega = 3685$ rpm, valor utilizado como referência para

o controle de potência entregue a bateria e referido como ω_{ref} . A simulação totaliza uma duração de 0,4 segundos e apresenta período de amostragem de 1×10^{-7} segundos. Um valor de rotação inicial é aplicado ao sistema por 0,03 segundo para garantir a inicialização.

As condições impostas nos casos apresentados nos capítulos anteriores se mantêm: a tensão inicial da bateria é definida em 36 V. A carga busca se manter com tensão igual a 12 V. A corrente do enrolamento de campo se mantêm em um valor tal qual faça com que a tensão de fase entrada do circuito seja igual à 127 V. A potência entregue a bateria segue a curva de potência ótima (curva vermelha da Figura 22), achando o ponto de potência máxima para o valor de rotação de referência definido para o tipo de onda que está sendo aplicado. O valor instantâneo de rotação do gerador é determinado a partir da potência instantânea que está sendo transmitida à bateria.

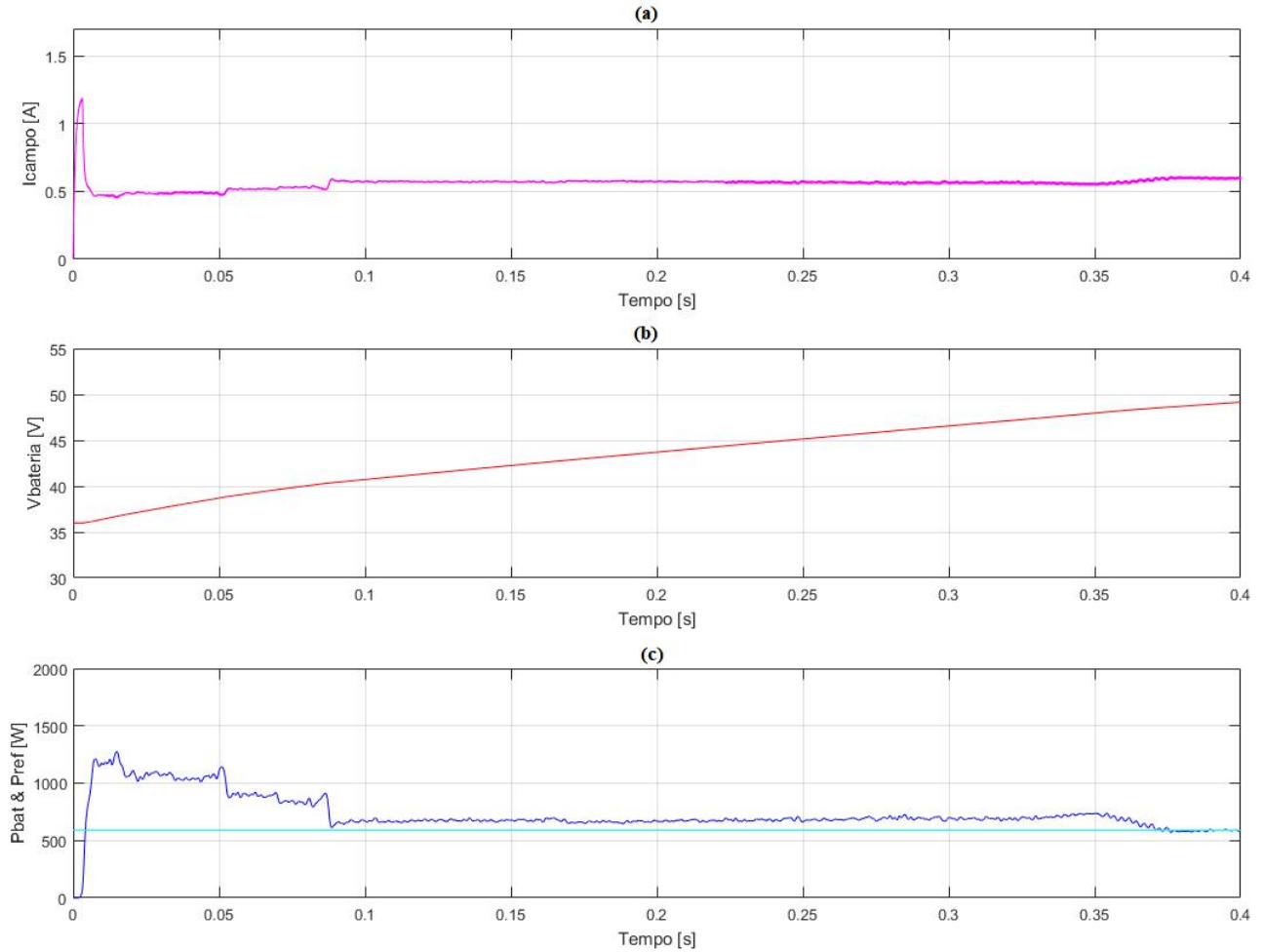
As variáveis de interesse após simulação são apresentadas na Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 - Simulação com velocidade de rotação livre para único tipo de onda: (a) ω e ω_{ref} ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;



Fonte: Autor.

Figura 32 - Simulação com velocidade de rotação livre para único tipo de onda: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;



Fonte: Autor.

O Quadro 3 apresenta o resumo dos valores das variáveis de interesse para as simulações em questão.

Quadro 3 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω livre sob efeito de única intensidade de onda.

Tempo [s]	ω [rpm]	ω_{ref} [RPM]	V_{fase} [V]	V_{carga} [V]	I_{campo} [A]	$P_{bateria}$ [W]	P_{ideal} [W]
0 - 0,088	Instável	3685	Instável	11,9	Instável	Instável	589
0,088 - 0,37	Estabilizando	3685	126,0	11,9	0,575	Estabilizando	589
0,37 - 0,4	3784	3685	126,0	11,9	0,575	638	589

Fonte: Autor.

Percebe-se que a velocidade de rotação do gerador apresenta instabilidade no início da simulação, começando a se estabilizar a partir de $t = 0,088$ s. Apesar disso, é somente após $t = 0,37$ s que ocorre a maior convergência seguida de estabilidade para a variável. A partir desse ponto, tem-se o valor médio de $\omega = 3784$ rpm, apresentando um erro de 2,7% quando comparado à referência de 3685 rpm (Figura 31 - a). As tensões de fase fornecidas pelo gerador também apresentam instabilidade inicial, evidente na brusca mudança de amplitude e frequência na parte inicial de simulação. Entretanto, avaliando essas variáveis a partir de $t = 0,1$ s, onde já é encontrada certa estabilidade, tem-se os valores eficazes de $V_a = 126,10$ V, $V_b = 126,10$ V e $V_c = 125,79$ V, caracterizando um erro de aproximadamente 0,8% quando comparado a média das três fases com o valor desejado de 127 V (Figura 31 - b). A tensão na carga se mantém com valor muito próximo dos 12 V desejados durante toda a simulação, apresentando variações entre 11,7 V e 12,1 V, o que é está dentro da variação prevista no projeto (Figura 31 - c). A corrente de campo do gerador apresenta valor médio de 575 mA quando avaliado a partir do fim do período transitório inicial, apresentando valor máximo de 613 mA e mínimo de 542 mA nessa faixa de tempo, caracterizando uma ondulação de aproximadamente 12,3% (Figura 32 - a). A tensão na bateria inicia em 36 V e aumenta com o decorrer do tempo devido à potência entregue para a bateria ser mais que o necessário para o funcionamento dos elementos do circuito, possibilitando o carregamento da mesma (Figura 33 - b). Com a intensidade de onda aplicada ao sistema, seguindo à equação de potência otimizada aplicada no projeto do circuito (Equação (9)), a potência entregue a bateria deveria se estabilizar em aproximadamente 589 W. Avaliando entre a faixa $0,37 \text{ s} \leq t \leq 0,6$, o valor médio da potência entregue foi de 638 W, 8,3% acima do proposto (Figura 32 - c).

4.4. SIMULAÇÃO COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO GERADOR LIVRE SOB EFEITO DE DIVERSAS INTENSIDADES DE ONDA

Nessa seção é proposto o caso de simulação em que a velocidade de rotação do gerador não é fixada em valores conhecidos, mas sim controlada de forma a chegar ao valor de referência que faz com que o máximo valor de potência seja fornecido para determinado tipo de onda, da mesma forma que apresentado no capítulo anterior. Entretanto, dessa vez, será analisado o caso em que diferentes tipos de onda incidem sobre o sistema durante a duração da simulação, fazendo com que a referência de rotação (e conseqüentemente de potência ótima) mude durante esse tempo. Da mesma forma, a potência entregue à bateria

continua servindo como referência para se determinar o valor de ω para cada intervalo de tempo, fazendo com que a potência que está sendo transmitida ao circuito tenha relação direta com a velocidade de rotação do gerador, o que não acontecia nas simulações realizadas nas Seções 4.1 e 4.2, além de haver a mudança de referências conforme descrito acima, o que não ocorria na Seção 4.3. Essa é a análise mais completa e fiel ao problema, já que está sendo levado em conta o tipo de onda que está incidindo sobre o sistema, a variação do mesmo ao longo do tempo e o impacto do valor de potência absorvida na velocidade de rotação do gerador.

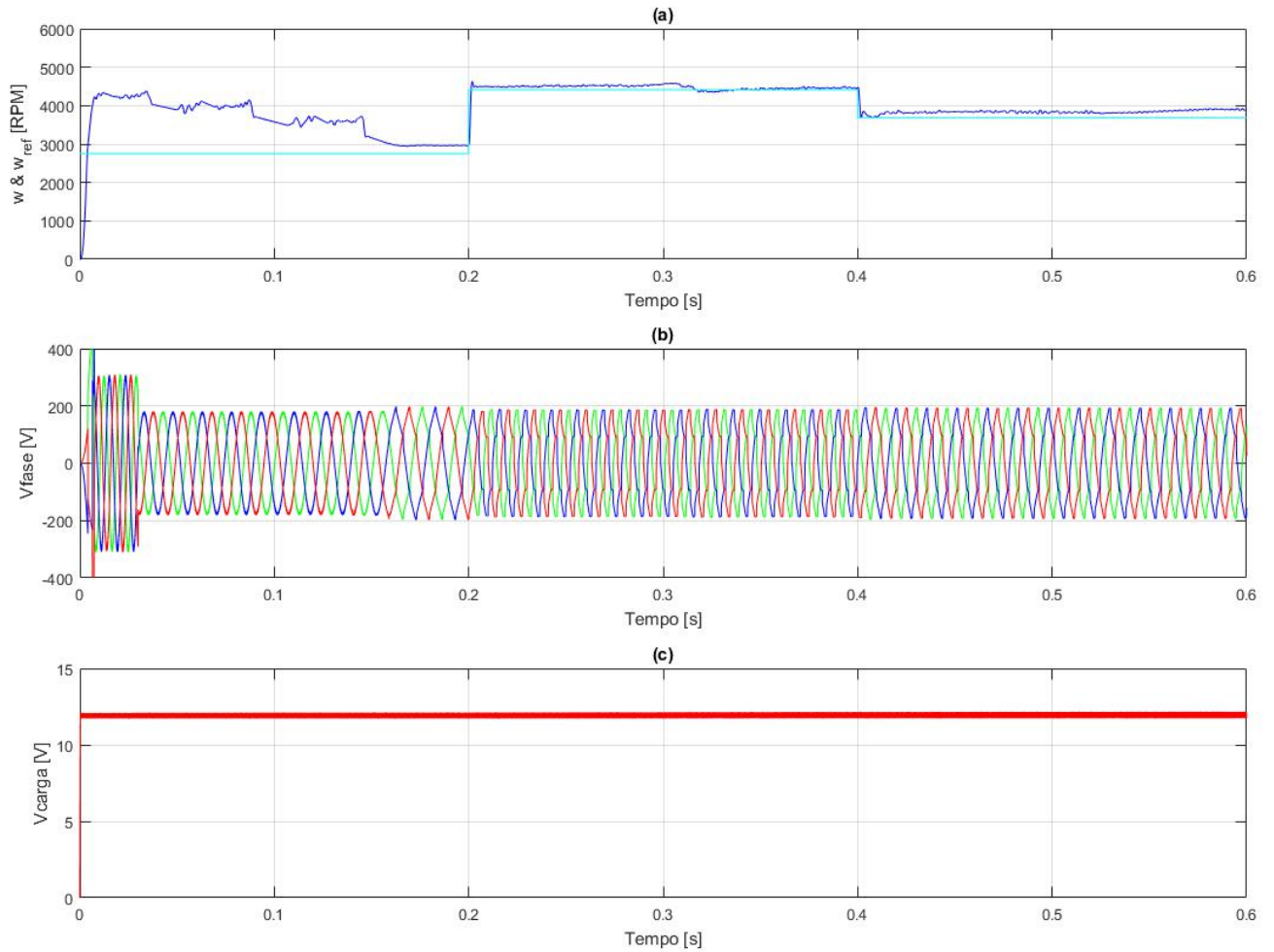
Na presente seção, será apresentado um caso em que três tipos de onda são aplicados sobre o sistema; portanto, o ponto de potência máxima e conseqüentemente o valor de ω de referência variam durante a simulação em questão.

Os três modelos de onda escolhidos para a simulação foram de intensidade baixa, alta e intermediária, respectivamente. Para cada uma delas, o ponto de potência máxima coincide com $\omega_1 = 2752$ rpm, $\omega_2 = 4411$ rpm e $\omega_3 = 3685$ rpm, valores utilizados como referência para o controle de potência entregue a bateria, referido como ω_{ref} . A simulação totaliza uma duração de 0,6 segundo, sendo 0,2 segundo para cada tipo de onda, e apresenta período de amostragem de 1×10^{-7} segundos. Um valor de rotação inicial é aplicado ao sistema por 0,03 segundos para garantir a inicialização.

Conforme feito na seção anterior, mantém-se o seguinte padrão: a tensão inicial da bateria é definida em 36 V. A carga busca se manter com tensão igual a 12 V. A corrente do enrolamento de campo deve se ajustar de tal forma que a tensão de fase da entrada do circuito seja igual à 127 V. A potência entregue à bateria deve seguir a curva de potência ótima (curva vermelha da Figura 22), ou seja, coincidente com o ponto de potência máxima para o valor de rotação de referência definido para o tipo de onda que está sendo aplicado. O valor instantâneo de rotação do gerador é determinado a partir da potência instantânea que está sendo transmitida à bateria.

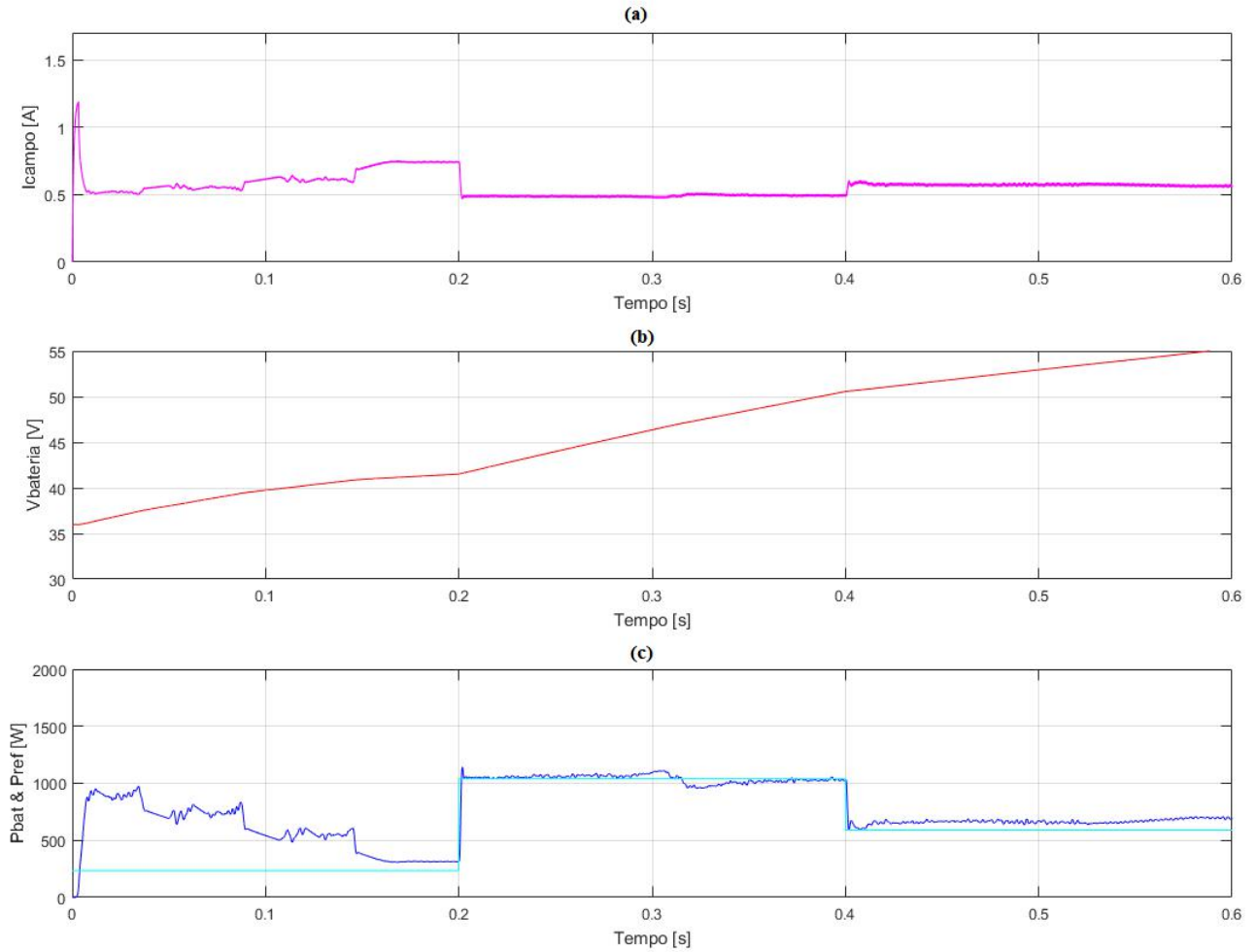
As variáveis de interesse após simulação são apresentadas na Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 - Simulação com velocidade de rotação livre para diversos tipos de onda: (a) ω e ω_{ref} ; (b) tensões de fase V_a , V_b e V_c ; (c) tensão na carga V_{carga} ;



Fonte: Autor.

Figura 34 - Simulação com velocidade de rotação livre para diversos tipos de onda: (a) corrente no enrolamento de campo do gerador I_{campo} ; (b) tensão na bateria V_{bat} ; (c) potência instantânea na bateria e potência ótima de referência;



Fonte: Autor.

O Quadro 4 apresenta o resumo dos valores das variáveis de interesse para as simulações em questão.

Quadro 4 - Resumo dos valores das variáveis de interesse para simulação com ω livre sob efeito de diversas intensidades de onda.

Tempo [s]	ω [rpm]	ω_{ref} [rpm]	V_{fase} [V]	V_{carga} [V]	I_{campo} [A]	$P_{bateria}$ [W]	P_{ideal} [W]
0 - 0,15	Instável	2752	-	11,9	Instável	Instável	234
0,15 - 0,2	2987	2752	125,28	11,9	0,737	321	234
0,2 - 0,4	4480	4411	125,28	11,9	0,492	1038	1040
0,4 - 0,6	3843	3685	125,28	11,9	0,573	666	589

Fonte: Autor.

Percebe-se que a referência de velocidade de rotação do gerador muda a cada 0,2 segundos, conforme mudança do tipo de onda que incide sobre o sistema. Durante a duração da onda de menor intensidade, nota-se que o circuito passa por um período de instabilidade inicial, fazendo com que ω só atinja um valor estável de 2987 rpm a partir de $t = 0,15$ s, representando um erro de 8,5% quando comparado à referência de 2752 rpm. Após transição para a faixa de tempo em que a onda de maior intensidade atua sobre o sistema, a estabilidade ocorre rapidamente, apesar de haver variações significativas do valor de ω durante esse intervalo. O valor médio é de 4480 rpm, com máximo em 4582 rpm e mínimo em 4352 rpm, um erro de 1,6% quando comparado à referência de 4411 rpm. No último intervalo de tempo, quando a intensidade de onda intermediária incide sobre o sistema, observa-se que estabilidade é atingida rapidamente. O valor médio de ω entre $t = 0,41$ s e $t = 0,6$ s é 3843 rpm, com máximo em 3924 rpm e mínimo em 3713 rpm, um erro de 4,3% quando comparado à referência de 3685 rpm (Figura 33 - a).

As formas de onda das tensões fornecidas pelo gerador apresentam frequência variável, diretamente proporcional a ω , conforme previsto no projeto. Os valores eficazes das tensões de fase também variam para cada tipo de onda aplicada no sistema, porém essa variação não é muito perceptível devido à atuação da compensação feita no enrolamento de campo. Os valores das tensões de fase eficazes, após o período de estabilização inicial dessa parte do sistema em $t = 0,037$ s, são: $V_a = 125,00$ V, $V_b = 125,35$ V e $V_c = 125,50$ V, caracterizando um

erro de aproximadamente 1,4% em relação à tensão de fase eficaz desejada de 127 V (Figura 33 - b).

A tensão na carga se mantém com valor muito próximo dos 12 V desejados durante toda a simulação, apresentando variações entre 11,7 V e 12,1 V, o que é está dentro da variação prevista no projeto (Figura 33 - c).

Conforme esperado, a corrente de campo do gerador tenta acompanhar as variações de ω com o objetivo de manter a amplitude de tensão do gerador constante, o que se mostrou bem sucedido devido aos valores de tensão de fase eficazes apresentados acima. Foram registrados os seguintes valores médios após estabilização em cada etapa durante a duração da simulação: 737 mA entre 0,15 e 0,2 segundo, apresentando *ripple* de aproximadamente 8,7%, 492 mA entre 0,21 e 0,4 segundo, apresentando *ripple* de aproximadamente 8,9% e 573 mA entre 0,41 e 0,6 segundo, apresentando *ripple* de aproximadamente 9,1% (Figura 34 - a).

A tensão na bateria inicia em 36 V e aumenta com o decorrer do tempo devido à potência entregue para a bateria ser mais que o necessário para o funcionamento dos elementos do circuito, possibilitando o carregamento da mesma (Figura 34 - b).

Com as intensidades de ondas tomadas como referência e suas respectivas velocidades de rotação do gerador seguindo à equação de potência otimizada aplicada no projeto do circuito, a potência entregue a bateria deveria se estabilizar em aproximadamente 234 W para a intensidade de onda mais baixa, 1040 W para o caso de maior intensidade e 589 W para a situação intermediária. Para a presente situação, o valor médio da potência entregue após estabilização do circuito foi 321 W para o primeiro intervalo (caracterizando erro de 37,2%), 1038 W para o intervalo seguinte (caracterizando erro de 0,2%) e 666 W para o intervalo final (caracterizando erro de 13,1%) (Figura 32 - c). Esses resultados reforçam a evidência da maior facilidade de convergência do sistema para rotações mais altas, apresentando erros cada vez maiores conforme os valores da velocidade de rotação do gerador durante a operação vão diminuindo.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realização das simulações apresentadas no capítulo anterior, conclui-se que o sistema proposto apresenta comportamento satisfatório em todos os elementos de interesse quando o gerador está a uma velocidade de rotação maior que aproximadamente 2700 rpm, começando a apresentar erros mais elevados na parte de controle de potência com valores de ω menores devido ao baixo nível de potência convertida que leva o circuito a operar em modo de condução descontínuo, e assim a relação de ganho estático não é mantida conforme projetado, isto é, para operação em modo de condução contínua. Apesar disso, o resto do sistema continua se comportando bem mesmo com esses valores de rotação inferiores, com a tensão na carga se mantendo próxima de 12 V em todas as situações propostas e com a corrente de campo do gerador sendo controlada de forma a adequar a tensão eficaz de fase da entrada do sistema para o valor desejado de 127 V na grande maioria dos casos, apresentando erro devido a saturação nos elementos de controle somente no caso estudado em que $\omega = 1000$ rpm, valor considerado muito baixo para um sistema OWC. Para o circuito responder melhor em baixas velocidades pode-se adotar as seguintes medidas: aumentar o valor do indutor de armazenamento do *buck-boost*, aumentar a frequência de chaveamento do *buck-boost* ou alterar os valores de tensão de referência da bateria e/ou da tensão nominal do gerador para operar com ganhos estáticos que favoreçam a operação em baixas velocidades de rotação.

O sistema mostrou rápida resposta frente às variações impostas nas simulações, apresentando, de forma geral, um período curto de instabilidade na parte de tensão de entrada durante a inicialização, não sendo o caso durante transições devido à resposta essencialmente instantânea do nível de corrente no enrolamento de campo do gerador. A potência entregue à bateria também apresentou certo atraso para convergência somente após o início do funcionamento, não sendo o caso durante as transições entre diferentes níveis de referência durante a duração das simulações.

Como implementações futuras, sugere-se a tentativa de adequação do projeto para melhor desempenho para baixos valores de ω e a adoção de um elemento dissipador de energia no circuito para o caso de fluxo de potência muito alto e sobretensão na bateria, caso que não foi estudado durante a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

AMON, E. A.; BREKKEN, T. K. A.; SCHACHER, A. A. Maximum Power Point Tracking for Ocean Wave Energy Conversion. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Corvallis, v. 48, p. 1079-1086, Maio/Jun. 2012.

BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. 6. ed. Florianópolis: ed. do Autor, 2006.

CAMPOS, G. A. P. **Estudo de Mecanismo Aplicado na Geração de Energia a partir de Correntes Oceânicas**. 2013. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CEBALLOS, S.; REA, J.; ROBLES, E.; LOPEZ, I.; POU, J.; O'SULLIVAN, D. Control strategies for combining local energy storage with wells turbine oscillating water column devices. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 83, p. 1097-1109, Nov. 2015.

EVANS, D. V. The oscillating water column wave-energy device. **IMA Journal of Applied Mathematics**, v. 22, p. 423-433, Dez. 1978.

FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 14, p. 899-918, Abril 2010.

FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 85, p. 1391-1424, Jan. 2016.

FERNANDES, N. T. D.; DEMONTI, R.; ANDRADE, J.; MELO, P. F.; BIANCHIN, C. G.; ALMEIDA, A. R.; PRETKO, G.; LEMOS, A. R. Control Strategy for Pulsed Lead Acid Battery Charger for Stand Alone Photovoltaics. In: IEEE Brazilian Power Electronics Conference and Southern Power Electronics Conference, 2015, Fortaleza. **2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference**. New Jersey: IEEE, Fev. 2016.

GATO, L. M. C.; FALCÃO, A. F. O. Aerodynamics of the Wells turbine. **International Journal of Mechanical Sciences**, Amsterdam, v. 30, p. 383-395, 1988.

HEATH, T. V. A review of oscillating water columns. **Phil. Trans. R. Soc. A**, Inverness, v. 370, p. 235-245, Jan. 2012.

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

LIN, H. C.; HE, Y. J.; LIU, C. W. Design of An Efficient Battery Charging System Based on Ideal Multi-state Strategy. In: International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2016, Xi'an. **2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)**. New Jersey: IEEE, Agosto 2016.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2. ed. Florianópolis: ed. dos Autores, 2006.

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

MURRAY, D. B.; GALLAGHER, P.; DUFFY, B.; MCCORMACK, V. **Energy Storage Solutions for Offshore Wave and Tidal Energy Prototypes**. In: International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, 2017, Monte Carlo. **2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)**. New Jersey: IEEE, Jun. 2017.

POLINDER, H.; DAMEN, M. E. C.; GARDNER, F. Linear PM Generator System for Wave Energy Conversion in the AWS. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, New Jersey, v.19, p. 583-589, Set. 2004.

RAJAPAKSE, G.; JAYASINGHE, S.; FLEMING, A.; NEGNEVITSKY, M. A Model Predictive Control-Based Power Converter System for Oscillating Water Column Wave Energy Converters. **Energies**, Newnham, v. 10, p. 1631-1647, Out. 2017.

RUSU, E.; ONEA, F. A review of the technologies for wave energy extraction. **Clean Energy**, [S.l.], v. 2, p. 10-19, Mar. 2018.

SHARAF, A. M.; EL-GAMMAL, A. A. A. Optimal Self Regulating Stand-Alone Wave Energy Conversion Scheme. In: IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2009, Montreal. **2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)**. New Jersey: IEEE, Mar. 2010.

SHENG, W.; LEWIS, A. Power Takeoff Optimization to Maximize Wave Energy Conversions for Oscillating Water Column Devices. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, New Jersey, v. 43, p. 37-48, Jan. 2018.

TEDESCHI, E.; SANTOS-MUGICA, M. Modeling and Control of a Wave Energy Farm Including Energy Storage for Power Quality Enhancement: the Bimep Case Study. **IEEE Transactions on Power Systems**, New Jersey, v. 29, p. 1489-1497, Maio 2014.

THE QUEEN'S UNIVERSITY OF BELFAST. **Islay LIMPET Wave Power Plant Report**. Belfast: Queens University, 2002. 62 p. European Commission.

THORPE, T. W. **An Overview of Wave Energy Technology: Status, Performance and Costs**. London: Broadway House, 1999. 16 p.

WU, F.; ZHANG, X. P. Application of the Battery Energy Storage in Wave Energy Conversion system. In: International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009, Nanjing. **2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**. New Jersey: IEEE, Dez. 2009.