

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

**FILIPE DOS SANTOS WERMANN**

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA MPPT PARA OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA  
CONVERTIDA EM SISTEMA DE GERAÇÃO A PARTIR DO MOVIMENTO DE  
ONDAS OCEÂNICAS**

Porto Alegre

2021



**FILIPPE DOS SANTOS WERMANN**

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA MPPT PARA OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA  
CONVERTIDA EM SISTEMA DE GERAÇÃO 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

2021

**FILIPPE DOS SANTOS WERMANN**

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA MPPT PARA OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA  
CONVERTIDA EM SISTEMA DE GERAÇÃO A PARTIR DO MOVIMENTO DE  
ONDAS OCEÂNICAS**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert**

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert, UFRGS**

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

**Profa. Dra. Thieli Smidt Gabbi**

**Doutora pela Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, Brasil**

**Eng. Cristiano Pereira Bandeira**

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

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família, que sempre priorizou meus estudos e disponibilizou tudo quanto foi possível (e o impossível) em prol da minha educação.

Dedico também a mim mesmo, que, com coragem, resiliência e dedicação, superei desafios que um dia pareciam improváveis de serem realizados.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu pai José Alfeu Wermann, minha mãe Evinha dos Santos Wermann e minha irmã Natália dos Santos Wermann por sempre me apoiarem e incentivarem cada vez mais a ser uma pessoa melhor, tomando sempre como base para isso a educação. Vocês foram essenciais nesse processo.

Aos meus amigos, colegas e não colegas na universidade, por estarem sempre ao meu lado, nos momentos bons e nos nem tanto. Sem vocês eu jamais chegaria aqui.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de fazer parte de sua história, prezando sempre por um ensino superior público gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador Paulo Roberto Eckert pela orientação neste trabalho.

À todos meus professores, do colégio à universidade, pela contribuição em minha formação e crescimento como pessoa. Vocês são a luz do mundo.

Obrigado!

“Educação não transforma o mundo.  
Educação muda as pessoas.  
Pessoas transformam o mundo.”

Paulo Freire.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de um método para obtenção de uma maior eficiência energética em um sistema de geração de energia elétrica a partir do movimento de ondas oceânicas. Inicialmente, é exposto um estudo dos sistemas já existentes de conversão de energia das ondas marítimas e oceânicas através da apresentação de diferentes classificações e modelos desenvolvidos nas últimas décadas por pesquisadores desta área, não usualmente explorada, mas que vem ganhando espaço devido a sua potencialidade. Em seguida, é apresentado o método MPPT, foco do trabalho, mostrando e classificando as diferentes formas de rastrear-se e obter-se o ponto de máxima potência na conversão de energia elétrica, comumente utilizado na geração eólica. Assim, é aplicado este método em um conversor de energia elétrica projetado para um sistema de coluna de água oscilante, composto por um gerador síncrono trifásico de ímãs permanentes e um retificador PWM trifásico e seus controladores que atuam para manter o fator de potência unitário e para ter baixos níveis de distorção harmônica. Considera-se neste trabalho uma geração de energia elétrica oriunda de uma boia em alto-mar, chamada de *spar buoy*, capaz de alimentar um banco de baterias que armazenará carga suficiente para alimentar sensores de monitoramento climático. A aplicação do método MPPT tem sua relevância neste tipo de sistema, uma vez que as condições de amplitude e frequência das ondas variam de modo intermitente. É utilizado o método MPPT com o princípio Perturba e Observa a fim de validar sua usabilidade para esta aplicação. Para tal, através de um simulador de circuitos elétricos, são realizadas simulações onde o método MPPT buscará a melhor referência para os controladores do sistema operando em diversas condições. Assim, são apresentadas as curvas de saída de potência, curvas de tensão e corrente no gerador, que comprovam a eficiência do MPPT para este tipo de sistema de conversão estudado.

**Palavras-Chaves:** Energia das ondas, MPPT, Coluna de Água Oscilante, *Spar buoy*, Gerador síncrono trifásico de ímãs permanentes, Retificador PWM trifásico.



## ABSTRACT

This work aims to present an application of a method to obtain greater efficiency in an electrical energy generation system from the movement of ocean waves. Initially, a study of the already existing sea and ocean waves energy conversion systems is presented through the presentation of classifications and models developed in the last decades by research in this area, not usually explored, but which has been gaining space due to its potential. Then, the MPPT method, the focus of the work, is presented, showing and classifying how different ways to track and obtain the maximum power point in the conversion of electrical energy, commonly used in wind generation. Thus, this method is designed in an electrical energy converter designed for an oscillating water column system, composed of a three-phase permanent magnet generator and a three-phase PWM rectifier and its controllers that act to maintain the unity power factor and to have low levels of harmonic distortion. In this work, it is considered a electrical energy generation from an offshore buoy, called a spar buoy, capable of supplying a bank of batteries that will store enough charge to supply climate monitoring sensors. An application of the MPPT method has its nature in this type of system, as the conditions of amplitude and frequency of waves vary intermittently. The MPPT method with the Disturbance and Observation principle is used to validate its usability for this application. For that, through an electrical circuit simulator, simulations are carried out where the MPPT method seeks the best references for the system drivers operating under different conditions. Thus, power output curves, voltage and current curves in the generator are presented, which prove the efficiency of the MPPT for this type of conversion system studied.

**Keywords:** Wave energy, MPPT, Oscillating water column, Spar buoy, Three-phase permanent magnet generator, Three-phase PWM rectifier.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO .....	16
1.1.1 Conversor de Energia OWC com Spar Buoys .....	18
1.1.2 Topologia e Técnica MPPT Aplicada no Sistema.....	20
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
2.1 CLASSIFICAÇÃO E CONTROLE DE WECs .....	23
2.2 TÉCNICAS MPPT .....	30
2.2.1 Classificação e divisão dos métodos MPPT.....	30
2.2.1.1 Perturba e Observa (P&O).....	33
2.2.1.2 Perturba e Observa (P&O) Com Perturbação Adaptativa .....	35
2.2.1.3 Condutância Incremental (Incremental Conductance ou IC) .....	37
2.2.1.4 Métodos Avançados – Inteligência Artificial (IA).....	40
2.2.1.4.1 Redes Neurais Artificiais ( <i>Artificial Neural Networks</i> ou ANN).....	40
2.2.1.4.2 Lógica de controle Fuzzy ( <i>Fuzzy logic controller</i> ou FLC).....	42
2.3 RETIFICADORES PWM TRIFÁSICOS CONTROLADOS.....	44
3 SOLUÇÃO PROPOSTA.....	48
3.1 MODELO DO CIRCUITO PROPOSTO .....	48
3.1.1 Gerador Elétrico .....	49
3.1.2 Conversor CA-CC .....	51
3.1.3 Sistema de Controle.....	53
3.1.4 Método MPPT Proposto .....	56
3.1.5 Cálculo da Velocidade Angular dos Regimes de Onda.....	60
3.2 SOLUÇÃO FINAL COMPLETA .....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	70

4.1 SIMULAÇÃO COM PERFIL DE ONDA FIXO.....	71
4.1.1 Simulação com Perfil de Onda PO1 .....	73
4.1.2 Simulação com Perfil de Onda PO2 e PO3 .....	76
4.2 SIMULAÇÃO COM PERFIS DE ONDA VARIÁVEL.....	80
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	83
5 CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS .....	85

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação das tecnologias de energia das ondas. ....	18
Figura 2 - Ilustração de uma estrutura do tipo <i>spar buoy</i> . ....	19
Figura 3 – Potência da turbina <i>versus</i> velocidade de rotação para diferentes estados marítimos (linhas azuis) e máxima potência para diferentes valores de velocidade de rotação (linha vermelha) em uma turbina com rotor de diâmetro $d = 0,25$ m. ....	20
Figura 4 - Diagrama de Blocos do Sistema Elétrico do Circuito. ....	21
Figura 5 - Classificação de WECs de acordo com diferentes critérios. ....	24
Figura 6 - Representação da turbina de Wells. ....	25
Figura 7 - Classificação de OWC. a) Vista transversal de um conversor OWC fixo. b) Vista transversal da boia <i>spar-buoy</i> OWC. c) Vista transversal do duto-coaxial OWC. ....	26
Figura 8 - Gerador síncrono de ímãs permanentes com conversores controlados do lado do gerador e da rede. ....	29
Figura 9 - Controle do conversor de potência com módulos PWM. ....	29
Figura 10: Classificação simplificada de alguns métodos de controle MPPT comuns. ....	31
Figura 11: Fluxograma do método MPPT P&O. ....	34
Figura 12: Fluxograma do método MPPT P&O com Perturbação Adaptativa. ....	36
Figura 13: Fluxograma do método MPPT IC. ....	39
Figura 14: Estrutura típica de uma ANN. ....	41
Figura 15: Lógica de controle Fuzzy. ....	42
Figura 16: Função de pertinência Fuzzy usado no processo de fuzzificação. ....	42
Figura 17: Retificadores PWM trifásicos. ....	46
Figura 18: Diagrama de blocos do sistema WEC proposto por Marei, Mokhtar e El-Sattar. ..	47
Figura 19: Diagrama organizacional do sistema estudado. ....	48
Figura 20: Circuito de regime permanente equivalente do gerador. ....	50
Figura 21: Circuito do conversor CA-CC trifásico analisado na modelagem. ....	51
Figura 22: Circuito simplificado do conversor acoplado ao gerador. ....	52
Figura 23: Circuito equivalente do conversor acoplado ao gerador. ....	53
Figura 24: Diagrama da integração entre gerador, conversor CA-CC e controle de potência. ..	55
Figura 25: Diagrama do circuito proposto com aplicação do método MPPT. ....	57
Figura 26: Fluxograma do método MPPT adaptado desenvolvido para o projeto. ....	59
Figura 27: Diagrama do cálculo da velocidade de rotação dos regimes de onda. ....	61

Figura 28: Visão geral do circuito desenvolvido através do PSIM®.	63
Figura 29: Gerador e medição de potência.	64
Figura 30: Cálculo da Velocidade Angular para os Regimes de Onda.	65
Figura 31: Conversor CA-CC.	66
Figura 32: Transformada de Park e Clarke.	67
Figura 33: Sistema de Controle.	68
Figura 34: Transformada Inversa e Geração PWM.	68
Figura 35: Bloco de aplicação do Método MPPT.	69
Figura 36: Diagrama geral de simulação no PSIM®.	71
Figura 37: Equações aproximadas da Potência <i>versus</i> Velocidade de rotação para diferentes estados marítimos (PO1, PO2 e PO3).	72
Figura 38: Equações da função da Velocidade de rotação <i>versus</i> Potência para diferentes estados marítimos (PO1, PO2 e PO3).	73
Figura 39: Simulação da potência de referência e convertida para perfil de onda PO1.	74
Figura 40: Simulação Velocidade de Rotação para perfil de onda PO1.	74
Figura 41: Simulação das correntes Id e Iq para perfil de onda PO1.	75
Figura 42: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase 1 para perfil de onda PO1.	75
Figura 43: Simulação da potência de referência e convertida para perfil de onda PO2.	77
Figura 44: Simulação Velocidade de Rotação para perfil de onda PO2.	77
Figura 45: Simulação das correntes Id e Iq para perfil de onda PO2.	77
Figura 46: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase A para perfil de onda PO2.	78
Figura 47: Simulação da potência de referência e convertida para perfil de onda PO3.	79
Figura 48: Simulação Velocidade de Rotação para perfil de onda PO3.	79
Figura 49: Simulação das correntes Id e Iq para perfil de onda PO3.	79
Figura 50: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase A para perfil de onda PO3.	80
Figura 51: Simulação da potência de referência e convertida para perfis de onda PO3, PO2 e PO1.	81
Figura 52: Simulação das correntes Id e Iq para perfis de onda PO3, PO2 e PO1.	82
Figura 53: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase A para perfis de onda PO3, PO2 e PO1.	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos métodos MPPT. ....	32
Tabela 2: Tabela de regras fuzzy .....	43
Tabela 3: Especificações de projeto do gerador. ....	50
Tabela 4: Valor nominais dos ganhos dos controladores. ....	56
Tabela 5: Definição das variáveis do fluxograma do método MPPT adaptado utilizado no projeto. ....	58
Tabela 6: Relação dos pontos de máxima Potência e Velocidade de Rotação para cada perfil de onda. ....	73
Tabela 7: Definição dos tempos para cada regime de onda. ....	81
Tabela 8: Respostas de Potência para simulação com perfil de onda variável.....	83
Tabela 9: Respostas de Potência para simulação com perfil de onda variável.....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANN: *Artificial Neural Networks* ou Redes Neurais Artificiais

BoA: *Bisector of Area* ou Bissetriz da Área

CA: Corrente Alternada

CC: Corrente Contínua

CD-OWC: *Coaxial-Duct OWC* ou Duto-Coaxial OWC

CoG: *Center of Gravity* ou Centro de Gravidade

FA: Função de Ativação

FLC: *Fuzzy Logic Controller* ou Lógica de Controle Fuzzy

IA: Inteligência Artificial

IC: *Incremental Conductance* ou Condutância Incremental

LPMSG: *Linear Permanent Magnet Synchronous Generator* ou Gerador Linear Síncrono de Imãs Permanentes

MoM: *Mean of Maxima* ou Média dos Máximos

MPP: *Maximum Power Point* ou Ponto de Máxima Potência

MPPT: *Maximun Power Point Tracking* ou Rastreamento do Ponto Máximo de Potência

OB: Corpos Oscilantes (*Oscillating Body* ou OB)

OWC: *Oscillating Water Column* ou Coluna de Água Oscilante

PI: Proporcional Integral

PMSG: *Permanent Magnet Synchronous Generator* ou Gerador Síncrono de Imãs Permanentes

PSC: *Partial Shading Conditions* ou Condições de Sombreamento Parcial

PTO: *Power Take-Off*

PWM: *Pulse Width Modulation*

P&O: Perturba e Observa

UE: União Europeia

VF-DPC: *Virtual Flux Based Direct Power Control* ou Controle Direto de Potência Baseado em Fluxo Virtual

VFOC: *Virtual Flux Oriented Control* ou Controle Orientado A Fluxo Virtual

VOC: *Voltage Oriented Control* ou Controle Orientado a Tensão

WEC: *Wave Energy Converters* ou Conversores de Energia das Ondas



## 1 INTRODUÇÃO

As soluções tecnológicas tomaram conta do cotidiano das pessoas por todo mundo, e isso não é em vão. O desenvolvimento das tecnologias revelou uma grande aceleração nos processos produtivos, na comunicação e informação e, principalmente, mudaram as relações entre as pessoas, facilitando e trazendo soluções que em tempos antigos eram inimagináveis. No entanto, tais mudanças geraram um outro grande desafio para o mundo: o suprimento energético.

A energia elétrica serve como base para todo esse desenvolvimento, e, por isso, tornou-se tão importante abrir-se novas discussões em meios alternativos e sustentáveis de sua geração. Como exemplo, surge a exploração da energia das ondas oceânicas, ainda subaproveitada devido à vários obstáculos em sua geração, entre eles a sua otimização, para que a mesma se torne economicamente viável de ser executada e implementada. Neste contexto este trabalho procurará apresentar técnicas que visam otimizar a potência convertida em um sistema de geração *offshore* que é baseado em boias com coluna de água oscilante que converte movimento de ondas oceânicas em energia elétrica.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Segundo Falcão (2010), a principal desvantagem da energia das ondas, assim como o vento de onde se origina, é sua variabilidade (grande parte aleatória) em várias escalas de tempo: de onda para onda, de acordo com o estado do mar, e de mês para mês (embora padrões de variação sazonal possam ser identificados). Com isso, necessita-se estabelecer um sistema que possa adequar-se a esses diferentes cenários, muitas vezes ainda não estudados, e permita realizar a conversão da energia produzida pelas ondas marítimas ou oceânicas de forma otimizada, com confiabilidade e padrão de qualidade aceitáveis.

Existem diversos sistemas de conversão de energia das ondas que usam variadas técnicas para absorver tal energia. A escolha do tipo de sistema depende da localidade em que será instalado (se em alto mar, na costa marítima), da profundidade da água e da aplicação do sistema. Dessa forma, tem-se diferentes princípios de trabalho que definem tais Conversores de

Energia das Ondas (*Wave Energy Converters* ou WECs), que podem ser classificados, segundo Campos (2015), em Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column* ou OWC), Corpos Oscilantes (*Oscillating Body* ou OB) e Transbordo (*Overtopping*), que serão detalhados no Capítulo 2. A Figura 1 apresenta a classificação de tais conversores, dividindo as possíveis instalações para cada um dos sistemas e exemplificando sistemas e locais onde é utilizada a tecnologia correspondente.

Os sistemas de conversão de energia apresentados neste capítulo delimitam-se ao estudo da conversão de energia potencial das ondas marítimas em energia cinética nas turbinas. Dessa forma, o próximo passo para uma geração de energia elétrica é projetar um conversor capaz de controlar os níveis de tensão e corrente produzidas a partir de um gerador conectado à turbina. Muitos métodos de controle podem ser adotados para realizar esta tarefa com otimização, e serão apresentados neste trabalho.

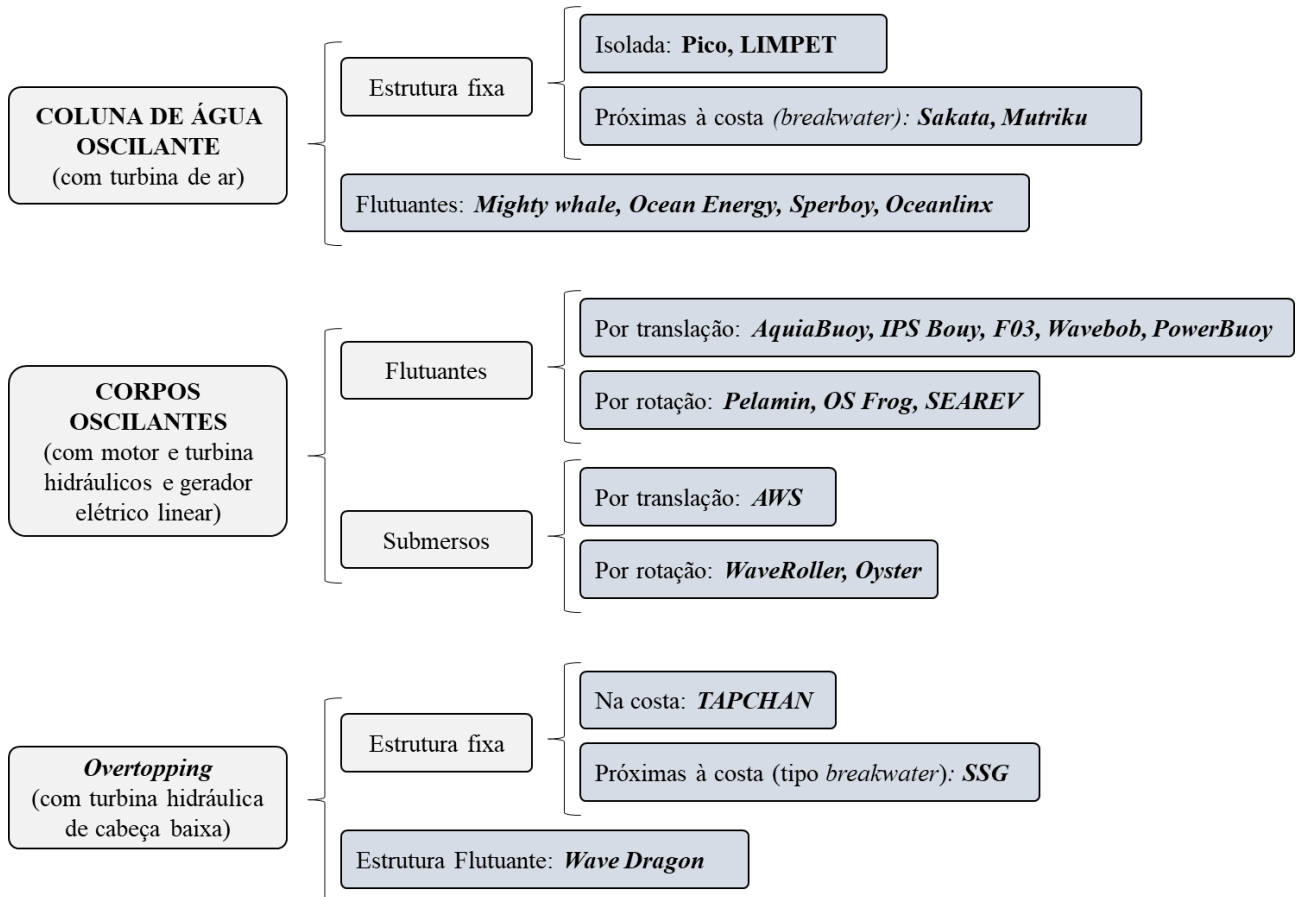
Uma das formas, e a que será abordada neste projeto, é a técnica do rastreamento do ponto máximo de potência (*Maximum Power Point Tracking* ou MPPT), amplamente utilizada nos sistemas de geração solar e eólica. Esta técnica tem por objetivo adequar os parâmetros de controle para que seja obtido o ponto de máxima potência convertida baseado na própria resposta de potência de saída.

De acordo com Henriques et al. (2016), a União Europeia (UE) estabeleceu uma série de iniciativas que promovem o conhecimento marinho e mapeamento do fundo do mar, estimando-se que com dados marinhos de alta qualidade e amplamente disponíveis para toda UE, melhorem a produtividade econômica em mais de 1 bilhão de dólares por ano. Nota-se a relevância deste estudo, definindo áreas urgentes de desenvolvimento para sistemas de observação oceânica melhores e duradouros.

Falcão (2010) descreve que, diferentemente da geração de energia com turbinas eólicas, existem diferentes tecnologias de absorção de energia proveniente das ondas, gerando ainda mais campo e oportunidades de estudos de caso. A busca por entender o comportamento marítimo e seu aproveitamento energético vem tomando relevância no cenário atual, com mais de cem projetos em diversas fases de estudo. O estudo de Henriques et al. (2016), baseia-se em um conversor de energia das ondas (WEC) utilizando um sistema com coluna de água oscilante (OWC) com boias denominadas *Spar Buoys*. Estas são sensoriadas e autoalimentadas, com a finalidade de suprir problemas de fonte energética dessas boias, hoje baseados em painéis

fotovoltaicos e baterias com vida útil e potência insuficientes para aplicações modernas (GOUIN, 2008).

Figura 1 - Classificação das tecnologias de energia das ondas.



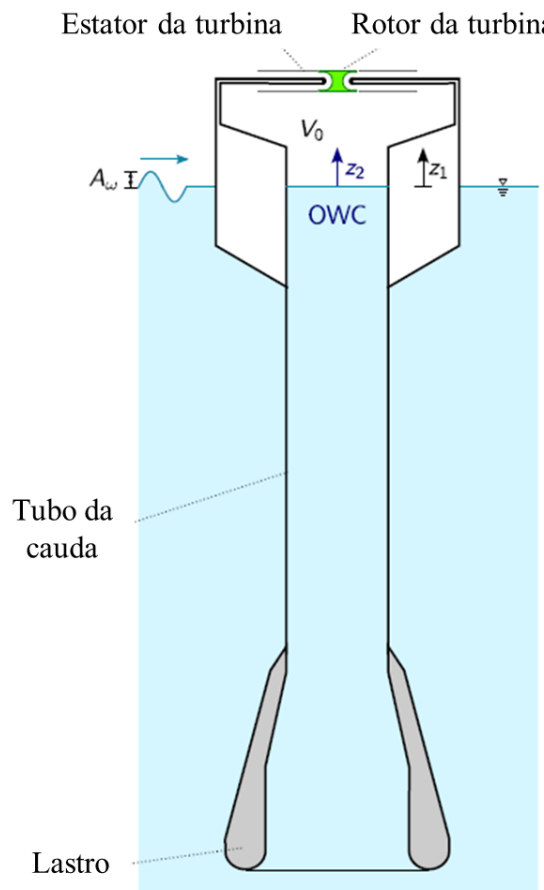
Fonte: Adaptado de Falcão (2010).

### 1.1.1 CONVERSOR DE ENERGIA OWC COM SPAR BUOYS

O princípio de funcionamento da coluna de água oscilante baseia-se, segundo Falcão, Henriques e Cândido (2012), em uma estrutura parcialmente submersa em água (flutuante ou fixa), na qual a parte que está abaixo da superfície é aberta, e a parte acima da água forma uma câmara na qual o ar fica preso, com passagem apenas por uma turbina em seu topo. Conforme o movimento oscilante das ondas incide sobre a estrutura, o ar interno também é deslocado, fluindo pela turbina que aciona um gerador elétrico acoplado.

As *Spar Buoys* são longos tubos verticais flutuantes, também abertos em suas duas extremidades, como pode ser observado na Figura 2. O comprimento do tubo determinará a frequência de ressonância da coluna de água interna.

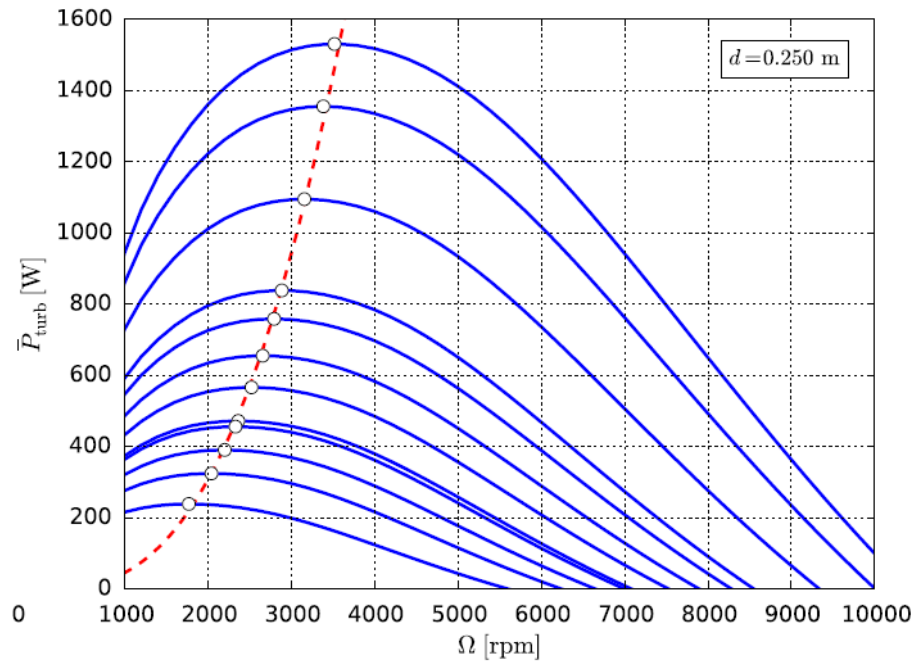
Figura 2 - Ilustração de uma estrutura do tipo *spar buoy*.



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

O estudo de Henriques et al. (2016) também apresenta uma análise sobre pontos de operação ótimos para diferentes estados marítimos, velocidades de rotação da turbina e do diâmetro de rotor da turbina, que determinará a potência entregue ao gerador. Na Figura 3, está apresentada a relação de potência *versus* velocidade de rotação da turbina com um diâmetro  $d = 0,25$  m, comparando diferentes estados marítimos já mapeados, mostrando para cada um deles um ponto de máxima potência em diferentes rotações. Estes pontos servirão como referência para simular as condições marítimas, observando a potência de saída real do sistema para diversas rotações.

Figura 3 – Potência da turbina *versus* velocidade de rotação para diferentes estados marítimos (linhas azuis) e máxima potência para diferentes valores de velocidade de rotação (linha vermelha) em uma turbina com rotor de diâmetro  $d = 0,25$  m.



Fonte: Henriques et al. (2016).

### 1.1.2 TOPOLOGIA E TÉCNICA MPPT APLICADA NO SISTEMA

A partir da energia gerada através do movimento de ondas oceânicas, tem-se a possibilidade de ser usada conectando-a diretamente à rede elétrica ou ainda carregando um banco de baterias, como alternativa para uma alimentação local de uma carga. Como este trabalho tem como base os estudos de Marques (2013) e Duarte (2018), com o intuito de alimentar um centro meteorológico em alto-mar, será abordado apenas uma geração visando alimentar um banco de baterias.

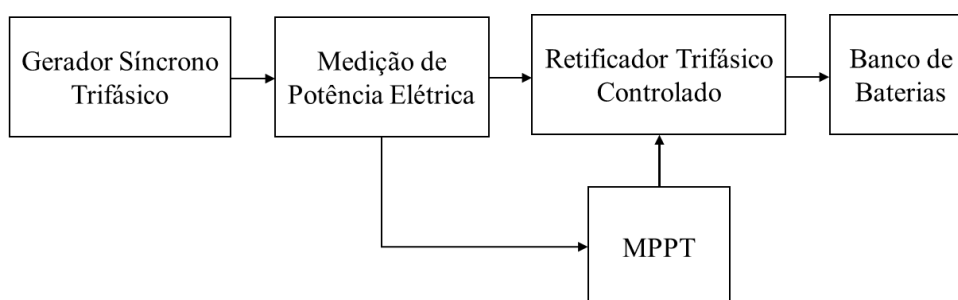
Dessa forma, será estudado um conversor de energia controlado, que, a partir de um gerador síncrono de ímãs permanentes trifásico conectado à turbina do sistema WEC, converterá a energia à um banco de baterias, alimentando uma carga. O diagrama de blocos do projeto é apresentado, de forma geral, na Figura 4.

Com base no sistema utilizando *Spar-Buoy* OWC, um gerador síncrono de ímãs permanentes (*Synchronous Generator with Permanent Magnet* ou PMSG) é escolhido para o desenvolvimento do projeto devido às suas características. Essas máquinas síncronas têm a vantagem de não necessitarem de excitação externa do rotor, além de estarem acopladas ao eixo da turbina diretamente, não necessitando de caixas redutoras, tendo boa eficiência energética e confiabilidade (BENADJA; CHANDRA, 2012, p. 1). Sobretudo, PMSGs requerem baixa manutenção, o que representa um fator crucial quando se está trabalhando em geração *offshore*, justificando a escolha do mesmo para o projeto.

A técnica do rastreamento do ponto de máxima potência será aplicada junto ao controle do retificador controlado trifásico, usando como entrada a leitura de tensão e de corrente, consequentemente de potência, gerada no sistema trifásico. Várias técnicas de MPPT podem ser aplicadas aqui, das mais variadas lógicas de controle e princípios de funcionamento, e serão apresentadas posteriormente com detalhes em aplicações similares a deste trabalho.

A carga aqui considerada envolve todo o sistema de aquisição dos sensores marítimos das boias, do seu processamento, armazenamento e transmissão dos dados, além de qualquer outra parte do sistema que necessite de alimentação elétrica em alto mar.

Figura 4 - Diagrama de Blocos do Sistema Elétrico do Circuito.



Fonte: Autor.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

A partir de um estudo base sobre o comportamento mecânico das ondas marítimas em sistemas *offshore*, pretende-se aplicar a técnica MPPT em um circuito conversor de energia elétrica desenvolvido por Dos Santos (2020) que possa maximizar a potência convertida deste

sistema para qualquer condição de onda. Para tal, a técnica MPPT será utilizada no ajuste da referência do circuito de controle deste projeto, visando um bom desempenho da conversão de energia, obtendo-se uma máxima potência convertida na saída.

O estudo envolve o desenvolvimento e a viabilização do projeto, desde a escolha do método MPPT a ser adotado, até a avaliação de seu desempenho. Serão realizadas simulações utilizando recursos computacionais, a fim de ter uma comprovação analítica e gráfica da implementação da lógica de controle para a otimização da transmissão de potência. Espera-se que ao final do estudo se possa validar o projeto quanto a sua funcionalidade e desempenho, obtendo um circuito elétrico capaz de transmitir a máxima potência gerada para um banco de baterias, mesmo operando em diferentes cenários marítimos.

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

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

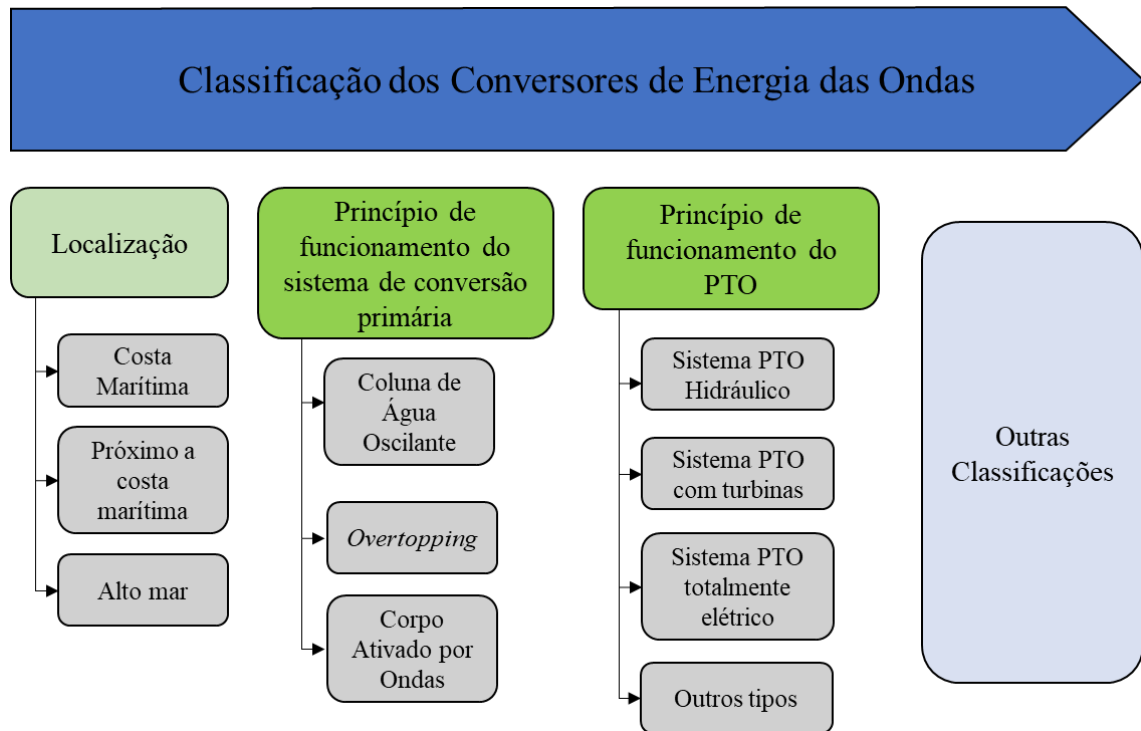
A revisão bibliográfica deste trabalho traz um *overview* sobre controle de WECs, procurando apresentar o que já foi desenvolvido e o que está sendo feito nesta área de estudo nos dias atuais, com foco em sistemas OWCs. Também são apresentadas topologias de retificadores PWM (*Pulse Width Modulation*) trifásicos controlados com destaque sobre os benefícios e desvantagens das topologias abordadas. Por fim, são apresentadas algumas técnicas de MPPT e uma discussão sobre como estas podem ser usadas para o controle de uma topologia específica de retificador PWM trifásico.

### 2.1 CLASSIFICAÇÃO E CONTROLE DE WECs

Para classificar os conversores de energia das ondas (WECs), várias maneiras são propostas pelos mais diversos autores. A Figura 5 apresenta uma resumida, mas importante e muito usada, divisão dessa classificação. A primeira é determinar a localização onde o sistema será instalado: *onshore* (na costa marítima), *nearshore* (próximo à costa marítima) e *offshore* (em alto mar). O lugar de instalação determinará, conseqüentemente, o princípio de funcionamento do sistema de conversão primária, podendo ser, como mostrado, Coluna de Água Oscilante, *overtopping* ou Corpo Ativado por Ondas (*Wave Activated Body* ou WAB). Na sequência o mecanismo pelo qual a energia absorvida pelo conversor primário é transformada em eletricidade, denominado na literatura como *power take-off* (PTO) *system*, deve ser definido. Este sistema é uma das partes mais importantes a ser apurada no projeto para a produção de energia elétrica, pois determina o princípio de funcionamento da geração. Segundo Sabzehgar e Moallem (2009) os PTOs podem ser classificados como WECs com PTO hidráulicas, WECs com PTO usando turbinas e WECs com PTO totalmente elétricas.



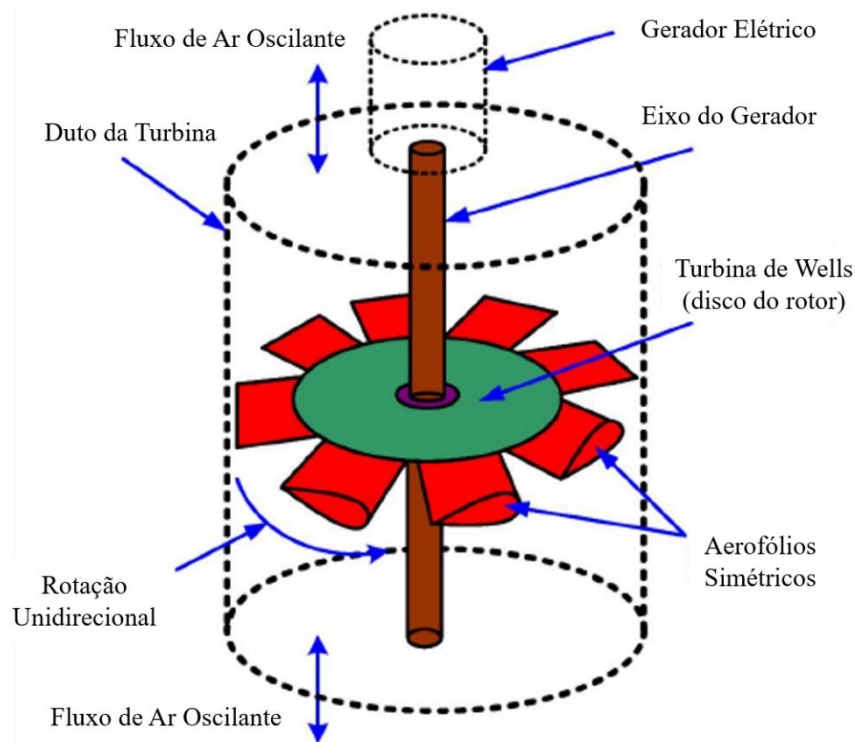
Figura 5 - Classificação de WECs de acordo com diferentes critérios.



Fonte: Adaptado de (WANG; ISBERG; TEDESCHI 2018).

Afim de apresentar um enfoque em sistemas operando com OWC, serão mostrados alguns controles baseados neste sistema, que é composto por turbinas movidas a ar. Nas OWC WEC, o ar é comprimido em uma câmara (uma parte submersa e outra parte acima do nível da água), e, conforme o movimento de oscilação das ondas altera o volume de água, e conseqüentemente a pressão de ar dentro da câmara, o ar passa por uma turbina autorretificada (do tipo Wells, por exemplo, conforme Figura 6), capaz de rotacionar sempre no mesmo sentido independente do sentido do fluxo de ar.

Figura 6 - Representação da turbina de Wells.

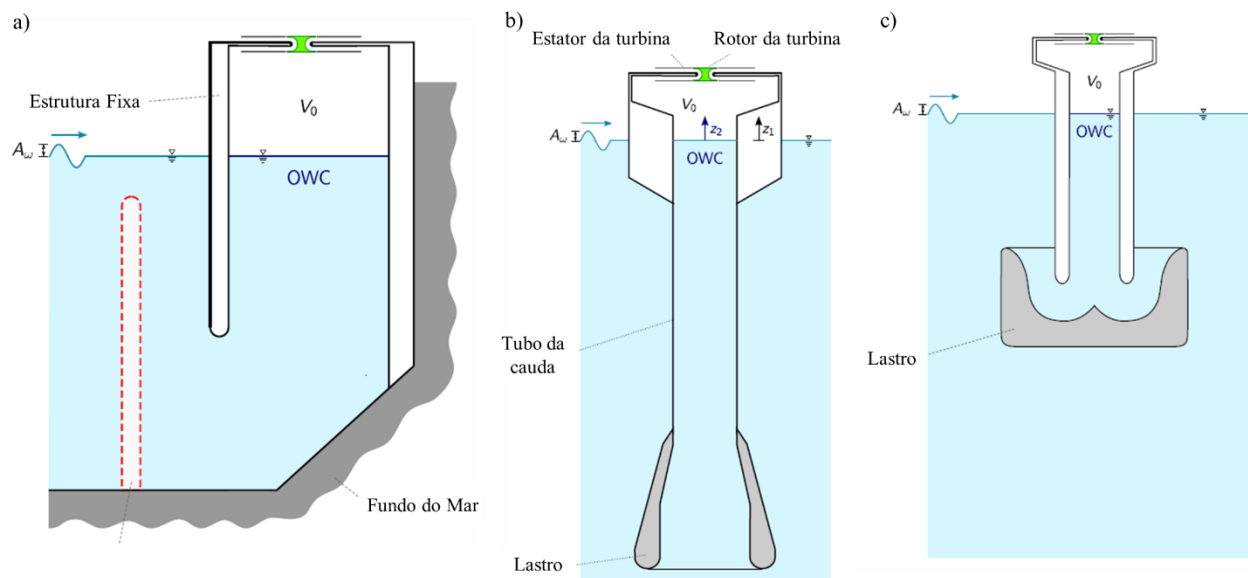


Fonte: Adaptado de (MISHRA, 2018).

Geralmente a turbina é localizada no topo da estrutura, conforme mostrado na Figura 7, onde são apresentados três tipos de OWC.

A Figura 7a) ilustra o sistema fixo *onshore*, e tem uma variação utilizando barreiras de água (*U-Shaped*), formado por um tubo vertical no lado de entrada das ondas proposto por Bocotti (2007). Um grande número desses dispositivos é utilizado em quebra-mares, entre eles no porto de Civitavecchia na Itália (ARENA et al., 2013) e no porto de Mutriku, Espanha (TORRE-ENCISO et al., 2009).

Figura 7 - Classificação de OWC. a) Vista transversal de um conversor OWC fixo. b) Vista transversal da boia spar-buoy OWC. c) Vista transversal do duto-coaxial OWC.



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

A Figura 7b) é conhecida como *spar-buoy* e foi projetada originalmente por Y. Masuda e desenvolvida em protótipo por Kaimei (FALCÃO, 2010). É uma estrutura flutuante, que segue os mesmos princípios de funcionamento anteriormente citados. Já a Figura 7c) é nomeada de duto-coaxial OWC (*coaxial-duct OWC* ou CD-OWC) e foi originalmente proposto por Takahashi Takashi em 1980 (TAKASHI, 1980). É um dispositivo assimétrico formado por dois tubos, na qual o tubo interno é parcialmente submerso, conectado à parte superior da atmosfera através de uma turbina de ar, e sua parte inferior ao duto de água formado pelos tubos coaxiais (HENRIQUES et al., 2016). As estruturas das Figura 7b) e Figura 7c) são comumente utilizadas *offshore*.

O eixo das turbinas é conectado a geradores elétricos a fim de converter a energia produzida pelas ondas em energia elétrica. No entanto, segundo Wang, Isberg e Tedeschi (2018), a fonte primária de energia destes sistemas (as ondas marítimas) possui uma característica irregular, e se sabe que a eletricidade produzida por um gerador deve atender alguns requisitos mínimos, como tensão e frequência constantes, para o fornecimento direto de energia a muitos tipos de cargas elétricas. Assim, faz-se necessário um controle deste fluxo de energia elétrica. Wang, Isberg e Tedeschi (2018) ainda trazem três requerimentos básicos para uma boa conversão de energia das ondas:

- Forte capacidade de capturar energia das ondas oceânicas;
- Boa eficiência na conversão da energia mecânica capturada em energia elétrica;
- Capacidade de converter energia elétrica instável em estável para atender aos requisitos para injeção na rede ou de fornecimento à determinada carga elétrica;

O controle pode ser aplicado em diferentes partes do sistema, sendo o primeiro requerimento ligado à escolha do WEC, o segundo referente ao PTO utilizado, e, por fim, o terceiro relacionado exclusivamente aos conversores eletrônicos de potência. Os principais métodos de controle para sistemas OWC podem ser divididos, de acordo com Hong et al. (2014), em controle de velocidade rotacional da turbina, controle do fluxo de ar e controle utilizando conversores elétricos.

O controle da velocidade de rotação tem o objetivo de regular a potência de saída no gerador através da velocidade de giro da turbina. Alberdi (2011) apresenta a estratégia de controle por variação de frequência, que é um *loop* de controle de *feedback* baseado na relação cúbica entre a frequência do rotor no gerador e a potência constante do gerador. Já Justino e Falcão (1995a) propõem três métodos para este controle: (i) controle de torque constante dependente da estimativa de potência; (ii) controle de velocidade para uma velocidade rotacional de referência, com função derivada linear entre torque e velocidade rotacional e (iii) controle dentro de oscilação aceitável (JUSTINO; FALCÃO, 1995b). Rao e Murthy (2005) trazem uma comparação de simulação entre três topologias para controle de velocidade das turbinas de Wells utilizando gerador de indução do tipo gaiola de esquilo: esquema sem controle, esquema com método de controle  $V/f$  (Tensão/Frequência), controlando a tensão e frequência do estator, e controle  $V/f$  da tensão e frequência do rotor. Neste estudo os autores chegaram à conclusão de que o controle pelo estator é a melhor topologia.

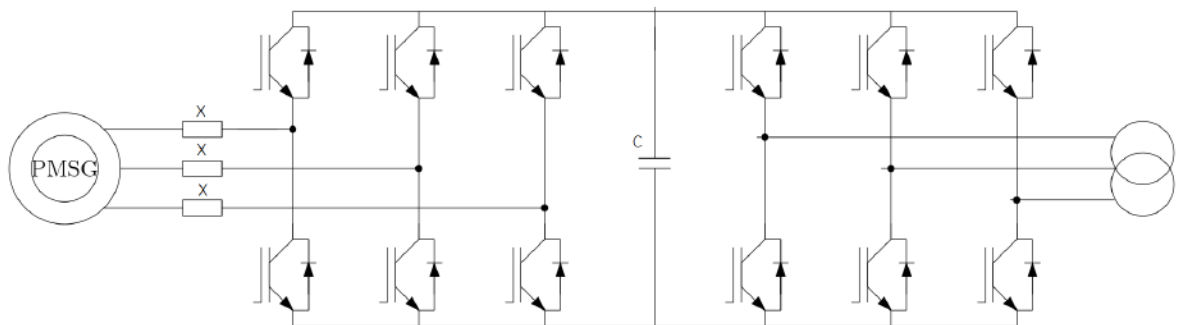
Para o controle de fluxo de ar em turbinas Wells são usadas válvulas para regulação da pressão interna da câmara, e conforme Falcão (2010), são propostas duas soluções. A primeira são válvulas montadas paralelamente à turbina, e o segundo são válvulas montadas no duto da turbina. Segundo o autor, o segundo método apresenta melhores resultados. Estes esquemas baseiam-se nos sinais de erro que são induzidos pela diferença entre a potência de saída real e a potência de saída de referência, definida de acordo com a queda de pressão disponível. O sinal de controle, obtido pelo sinal de erro e o sinal de regulação da pressão,

aciona a válvula para ajustar a queda de pressão na turbina Wells. Este tipo de controle é classificado como controle hidrodinâmico.

Utilizando um controle a partir de conversores eletrônicos, o tratamento da energia elétrica é feito apenas nestes circuitos de potência, não envolvendo controle de velocidade da turbina. Para cumprir o último requerimento proposto por Wang, Isberg e Tedeschi (2018), são apresentadas duas propostas de controle para o sistema de conversão de energia. Como a energia elétrica produzida terá variabilidade na potência entregue, conseqüentemente da frequência e amplitude de tensão e corrente, se faz necessário controlar este fluxo de potência de acordo com a produção instantânea de energia. Cabe salientar que a escolha da proposta de controle também dependerá da finalidade de utilização do circuito, com objetivo de produção de energia para acoplamento em sistemas conectados à rede elétrica ou sistemas em operação isolada com banco de baterias. Os estudo sobre a utilização da energia elétrica produzida pelas ondas oceânicas ainda é limitado, cabendo então trazer exemplos de aplicações similares de conversores controlados que também atendam tais aplicações.

Alternativamente, Penalba e Ringwood (2016) apresentam um sistema de geração de energia com geradores de velocidade variável. O esquema proposto utiliza um PMSG e os conversores de eletrônica de potência do tipo *back-to-back* são usados para acoplar o gerador à rede elétrica. Diferentes configurações dos conversores baseados em combinações de diodos e tiristores podem ser usados, e aqui é apresentado um conversor trifásico controlado, tanto do lado do gerador como o lado da rede, observado na Figura 8. O retificador controlado, do lado da geração, e o inversor, do lado da rede, são conectados por um barramento CC, formado por um único capacitor ou um banco de capacitores, e podem absorver a diferença instantânea de energia ativa e também funcionam como fonte de tensão para os conversores.

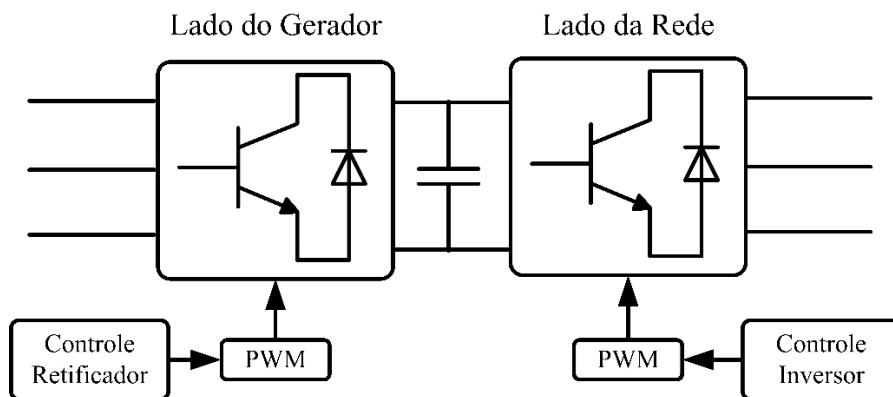
Figura 8 - Gerador síncrono de ímãs permanentes com conversores controlados do lado do gerador e da rede.



Fonte: Adaptado de (PENALBA; RINGWOOD, 2016).

A regulação da potência convertida é feita unicamente controlando o período de comutação das chaves estáticas do retificador e do inversor, variando o tempo da relação *on/off*, onde a entrada de controle é o ângulo de disparo ou o ângulo de condução. A estratégia de controle dependerá dos objetivos da geração, porém em muitos casos o sinal de saída dos controladores é convertido pela técnica de modulação PWM, como ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Controle do conversor de potência com módulos PWM.



Fonte: Adaptado de (PENALBA; RINGWOOD, 2016).

Malinowski, Kazmierkowski e Trzynadlowski (2003) classificam essas técnicas de controle em dois principais grupos, controle baseado em tensão e controle virtual de fluxo, que, por sua vez, são divididos em outros dois subgrupos: controle orientado a tensão (*Voltage Oriented Control* ou VOC), controle direto de tensão (*Voltage based Direct Power Control* ou V-DPC), controle orientado a fluxo virtual (*Virtual Flux Oriented Control* ou VFOC) e controle direto de potência baseado em fluxo virtual (*Virtual Flux based Direct Power Control* ou VF-DPC). Entre eles, o VF-DPC parece ser superior aos outros, onde um algoritmo mais

simples com baixa sensibilidade à tensão de alimentação não ideal e a não uso de PWM são as principais vantagens.

## 2.2 TÉCNICAS MPPT

As técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência são amplamente usadas em sistemas que buscam encontrar uma maior eficiência em uma geração de energia elétrica. Usualmente essas técnicas já são implementadas em sistemas de geração eólica e fotovoltaica, porém ainda são pouco estudadas no campo da geração de energia elétrica através das ondas marítimas. Por este motivo, o estudo de revisão feito neste capítulo se baseia, principalmente, nesses dois sistemas de geração para os quais a bibliografia é vasta e traz inúmeros exemplos com aplicabilidade compatível com o sistema de geração deste trabalho.

Inicialmente são discutidas algumas técnicas MPPT presentes na literatura, de forma a apresentar o seu princípio de controle e como o algoritmo se baseia, com a exploração das vantagens e desvantagens de seu uso. Posteriormente, será apresentada a aplicação dessa lógica em alguns sistemas operantes, e onde que ele pode ser aplicado em cada um deles. Cabe salientar que muitas dessas técnicas são usadas em mais de um tipo de sistema; porém, são ilustradas aqui de forma a exemplificar seus funcionamentos, independentemente da aplicação final da mesma.

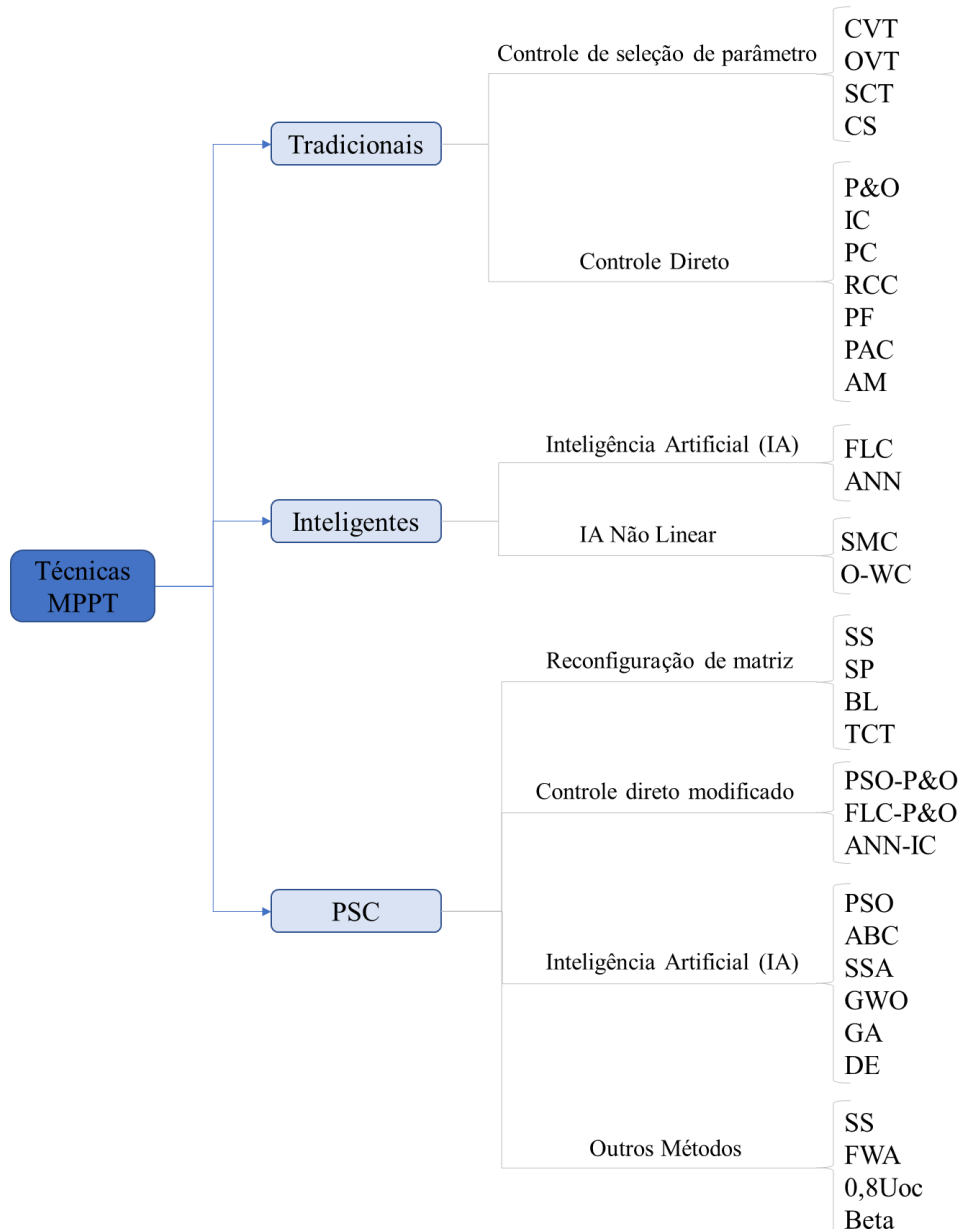
### 2.2.1 CLASSIFICAÇÃO E DIVISÃO DOS MÉTODOS MPPT

Recentemente, um número expressivo de algoritmos e projetos MPPT são propostos na literatura. Cada abordagem tem suas próprias especificações, limitações e aplicações. Existem várias subcategorias baseadas em diferentes fatores, princípio de funcionamento ou implementação (BABA; LIU; CHEN, 2020).

Mao et al. (2020) trazem uma divisão desses métodos baseados em três conceitos diferentes: (1) Métodos MPPT tradicionais, (2) Métodos MPPT baseados em controles

inteligentes e (3) Métodos MPPT para PSC (*Partial Shading Conditions* ou Condições de Sombreamento Parcial). Esta última, voltada exclusivamente para sistemas fotovoltaicos que sofrem com sombreamento das células fotovoltaicas. A Figura 10 apresenta uma visão geral dessa divisão classificando cada um dos métodos nessas três áreas distintas.

Figura 10: Classificação simplificada de alguns métodos de controle MPPT comuns.



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

Baba, Liu e Chen (2020) e Karami, Moubayed e Outbib (2017) fazem a divisão dos métodos utilizando 5 categorias:



1. Técnicas de rastreamento com parâmetros constantes: Os métodos baseados nesta técnica de rastreamento usam valores fixos predefinidos que caracterizam o MPP (*Máxima Power Point* ou Ponto de Máxima Potência).
2. Técnicas de rastreamento com medição e comparação: Esta técnica é baseada na detecção dos parâmetros externos (tensão fotovoltaica, corrente, irradiância ou temperatura) e comparando-os com um MPP pré-conhecido.
3. Técnicas de rastreamento com tentativa e erro: Estes métodos utilizam uma tentativa de cálculo e observam o resultado consequente, que determina os critérios de direção para a próxima tentativa de se chegar ao MPP.
4. Técnicas de rastreamento com cálculo matemático: Estes Métodos definem a localização do MPP com base no cálculo matemático dos dados disponíveis com base em equações.
5. Técnicas de rastreamento com previsão inteligente: Esses métodos usam um processo de aprendizado inteligente que oferece a capacidade de prever a localização do MPP.

A Tabela 1 lista alguns métodos MPPT classificando-os de acordo com cada grupo a que pertencem.

Como o objetivo deste trabalho é apresentar métodos diretos, isto é, com medição *online* dos parâmetros do circuito, não serão abordados e detalhados os métodos indiretos (com medição dos parâmetros *offline* ou com base em parâmetros dos circuitos). Os subseções seguintes trazem a explicação dos principais métodos usados.

Tabela 1: Classificação dos métodos MPPT.

<b>Técnica de Rastreamento</b>	<b>#</b>	<b>Método de Rastreamento</b>
Técnicas de rastreamento com parâmetros constantes	1	Tensão constante
	2	Tensão de circuito aberto
	3	Corrente de curto-circuito
	4	Tensão de circuito aberto em células fotovoltaicas
	5	Algoritmo Gradiente de temperatura
	6	<i>Feedback</i> de tensão e corrente
	7	Rastreamento de queda de tensão de junção PN
Técnicas de rastreamento com medição e comparação	8	Tabela de pesquisa ( <i>look-up table</i> )
	9	Máxima corrente ou tensão de carga
	10	Controle linear de corrente
	11	Controle sem medição de saída fotovoltaica
	12	Perturba e Observa
	13	Perturba e Observa com perturbação fixa
	14	Perturba e Observa com perturbação adaptativa
	15	Comparação ponderada de três pontos

	16	Busca <i>On-Line</i> do MPP
	17	MPPT com indutor variável
	18	Coordenadas lineares reorientadas
	19	Ajuste de curva
	20	Varredura de corrente
Técnicas de rastreamento com cálculo matemático	21	Controle por <i>feedback</i> de $dP/dV$ ou $dP/dI$
	22	Condutância incremental
	23	Condutância incremental com degrau variável
	24	Resistência incremental com degrau variável
	25	Capacitância parasita
Técnicas de rastreamento com predição inteligente	26	Lógica de controle <i>Fuzzy</i>
	27	Redes Neurais

Fonte: Adaptado de (KARAMI et al., 2017).

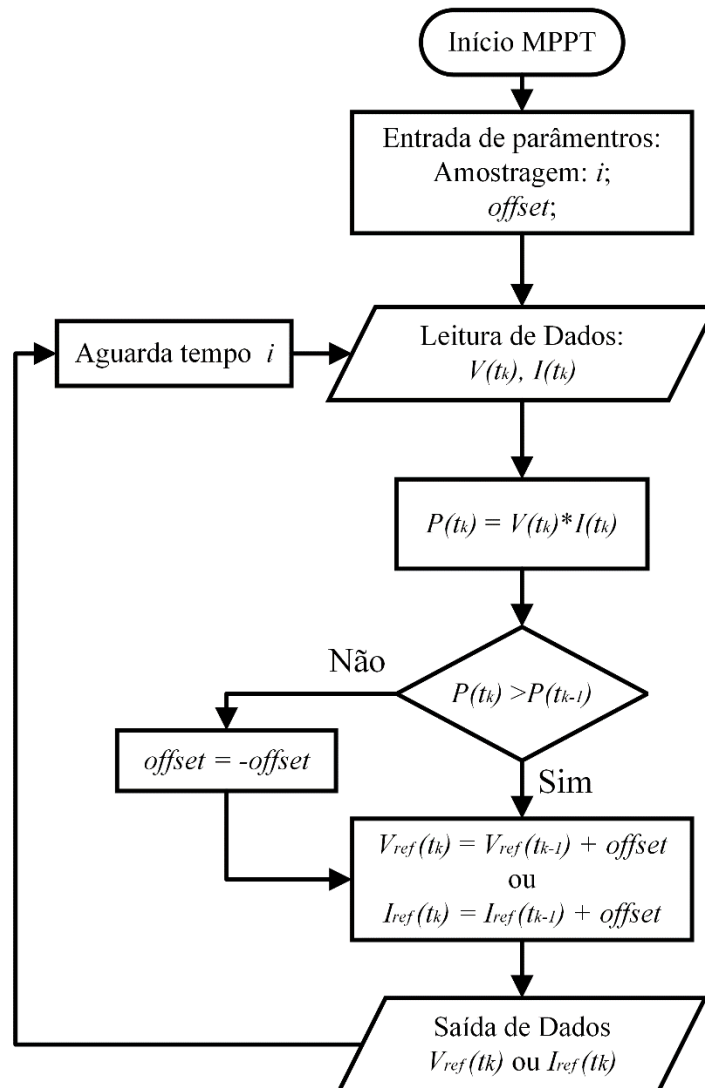
### 2.2.1.1 Perturba e Observa (P&O)

O método Perturba e Observa é amplamente usado em sistemas fotovoltaicos para chegar-se ao MPP devido a sua simplicidade e fácil aplicação.

Segundo Karami et al. (2017), este método se baseia em um processo de tentativa e erro para buscar o MPP. Em sistemas fotovoltaicos a tensão de referência é propositalmente perturbada para aumentar ou diminuir, então a potência lida é comparada à adquirida no intervalo de leitura anterior. Se a potência aumentar, a próxima perturbação da tensão de operação deve seguir na mesma direção. No entanto, se a potência diminuir, a tensão operacional é perturbada na direção oposta. Este cenário se repete até chegar ao MPP. O ponto de máxima potência é obtido quando  $\frac{dP}{dV} = 0$ . Isto é, quando a taxa de variação da potência é nula em relação à tensão.

A corrente de saída e a tensão são periodicamente observadas e comparadas em etapas de amostragem sequencial para determinar a potência de saída correspondente (SEGUEL, 2009). A modificação da tensão de entrada varia para cada sistema. O fluxograma do método P&O pode ser observado na Figura 11, onde  $V$  e  $I$  são a tensão e a corrente medidas, respectivamente,  $t_k$  é o instante de tempo,  $offset$  é tamanho do passo de perturbação, e  $V_{ref}$  é a nova tensão de referência do circuito.

Figura 11: Fluxograma do método MPPT P&amp;O.



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

Pelo fluxograma apresentado na Figura 11 é possível entender a lógica do algoritmo a ser implementado. O sistema inicializa, realiza a medição de  $V$  e  $I$  e calcula a potência multiplicando os dois valores (estima-se que o valor inicial de  $P$  seja zero). Assim, ele compara o valor medido de potência com o valor anterior. Se o valor da potência diminuir, ele inverte o sinal do  $offset$ . Caso a potência  $P$  estiver crescente, o sinal do  $offset$  permanece o mesmo e o novo valor da tensão de referência  $V_{ref}$  é atualizado somando-se o  $offset$ .

Uma das grandes vantagens deste método é que não requer nenhum conhecimento prévio do sistema de geração, além de sua simplicidade de implantação. No entanto, alguns pontos importantes devem ser observados. O algoritmo de rastreamento depende de dois

critérios principais, a velocidade de rastreamento e a tamanho do passo de perturbação. Para valores fixos de perturbação, as oscilações de estado estacionário são proporcionais ao valor do passo. Valores de passo grandes causam oscilações mais altas. Infelizmente, valores de etapa menores resultam em uma resposta mais lenta, causando um problema inerente deste método (KARAMI et al., 2017).

### 2.2.1.2 Perturba e Observa (P&O) Com Perturbação Adaptativa

Este método foi desenvolvido para solucionar o problema apresentado anteriormente no P&O convencional. Ele tem os mesmos princípios de atuação do P&O convencional, porém o passo da perturbação é variado conforme a potência de saída está perto do MPP.

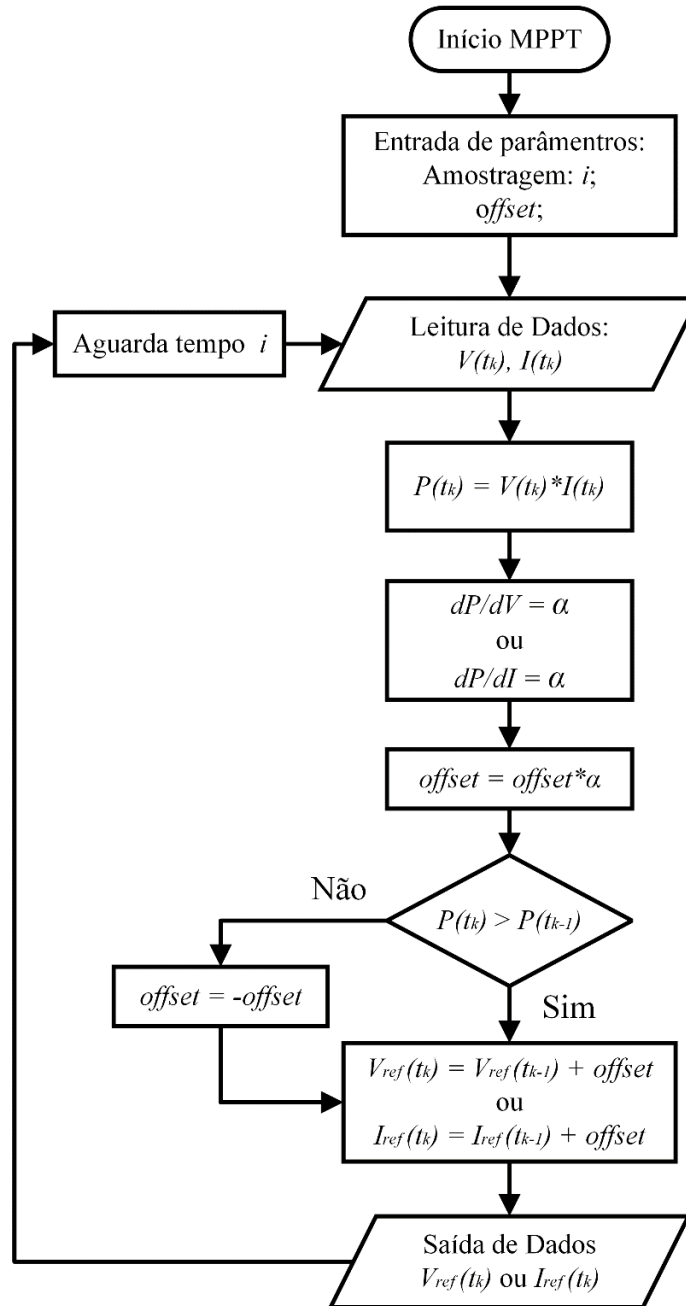
O método se baseia na derivada da potência  $P$  em relação à tensão  $V$   $\left(\frac{dP}{dV}\right)$  ou da potência  $P$  em relação à corrente  $I$   $\left(\frac{dP}{dI}\right)$  para determinar o ajuste do passo da perturbação (MOTAHHIR et al., 2020). Uma vez que a potência se aproxima do MPP, o valor da derivada diminui; portanto, o tamanho do passo de perturbação também é reduzido.

Usando valores tradicionais, inicialmente o passo da tensão de perturbação é definido em cerca de 10% da tensão de circuito aberto. Cada passo sucessivo é 50% menor do anterior até que o valor de perturbação seja 0,5% da tensão de circuito aberto (KARAMI et al., 2017).

Esta abordagem é totalmente adaptativa, pois funciona dependendo apenas das características P-V, resultando em um fator  $\frac{dP}{dV}$  ou  $\frac{dP}{dI}$  próximo de zero no MPP. Como o tamanho do passo pode ser relativamente pequeno à medida que  $\frac{dP}{dV}$  ou  $\frac{dP}{dI}$  se aproxima de zero e o painel fotovoltaico opera na proximidade de MPP, o P&O adaptativo tem uma velocidade de rastreamento muito boa, bem como precisão no estado estacionário (SOLODOVNIK et al., 2004).

O fluxograma é o mesmo apresentado no método P&O convencional. A única mudança está no tamanho do *offset*, que será adaptado conforme o valor da derivada. O fluxograma do método P&O adaptativo pode ser visto na Figura 12.

Figura 12: Fluxograma do método MPPT P&O com Perturbação Adaptativa.



Fonte: Autor.

### 2.2.1.3 Condutância Incremental (*Incremental Conductance ou IC*)

O método da Condutância Incremental é amplamente usado em muitos sistemas fotovoltaicos, sendo considerado por Liu, et al. (2008) eficaz para obter-se o MPP. O princípio de funcionamento deste método é similar ao P&O, pois depende principalmente da variação de potência em relação à tensão, porém mais completo e com algumas complicações.

Através das medidas de tensão e corrente, pode-se derivar a potência em relação à tensão, conforme Equação (1), buscando obter os valores de condutância instantânea e incremental do arranjo, onde  $V$  e  $I$  são tensão e corrente de saída medida, respectivamente, e  $P$  é a potência calculada de  $V$  e  $I$ .

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial(V \cdot I)}{\partial V} = I + \frac{\partial I}{\partial V} V \quad (1)$$

Sabe-se que para obter o MPP do sistema, a condição de derivada de  $P$  em relação à  $V$  deve ser zero, conforme Equação (2). Assim, substituindo a (2) em (1), tem-se a relação obtida em Equação (3).

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = I + \frac{\partial I}{\partial V} V = 0 \rightarrow \frac{\partial I}{\partial V} = -\frac{I}{V} \quad (3)$$

O lado esquerdo da equação (3) representa a condutância incremental, enquanto o lado direito representa a condutância instantânea. De acordo com Karami et al. (2017), a variação desses incrementos,  $dV$  e  $dI$ , podem ser aproximadas pela medida de  $V$  e  $I$  em diferentes instantes, isto é,

$$dV(t_2) \approx \Delta V(t_2) = \Delta V(t_2) - \Delta V(t_1) \quad (4)$$

$$dI(t_2) \approx \Delta I(t_2) = \Delta I(t_2) - \Delta I(t_1) \quad (5)$$

onde  $t_1$  e  $t_2$  são dois instantes distintos de tempo para as medidas do sistema.

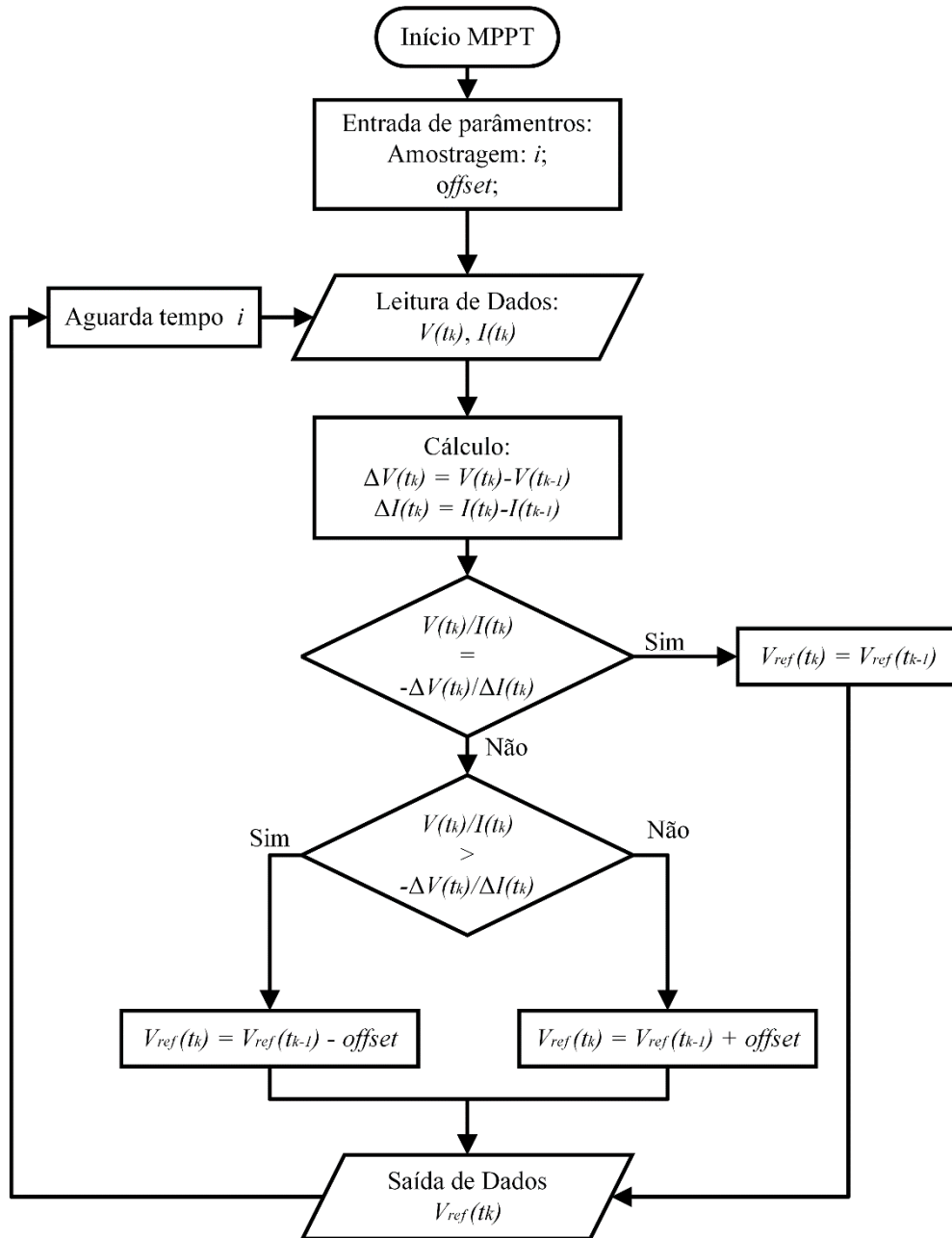
Dessa forma, a derivada de potência em relação à tensão informará a inclinação da curva característica P-V (Potência *versus* Tensão). Quando esse valor for nulo, o ponto é de máxima potência. Caso contrário, o sinal da equação informará se a tensão de referência deve se elevar (sinal positivo) ou diminuir (sinal negativo). Tais condições estão expressas na Equação (6), e o fluxograma na Figura 13.

$$\begin{cases} \frac{I}{V} = -\frac{\Delta I}{\Delta V} & \text{no MPP} \\ \frac{I}{V} < -\frac{\Delta I}{\Delta V} & \text{MPP à esquerda} \\ \frac{I}{V} > -\frac{\Delta I}{\Delta V} & \text{MPP à Direita} \end{cases} \quad (6)$$

Este método requer um grande poder de processamento, porém pode ser facilmente implementado com o avanço do processamento digital de sinais (KOIZUMI, et al., 2006). (BABA; LIU; CHEN, 2020). Outro ponto a ser destacado, apresentado por Mao et al. (2020), é a relação do tamanho do passo do incremento de tensão com o erro de rastreamento. Quanto maior for este passo, maior será o erro, devido a sua proporcionalidade.

Em comparação com o método P&O convencional, o IC apresenta melhor performance durante rápidas variações de entrada (BABA; LIU; CHEN, 2020), causadas principalmente por mudanças atmosféricas, tendo como consequência menores oscilações no entorno do MPP, causando melhor rejeição de ruído e menos confusão no processamento e na resposta devido à dinâmica do sistema (ELGENDY; ZAHAWI; ATKINSON, 2012).

Figura 13: Fluxograma do método MPPT IC.



Fonte: Adaptado de (MOTAHHIR et al., 2020) e (KORAMI et al., 2017).



#### 2.2.1.4 Métodos Avançados – Inteligência Artificial (IA)

##### 2.2.1.4.1 Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks* ou ANN)

As redes neurais artificiais são algoritmos desenvolvidos para imitar um comportamento da rede de neurônios humana. Um neurônio é uma unidade de processamento que primeiro pesa linearmente as entradas, depois elabora a soma por meio de uma função não linear, chamada função de ativação (FA) e, finalmente, envia os resultados aos neurônios seguintes da rede (MCCULLOCH; PITTS, 1943).

A Figura 14 apresenta uma estrutura típica de ANN de alimentação de três camadas ( $h, j$  e  $k$ ). Cada neurônio é representado pelos círculos, onde cada um deles tem uma conexão com todos os neurônios da camada subsequente e um peso específico  $w$ . A primeira camada  $h$  é a de entrada, que é então distribuída para as camadas subsequentes. A camada  $j$  é chamada de camada oculta, onde cada neurônio recebe as entradas da camada  $h$  e processa os resultados passando pela FA  $y^k$  para produzir a saída final, onde  $k$  representa o índice das saídas. As unidades da camada de saída geralmente têm ativações lineares (MOTAHHIR et al., 2020).

Na Figura 14,  $S_1$  é o número total de neurônios da camada oculta,  $w$  é o peso adaptativo,  $x$  e  $y$  são as entradas e as saídas da ANN, respectivamente. Sabendo das condições, temos que as funções gerais que regem o comportamento de uma ANN são dadas pelas Equações (7), (8) e (9). O erro de mapeamento é apresentado na Equação (10).

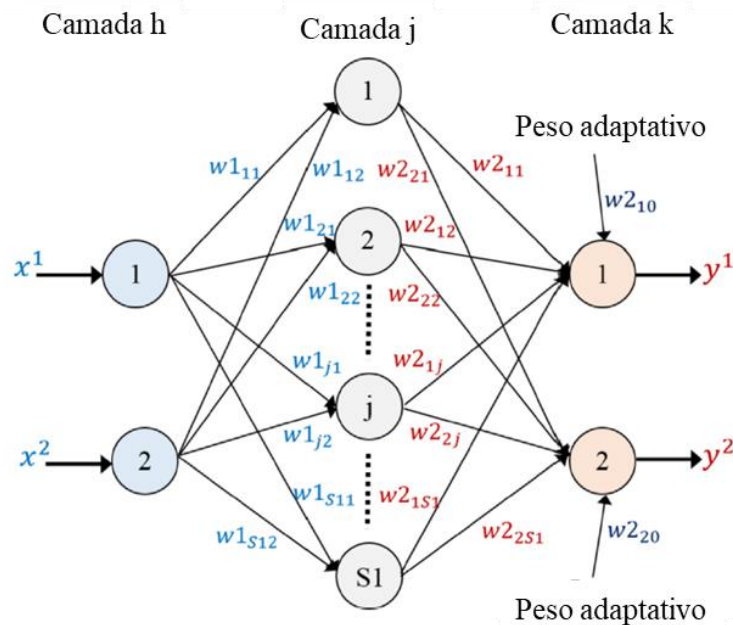
$$y^k = \sum_{j=0}^{S_1} w_{2kj} z_j \text{ onde } Z_0 = 1 \quad (7)$$

$$z_j = \frac{1}{1 + e^{a_j}} \quad (8)$$

$$a_j = \sum_{h=1}^2 w_{1jh} x^h \quad (9)$$

$$E^k(w) = (y^k(x_i, w) - t_i^k)^2 \quad (10)$$

Figura 14: Estrutura típica de uma ANN.



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

Dessa forma, o algoritmo precisa apenas dos sinais de entrada, e conforme a rede neural for treinada, ela terá uma diferente resposta para cada situação. As redes neurais artificiais podem ser treinadas *offline* para um mapeamento não-linear, e podem ser utilizadas de maneira eficiente no ambiente *online* (PUNITHA; DEVARAJ; SAKTHIVEL, 2013). A principal característica da ANN é que ela não precisa de um modelo matemático preciso e ela pode detectar relacionamentos não lineares complexos entre variáveis dependentes e independentes. Porém, como principal desvantagem é que o sistema precisa ser treinado usando um grande número de medidas previamente (BABA; LIU; CHEN, 2020).

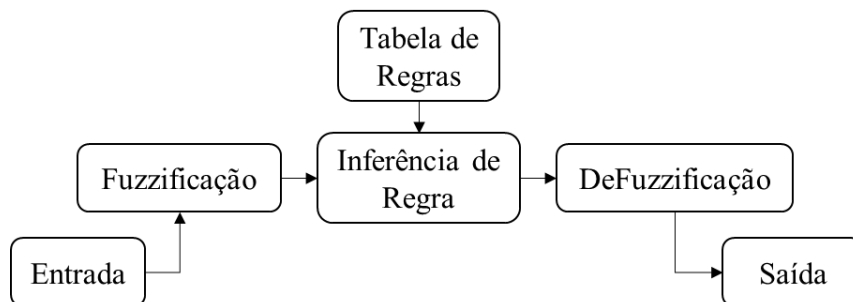
Motahhir et al. (2020) ainda traz uma discussão sobre a aplicação das redes neurais para uso na técnica MPPT, onde as entradas são as informações características do sistema, como a tensão de circuito aberto  $V_{oc}$  e a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$ . Pode-se também ter outras variáveis de entrada, como condições do ambiente, rotação, etc. As saídas serão o(s) valor(es) estimado(s) de referência para o controlador.

O desempenho de rastreamento (precisão e velocidade) do MPPT é baseado no método empregado para a camada oculta e no treinamento adequado da ANN. Porém, para se atingir o MPP, os pesos associados devem ser calculados cuidadosamente por meio de um processo de treinamento abrangente e extensivo.

#### 2.2.1.4.2 Lógica de controle Fuzzy (Fuzzy logic controller ou FLC)

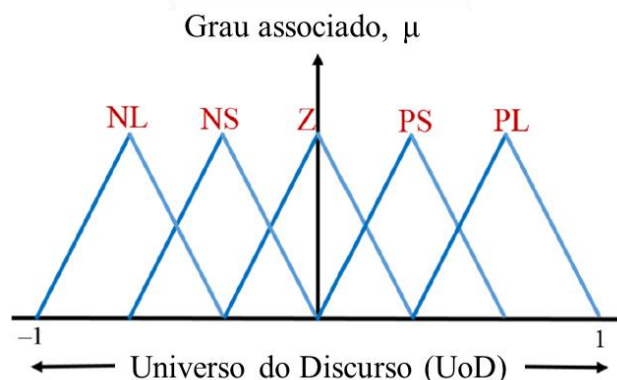
A lógica de controle *fuzzy* consiste, segundo Subiyanto, Mohamed e Hannan (2012), em três estágios: fuzzificação, inferência de regra (ou avaliação de regra de controle) e defuzzificação, observada na Figura 15. A primeira etapa, fuzzificação, transforma as variáveis numéricas de entrada em variáveis linguísticas com base em uma função de pertinência. O sistema pode ter o número de funções de pertinência tanto quanto se julgar necessário. Aqui, serão usadas 5 funções para exemplificar, dentre elas: negativo grande ((*Negative Large* ou NL), negativo pequeno (*Negative Small* ou NS), nulo (*Zero* ou Z), positivo pequeno (*Positive Small* ou PS) e positivo grande (*Positive Large* ou PL), onde cada função representa um nível, como apresentado na Figura 16.

Figura 15: Lógica de controle Fuzzy.



Fonte: Adaptado de (BABA; LIU; CHEN, 2020).

Figura 16: Função de pertinência Fuzzy usado no processo de fuzzificação.



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

Na segunda etapa, o processo de inferência de regras toma as decisões baseadas no julgamento *fuzzy* das entradas, gerando as ações de controle. É análogo a ganhos de controle ou

leis de controle em um controlador convencional; no entanto, as regras de controle precisam ser previamente definidas. Esse é um dos principais desafios deste método de controle, uma vez que estas regras precisam relacionar as variáveis de entrada e saída. Essas regras são usadas então para compor a tabela de regras *fuzzy*, como exemplo na Tabela 2 com cinco variáveis linguísticas.

Tabela 2: Tabela de regras fuzzy

<b>E</b> <b>ΔE</b>	<b>PL</b>	<b>PS</b>	<b>Z</b>	<b>NS</b>	<b>NL</b>
<b>NL</b>	Z	NS	NL	NL	NL
<b>NS</b>	PS	Z	NS	NL	NL
<b>Z</b>	PL	PS	Z	NS	NL
<b>PS</b>	PL	PL	PS	Z	NS
<b>PL</b>	PL	PL	PL	PS	Z

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

A defuzzificação converte novamente uma variável linguística em uma variável numérica, fornecendo um número real de saída deduzida do controlador *fuzzy*. Existem variados métodos de defuzzificação, entre eles Bissetriz da Área (*Bisector of Area* ou BoA), Média dos Máximos (*Mean of Maxima* ou MoM) e Centro de Gravidade (*Center of Gravity* ou CoG) (Peng et al., 2004). O Método CoG é um dos mais usados, e está representado pela Equação (11), onde  $n$  é o número de funções de pertinência de saída,  $\mu(x_i)$  e  $x_i$  representam respectivamente o grau e a localização do pico da função de pertinência. A expressão de saída  $u$  pode ser interpretada como a média ponderada dos elementos.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (11)$$

Matahhir et al., (2020) ainda mostra que, considerando uma implementação utilizando *fuzzy* para o MPPT, as entradas do sistema geralmente são o sinal de erro  $E$  e a variação do sinal de erro  $\Delta E$ , dados pelas Equações (12) e (13), onde  $V$  e  $I$  são a tensão e corrente medidas, respectivamente,  $P$  é a potência calculada ( $P = V \cdot I$ ) e  $t_k$  e um instante de tempo.

$$E(k) = \frac{P(t_k) - P(t_k - 1)}{V(t_k) - V(t_k - 1)} \quad (12)$$

$$\Delta E = E(t_k) - E(t_k - 1) \quad (13)$$

Uma vez que  $E(t_k)$  e  $\Delta E$  são calculados e transformados para valores linguísticos, a saída da FLC também pode ser linguística em termos de *duty cycle*, tensão ou corrente. Portanto, o sinal de saída depende das regras *fuzzy* apresentadas na Tabela 1. As variáveis linguísticas para o sinal de saída são geralmente definidas com base no conhecimento prévio do sistema de geração usado.

Este sistema tem a vantagem de ser robusto e ao mesmo tempo ter uma relativa facilidade de se projetar, pois não precisam do conhecimento do modelo específico. Por outro lado, eles precisam do conhecimento completo do projetista sobre a operação do sistema. Os controladores *fuzzy* podem ser mais eficazes do que os controladores tradicionais para os sistemas não lineares, porque há mais flexibilidade (CHEIKH et al., 2007). Comparando com outras técnicas, a performance dinâmica do FLC é muito eficiente (Ishibuchi et al., 2008), além de ter um alto grau de liberdade para ajustar os parâmetros de controle. Isso permite fáceis modificações, tornando-o compatível com diversos sistemas, lineares ou não (Hu et al., 2015).

### 2.3 RETIFICADORES PWM TRIFÁSICOS CONTROLADOS

Conforme já mencionado, neste trabalho é considerado um sistema de conversão de energia de movimento de ondas oceânicas que utiliza um gerador síncrono de ímãs permanentes. Além disso, foi mencionado que a energia convertida deve alimentar cargas de um sistema de monitoramento oceanográfico. Desta forma, a energia convertida deve ser armazenada em um banco de baterias para depois alimentar as cargas em diferentes níveis de tensão. Portanto, é necessário que o sistema de conversão contenha um conversor CA-CC.

Tradicionalmente, os conversores CA-CC (ou retificadores) são desenvolvidos usando diodos e tiristores para fornecer energia CC unidirecional e bidirecional, respectivamente. Eles têm problemas de baixa qualidade de energia em termos de harmônicos de corrente injetados, distorção de tensão resultante e baixo fator de potência na rede CA de entrada e saída CC com elevada ondulação (SINGH et al., 2004).

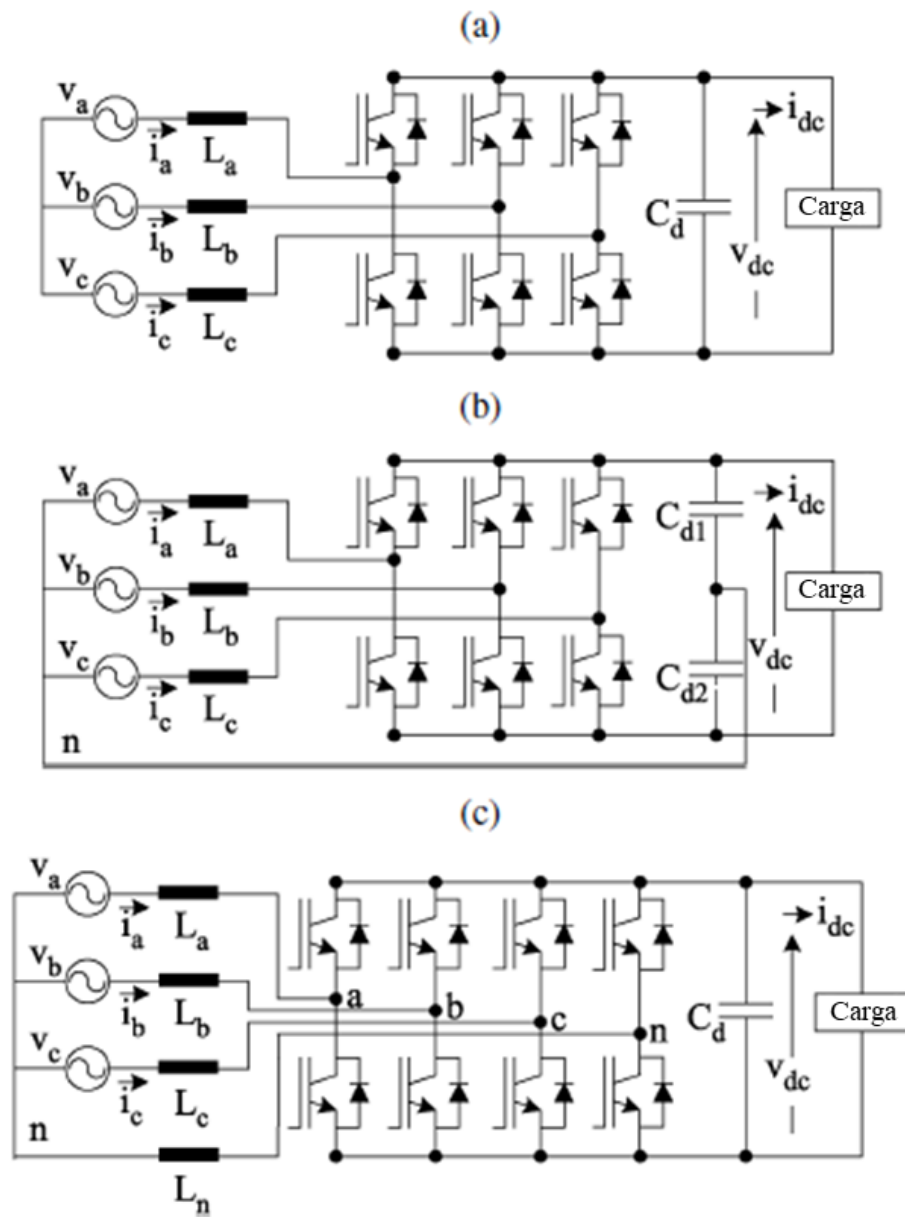
Singh et al. (2004) traz um estudo detalhado de diversos retificadores, apresentado diversas topologias, juntamente com vantagens e desvantagens do uso cada um, promovendo o

uso de outros dispositivos de comutação de estado sólido, entre eles os MOSFETs, IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*), GTOs (*Gate-Turn-Off thyristors*), etc. Para cada dispositivo estudado, uma aplicação específica é detalha e apresentada, de acordo com os objetivos de cada projeto. Neste trabalho será revisado apenas o retificador PWM totalmente controlado, usado no circuito proposto para controlar a saída de tensão e corrente, a fim de obter uma máxima transferência de potência com a técnica MPPT.

A Figura 17 propõem três configurações de retificadores trifásicos totalmente controlados, com algumas possíveis variações. A Figura 17(a) apresenta um conversor usando 6 chaves, sendo essa a topologia mais comumente empregada. Porém, existem variações, como nas Figura 17(b) e Figura 17(c), empregadas com a finalidade de reduzir o *ripple* da tensão do barramento CC e equilibrar as correntes de entrada, mesmo com tensões desbalanceadas. Como no presente trabalho a energia é gerada a partir de um gerador trifásico, que produz tensões equilibradas e tem impedância interna equilibrada, é utilizado o conversor da Figura 17(a). É importante salientar que, embora esses conversores sejam bidirecionais, neste trabalho apenas é utilizada a conversão CA-CC. A amplitude das correntes e de tensão no barramento CC é dada pelo controle de corrente em malha fechada, ajustada a partir de modulação PWM.

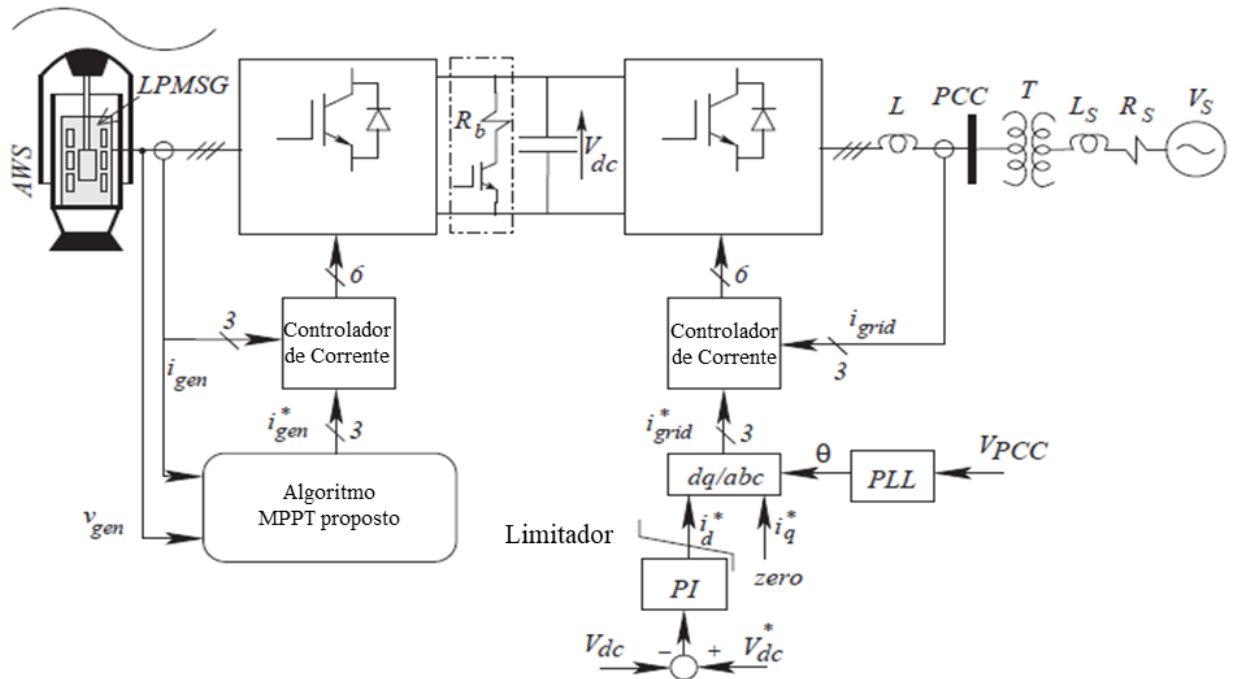
Em uma aplicação semelhante a tratada no presente trabalho, Marei, Mokhtar e El-Sattar (2015) trazem um estudo da estratégia de controle MPPT para WECs utilizando um gerador linear síncrono de ímãs permanentes (*Linear Permanent Magnet Synchronous Generator* ou LPMSG). O sistema proposto pelo trabalho é conectado à rede elétrica (conforme mostrado na Figura 18). Neste sistema é utilizado um conversor do tipo *back-to-back* para injeção de energia na rede elétrica; entretanto, no presente trabalho todos os elementos a montante do retificador serão substituídos por uma bateria e uma carga elétrica conhecida de potência constante. Portanto, no presente trabalho será considerada operação isolada, sem interconexão com a rede elétrica.

Figura 17: Retificadores PWM trifásicos.



Fonte: Adaptado de (SINGH, 2004).

Figura 18: Diagrama de blocos do sistema WEC proposto por Marei, Mokhtar e El-Sattar.



Fonte: Adaptado de (MAREI, MOKHTAR E EL-SATTA, 2015).

Conforme mostrado na Figura 18, a aplicação da técnica MPPT é em conjunto com um controlador de corrente, que no caso específico é do tipo Proporcional Integral (PI). Neste caso o algoritmo MPPT gera um sinal de referência para o controlador de corrente de forma que a máxima potência seja convertida. De forma indireta, a técnica MPPT fornece o ajuste de torque, conseqüentemente de velocidade de rotação, uma vez que o torque eletromagnético é diretamente proporcional à corrente do estator ao longo do eixo em quadratura do gerador (BENADJA; CHANDRA, 2012).

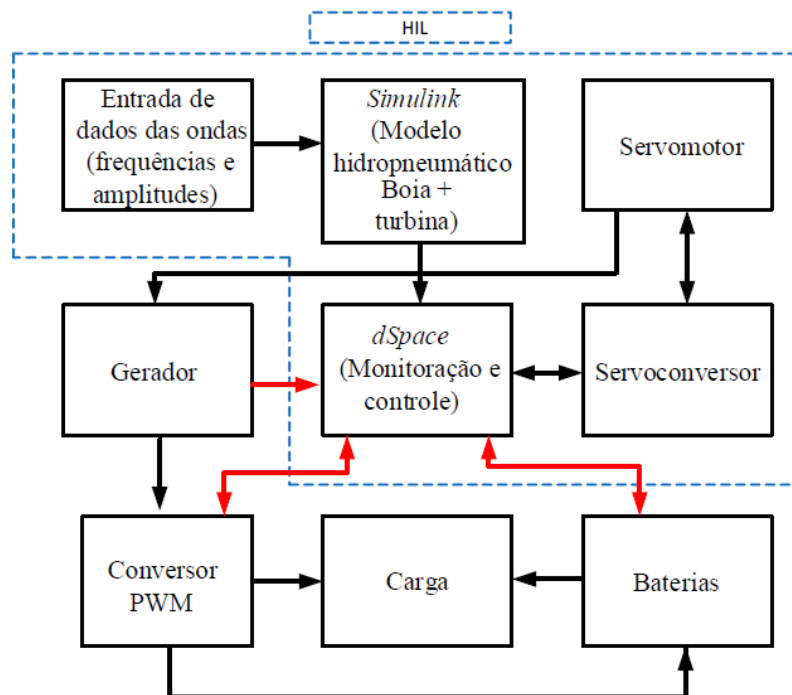


### 3 SOLUÇÃO PROPOSTA

#### 3.1 MODELO DO CIRCUITO PROPOSTO

Este trabalho tem como projeto base para a implementação do método MPPT os estudos realizados na dissertação de mestrado desenvolvida no LMEAE pelo Dos Santos (2020). Nele, é proposto um sistema de conversão de energia elétrica de forma otimizada, obtendo-se uma máxima potência de conversão que depende do regime de ondas. O estudo visou projetar o gerador e o sistema de controle para uma futura implementação e teste experimental do sistema, descrito na Figura 19.

Figura 19: Diagrama organizacional do sistema estudado.



Fonte: (DOS SANTOS, 2020).

Como se pode observar na Figura 19, os dados de entrada de amplitude e frequência das ondas serão calculados a partir do *software* Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>. Uma controladora em tempo real (dSPACE<sup>®</sup>) receberá estes dados e enviará os sinais de referência de conjugado a um servoconversor que controla um servomotor. Os elementos do sistema mencionados neste parágrafo estão delimitados na Figura 19 por uma linha pontilhada identificada como HIL

(*Hardware-in-the-Loop*). Os elementos que compreendem o HIL visam simular as condições de conjugado e velocidade produzidos por uma turbina de um OWC. O gerador elétrico proposto por Dos Santos (2020) deve ser mecanicamente acoplado ao eixo do servomotor.

Para o sistema de conversão de energia elétrica, foi realizado também o estudo e a modelagem de um conversor CA-CC, juntamente com o projeto do sistema de controle. Como este trabalho visa otimizar e garantir uma máxima eficiência na conversão de energia elétrica em qualquer condição de onda, os estudos de aplicação do método MPPT são dedicados exclusivamente para gerar um sinal de referência para o controle do conversor PWM, uma vez que este pode controlar a potência convertida.

Nas subseções subsequentes são apresentadas, de forma geral, os componentes do circuito aplicado a este trabalho bem como suas especificações e funções.

### 3.1.1 GERADOR ELÉTRICO

Para o dimensionamento do gerador foram definidas algumas premissas de projeto. Será utilizada uma máquina síncrona de ímãs permanentes dedicada para a aplicação do sistema de geração proposto. As tensões nominais, potência e conjugado, velocidade de operação, fator de potência e rendimento deste gerador são apresentadas na Tabela 3.

Destaca-se que a velocidade de rotação pode chegar em até 10.000 rpm; porém, como o sistema de controle tem como função maximizar a potência convertida, a velocidade de rotação nominal ficará fixada em torno de 4.500 rpm, conforme as curvas apresentadas por Henriques et al. (2016) na Figura 3. Para não se ter perdas magnéticas elevadas, optou-se por uma máquina de dois polos, uma vez que com um número reduzido de polos a frequência para uma dada velocidade de rotação será menor, obtendo-se menores perdas magnéticas para um dado material ferromagnético macio, utilizado no projeto do gerador.

Tabela 3: Especificações de projeto do gerador.

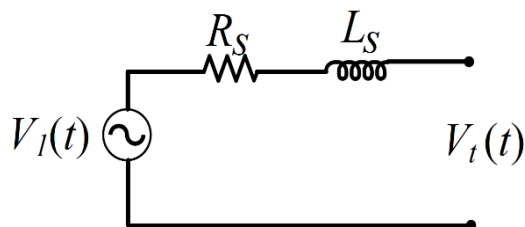
<b>Simbologia</b>	<b>Definição</b>	<b>Valor</b>
$T$	Conjugado Nominal	10 [N.m]
$n_m$	Velocidade Angular Mecânica Nominal	4500 [rpm]
$P$	Potência Mecânica Nominal	4712 [W]
$\eta$	Rendimento	90 [%]
$\cos \phi$	Fator de Potência	1
$2p$	Número de Polos	2 polos

Fonte: (DOS SANTOS, 2020).

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

O circuito equivalente do gerador por fase é apresentado na Figura 20, onde  $V_1(t)$  é a componente fundamental da tensão induzida,  $R_S$  é a resistência elétrica de fase do enrolamento,  $L_S$  é a indutância síncrona e  $V_t(t)$  é a tensão terminal. Os valores dos parâmetros do circuito equivalente foram obtidos através da modelagem do gerador aplicando-se um modelo numérico em elementos finitos. A amplitude da componente fundamental da tensão induzida a vazio é de 95,93 V, então tem-se o valor eficaz da componente fundamental da tensão induzida em aproximadamente 67,8 V em 4500 rpm. A resistência de enrolamento total por fase é de 0,0638  $\Omega$  e a indutância síncrona da máquina é de 2,385 mH. Os demais dimensionamentos e parâmetros do gerador estão detalhados em Dos Santos (2020).

Figura 20: Circuito de regime permanente equivalente do gerador.

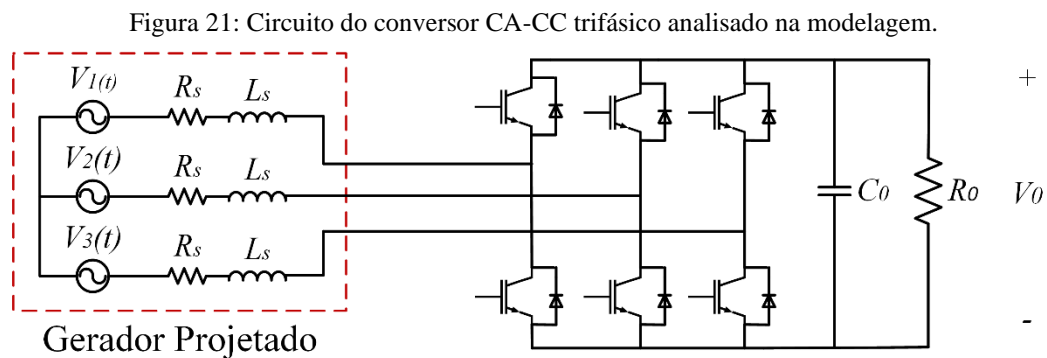


Fonte: (DOS SANTOS, 2020).

### 3.1.2 CONVERSOR CA-CC

Considerando que a aplicação do projeto é a alimentação de um banco de baterias e uma carga em corrente contínua, faz-se necessário o uso de um conversor CA-CC trifásico. Para melhores resultados de conversão, como baixo fator de potência e baixa distorção harmônica de corrente, optou-se pelo uso de um conversor CA-CC trifásico bidirecional totalmente controlado. O controle do circuito é feito por um controlador PI devido a sua facilidade de implementação e terão seus parâmetros calculados com base no circuito equivalente apresentado no Subseção 3.1.1.

Em Dos Santos (2020), é apresentada uma análise detalhada da obtenção dos parâmetros relativos à modelagem do circuito de conversão, que tiveram como base de cálculos os métodos desenvolvidos por Borgonovo (2001). A Figura 21 apresenta o circuito considerado para a modelagem, onde a tensão induzida de fase, as resistências elétricas de enrolamento e as indutâncias síncronas por fase representam o circuito equivalente trifásico do gerador. O sistema é composto ainda pelo retificador PWM que contém 6 chaves estáticas ativas  $S$  e 6 diodos em antiparalelo com cada chave ativa, além de um capacitor  $C_0$  e uma resistência de carga  $R_0$ , com tensão de saída de barramento de  $V_0$ .



Fonte: Adaptado de (DOS SANTOS, 2020).

Para a modelagem do circuito, considera-se uma alimentação senoidal e equilibrada e que as tensões de fase podem ser representadas de acordo com as Equações (14), (15) e (16), onde  $V_p$  é a tensão de pico de fase.

$$V_1(t) = V_P \cdot \cos(\omega t) \quad (14)$$

$$V_2(t) = V_P \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (15)$$

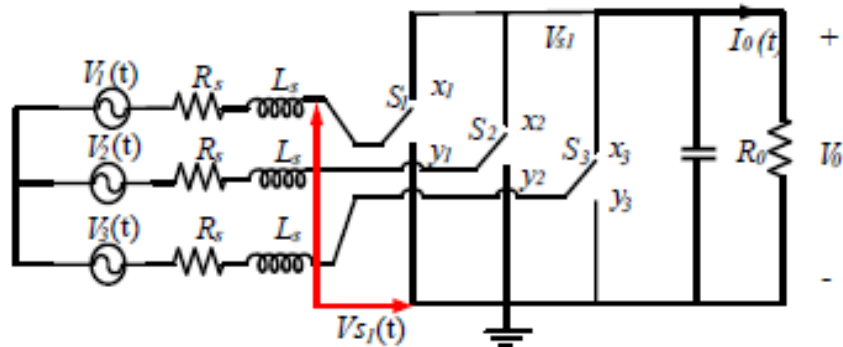
$$V_3(t) = V_P \cdot \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (16)$$

A modelagem foi desenvolvida separando as correntes em eixo direto e em quadratura, aplicando-se a transformada de Park, com o objetivo de obter a função de transferência das correntes em função das razões cíclicas trifásicas  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ , que formam o PWM e com a tensão de saída  $V_0$ . Para obter tal relação, considera-se o circuito da Figura 22, que é um circuito simplificado do conversor acoplado com o gerador. Pode-se observar que quando a chave  $S_1$  está na posição  $x_1$ , a tensão  $V_{s1}$  é igual a tensão de saída  $V_0$ , e quando a chave está na posição  $y_1$ , a tensão em  $V_{s1}$  é nula. Assim, expandindo-se para as demais chaves, tem-se a relação:

$$\begin{cases} V_{s1}(t) = V_0 D_1(t) \\ V_{s2}(t) = V_0 D_2(t) \\ V_{s3}(t) = V_0 D_3(t) \end{cases} \quad (17)$$

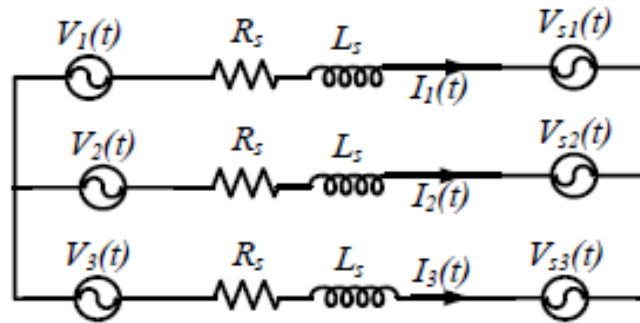
A partir da relação (17), e considerando uma tensão de saída constante, o circuito equivalente do gerador acoplado ao conversor pode ser representado pela Figura 23.

Figura 22: Circuito simplificado do conversor acoplado ao gerador.



Fonte: (DOS SANTOS, 2020).

Figura 23: Circuito equivalente do conversor acoplado ao gerador.



Fonte: (DOS SANTOS, 2020).

Necessita-se para o sistema de controle obter a função de transferência da tensão de saída em função das correntes de eixo direto  $I_d(t)$  e de eixo em quadratura  $I_q(t)$ . Em Dos Santos (2020), é feita uma análise por malhas do circuito da Figura 23 e é aplicada a transformada de Park para obter-se o novo sistema de coordenadas de eixo direto e em quadratura. Sabendo que se busca um fator de potência unitário, ou seja,  $I_q = 0$ , a função de transferência da tensão de saída  $v_o(s)$  depende apenas da corrente de eixo direto  $i_d(s)$  e é dada pela Equação (18), onde  $P_0 = \frac{P_{in}}{\eta} = \frac{V_d I_d}{\eta}$  é a potência de entrada ativa e  $\eta$  é o rendimento do conversor. É importante salientar que essa modelagem não considera a resistência de fase do gerador. No entanto, em geral o valor desta resistência não afeta significativamente o desempenho do sistema.

$$\frac{v_o(s)}{i_d(s)} = \frac{\sqrt{3}V_p R_0}{\sqrt{2}V_0} \frac{1 - \frac{s2L_s P_0 \eta}{3V_p^2}}{1 + sR_0 C_0} \quad (18)$$

### 3.1.3 SISTEMA DE CONTROLE

A partir do modelo do gerador e do conversor, faz-se necessário o projeto dos controladores para que o sistema seja capaz de operar em determinados pontos e garantir a máxima potência convertida. Os controladores deverão manter a corrente de eixo de quadratura

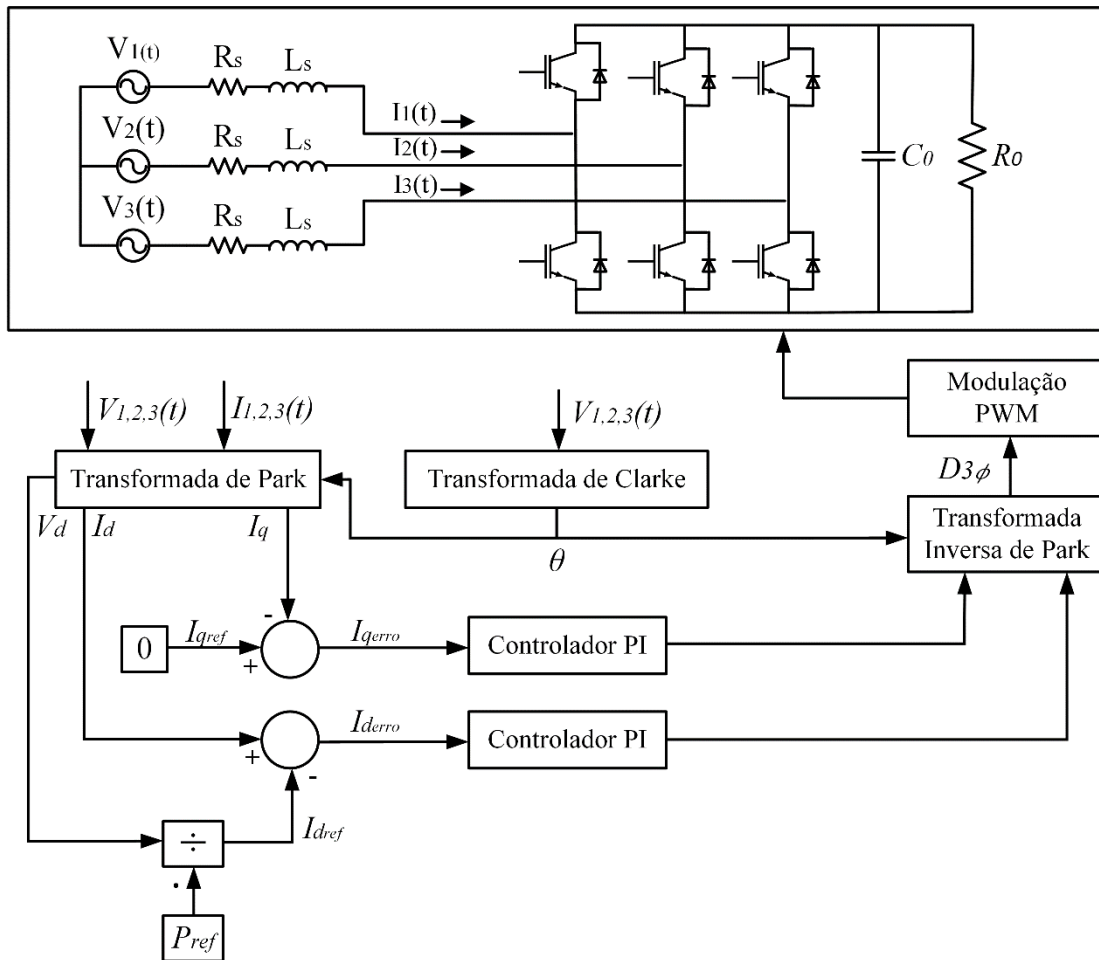
nula para garantir um fator de potência unitário. Assim, a saída do sistema dependerá apenas da corrente de eixo direto para controlar a potência de saída do conversor.

O equacionamento para os ganhos dos controladores PI foi realizado por Dos Santos (2020) tomando como base para os cálculos de Siqueira 2003).

A potência de entrada em relação à rotação velocidade de rotação, fornecida pela turbina ao gerador, é adaptada de um equacionamento apresentado em Henriques et al. (2016), estimando-se uma curva com mesmo formato, mas com potência máxima de 4700 W, visto que em seu trabalho a potência máxima é 1100 W.

A Figura 24 mostra o diagrama do sistema de controle, contendo uma fonte trifásica com resistências e indutâncias em série com as fontes, que caracteriza o modelo em parâmetros concentrados do gerador, o conversor CA-CC Boost PWM trifásico, as transformações de sistemas de referência (Park e Clarke), a geração do PWM trifásico e o sistema de controle, composto por dois controladores de corrente, um para corrente de eixo direto e outro para corrente de eixo em quadratura.

Figura 24: Diagrama da integração entre gerador, conversor CA-CC e controle de potência.



Fonte: Adaptado de (DOS SANTOS; TAVARES; PAULO, 2021).

Os valores dos ganhos de cada variável dos controladores estão na Tabela 4 e são dados de forma geral pela Equação (19), que define a função de transferência do controlador. Através da Figura 24 pode-se verificar que a corrente do eixo em quadratura  $I_q$  terá sempre seu controle buscando uma referência nula. Já o controle da corrente de eixo direto  $I_d$  terá seu *setpoint* dado pela potência de referência  $P_{ref}$ . O controle dessa corrente implicará diretamente no controle da potência de saída do sistema.

$$G(s) = \frac{k \cdot (1 + s\tau)}{s\tau} \quad (19)$$



Tabela 4: Valor nominais dos ganhos dos controladores.

<b>Simbologia</b>	<b>Definição</b>	<b>Valor</b>
$k_{Id}$	Ganho do controlador PI de $I_d$	1,3176
$\tau_{Id}$	Constante de tempo do controlador PI de $I_d$	66,4 ms
$k_{Iq}$	Ganho do controlador PI da corrente $I_q$	1,3176
$\tau_{Iq}$	Constante de tempo do controlador PI de $I_q$	66,4 ms

Fonte: Autor.

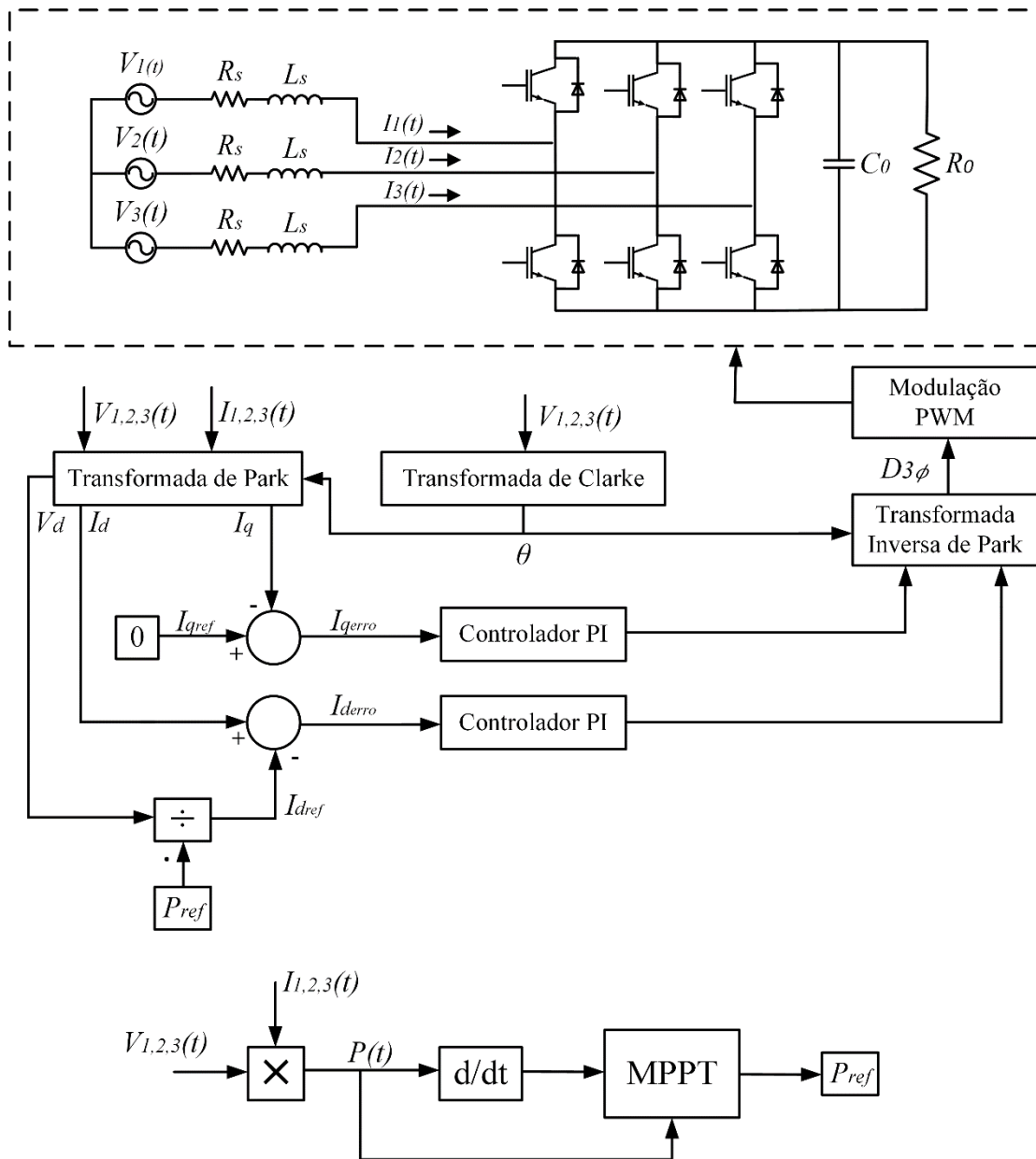
### 3.1.4 MÉTODO MPPT PROPOSTO

Conforme observado na Figura 24, o controle do circuito é realizado baseado em uma dada potência de referência considerada para o sistema. No trabalho de Dos Santos (2020), essa referência é calculada de acordo com a velocidade de rotação da turbina pelas equações que foram adaptadas de Henriques et al. (2016), conforme a Figura 3.

Para uma máxima conversão de energia, a potência de referência do circuito precisa ser a máxima, considerando cada perfil de onda marítima traçada na Figura 3. Em Dos Santos (2020), a obtenção da potência de referência  $P_{ref}$  é calculada de acordo com o perfil de onda identificado em dado momento, o que traz a dificuldade de aplicação prática deste modelo de controle para um sistema na qual precisa estar identificando continuamente as condições de onda marítima para obtenção de uma máxima geração de energia. Ainda assim, esses valores de máximo apresentados por Henriques et al. (2016) são teóricos e podem não representar na prática uma potência máxima convertida do sistema.

Para tal desafio, este trabalho traz como solução a aplicação do método MPPT para obtenção da potência máxima de conversão, que não necessita identificar o perfil de onda marítima em dado instante de tempo para produzir a máxima conversão de energia. Isso porque, conforme apresentado na Seção 2.2, o método busca de forma autônoma a operação no ponto de máxima potência no sistema em que está atuando. Isto é, o método irá ler os valores instantâneos de saída de potência e buscará sempre atualizar a potência de referência  $P_{ref}$  para a máxima naquele instante. A Figura 25 apresenta o diagrama completo do circuito proposto com a inclusão do método MPPT, ajustando a potência de referência  $P_{ref}$  do circuito de controle.

Figura 25: Diagrama do circuito proposto com aplicação do método MPPT.



Fonte: Autor.

O desenvolvimento do método MPPT baseou-se em duas das principais técnicas utilizadas, a P&O e a P&O com Perturbação Adaptativa, devido a sua facilidade de aplicação, rápida resposta e reduzida necessidade de processamento, tornando o sistema simplificado e, ao mesmo tempo, eficaz. A Figura 26 traz a representação do fluxograma utilizado para aplicação do MPPT. A Tabela 5 detalha cada variável definida no fluxograma do método MPPT da Figura 26.

Tabela 5: Definição das variáveis do fluxograma do método MPPT adaptado utilizado no projeto.

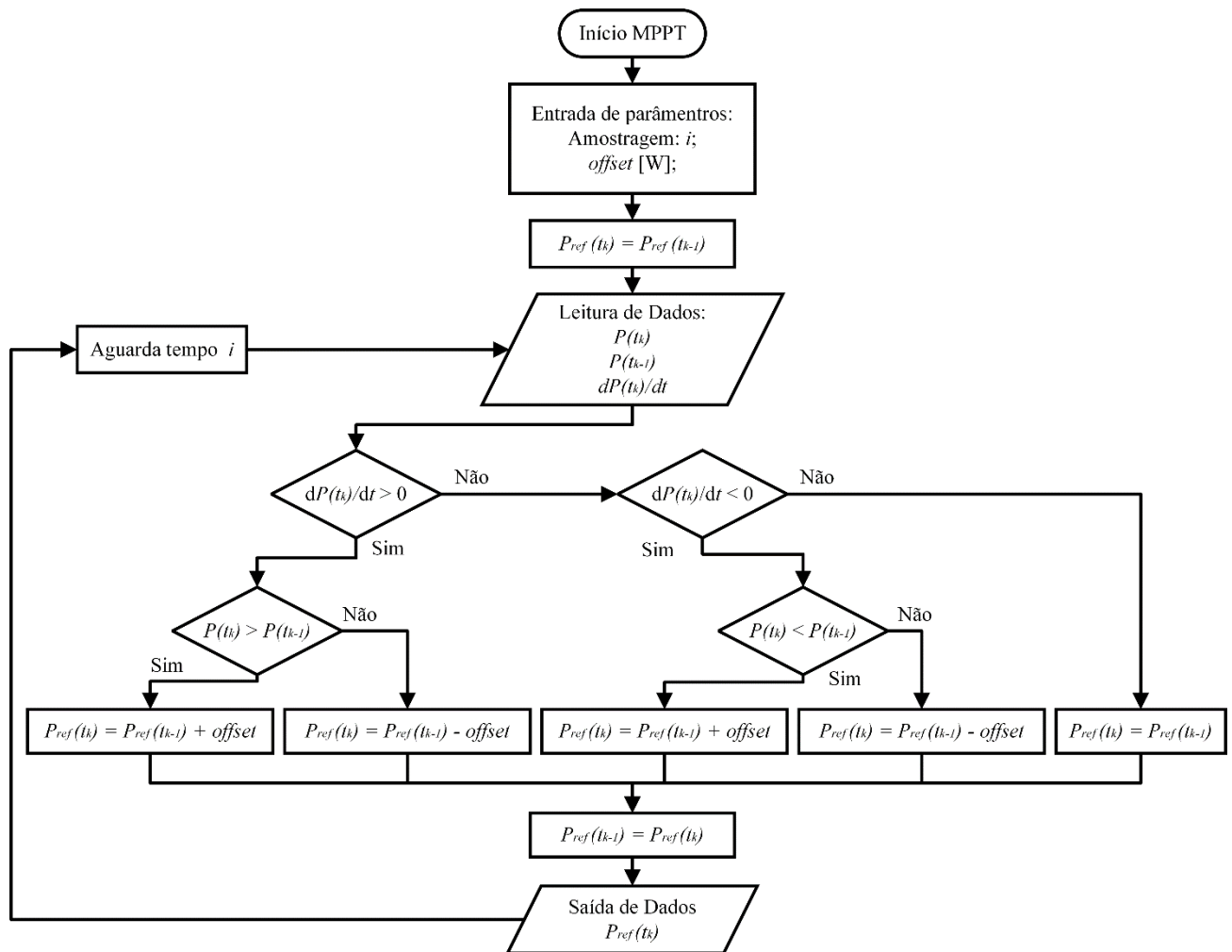
<b>Simbologia</b>	<b>Definição</b>
$i$	Tempo de amostragem
$offset$	Passo de perturbação (em watts)
$t_k$	Instante de tempo
$t_{k-1}$	Instante de tempo anterior
$P(t_k)$	Potência lida em um instante $t_k$
$P_{ref}(t_k)$	Potência de referência em um instante $t_k$
$\frac{dP(t_k)}{dt}$	Derivada da potência lida num instante $t_k$

Fonte: Autor.

O método de obtenção do ponto de máxima potência apresentado no fluxograma da Figura 26 segue os mesmos princípios apresentados na Subseção 2.2.1.1, na qual a potência de referência é perturbada, então as variáveis de entrada (a potência e a sua derivada em relação ao tempo) são lidas e comparadas com valores anteriores. Assim, o algoritmo toma a decisão de aumentar, diminuir ou manter a referência de saída.

Inicialmente o algoritmo faz a inicialização necessária definindo os parâmetros de entrada, como o tempo de amostragem do cálculo  $i$  e o  $offset$  que será aplicado em cada perturbação. Também é definido apenas na primeira amostragem que a potência medida atual  $P(t_k)$  é igual a potência medida anterior  $P(t_{k-1})$ , para fins de inicialização, devido a não existir valor anterior medido. Portanto, é feita a leitura dos dados de entrada: potência medida  $P(t_k)$  no instante de tempo  $t_k$ ; potência medida  $P(t_{k-1})$  no instante de tempo  $t_{k-1}$ ; e a derivada da potência  $\frac{dP(t_k)}{dt}$ .

Figura 26: Fluxograma do método MPPT adaptado desenvolvido para o projeto.



Fonte: Autor.

As comparações são realizadas em três esferas. Nas duas primeiras, verifica-se a inclinação da curva de potência de saída através de sua derivada e também se os valores da potência de saída estão aumentando ou diminuindo em relação ao tempo. Caso a derivada apresentar um valor positivo, isto é, a curva estiver numa crescente, e o valor medido de potência em um instante  $t_k$  for maior que em um instante anterior  $t_{k-1}$ , a potência de referência  $P_{ref}$  é aumentada conforme valor do *offset*. Se a potência  $P(t_k)$  for menor que seu valor anterior  $P(t_{k-1})$ , a  $P_{ref}$  é subtraída no valor de *offset*. Esta comparação segue o inverso quando a derivada é negativa.

Para o terceiro caso, a derivada é nula e o sistema está em estabilidade, assumindo assim o seu ponto de máxima potência de operação. Nessa situação, não há perturbação no valor da potência de referência e a potência de saída do sistema é a máxima.

No entanto, mesmo com o sistema estável, ele continuará realizando as leituras, e se em um dado novo instante de tempo as condições marítimas de onda se alterarem, a potência lida também será alterada e, conseqüentemente, o ponto de máxima potência também. O sistema entrará em nova perturbação e comparação para obter este novo ponto de máxima potência de operação.

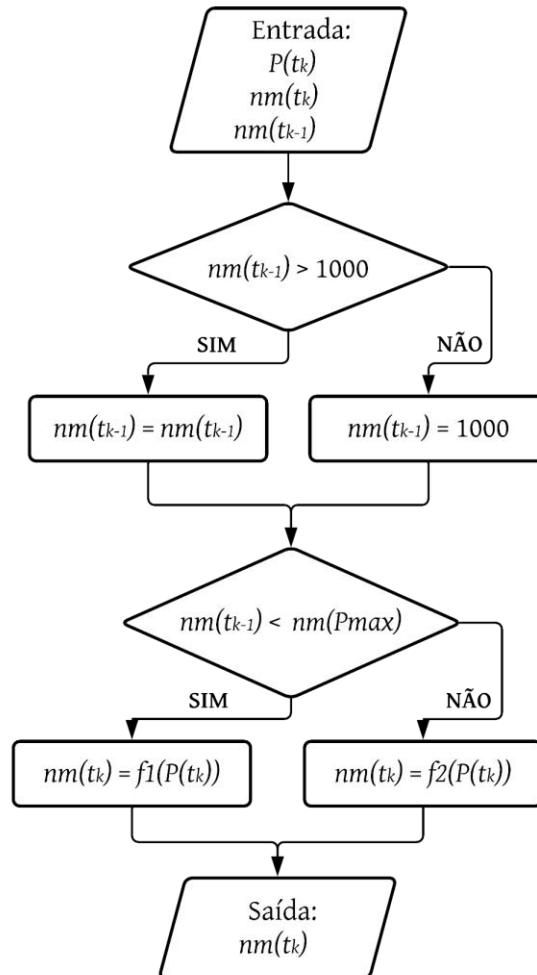
### 3.1.5 CÁLCULO DA VELOCIDADE ANGULAR DOS REGIMES DE ONDA

Conforme apresentado na Subseção 1.4.1, com base nos estudos de Henriques et al. (2016), existe uma dependência da potência de saída em relação à velocidade de rotação da turbina para diversos regimes de onda. Cada regime de onda terá um ponto de máxima conversão, e é neste ponto que o MPPT deve levar o sistema a operar.

Com isto, existe uma relação entre a frequência de operação do sistema e a potência de saída do mesmo. Ao mudar-se a potência de saída, conseqüentemente altera-se a velocidade síncrona do gerador e, assim, o seu conjugado e amplitude, que está amarrado pelas curvas da Figura 3. Para manter-se a relação entre as variáveis de entrada e saída, definiu-se como solução calcular a velocidade angular de rotação em função da potência de saída do sistema. Essas equações foram aproximadas da Figura 3 através do *software* Matlab®, que irão fornecer as condições de conjugado e velocidade angular que a turbina real oferece, possibilitando modelar a tensão induzida do gerador. No entanto, como agora a variável de entrada é a potência, para que exista uma função, isto é, uma única saída para uma dada entrada, as curvas foram divididas em duas partes, separados pelo ponto de máxima potência de cada curva. Aqui será definido como  $f_1(P)$  a função abaixo do ponto de máxima  $P_{max}$  e  $f_2(P)$  a função que está acima do ponto de máxima.

O intuito desta etapa é emular as condições reais de operação da turbina, e conseqüentemente do gerador que está acoplado nela, de forma que o sistema possa estar sempre trabalhando em cima das curvas de cada regime de onda selecionado nas simulações. A Figura 27 apresenta o diagrama desta etapa, na qual a variável de entrada é a potência convertida e a saída é a velocidade de rotação da turbina.

Figura 27: Diagrama do cálculo da velocidade de rotação dos regimes de onda.



Fonte: Autor.

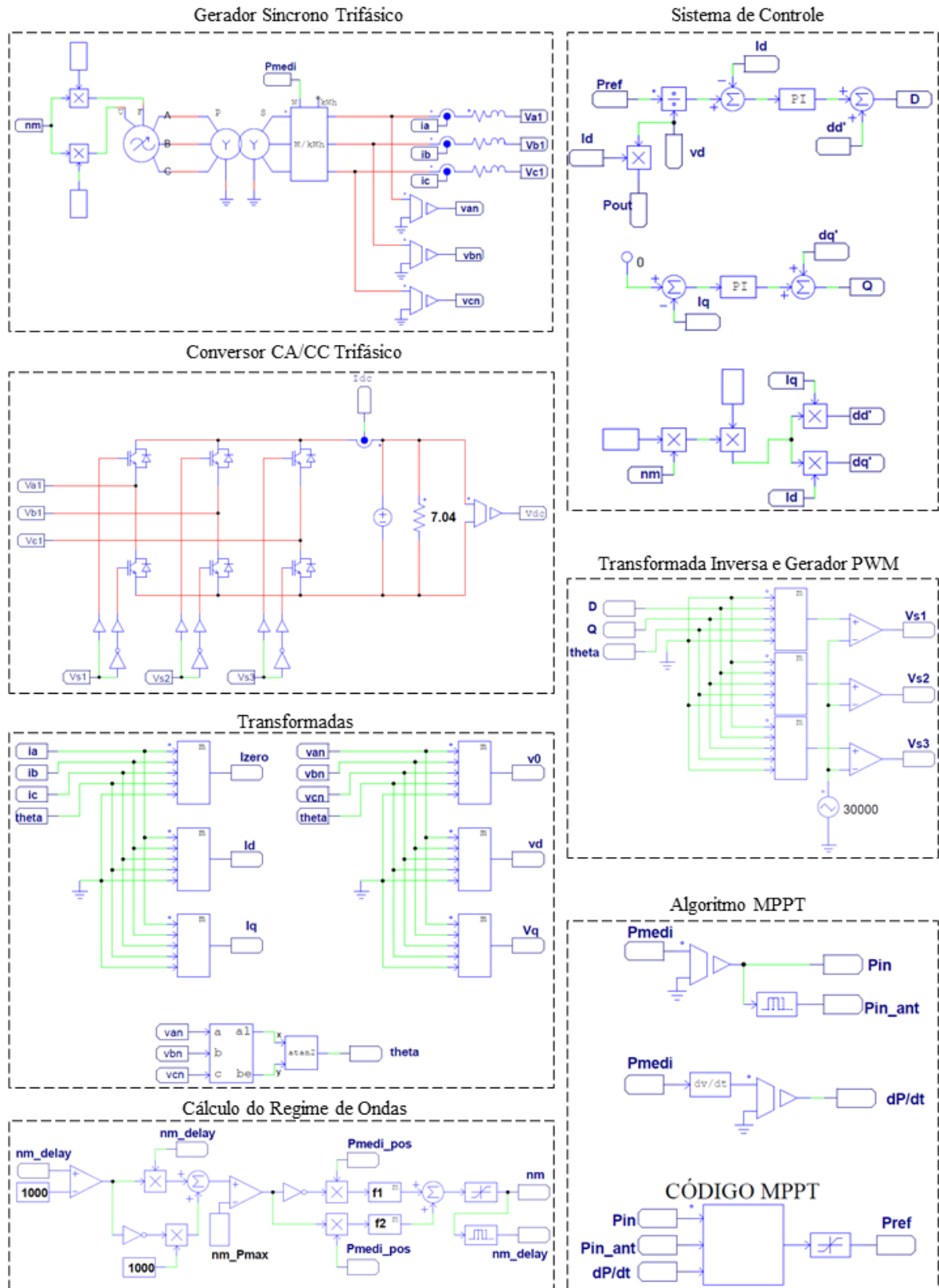
Conforme Figura 27, observa-se que foram impostas algumas condições de operação. Inicialmente o sistema recebe as variáveis de entrada: potência de saída, velocidade de rotação e velocidade de rotação em um instante de tempo anterior  $t_{k-1}$  (necessária para o processamento do simulador). O bloco inicialmente condiciona o circuito a operar com rotação mínima de 1000 rpm (assim definido pois não se tem dados para a potência convertida abaixo desta velocidade, de acordo com a Figura 3). O segundo bloco faz a comparação para saber qual função será utilizada no cálculo, conforme for o ponto da curva em que se está operando naquele instante. Por fim, o cálculo é realizado pelas funções  $f_1(P)$  ou  $f_2(P)$  e tem-se a velocidade de rotação de acordo com a potência instantânea, que servirá como variável de entrada para o gerador.

### 3.2 SOLUÇÃO FINAL COMPLETA

Com base nas modelagens e nos métodos apresentados na Seção 3.1, a Figura 28 traz uma visão geral do circuito desenvolvido através do *software* PSIM<sup>®</sup>, a fim de aplicar e comprovar as deduções até aqui apresentadas através de simulações. O projeto foi dividido em 7 partes: gerador síncrono trifásico, conversor CA-CC trifásico, transformadas, sistema de controle, transformada inversa e gerador PWM trifásico, cálculo do regime de ondas ( $v \times P$ ) e algoritmo MPPT.

A Figura 29 apresenta o sistema de geração de energia composto por uma fonte de tensão trifásica variável que tem como parâmetros de entrada a frequência elétrica e o valor eficaz de tensão induzida do gerador. Assim será possível modelar a tensão induzida do gerador através do cálculo da velocidade angular  $\omega$  do sistema para diferentes cenários de onda. Aqui também estão inclusos os demais parâmetros do circuito equivalente do gerador: resistência de fase e indutância síncrona  $R_s$  e  $L_s$ , respectivamente. Neste bloco foi incluso a medição de potência que serve como base para o cálculo do MPPT. Usou-se um bloco transformador estrela-estrela trifásico com relação 1-1 para isolar o sistema de geração com o de conversão.

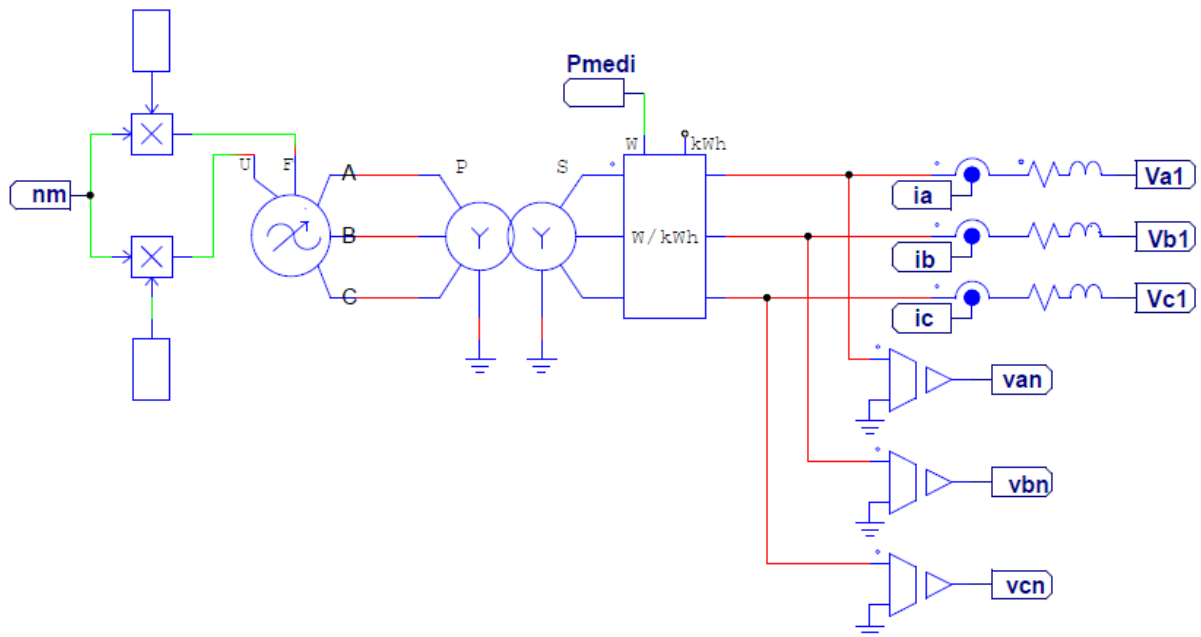
Figura 28: Visão geral do circuito desenvolvido através do PSIM®.



Fonte: Autor.



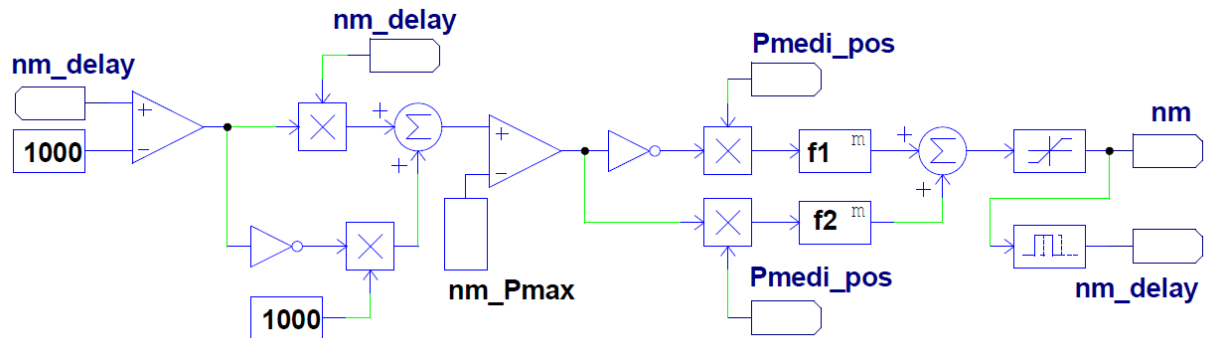
Figura 29: Gerador e medição de potência.



Fonte: Autor.

O cálculo da velocidade angular, que servirá de referência para o gerador para as simulações, é composto pelo bloco matemático da Figura 30. Inicialmente o bloco limita as simulações em uma velocidade angular mínima de 1000 rpm visto que inicialmente não há nenhuma potência convertida e, após isto, compara com a velocidade máxima de rotação  $nm_{P_{max}}$  para o perfil de onda considerado. Isto se faz necessário, como já apresentado na Subseção 3.1.5, para que o cálculo da velocidade  $nm$  tenha apenas uma saída para uma dada entrada de potência medida  $P_{medi}$ . Assim, divide-se o cálculo nas funções  $f_1(P)$  como a função para os valores de velocidade abaixo do ponto de máxima  $P_{max}$  e  $f_2(P)$  como a função para os valores de velocidade que estão acima do ponto de máxima.

Figura 30: Cálculo da Velocidade Angular para os Regimes de Onda.

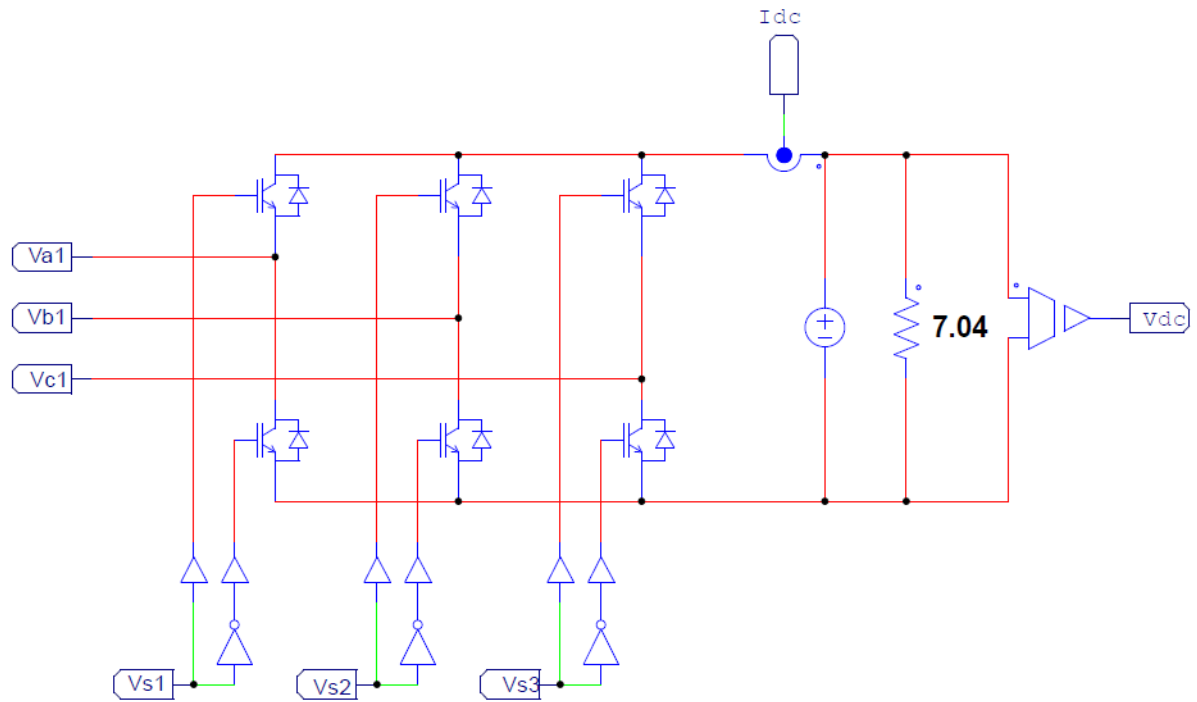


Fonte: Autor.

O sistema de conversão CA-CC é apresentado na Figura 31. Este é composto por um retificador PWM trifásico. Para a representação da bateria, usou-se uma fonte de tensão  $V_{DC}$  na saída do circuito em paralelo com uma carga resistiva. Essa configuração foi escolhida pois o regime de ondas não será alterado significativamente de forma abrupta, então a tensão terminal da bateria também não terá seu valor alterado nos intervalos de tempo das simulações realizadas. Para o controle PWM, considerou-se os sinais  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  e  $V_{s3}$  que formarão o controle das chaves do retificador. Esses sinais são oriundos do bloco de Transformada Inversa e Geração PWM.

O bloco de desacoplamento dos circuitos de eixo direto e quadratura realizado pelas transformadas de Park, alterando-se o sistema de referência trifásico para o sistema de referência síncrono  $dq$ , a fim de garantir que o controle da potência convertida será dado apenas pela corrente de eixo direto. A transformada de Clarke é utilizada para a obtenção do ângulo de referência para aplicar tanto na Transformada de Park, quanto na sua inversa (DOS SANTOS, 2020). Os dois blocos de transformada são apresentados na Figura 32.

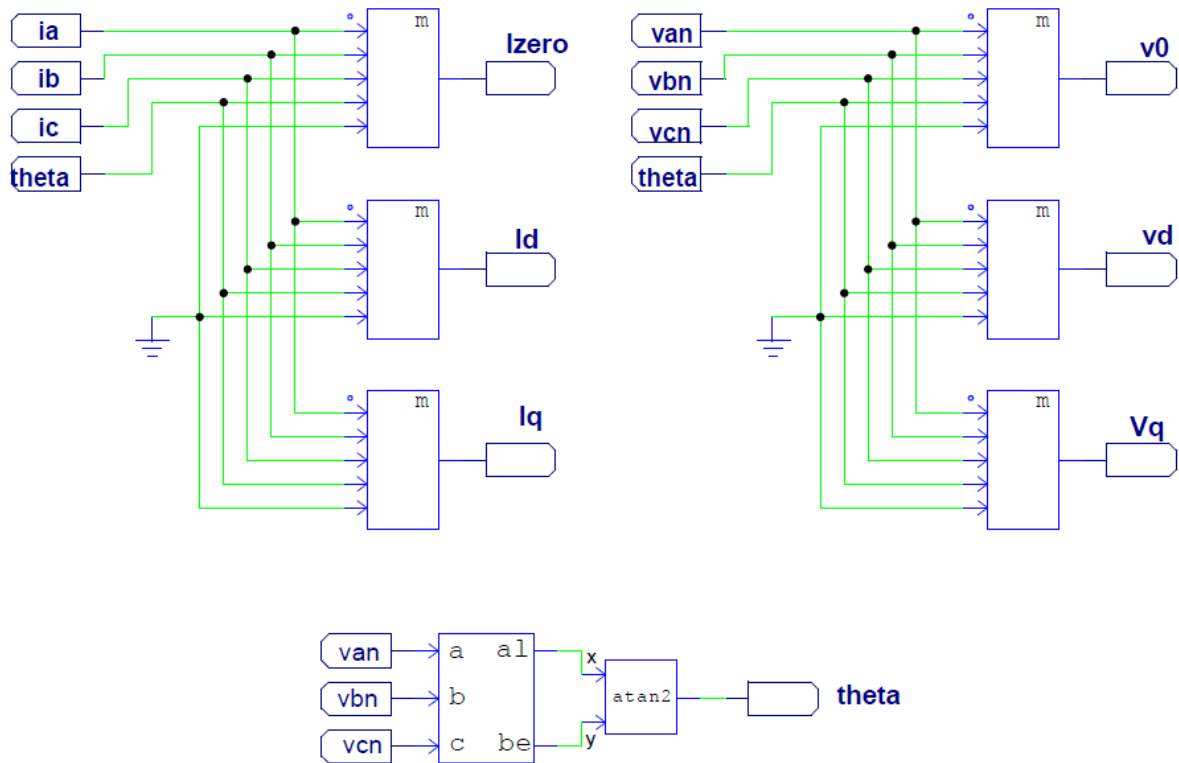
Figura 31: Conversor CA-CC.



Fonte: Autor.

O sistema de controle discutido na Subseção 3.1.3 é composto por dois controladores PI utilizados para controlar a corrente de eixo direto  $I_d$  e de eixo em quadratura  $I_q$ , conforme ilustra a Figura 33. A partir das saídas dos controladores são obtidas as variáveis que compõem os cálculos para as transformadas inversas que formarão o PWM, responsável pelo chaveamento do conversor CA-CC, conforme Figura 34. Os sinais gerados a partir da transformada inversa de Park são comparados com um sinal triangular com frequência fundamental de 3 kHz, caracterizando assim uma modulação senoidal PWM.

Figura 32: Transformada de Park e Clarke.

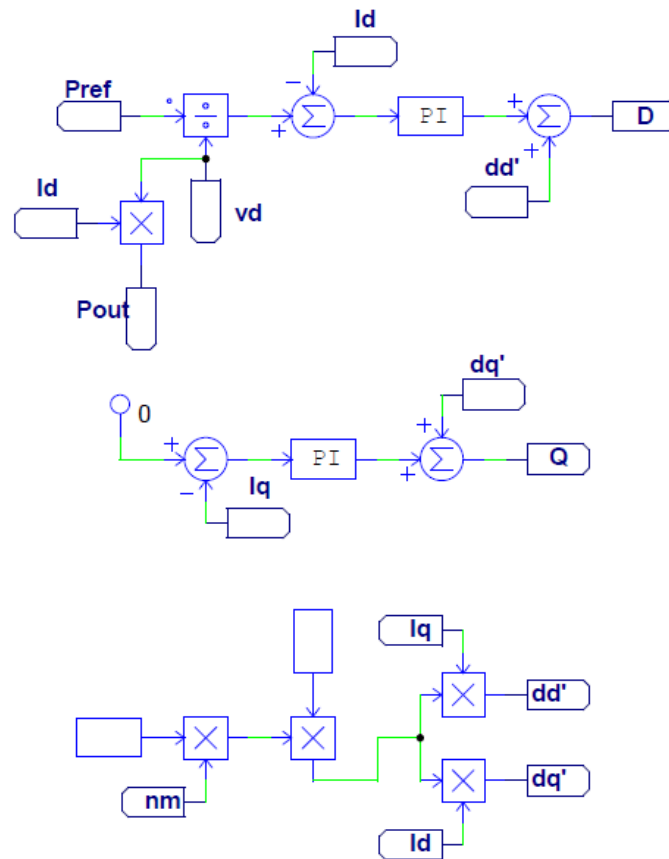


Fonte: Autor.

O bloco de aplicação do método MPPT é apresentado na Figura 35, onde foi utilizado o *C Block* do PSIM<sup>®</sup>. Este bloco permite a criação e aplicação da lógica do diagrama da Figura 26 utilizando a linguagem C. Foram definidas três variáveis de entrada: potência medida  $P_{in} = P(t_k)$ , potência medida anterior  $P_{in_{ant}} = P(t_{k-1})$  e a derivada da potência medida em relação ao tempo  $dP/dt = dP(t_k)/dt$ . A potência medida anterior é obtida usando-se um bloco de *delay* de 0,05 segundos de tempo e a derivada é obtida através do bloco de derivação do PSIM<sup>®</sup>.

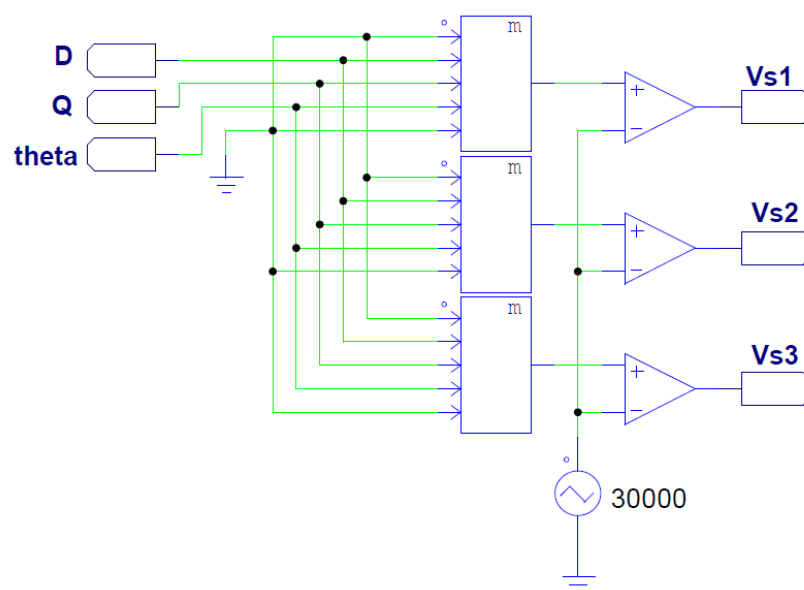
A variável de saída do *C Block* é a potência de referência  $P_{ref}$  que servirá de base para o circuito de controle. O bloco de saturação na saída serve para limitar o valor de potência do sistema, visto que não há nenhuma limitação física na fonte de tensão (que simula o gerador) para gerar-se uma potência acima da máxima dadas pelas curvas da Figura 3.

Figura 33: Sistema de Controle.



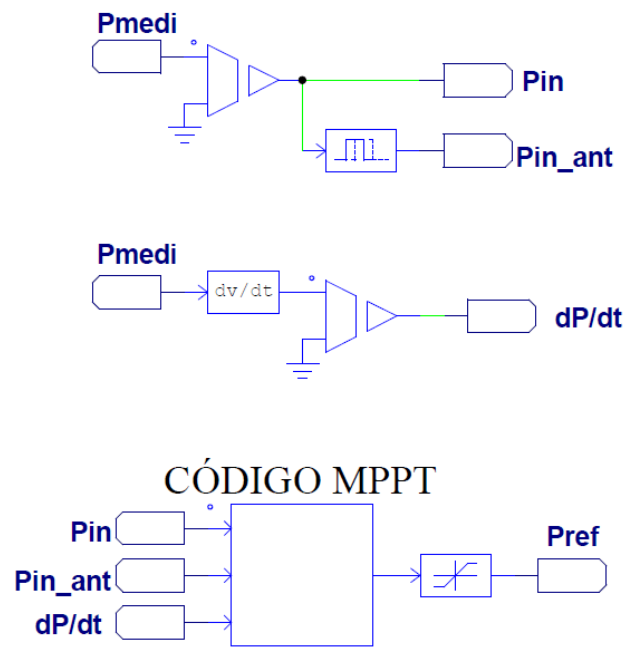
Fonte: Autor.

Figura 34: Transformada Inversa e Geração PWM.



Fonte: Autor.

Figura 35: Bloco de aplicação do Método MPPT.



Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dedicado para a apresentação e análise das simulações que foram realizadas com base no estudo desenvolvido e apresentado no Capítulo 3. O objetivo destas simulações é analisar de forma geral a viabilidade e o desempenho da aplicação do método MPPT para obtenção de uma maior eficiência energética em um sistema de geração de energia através de ondas marítimas, especificamente para o sistema WEC estudado a partir da proposta de Dos Santos (2020) para os estudo de Henriques et al. (2016).

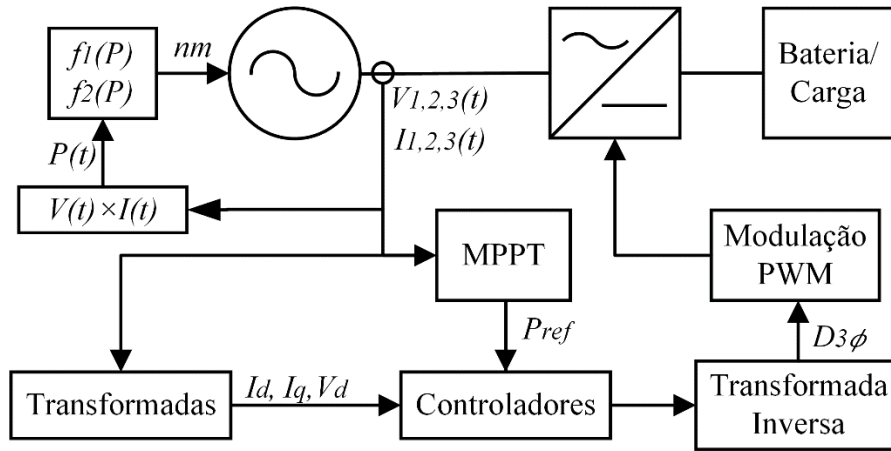
Alguns elementos de interesse do circuito são apresentados nas simulações, como a potência de referência, calculada pelo MPPT, a potência de saída do sistema, correntes de eixo direto e em quadratura e velocidade de operação, além das curvas de tensão e corrente do gerador da fase 1. Não são abordadas simulações considerando velocidade fixa, visto que estes casos já são analisados em Dos Santos (2020), onde é evidenciado a reposta do sistema para diversos regimes de onda, inclusive quando se tem um transiente entre eles.

Dois diferentes tipos de análises são realizados neste capítulo. Na primeira o sistema é submetido a apenas um regime de onda específico, a fim de validar o método MPPT para cada condição marítima separadamente. Para este caso, foram considerados três perfis de onda distintos, com potência máxima de saída de 4700 W, 4000 W e 3500 W, denominados como PO1, PO2 e PO3, respectivamente. Em seguida é realizada uma simulação na qual os três diferentes regimes de onda são avaliados em um mesmo intervalo de tempo, simulando uma alteração na condição marítima dentro de um mesmo período amostrado. Neste segundo caso, o sistema é perturbado e necessita retomar uma saída com potência máxima, simulando próximo a um cenário real de aplicação onde o perfil das ondas marítimas está constantemente se alterando.

O circuito geral simulado é apresentado no diagrama de blocos da Figura 36. Ele é composto pelo sistema de geração e conversão, transformadas, controle de corrente, método MPPT e cálculo de velocidade para os regimes de onda.

Todas simulações são realizadas no *software* PSIM<sup>®</sup> versão 12.0.4. Os dados foram importados e apresentados através do *software* Matlab<sup>®</sup> versão R2012b.

Figura 36: Diagrama geral de simulação no PSIM®.



Fonte: Autor.

#### 4.1 SIMULAÇÃO COM PERFIL DE ONDA FIXO

Na simulação com perfil de onda fixo, considera-se que as ondas que estão incidindo sobre a turbina mantem-se com a mesma intensidade. Assim, pode-se avaliar de forma dinâmica o comportamento do MPPT afim de buscar a máxima potência convertida. Além disso, é possível avaliar a resposta do sistema quando a potência de referência  $P_{ref}$  é alterada.

Todas as simulações para este caso são realizadas em um intervalo de tempo de 0,3 segundos, com tempo de amostragem de 1 microssegundo. O tempo de amostragem para o cálculo MPPT é de 5 milissegundos. Vale salientar que a velocidade angular de operação e a tensão induzida do gerador são ajustadas pelas equações  $f_1(P)$  e  $f_2(P)$ , conforme as curvas aproximadas e adaptadas de Henriques et al. (2016), Figura 3. A potência máxima de saída para um perfil de onda fixo segue a Equação (20) (escalonada para os valores de potência de saída deste trabalho) e está representada pela linha pontilhada em preto da Figura 37. Como a velocidade é variável durante as simulações, para cada situação será considerado o  $n_m$  máximo ( $n_{m\_max}$ ) para se chegar na potência de referência máxima  $P_{PO\_max}$ .

$$P_{PO} = 13,574 \times 10^{-9} \cdot n_m^{3,159} \quad (20)$$



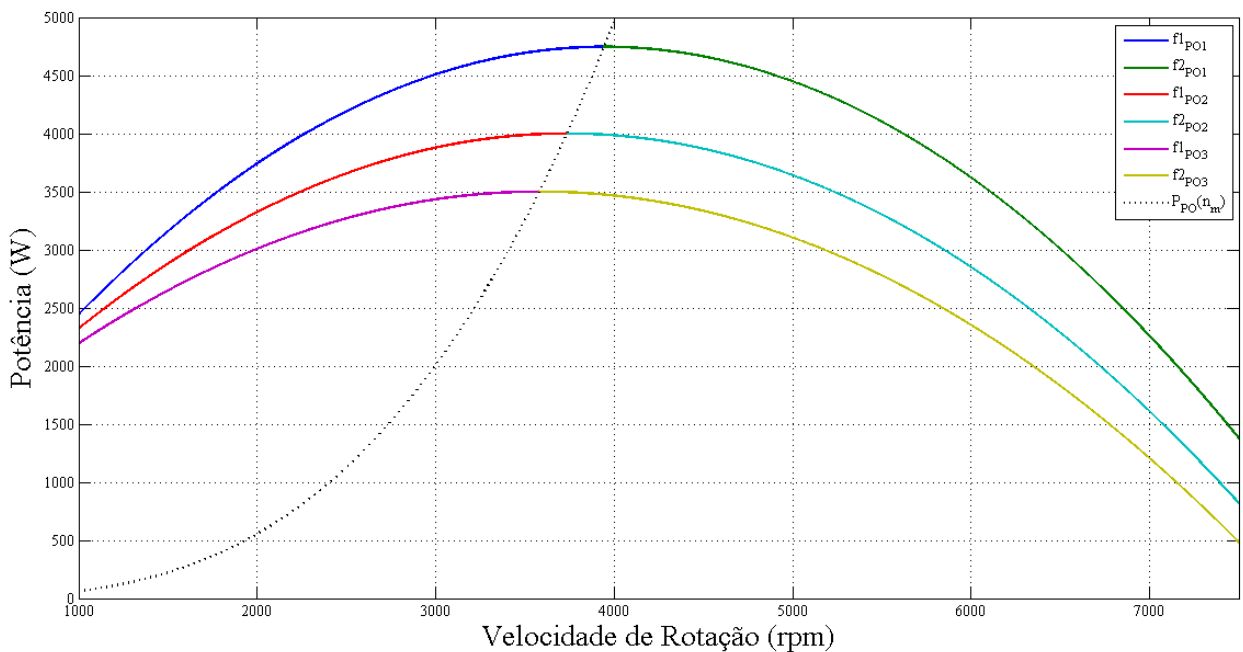
Para realizar as simulações, três curvas da Figura 3 foram aproximadas por equações de segundo grau e são apresentadas na Figura 37. Elas foram divididas em seus pontos de máxima potência  $P_{PO\_max}$ , possibilitando a existência de duas funções,  $f_1(P)$  e  $f_2(P)$ , que extraem suas raízes, uma vez que agora a potência está em função da velocidade. A Figura 38 apresenta as funções dos três perfis de onda, com PO1 tendo as Equações (21), PO2 com as Equações (22) e PO3 com as Equações (23).

$$\begin{cases} f_{1\_PO1}(P) = 1878,99 \cdot \left( 2,098 - \sqrt{10,644 \times 10^{-4} \cdot (610,8 - P) + 4,4016} \right) \\ f_{2\_PO1}(P) = 1878,99 \cdot \left( -2,098 + \sqrt{10,644 \times 10^{-4} \cdot (610,8 - P) + 4,4016} \right) + 7884 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} f_{1\_PO2}(P) = 2229,47 \cdot \left( 1,67501 - \sqrt{8,971 \times 10^{-4} \cdot (872,46 - P) + 2,80566} \right) \\ f_{2\_PO2}(P) = 2229,47 \cdot \left( -1,67501 + \sqrt{8,971 \times 10^{-4} \cdot (872,46 - P) + 2,80566} \right) + 7468 \end{cases} \quad (22)$$

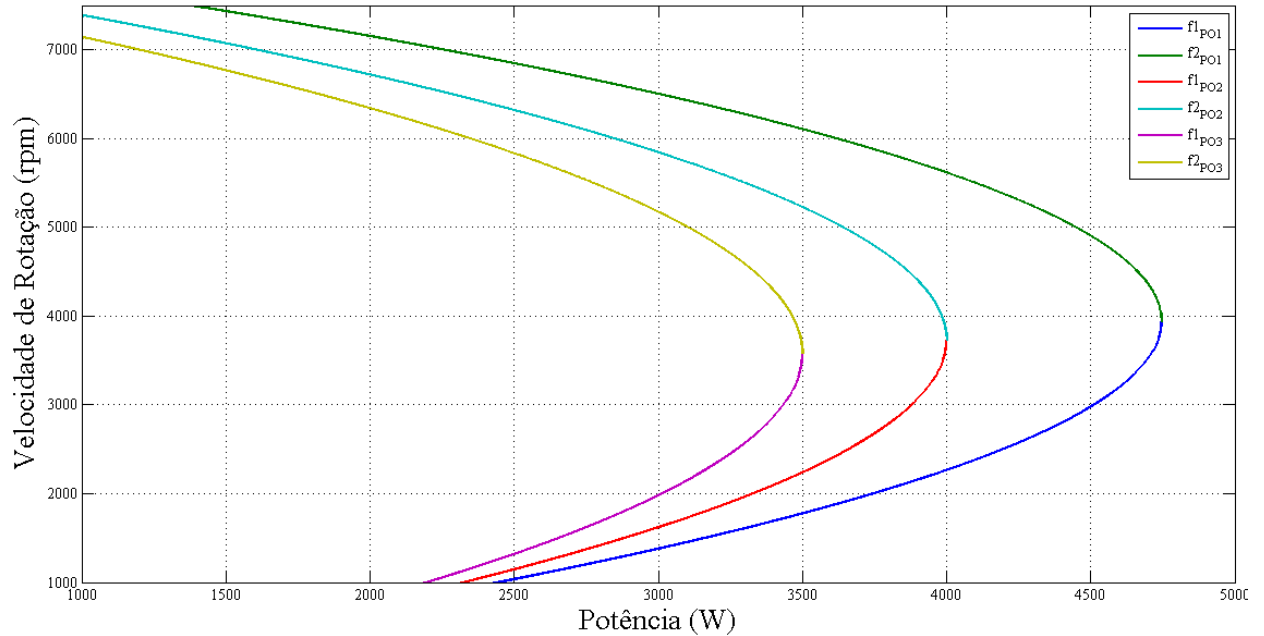
$$\begin{cases} f_{1\_PO3}(P) = 2547 \cdot \left( 1,97394 - \sqrt{7,8494 \times 10^{-4} \cdot (985,24 - P) + 1,40497} \right) \\ f_{2\_PO3}(P) = 2547 \cdot \left( -1,97394 + \sqrt{7,8494 \times 10^{-4} \cdot (985,24 - P) + 1,40497} \right) + 7156 \end{cases} \quad (23)$$

Figura 37: Equações aproximadas da Potência *versus* Velocidade de rotação para diferentes estados marítimos (PO1, PO2 e PO3).



Fonte: Autor.

Figura 38: Equações da função da Velocidade de rotação versus Potência para diferentes estados marítimos (PO1, PO2 e PO3).



Fonte: Autor.

A Tabela 6 apresenta a relação dos pontos de máxima potência e máxima velocidade de rotação para os perfis de onda PO1, PO2 e PO3. Estes pontos fazem a divisão entre as funções  $f_1(P)$  e  $f_2(P)$ , e servem como base para os valores de referência buscados pelo MPPT.

Tabela 6: Relação dos pontos de máxima Potência e Velocidade de Rotação para cada perfil de onda.

Perfil de Onda	$n_{m \max}$ (rpm)	$P_{PO \max}$ (W)
PO1	3942	4700
PO2	3734	4000
PO3	3579	3500

Fonte: Autor.

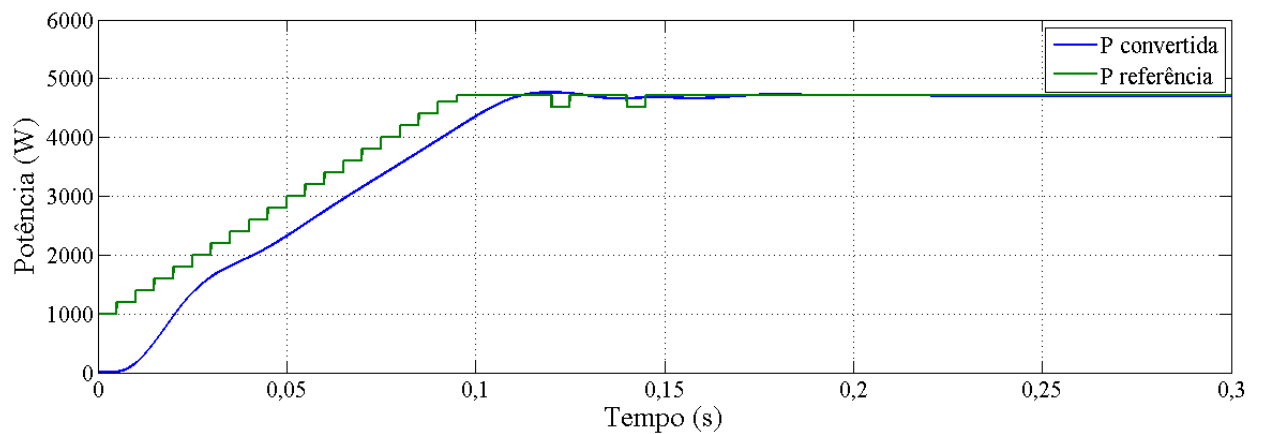
#### 4.1.1 SIMULAÇÃO COM PERFIL DE ONDA PO1

Na simulação com o perfil de onda PO1, a potência de referência inicial é de 1000 W com o intuito de inicializar o sistema, visto que inicialmente não há nenhuma potência convertida. A Figura 39 apresenta a potência de referência calculada pelo MPPT e a potência de saída convertida pelo sistema, considerando o perfil de onda PO1. Espera-se que o sistema

obtenha, de forma autônoma, a melhor e maior potência de saída convertida possível neste cenário. A Figura 40 mostra a velocidade de rotação.

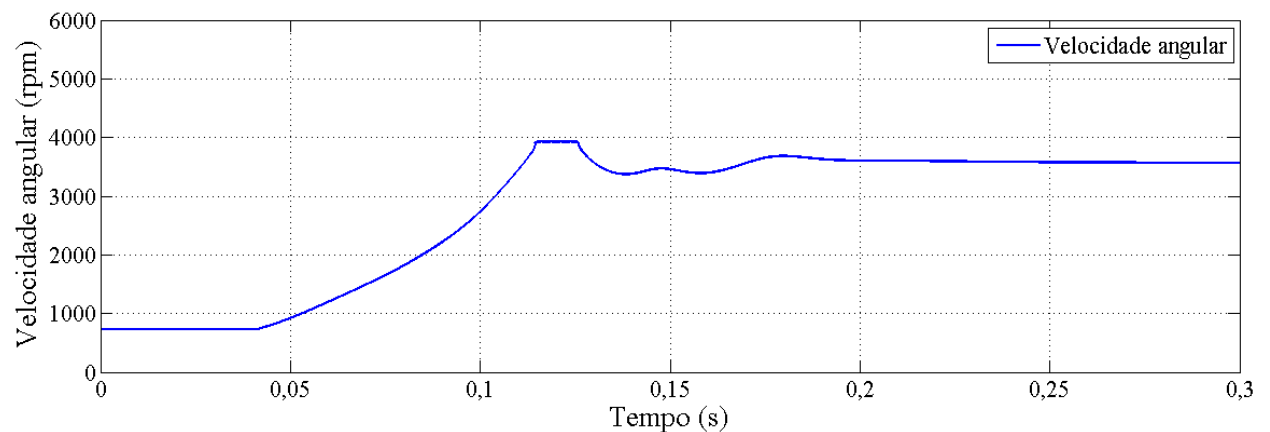
Na Figura 41 são apresentadas as correntes de eixo direto  $I_d$  e em quadratura  $I_q$ . Na primeira, se espera que o sistema de controle seja capaz de mantê-la estável em regime permanente. Já para a segunda, o controle deve buscar um valor nulo para que se tenha fator de potência próximo ao unitário. Também é mostrado na Figura 42 a tensão e corrente do gerador para a fase 1 do circuito.

Figura 39: Simulação da potência de referência e convertida para perfil de onda PO1.

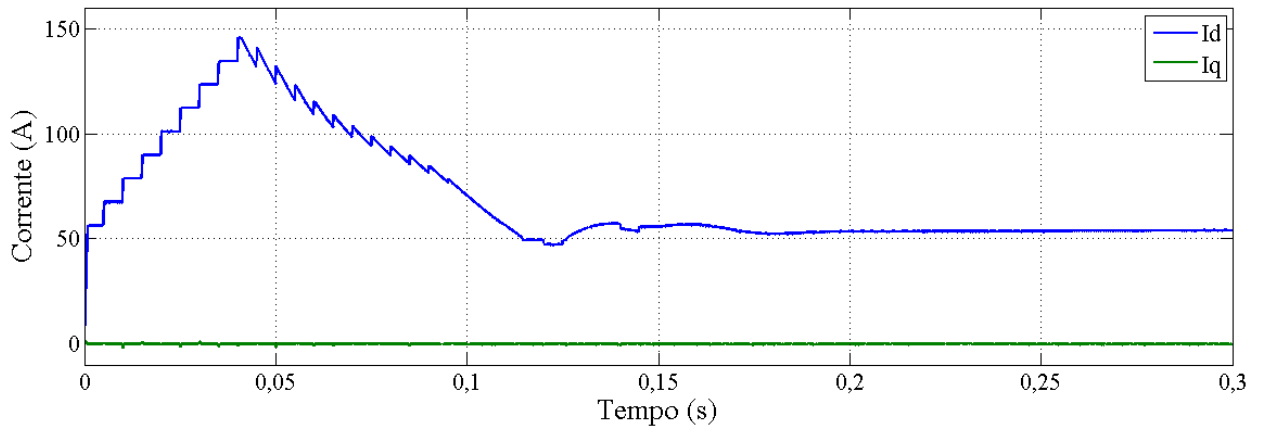


Fonte: Autor.

Figura 40: Simulação Velocidade de Rotação para perfil de onda PO1.

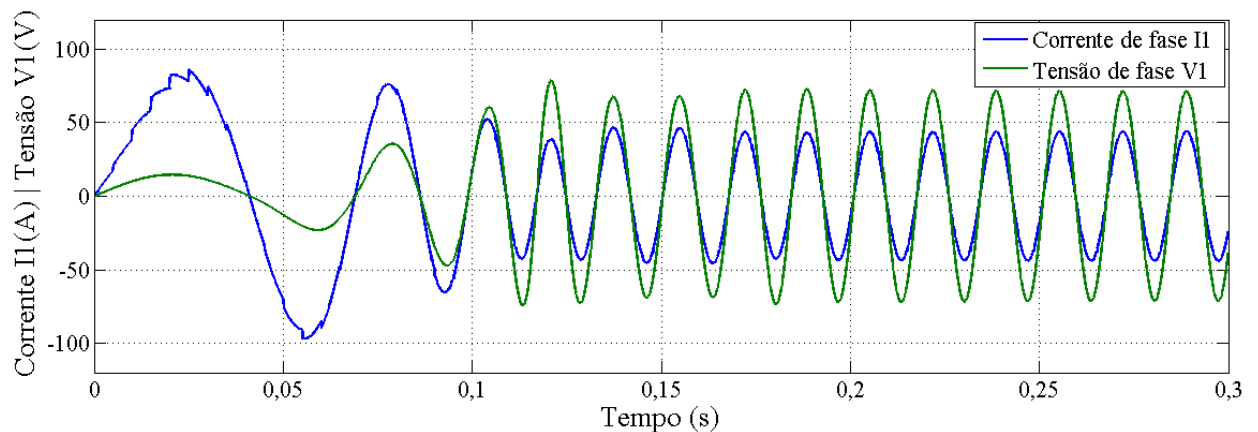


Fonte: Autor.

Figura 41: Simulação das correntes  $I_d$  e  $I_q$  para perfil de onda PO1.

Fonte: Autor.

Figura 42: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase 1 para perfil de onda PO1.



Fonte: Autor.

Pela Figura 39 pode-se observar que, inicialmente com a potência de referência em 1000 W, a potência convertida sai do seu estágio nulo e inicia a conversão aumentando gradativamente a potência. Conforme o tempo de simulação decorre, o sistema faz as leituras de potência em um instante anterior e de sua derivada e gradualmente aumenta a referência aplicada ao controlador até chegar em seu valor máximo de 4706 W, em um passo definido pelo *offset* de 200 W. Nesse valor de máxima potência de referência, o circuito tem um sobressinal e o MPPT ainda impõem um degrau de *offset* para ajustar o valor de máxima potência, mostrando assim a eficiência e a correta aplicação do método para este circuito, que também obteve boa resposta à variação de referência.

Na Figura 40, observa-se a variação da velocidade de rotação, estabilizada em aproximadamente 3580 rpm, no instante  $t = 0,2$  s. A corrente de eixo direto tem um valor

máximo de 148,8 A, aproximadamente 2,78 vezes o valor dessa corrente quando estabilizado o sistema, com valor de 53,54 A. Isso se dá porque o circuito não possui boa operação em rotações baixas, já descrito por Dos Santos (2020). No entanto, a corrente de eixo em quadratura mantém o seu valor próximo à zero devido a atuação do controlador para esta variável, mantendo um fator de potência unitário, que pode ser constatado na Figura 42.

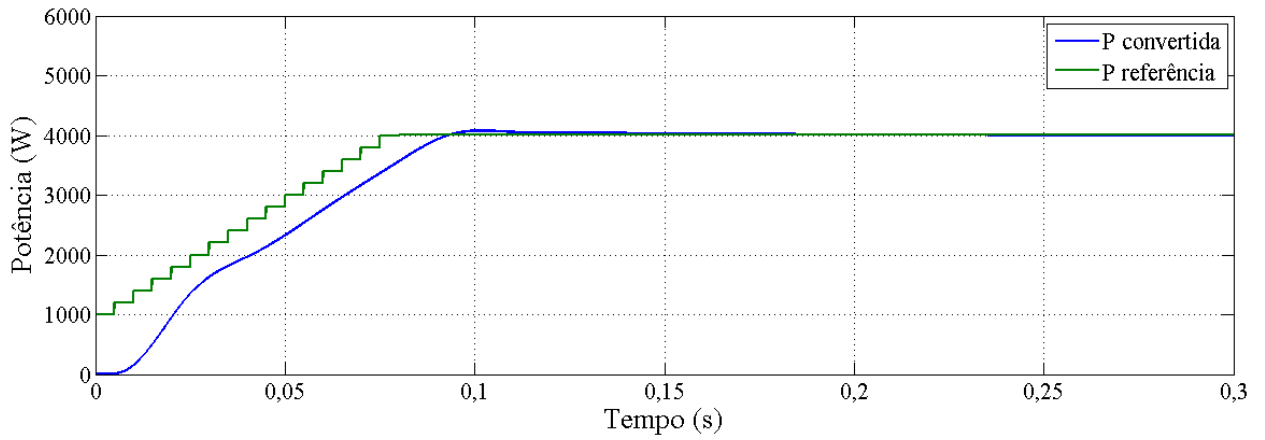
As tensões e correntes do gerador apresentam variabilidade no período transiente onde os valores de rotação são menores que 1700 rpm, porém estabilizam quando os valores de rotação se elevam. A tensão eficaz a partir da estabilidade é de 50,73 V e a corrente eficaz é de 31,05 A.

#### 4.1.2 SIMULAÇÃO COM PERFIL DE ONDA PO2 E PO3

As mesmas condições de simulações aplicadas ao perfil de onda PO1 foram utilizadas para validar o método MPPT para os perfis de onda PO2 e PO3. A alteração dessas simulações se dá no cálculo da velocidade angular para os diferentes regimes de onda, calculadas pelas equações  $f_{1\_PO2}(P)$  e  $f_{2\_PO2}(P)$ .

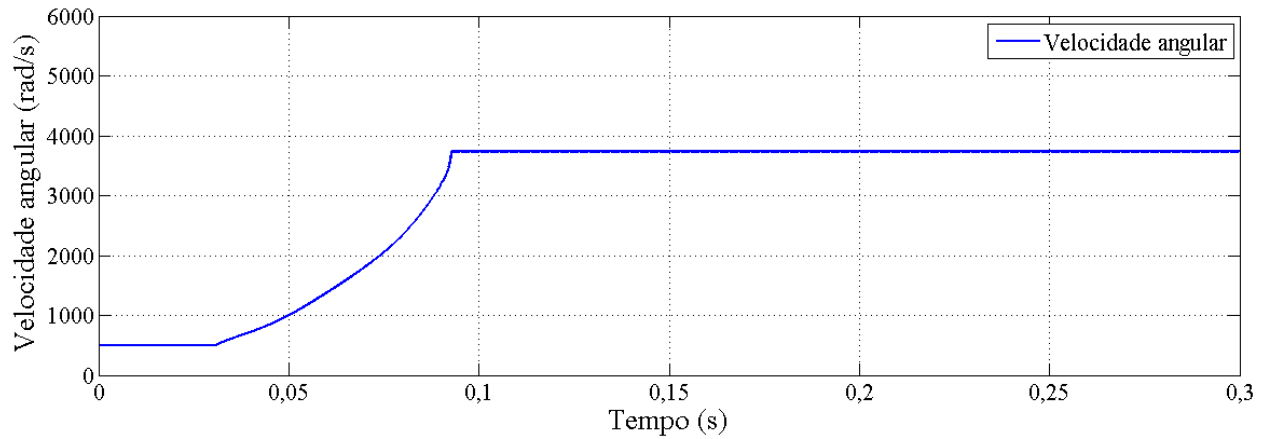
A Figura 43, Figura 44, Figura 45 e Figura 46 trazem, respectivamente, as curvas da potência de referência e convertida, velocidade de rotação, corrente de eixo direto e corrente de eixo em quadratura e tensão e corrente do gerador para o perfil de onda PO2. Já para o perfil de onda PO3, as mesmas análises são realizadas e apresentadas na Figura 47 (potência de referência e convertida), Figura 48 (velocidade de rotação), Figura 49 (corrente de eixo direto e em quadratura) e Figura 50 (tensão e corrente da fase 1 do gerador).

Figura 43: Simulação da potência de referência e convertida para perfil de onda PO2.



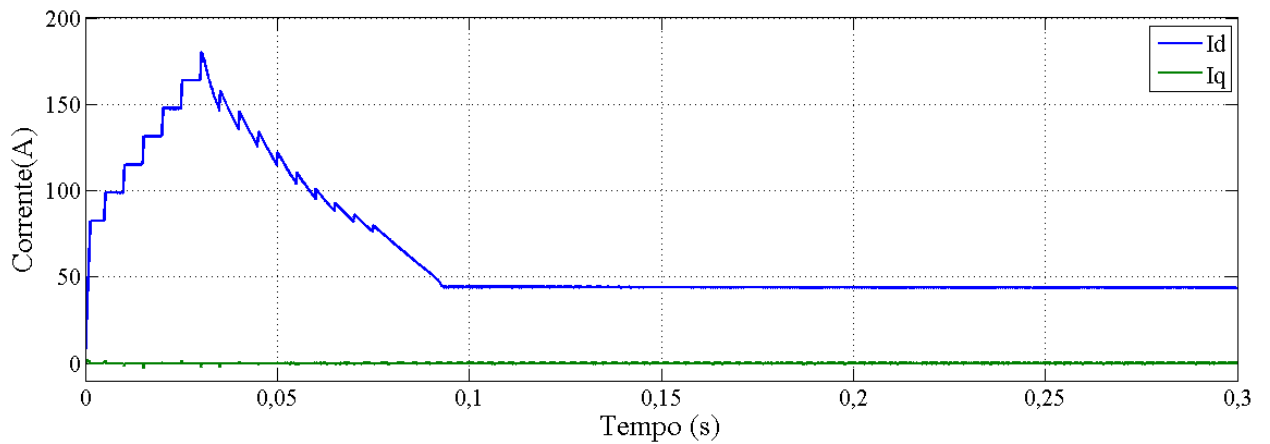
Fonte: Autor.

Figura 44: Simulação Velocidade de Rotação para perfil de onda PO2.



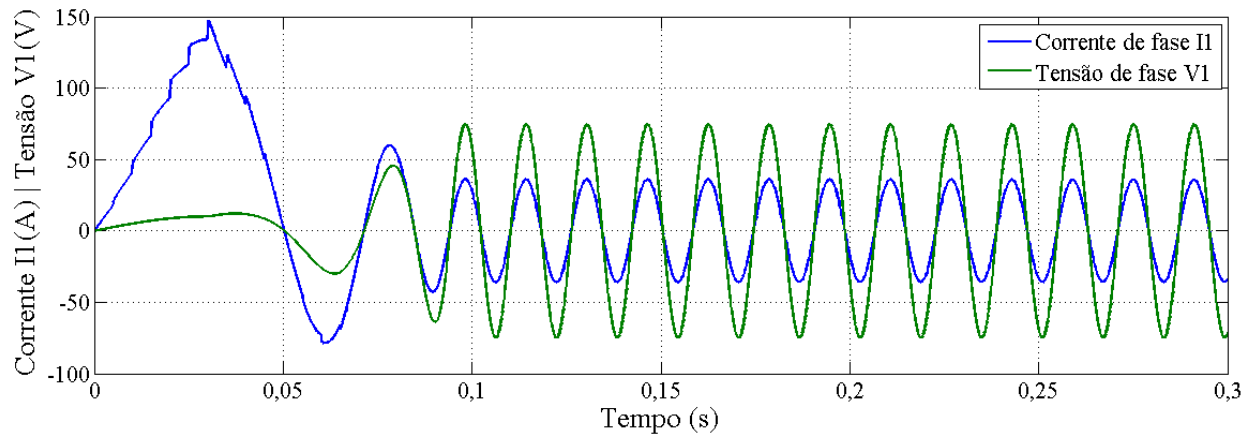
Fonte: Autor.

Figura 45: Simulação das correntes Id e Iq para perfil de onda PO2.



Fonte: Autor.

Figura 46: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase A para perfil de onda PO2.



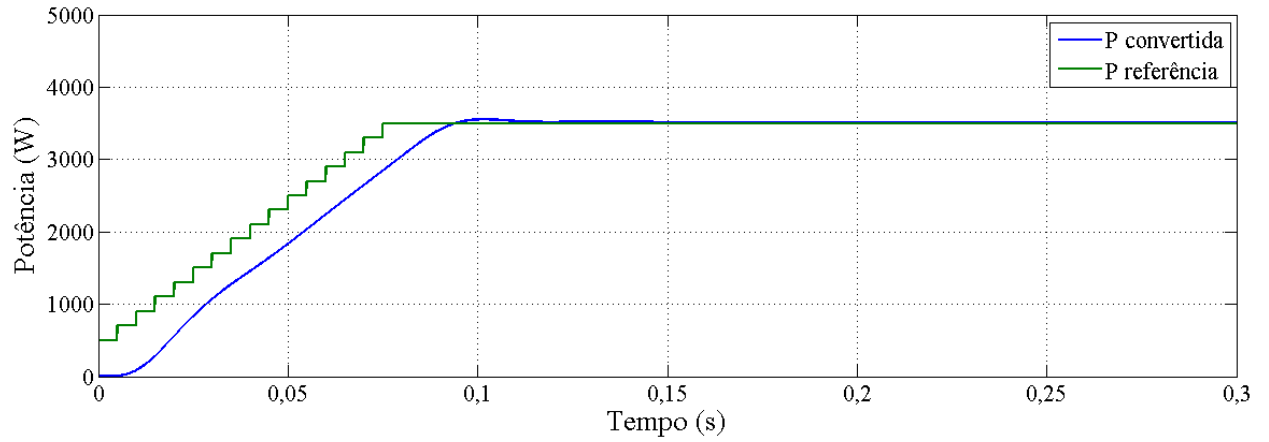
Fonte: Autor.

Considerando o perfil de onda PO2, observa-se na Figura 43 que o circuito estabiliza em aproximadamente  $t = 0,1$  s. Da mesma forma que para o perfil de onda PO1, o MPPT atua de forma autônoma até obter-se a máxima saída de potência convertida com valor de 4001 W no instante  $t = 0,2$  s. A velocidade de rotação apresentada na Figura 44 é máxima e estabilizada em 3730,34 rpm.

A corrente de eixo direto chega em um valor máximo de 180,4 A em  $t = 0,03$  s, com sobressinal de 4,09 vezes comparado ao valor em regime de 44,12 A. Já a corrente de eixo em quadratura permanece nula, mostrando boa atuação do controlador para manter-se um fator de potência nulo durante toda simulação.

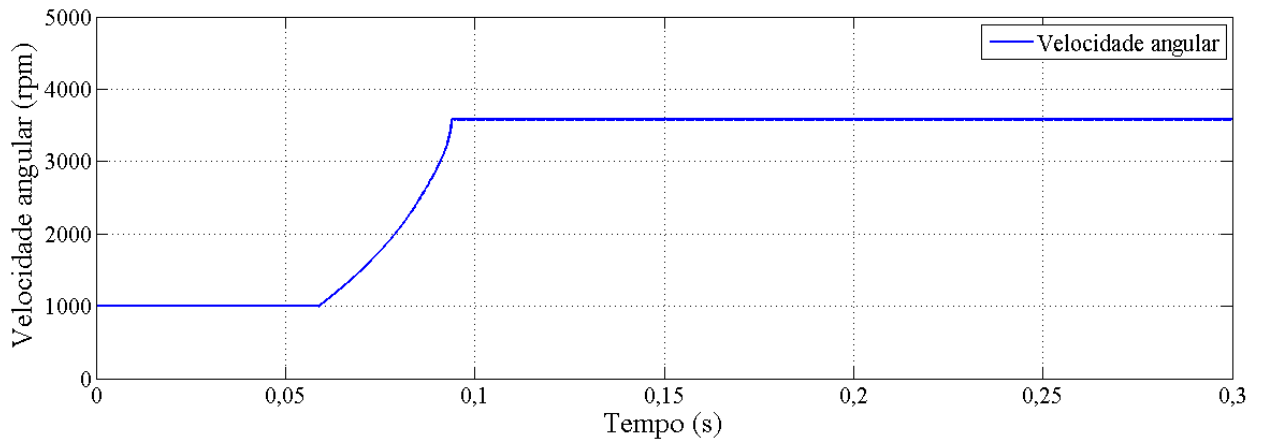
Ainda para o perfil PO2, a corrente de fase chega à um valor máximo de 147 A no mesmo instante de tempo que a corrente de eixo direto chega ao seu valor máximo, visto que a tensão de fase do gerador nesse instante é de 10 V. Quando o sistema opera em regime, a corrente de fase eficaz é de 25,33 A enquanto a tensão de fase eficaz é 52,72 V.

Figura 47: Simulação da potência de referência e convertida para perfil de onda PO3.



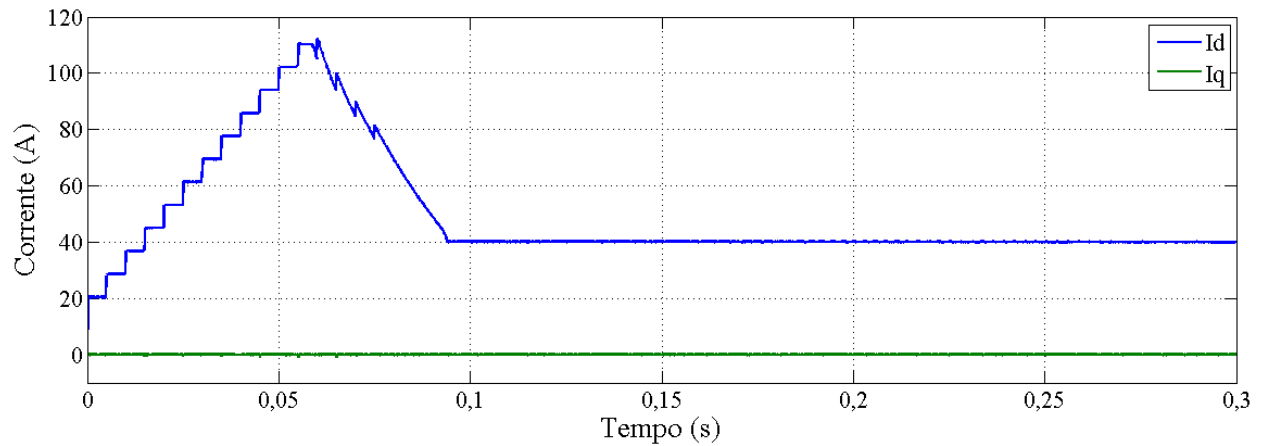
Fonte: Autor.

Figura 48: Simulação Velocidade de Rotação para perfil de onda PO3.



Fonte: Autor.

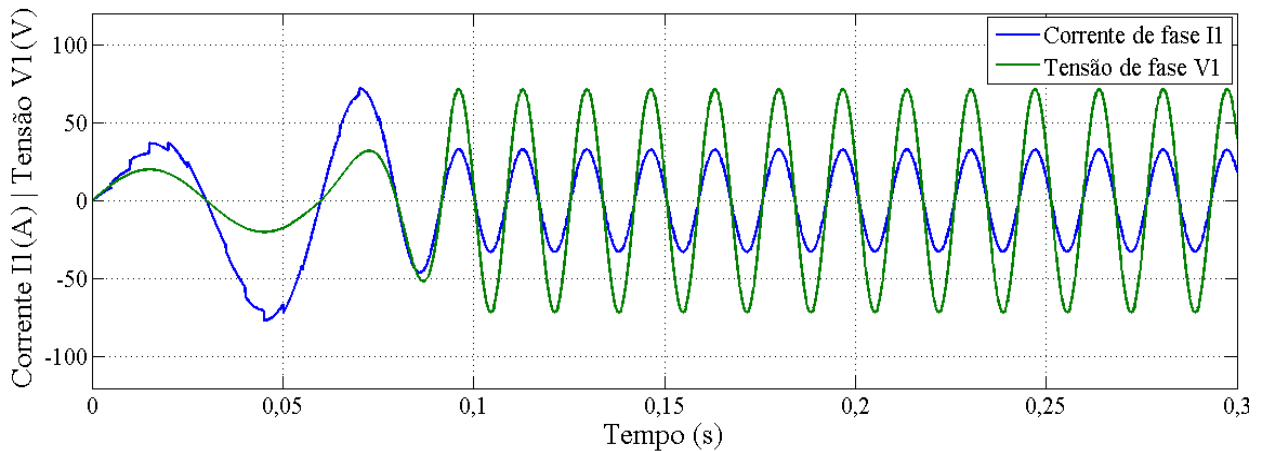
Figura 49: Simulação das correntes Id e Iq para perfil de onda PO3.



Fonte: Autor.



Figura 50: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase A para perfil de onda PO3.



Fonte: Autor.

Para o perfil de onda PO3, e conforme Figura 47, o MPPT obtém o valor de referência na estabilidade em aproximadamente  $t = 0,1$  s. A potência convertida de saída chega ao valor de 3505 W em  $t = 0,22$  s, e aproxima-se do valor da referência ( $P = 3500$  W) ao longo da simulação. A velocidade de rotação máxima, e na estabilidade, é de aproximadamente 3576 rpm, observado na Figura 48.

Para o perfil de onda PO3 a corrente de eixodireto, visualizada na Figura 49, tem seu valor de máxima em 112,4 A e, após período transiente do sistema (após  $t = 0,1$  s), seu valor médio foi de 40,0 A, com sobressinal de 2,81 vezes comparado ao valor em regime. O valor médio da corrente de eixo em quadratura foi de 0,05 A, muito próximo de zero, caracterizando também para esta condição de simulação um fator de potência unitário.

Para o período após o transiente, a tensão e a corrente eficaz de fase do gerador são 50,56 V e 23,07 A, respectivamente. O valor máximo da corrente de fase foi 71,6 A no instante de tempo  $t = 0,07$  s, conforme mostrado na Figura 50.

## 4.2 SIMULAÇÃO COM PERFIS DE ONDA VARIÁVEL

Nesta análise mais de um perfil de onda é simulado em um mesmo intervalo de tempo. Para este caso, o objetivo é analisar o método MPPT atuando em diferentes estados marítimos, simulando assim um cenário mais próximo de sua verdadeira aplicação, visto que os perfis de

ondas do mar alteram-se ao longo do tempo. Para isto, foi incrementado um bloco no sistema que modifica o cálculo do regime de onda em determinados instantes de tempo, conforme Tabela 7. Três mudanças de perfil de onda foram realizadas em um mesmo período de simulação, aplicando-se assim “degraus” gradativos que modificam o cálculo da velocidade angular de operação e a tensão induzida do gerador, isto é, as equações  $f_1(P)$  e  $f_2(P)$ . Os perfis de onda simulados são os mesmos utilizados na Seção 4.1, isto é, PO1, PO2 e PO3.

A velocidade inicial de referência é 1000 rpm para obter-se um conjugado inicial no sistema. O período total da simulação é 0,6 segundos, com amostragem de simulação de 1 microssegundo. A amostragem do sistema MPPT, assim como nas outras simulações, é 5 milissegundos.

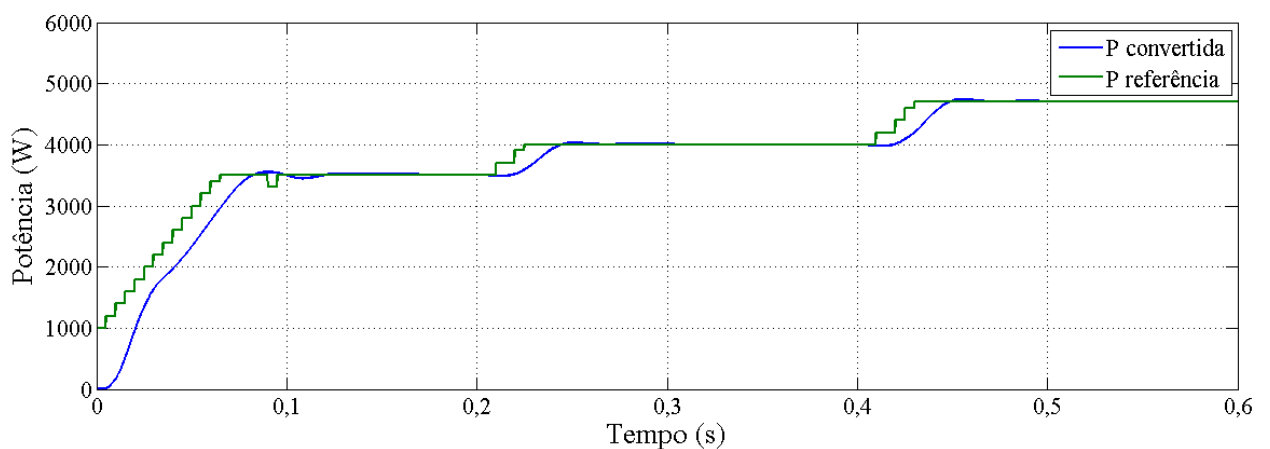
A Figura 51 traz a simulação da potência de referência juntamente com a potência convertida pelo sistema, a fim de validar o método MPPT. A Figura 52 mostra as correntes de eixo direto e em quadratura, e a Figura 53 as tensões e correntes de fase do gerador.

Tabela 7: Definição dos tempos para cada regime de onda.

<b>Instante de tempo (s)</b>	<b>Perfil de Onda</b>
$0 \leq t < 0,2$	PO3
$0,2 \leq t < 0,4$	PO2
$0,4 \leq t \leq 0,6$	PO1

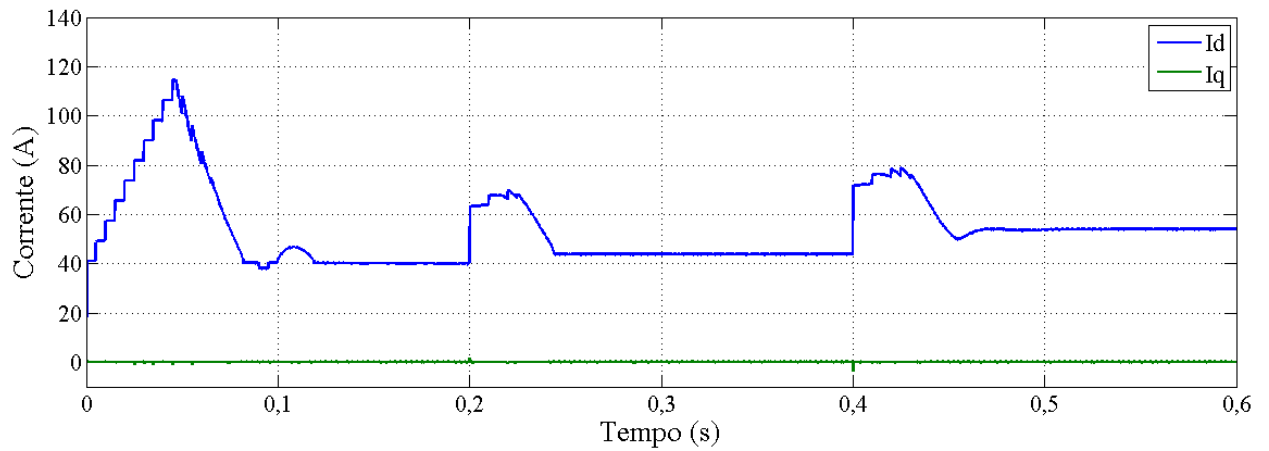
Fonte: Autor.

Figura 51: Simulação da potência de referência e convertida para perfis de onda PO3, PO2 e PO1.



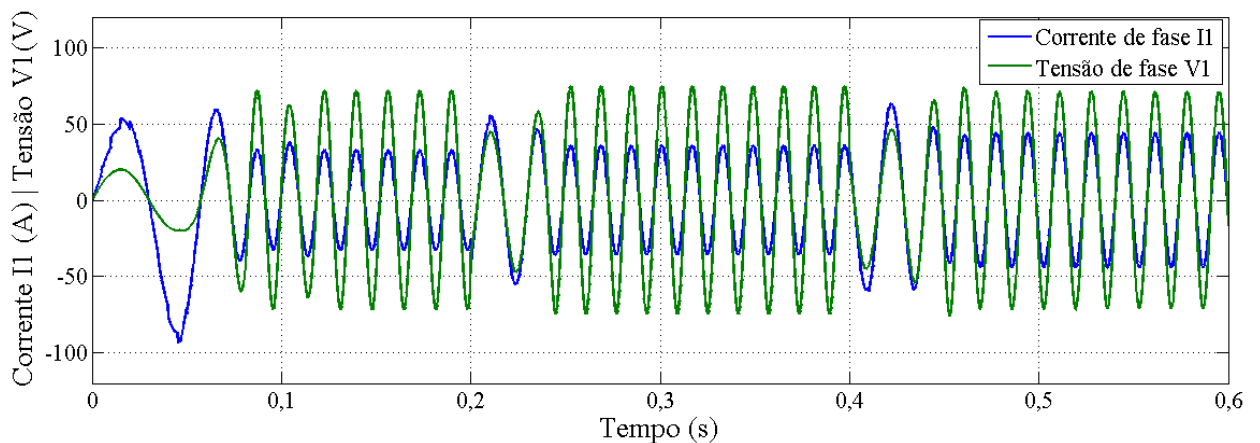
Fonte: Autor.

Figura 52: Simulação das correntes  $I_d$  e  $I_q$  para perfis de onda PO3, PO2 e PO1.



Fonte: Autor.

Figura 53: Simulação da Tensão e Corrente do gerador da Fase A para perfis de onda PO3, PO2 e PO1.



Fonte: Autor.

Conforme observado na

Figura 51, a aplicação do método MPPT alterou, de forma autônoma, a potência de referência aplicada ao controle do circuito, buscando a máxima potência para os três perfis de onda. Por sua vez, o circuito também apresentou boa resposta à alteração da referência para estes três casos. A Tabela 8 mostra a potência de referência máxima aplicada pelo MPPT e a potência convertida pelo circuito após a estabilização. O sobressinal de potência também é incluído na tabela.

Tabela 8: Respostas de Potência para simulação com perfil de onda variável.

<b>Instante de tempo (s)</b>	<b>Perfil de Onda</b>	$P_{ref\_max}$ [W]	$P(t)$ [W]	$P_{max}(t)$ [W]
$0 \leq t < 0,2$	PO3	3500	3507,3	3552,6
$0,2 \leq t < 0,4$	PO2	4000	4001,6	4033,1
$0,4 \leq t \leq 0,6$	PO1	4706	4706,9	4744,3

Fonte: Autor.

A corrente de eixo direto teve inicialmente, para o caso em que o perfil de onda é PO3, uma sobrecorrente de 114,55 A, isto é, 2,86 vezes maior que o valor da corrente quando estabilizado o sistema, ficando com valor médio de 40,07 A. Já para os casos PO2 e PO1 o comportamento foi análogo, onde os valores das correntes médias quando estabilizado o sistema foram de 43,80 A e 53,90 A, respectivamente. A corrente de eixo direto máxima para PO2 é 70,0 A e para PO3 é 79,12 A.

A corrente de eixo em quadratura teve o valor médio em todo período da simulação em -0,002 A, isto é, valor que pode ser considerado nulo quando comparado à ordem de grandeza da corrente de eixo direto. Portanto, o fator de potência foi mantido unitário mesmo com variações de potência de saída e das tensões e correntes de entrada, observadas na Figura 53. As tensões e correntes eficazes de fase de entrada do gerador  $V_1$  e  $I_1$ , após a estabilização do sistema, são apresentadas na Tabela 9 para cada perfil de onda.

Tabela 9: Respostas de Potência para simulação com perfil de onda variável.

<b>Instante de tempo (s)</b>	<b>Perfil de Onda</b>	$V_1$ [V]	$I_1$ [A]
$0,15 \leq t < 0,2$	PO3	50,6	23,1
$0,25 \leq t < 0,4$	PO2	53,2	25,5
$0,45 \leq t \leq 0,6$	PO1	50,8	30,9

Fonte: Autor.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 4, de modo geral, apresentou os mecanismos desenvolvidos para realização das simulações que pudessem representar, de forma mais coerente possível, as condições de operação de um gerador desenvolvido especialmente para aplicação em geração de energia através de ondas marítimas ou oceânicas. Para tal, fez-se necessário os ajustes das curvas que

relacionam Potência e Velocidade de rotação de um sistema OWC baseado em dados de referências.

No entanto, mais importante do que verificar a resposta do circuito através das simulações, pode-se observar a aplicação do método MPPT desenvolvido para este trabalho, obtendo-se êxito no fundamento principal de sua aplicação. Ou seja, com o método MPPT desenvolvido para o projeto foi possível obter, de forma autônoma e eficiente, a máxima conversão de potência, buscando e encontrando o ponto de máxima na operação do sistema, conforme observou-se nas figuras que trazem a potência de referência e convertida. Também se observa na Seção 4.2 que, quando recebido alguma perturbação, isto é, quando variada a condição do perfil de onda, o MPPT continua atuando e levando o sistema de geração a operar no ponto de máxima conversão de energia.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal a aplicação do método MPPT em um sistema de conversão de energia das ondas oceânicas em energia elétrica, especificamente para um sistema OWC, para obtenção de uma máxima eficiência em diversos cenários de operação, visto a variabilidade e intermitência das condições de amplitude e frequência das ondas no oceano. Para tal, foi realizado um estudo e classificação destes sistemas de conversão já existentes, além de uma análise de alguns métodos MPPT mais relevantes e usualmente utilizados. Cabe salientar que não foi encontrado na literatura a aplicação do método MPPT em sistemas de geração de energia elétrica através da conversão de energia das ondas oceânicas isolado, o que justifica a pertinência do presente estudo.

Através de simulações computacionais utilizando o *software* PSIM<sup>®</sup>, aplicou-se o método MPPT Perturba e Observa adaptado e desenvolvido neste trabalho para o sistema projetado por Dos Santos (2020), composto por um gerador síncrono de ímãs permanentes trifásico, um conversor CA-CC PWM e o seu sistema de controle. Nele, pôde-se observar que a sua resposta na obtenção da máxima potência convertida teve seu objetivo cumprido. Isto é, o método conseguiu, de forma autônoma, rastrear o ponto de máxima potência do circuito simulado, mesmo em diversos cenários de amplitude e frequência de onda. Com as respostas das simulações, verificou-se que o circuito tem ótima resposta de operação tanto em condições de rotação mais elevadas são mais estáveis quanto em baixas rotações. O sistema mostrou rápida resposta frente às variações impostas nas simulações quando em um mesmo intervalo de tempo três perfis de onda são analisados, retomando o MPP. Outro objetivo era obter-se fator de potência no gerador próximo ao unitário, mantendo a corrente de eixo em quadratura  $I_d$  nula. Neste sentido o trabalho também teve seus resultados satisfatórios para todos os cenários de simulação impostos. Apenas nos transientes iniciais, quando a rotação e potência convertida estiveram com valores baixos, o circuito apresentou uma pequena variabilidade em suas saídas. Isto é consequência da variação constante da referência nos instantes iniciais e de baixos valores de rotação, que conseqüentemente provocam de baixos valores de frequência e amplitude da tensão induzida no gerador, onde o método MPPT saiu de valores de referência baixos até buscar as melhores referências no MPP.

Em implantações futuras, sugere-se a aplicação do método MPPT P&O com Perturbação Adaptativa, ponderando o *offset* de referência, para gerar menos variabilidade no sistema. Também recomenda-se utilizar outros métodos MPPT aqui estudados para esta mesma aplicação.

## REFERÊNCIAS

ALBERDI, M., et al. Fault ride through capability of oscillating water column based wave power generation plants equipped with doubly fed induction generator and airflow control. **IEEE Trans Ind Electron** 2011; v. 58, p. 1501–17, 2011.

AQUE, M. E., MUTTAQI, K. M., NEGNEVITSKY, M. Control of a stand alone variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generators. In: **Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, Pittsburgh. ed. XX, p. 1-9, 2008.

ARENA F., ROMOLO A., MALARA G., ASCANELLI A. On design and building of a U-OWC wave energy converter in the Mediterranean Sea. In: **Proceedings of the 32<sup>nd</sup> international conference on ocean, offshore and arctic engineering**, Nantes , 2013.

BABA, A. O., LIU, G., CHEN, X. Classification and evaluation review of maximum point tracking methods. **Sustainable Futures**, v. 2, article 100020, 2020.

BENADJA, M., CHANDRA, A. A new MPPT algorithm for PMSG based grid connected wind energy system with power quality improvement features. In: **IEEE Power India Conference**, Delhi, v. 5, p. 1-6, 2012.

BOCCOTTI, P. Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. **Ocean Engineering**, England, v. 34, p. 799-805, 2007.

BORGONOVO, D. **Modelagem e controle de retificadores PWM trifásicos empregando a transformação de Park**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CAMPOS, G. A. P. **Estudo de mecanismo aplicado na geração de energia a partir de correntes oceânicas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

DOS SANTOS, I. M. **Sistema de Conversão de Energia Dedicado para Geração de Energia Elétrica a partir de Ondas Marítimas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2020.



DOS SANTOS, I. M., TAVARES, R. B., ECKERT, P. R. Design and Analysis of PMSG and PWM Boost Converter for Isolated Ocean Wave Energy Conversion System. In: **14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Industry Applications**, Porto Alegre, 2021.

DUARTE, A. P. A. **Modelling and analysis of a backward bent duct buoy WEC oceanographic applications**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2018.

ELGENDY, M.A., et al. Assessment of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm. **IEEE Transactions on sustainable energy**, v.4, p.108–117, 2012.

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

FALCÃO, A. F. O., HENRIQUES, J. C. C., CÂNDIDO, J. J. Dynamics and optimization of the OWC spar buoys wave energy converter. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 48, p. 369-381, 2012.

GOUIN J. **Wave energy conversion systems designed for sensor buoys**. 2008. Disponível em: <[https://www.electrostandards.com/\\_resources/common/userfiles/file/WaveEnergyConversionSystems\\_5294-01ee.pdf](https://www.electrostandards.com/_resources/common/userfiles/file/WaveEnergyConversionSystems_5294-01ee.pdf)>

HENRIQUES, J. C. C. et al. Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys. **Energy**, Amsterdam, v. 112, p. 852-867, 2016.

HONG, Y. et al. Review on electrical control strategies for wave energy converting systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 31, p. 329-342, 2014.

HU, Y., et al. Application of evolutionary computation for rule discovery in stock algorithmic trading: a literature review. **Applied Soft Computing**, v.36, p. 534-551, nov. 2015.

Ishibuchi, H., Tsukamoto, N., Nojima, Y. Evolutionary many-objective optimization: a short review. In: **2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation**, p.2419-2426, 2008.

JUSTINO P. A. P., FALCÃO A. F. Control simulation of an OWC wave power plant. In: **Second European wave power conference**. v. 2, p. 268–272, 1995a.

JUSTINO P. A. P., FALCÃO A. F. OWC Wave Energy converters with valve- constrained air flow. In: **Second European wave power conference**. v. 2, p. 187–194, 1995b.

KARAMI, et al. General review and classification of different MPPT Techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.68 – pt.1, p.1-18, 2017.

KOIZUMI, H., et al. A novel microcontroller for grid-connected photovoltaic systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v.53, p.1889-1897, 2006.

LIU, F., et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v.55, p.2622–2628, 2008.

MALINOWSKI, M., KAZMIERKOWSKI, M. P., TRZYNADLOWSKI, A. M. A comparative study of control techniques for PWM rectifiers in AC adjustable speed drives. **IEEE Trans. Power Electron.** 2003, 18, 1390–1396.

MAO, M., et al. Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. **Energy Reports**, v.6, p.1312-1327, 2020.

MAREI, M. I., MOKHTAR, M., EL-SATTAR, A. A. MPPT strategy based on speed control for AWS-based wave energy conversion system. **Renewable Energy**, v. 83, p. 305-317, 2015.

MARQUES, P. R. F. N. **A Study of wave energy converters for oceanographics applications**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

MCCULLOCH, W.S., PITTS, W. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity, *Bulletin of the Mathematical Biophysics* 5, p. 115–133, 1943.

MOTAHHIR, S., et al. The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, feb. 2020.

PENALBA, M., RINGWOOD, J. V. A review of wave-to-wire models for wave energy converters. **Energies**, Basel, v. 6, ed. 7, article 506, jul. 2016.

PENG, Y.F., et al. Implementation of LLCC-resonant driving circuit and adaptive CMAC neural network control for linear piezoelectric ceramic motor. **IEEE Trans. Ind. Electron**, v.51, p.35-48, 2004.

PUNITHA, K., DEVARAJ, D., SAKTHIVEL, S. Artificial neural network based modified incremental conductance algorithm for maximum power point tracking in photovoltaic system under partial shading conditions. **Energy**, v. 62, p. 330-340, 2013.

RAO S. S., MURTHY B. K. Control of Induction generator in a Wells turbine based wave energy system. In: **International conference on power electronics and drives systems (PEDS)**. v.2, p.1590-1594, 2005.

SABZEHGAR, R., MOALLEM, M. A review of ocean wave energy conversion systems. In: **2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference**, p. 1-6, Canada, 2009.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. 206 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Minas Gerais, 2009.

SINGH, B., et al. A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 51, n° 3, 2004.

SIQUEIRA, E. S. **Controle por inclinação para paralelismo de inversores em microrredes**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SUBIYANTO, S., MOHAMED, A., HANNAN, M. A. Intelligent maximum power point tracking for PV system using Hopfield neural network optimized fuzzy logic controller. **Energy and Buildings**. v. 51, p. 29-38, 2012.

TAKASHI, T., Wave force utilizing power plant equipped with resonance sleeve, Japanese Patent JPS55151176 (A) (1980).

TORRE-ENCISO, Y., ORTUBIA, I., DE AGUILETA L. I. L., MARQUÊS, J. Mutriku. wave power plant: from the thinking out to the reality. In: **Proc 8th european wave tidal energy conf**, Sweden, p. 319 – 329, 2009

WANG, L., ISBERG, J., TEDESCHI, E. Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Northern Ireland, v. 81, p. 366-379, 2018.