



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

MIGUEL ENÉAS DA SILVA NETO

PROPOSTA E ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MPPT E LVRT
APLICADOS EM SISTEMAS EÓLICOS

SOBRAL

2021

MIGUEL ENÉAS DA SILVA NETO

PROPOSTA E ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MPPT E LVRT APLICADOS
EM SISTEMAS EÓLICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e da Computação. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica e subárea: Eletrônica de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Márcio André Baima Amora.

Coorientador: Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto.

SOBRAL

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S581p Silva Neto, Miguel Enéas da.
PROPOSTA E ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MPPT E LVRT APLICADOS EM SISTEMAS EÓLICOS /
Miguel Enéas da Silva Neto. – 2021.
109 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Márcio André Baima Amora.
Coorientação: Prof. Dr. Vandilberto Pinto Pereira.

1. Sistema eólico. 2. PMSG. 3. Extração de potência. 4. Afundamentos de tensão. I. Título.

CDD 621.3

MIGUEL ENÉAS DA SILVA NETO

PROPOSTA E ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MPPT E LVRT APLICADOS
EM SISTEMAS EÓLICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e da Computação. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica e subárea: Eletrônica de Potência.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio André Baima Amora (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC),
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto (Coorientador)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC),
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcus Rogério de Castro
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC),
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida (Externo a Instituição)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE),
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

A Deus.

A minha família.

E a todos que contribuíram com essa difícil
jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais Raimundo Nonato (In memoriam) e Maria de Lourdes por não terem poupado esforços e garantido os meus estudos, mesmo diante de todas as dificuldades. Pai, sei que o senhor está olhando por mim e pela sua família. Amo vocês...

Agradecer minha esposa Joyciane Coelho ao qual me faz ser um homem cada dia melhor e feliz, me dando todo apoio e suporte para a execução desse mestrado. A minha filha, Sofia Vasconcelos Silva, por todo dia me ajudar a ter forças de continuar meus objetivos. Amo vocês!

Agradecer ao meu irmão Mikael Castro pelo apoio incondicional.

A toda a minha família pelo apoio e dedicação para com minha pesquisa, em especial a minha Tia Fatima Maria e as minhas primas Lívia e Lara de Castro.

Aos vários amigos que tive a oportunidade de fazer ao longo do mestrado, em especial ao Acélio Luna, Lucivando Ribeiro, Vicente Feijão e Alisson por todos os momentos bons e ruins vividos durante esta empreitada.

Aos meus amigos do colegiado da Engenharia de Produção e Engenharia Civil do Centro Universitário Inta –Uninta, meu muito obrigado.

Aos docentes e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

Ao Prof. Dr. Márcio Amora pela excelente orientação e grandes ensinamentos desde a época de graduação. Obrigado de coração!

Ao Prof. Dr. Vandilberto Pereira pela grande ajuda e orientações nos momentos mais difíceis do mestrado, meu muito obrigado.

Ao Centro Universitário Inta – Uninta no qual me deu todo apoio para o desenvolvimento do mestrado.

Aos membros da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“O que te preocupa, te escraviza.” De John
Locke.

RESUMO

Este trabalho propõe um novo método de MPPT denominado de P&O Híbrido (P&O-H). Para isso, é feito um estudo de algoritmos de rastreamento do máximo ponto de potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) e de mitigação dos afundamentos de tensão conhecido na literatura como capacidade de suportar afundamentos de tensão (*Low Voltage Ride Through* - LVRT) aplicados em sistemas eólicos conectados na rede elétrica por meio do conversor *back-to-back* associado ao gerador síncrono de ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator* - PMSG). Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os mais diversos métodos de MPPT citados na literatura, sendo possível identificar uma área ainda pouco estudada dos métodos do tipo perturba e observe (*Perturb & Observe* - P&O), possibilitando o desenvolvimento de técnicas de extração de potência mais eficientes e robustas. O P&O-H apresenta vantagens frente aos demais algoritmos devido não requerer o conhecimento dos parâmetros do sistema, bem como não necessitar da medição do vento, tornando o mesmo perfeitamente adaptável as mudanças do ambiente. Também, um estudo das técnicas de mitigação do LVRT foi aplicado, sendo proposto neste trabalho um controle de baixo custo e de fácil implementação, o LVRT-H. As simulações realizadas comprovam a eficiência tanto do P&O-H, apresentando contribuições na extração de potência, como o do LVRT-H, apresentando contribuições na redução da ação média dos controladores do conversor do lado da rede (CLR) e contribuindo para a estabilidade do sistema perante perturbações da rede. Por fim, são indicados trabalhos futuros.

Palavras-chave: Sistema eólico; PMSG; Extração de potência; Afundamento de tensão.

ABSTRACT

This work proposes a new MPPT method called Hybrid P&O (P&O-H). For this, a study of the maximum power point tracking algorithms (Maximum Power Point Tracking - MPPT) and voltage sag mitigation known in the literature as Low Voltage Ride Through (Low Voltage Ride Through - LVRT) applied in systems wind turbines connected to the electricity grid through the back-to-back converter associated with the permanent magnet synchronous generator (Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG). A literature review was carried out on the most diverse methods of MPPT mentioned in the literature, it is possible to identify an area still little studied in the methods of the perturb and observe type (Perturb & Observe - P&O), enabling the development of more efficient and robust power extraction techniques. The P&O-H has advantages over other algorithms because it does not require knowledge of the system parameters, as well as it does not need to measure the wind, making it perfectly adaptable to changes in the environment. Also, a study of the LVRT mitigation techniques was applied, being proposed in this work a control of low cost and easy to implement, the LVRT-H. The simulations carried out prove the efficiency of both the P&O-H, presenting contributions in the power extraction, as well as the LVRT-H, presenting contributions in the reduction of the average action of the controllers of the network-side converter (CLR) and contributing to the stability of the system against disturbances from the grid. Finally, future works are indicated.

Keywords: Wind system; PMSG; Power extraction; Voltage low.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz de produção de energia elétrica do Brasil.	199
Figura 2 - Topologia do WECS.....	24
Figura 3 - Curva de potência da turbina eólica.....	25
Figura 4 - Curva do coeficiente de potência.....	26
Figura 5 - Transformação de coordenadas dq	28
Figura 6 - Diagrama do sistema de controle do CLM.	29
Figura 7 - Diagrama do sistema de controle do CLR.....	30
Figura 8 - Estrutura CLR e rede elétrica.....	31
Figura 9 - Classificação dos métodos de MPPT.....	34
Figura 10 - Diagrama de blocos OTC.	40
Figura 11 - Diagrama de blocos TSR.....	41
Figura 12 - Fluxograma do P&O-PV	43
Figura 13 - Divisão da curva $P-\omega$	44
Figura 14 - Fluxograma do P&O-VS	45
Figura 15 - Fluxograma do P&O-RA.....	46
Figura 16 - Fluxograma do CA.	47
Figura 17 - Fluxograma do P&O-H.....	49
Figura 18 - Curva de suportabilidade de afundamentos de tensão	54
Figura 19 - Back-to-back associado ao braking chopper (BC)	57
Figura 20 - Velocidade do vento	60
Figura 21 - Velocidade do gerador na extração da máxima potência	61
Figura 22 - Potência elétrica dos métodos de MPPT.....	62
Figura 23 - Afundamento simétrico na tensão da rede elétrica.	65
Figura 24 - Velocidade do gerador com LVRT-H associado ao afundamento simétrico	65
Figura 25 - Potência ativa gerada com LVRT-H associado ao afundamento simétrico.....	66
Figura 26 - Tensão do link CC com LVRT-H associado ao afundamento simétrico.....	67
Figura 27 - Potência ativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento simétrico.....	68
Figura 28 - Potência reativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento simétrico	69
Figura 29 - Ação dos controladores do CLR e CLM utilizando LVRT-H associado ao afundamento simétrico	70
Figura 30 - Afundamento assimétrico na tensão da rede elétrica.....	71

Figura 31 - Velocidade do gerador com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico	72
Figura 32 - Potência ativa gerada com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico	73
Figura 33 - Tensão do link CC com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico	73
Figura 34 - Potência ativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico	74
Figura 35 - Potência reativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico ...	74
Figura 36 - Ação dos controladores doCLM e CLRutilizando LVRT-H associado ao afundamento assimétrico	76
Figura 37 - Velocidade do gerador com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico.....	77
Figura 38 - Potência ativa gerada com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico	77
Figura 39 - Tensão do link CC com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico	78
Figura 40 - Potência ativa da rede com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico	79
Figura 41 - Potência reativa da rede com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico	79
Figura 42 - Ação dos controladores do CLR e CLM utilizando LVRT-BC associado ao afundamento simétrico	81
Figura 43 - Tensão do link CC com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico	82
Figura 44 - Potência ativa rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico.....	83
Figura 45 - Potência reativa rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico	84
Figura 46 - Ação do controlador PI tensão com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico	84
Figura 47 - Ação do controlador eixo d da rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico.....	85
Figura 48 - Ação do controlador eixo qda rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eficiência média dos métodos de MPPT.....	63
Tabela 2 - Eficiência média dos métodos de MPPT.....	64
Tabela 3 - Ação média dos controladores PI submetidos a afundamentos associado ao LVRT-H.	87
Tabela 4 - Ação média dos controladores PI submetidos a afundamentos associado ao LVRT-BC.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Controle Adaptativo
CLM	Conversor do Lado da Máquina
CLR	Conversor do Lado da Rede
DFIG	Gerador de Indução Duplamente Alimentado (<i>Doubly Fed Induction Generator</i>)
DPC	Controle da Potência direta (<i>Direct Power Controller</i>)
EKF	Filtro de Kalman Estendido (<i>Extended Kalman Filter</i>)
FFC	Controle com Retroalimentação Feedforward (<i>Feedback-Feedforward Controller</i>)
FT	Função de Transferência
HSC	Controle de Busca em Subida (<i>Hill Climb Search</i>)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPC	Controle de Potência Indireta (<i>Indirect Power Controller</i>)
IR-PO	Algoritmo Robusto e Inteligente (<i>Intelligent and Robust Perturb and Observe</i>)
LQG	Gaussiana Quadrática Linear (<i>Linear Quadratic Gaussian</i>)
LVRT	Capacidade de Suportar Afundamentos de Tensão (<i>Low Voltage Ride Through</i>)
LVRT-BC	LVRT <i>Braking Chopper</i>
LVRT-H	LVRT Híbrido
MEPT	Rastreadores de Potência Elétrica Máxima (<i>Maximum Electrical Power Tracker</i>)
MMPT	Rastreadores de Potência Mecânica Máxima (<i>Maximum Mechanical Power Tracker</i>)
MPP	Máximo Ponto de Potência (<i>Maximum Power Point</i>)
MPPT	Algoritmo de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
ONS	Operador Nacional do Sistema
OTC	Controle de Torque Ótimo (<i>Optimal Torque Control</i>)
PAC	Controle do Angulo de Pitch (<i>Pitch Angle Control</i>)

PI	Proporcional e Integral
PLL	Rastreamento da Fase em Circuito Fechado (<i>Phase Locked Loop</i>)
PMSG	Gerador Síncrono de Imã Permanente (<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>)
P&O	Perturba e Observe (<i>Perturb & Observe</i>)
P&O-H	Perturba e Observe Híbrido
P&O-PV	Perturba e Observe de Passo Variável
P&O-RA	Perturba e Observe Adaptativo Robusto
P&O-VS	Perturba e Observe Multisetor de Passo Variável
PSF	Controle de Retroalimentação de Potência (<i>Power Signal Feedback</i>)
RA-PO	Algoritmo de Perturbação Robusta e Eficiente (<i>Robust Adaptive Perturb and Observe</i>)
SCIG	Gerador Gaiola de Esquilo (<i>Squirrel Cage Induction Generators</i>)
SPWM	Modulação por Largura de Pulso Senoidal (<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>)
TSR	Relação de Velocidade de Ponta (<i>Tip Speed Ratio</i>)
VS-PO	Passo Variável com Operação Multisetorial (<i>Variable Step Perturb and Observe</i>)
WECS	Sistema de Conversão de Energia Eólica (<i>Wind Energy Conversion System</i>)
WSR	Medição da Velocidade do Vento (<i>Wind Speed Measurement</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área varrida pelas pás
β	Ângulo de inclinação da pá
C	Constante de convergência do método P&O-PV
$C_p(\lambda, \beta)$	Coefficiente de potência da turbina
i_a	Corrente da fase A da rede elétrica
i_b	Corrente da fase B da rede elétrica
i_c	Corrente da fase C da rede elétrica
i_d	Corrente de eixo direto
i_d^*	Corrente de eixo direto de referência
i_q	Corrente de eixo em quadratura
i_q^*	Corrente de eixo em quadratura de referência
I_{rede}	Corrente nominal injetada na rede elétrica
K	Inclinação da reta de injeção de corrente reativa na rede
L_{ds}	Indutância de eixo direto da máquina
L_{qs}	Indutância de eixo em quadratura da máquina
L_f	Indutância do filtro da rede elétrica
M	Constante de convergência do método P&O-RA
N	Número de polos do gerador
P_m	Potência mecânica
P_e	Potência elétrica
R	Comprimento da pá
R_f	Resistência do filtro da rede elétrica
R_s	Resistência do estator
S	Constante de convergência do método P&O-H
T_e	Conjugado eletromecânico
T_e^*	Conjugado eletromecânico de referência
V	Velocidade do vento
V_a	Tensão da fase A da rede elétrica
V_b	Tensão da fase B da rede elétrica
V_c	Tensão da fase C da rede elétrica

V_{a1}	Tensão da fase A sintetizada pelo conversor
V_{b1}	Tensão da fase B sintetizada pelo conversor
V_{c1}	Tensão da fase C sintetizada pelo conversor
V_{ds}	Tensão de eixo direto do gerador
V_{qs}	Tensão de eixo em quadratura do gerador
V_{falta}	Tensão da rede durante o afundamento
V_{rede}	Módulo da tensão nominal da rede elétrica
ω_e	Velocidade elétrica
ω_m	Velocidade mecânica
ω_m^*	Velocidade mecânica de referência
$\Delta\omega_m$	Varição da velocidade mecânica
$\Delta\omega_{m_ref}$	Tamanho do passo imposto na velocidade do gerador
ΔP_m	Varição da potência mecânica
ΔP_e	Varição da potência elétrica
λ	Velocidade tangencial da ponta das pás pela velocidade do vento
λ_m	Fluxo magnético
ρ	Densidade do ar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Motivação e justificativa do trabalho	19
1.2 Objetivos.....	22
<i>1.2.1 Objetivo geral</i>	<i>22</i>
<i>1.2.2 Objetivos específicos</i>	<i>22</i>
1.3 Produções científicas	22
1.4 Organização do trabalho	23
2 COMPONENTES DE UM WECS.....	24
2.1 Turbina eólica.....	24
2.2 Gerador PMSG.....	27
2.3 Conversor do lado da máquina (CLM)	29
2.4 Conversor do lado da rede (CLR).....	30
2.5 Considerações parciais	33
3 MÉTODOS DE MPPT	34
3.1 Algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).....	34
3.2 Métodos de MPPT utilizados como comparação no trabalho.....	39
<i>3.2.1 Controle de torque ótimo (OTC)</i>	<i>39</i>
<i>3.2.2 Relação de velocidade de ponta (TSR).....</i>	<i>41</i>
<i>3.2.3 Perturbe e observe de passo variável (P&O-PV)</i>	<i>41</i>
<i>3.2.4 Perturbe e observe multisetor de passo variável (P&O-VS)</i>	<i>43</i>
<i>3.2.5 Perturbe e observe adaptativo robusto (P&O-RA)</i>	<i>45</i>
<i>3.2.6 Controle adaptativo (CA).....</i>	<i>46</i>
3.3 Perturbe e observe híbrido (P&O-H)	48
3.4 Considerações parciais	50
4 MÉTODOS DE LVRT.....	51
4.1 Capacidade de suportar afundamentos de tensão (LVRT).....	51

4.2 LVRT híbrido (LVRT-H).....	54
4.3 LVRT <i>braking chopper</i> (LVRT-BC).....	56
4.4 Contribuição do MPPT no auxílio do LVRT	57
4.5 Considerações parciais	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 Comparativo da eficiência dos métodos de MPPT estudados	60
5.2 Análise do afundamento de tensão simétrico e assimétrico	64
5.2.1 LVRT híbrido (LVRT-H) associado ao afundamento simétrico	64
5.2.2 LVRT híbrido (LVRT-H) associado ao afundamento assimétrico.....	71
5.2.3 LVRT <i>braking chopper</i> (LVRT-BC) associado ao afundamento simétrico.....	75
5.2.4 LVRT <i>braking chopper</i> (LVRT-BC) associado ao afundamento assimétrico	81
5.3 Considerações parciais	86
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	90
6.1 Propostas para Trabalhos Futuros.....	91
REFERÊNCIAS	92
APÊNDICE A – PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA EÓLICO	97
APÊNDICE B – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES PI	98
APÊNDICE C – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-PV	102
APÊNDICE D – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-VS.....	104
APÊNDICE E – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-RA	105
APÊNDICE F – CÓDIGOS DO ALGORITMO CA.....	106
APÊNDICE G – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-H	108

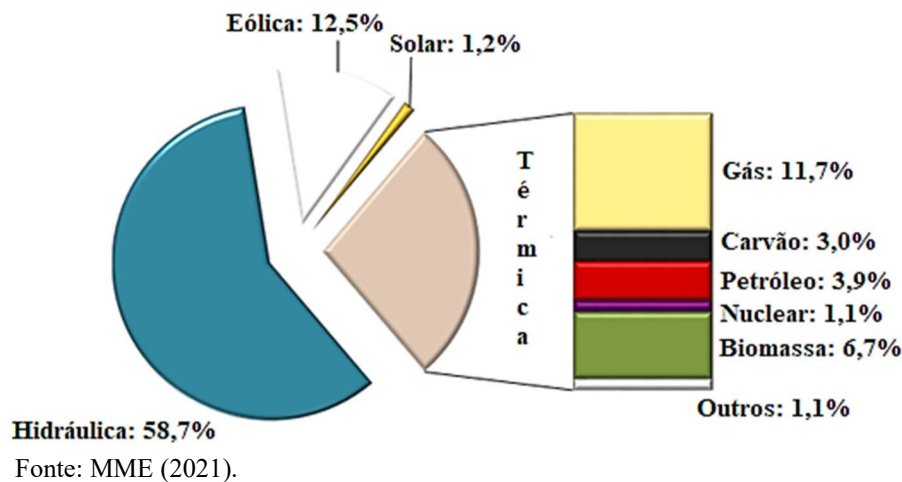
1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e justificativa do trabalho

Com a crescente preocupação de se eliminar as fontes poluentes de geração de energia, principalmente os combustíveis fósseis, as energias renováveis tornam-se cada vez mais uma solução aplicada em todo o mundo. A geração eólica é uma das fontes que mais crescem, gerando emprego e renda. Segundo (GWEC, 2021), estimasse que entre 2021 e 2025, as instalações anuais de potência eólica devem crescer uma potência adicional de 470 GW, atingindo um valor total de 1.210 GW de capacidade instalada *onshore* e *offshore*. Essa potência é equivalente à criação de mais de 3,3 milhões de empregos diretos em todo o mundo.

No Brasil, a geração eólica vem batendo recordes de geração. Em agosto de 2021, essa fonte registrou um recorde médio gerado de 11.680 MW, suprimindo a demanda de energia da região nordeste durante um dia inteiro (ABEEólica, 2021). A Figura 1 ilustra como está distribuída a matriz energética brasileira, sendo destacada cada fonte produtora. A eólica apresenta 12,5% da produção total de energia, sendo a segunda maior fonte produtora de energia do Brasil (MME, 2021).

Figura 1 - Matriz de produção de energia elétrica do Brasil



Os sistemas de conversão de energia eólica (*Wind Energy Conversion System - WECS*), associados a geradores síncronos de ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG*), conectados na rede elétrica por meio de conversores bidirecionais (*back-to-back*) são amplamente citados na literatura (BAKHTIARI e NAZARZADEH, 2020; YOUSSEF *et al.*, 2018; TRIPATHI, TIWARI e SINGH, 2015a). Tal topologia também é

utilizada em análise de afundamentos da tensão simétricos e assimétricos, visando validar as diversas técnicas de mitigação destas perturbações (RIBEIRO, 2020; TRIPATHI, TIWARI e SINGH, 2019).

Apesar das vantagens da energia eólica, alguns pontos devem ser considerados, visando à evolução desta fonte, tais como: i) A estabilidade e confiabilidade da rede elétrica precisam ser analisadas, visto que situações de afundamentos de tensão simétricos e assimétricos podem ocorrer, prejudicando o sistema eólico conectado, visto o grande aumento da penetração da mesma na rede de distribuição de energia (ANDREW, YUN e YASSER, 2021); ii) A capacidade do WECS de extrair a máxima potência da turbina eólica independentemente das características imprevisíveis do vento deve ser considerada, visto que mais de 50% da capacidade de produção anual do gerador vem da situação de velocidade do vento abaixo da nominal (HUANG, LI e JIN, 2015). Diante disso, os algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) devem ser robustos o suficiente para atender a estas duas demandas, requerendo menos esforços dos controladores, o que resulta na redução da energia do mesmo.

O WECS, além de suportar as oscilações de tensão sem ocasionar sua desconexão, deve fornecer estabilidade para a rede elétrica durante este evento, ajudando principalmente na sua reinicialização. Também, um monitoramento da tensão do barramento CC deve ser realizado, pois o desequilíbrio entre as potências da rede e do gerador podem ocasionar a desconexão. Essa suportabilidade as falhas da rede é conhecida na literatura como Capacidade de Suportar Afundamentos de Tensão (*Low Voltage Ride Through* - LVRT) (ANDREW, YUN e YASSER, 2021; ALEPUZ *et al.*, 2013). Basicamente, os dois principais tipos de aprimoramento da capacidade de LVRT são os métodos baseados em dispositivos externos e os baseados em controle modificado (NASIRI, MILIMONFARED e FATHI, 2015). Este último se destaca pela redução dos custos de instalação, contrapondo com o primeiro. São exemplos clássicos de aprimoramento da capacidade utilizando equipamentos externos os sistemas de armazenamento de energia, os resistores de dissipação de energia (*braking chopper*), dentre outros. Já o Controle do Ângulo de Pitch (*Pitch Angle Control* - PAC) e a modificação das estratégias de controle do conversor *back-to-back* são exemplos do aprimoramento com controle modificado (NASIRI, MILIMONFARED e FATHI, 2015).

O MPPT é amplamente estudado na literatura, com aplicações mais comuns em sistemas eólicos e fotovoltaicos. Estes têm por função extrair a potência total fornecida pela turbina eólica, independentemente do valor da velocidade do vento, buscando sempre o ponto

de máxima potência (*Maximum Power Point* - MPP). Também, esses métodos de controle podem contribuir com o WECS a suportar os momentos de instabilidade da rede elétrica, causados pelos afundamentos de tensão.

Nos últimos anos, o método de Perturba e Observe (*Perturb & Observe* - P&O) ganhou destaque e notoriedade nas pesquisas, buscando eliminar as problemáticas inerentes ao seu processo que são: a baixa eficiência devido às oscilações impostas pelo tamanho do passo fixo de perturbação na velocidade e a demora na convergência até o ponto de máxima potência do sistema (LEE e KIM, 2016; KAZMI *et al.*, 2011), visando desenvolver algoritmos mais robustos e eficientes, colaborando assim com a estabilidade tanto do WECS como da rede elétrica.

Portanto, o presente trabalho traz uma análise detalhada de alguns algoritmos de MPPT eficientes, também o autor propõe um novo método de rastreamento híbrido chamado de P&O Híbrido (P&O-H), no qual o mesmo possa contribuir tanto com a extração de potência elétrica do gerador eólico como auxiliar o WECS durante afundamentos de tensão simétricos e assimétricos da rede elétrica. Será feita uma comparação entre dois tipos de controle visando contribuir com a suportabilidade dos sistemas eólicos durante a ocorrência de perturbações na rede, conhecido por LVRT, onde a ação média dos controladores Proporcional e Integral (PI) será investigada, contribuindo para a escolha do mais eficiente.

Para tal, o P&O-H proposto neste trabalho realiza modificações no método implementado em Lijun, Yongdong e Ronald (2013), aplicando uma perturbação adaptativa na velocidade de referência do gerador PMSG, conforme descrito em Mousa, Youssef e Mohamed (2019a). Também, este algoritmo e os demais aqui abordados, serão simulados em conjunto com os controles de mitigação do LVRT, sendo investigadas as possíveis contribuições do MPPT na estabilidade do sistema WECS e rede elétrica, como também na ação média dos controladores PI.

Assim, a proposta aplicada em Tripathi, Tiwari e Singh (2015b, 2019), foi modificada neste trabalho, sendo denominada de LVRT Híbrido (LVRT-H), devido o mesmo utilizar uma estratégia de armazenamento da energia gerada na inércia do rotor em conjunto com um conjugado que rastreia a potência instantânea da rede no momento dos afundamentos de tensão. O LVRT-H será comparado com a aplicação clássica de resistores associado ao link CC, dissipando o excedente de energia ativa gerada pelo WECS, o *Braking Chopper* (LVRT-BC).

Com isso, este trabalho pretende desenvolver métodos de MPPT e controles de

mitigação do LVRT perfeitamente aplicáveis em sistemas eólicos de baixa potência, visando reduzir ao máximo os custos da instalação destes sistemas, eliminando sensores de medição do vento, e de dispositivos externos para o armazenamento de energia durante as situações de perturbação na rede elétrica.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise dos diversos tipos de algoritmos de extração da máxima potência, identificando qual é o mais eficiente, no quesito geração de potência elétrica. Também, uma comparação de métodos de mitigação de afundamentos de tensão será aplicada, contribuindo com o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e de baixo custo.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Desenvolver um MPPT híbrido sem necessidade do conhecimento dos parâmetros do sistema e que seja perfeitamente adaptável as mudanças do vento;
- Realizar comparações de eficiência da extração de potência elétrica dos métodos de MPPT abordados e proposto neste trabalho;
- Realizar uma comparação entre as técnicas clássicas (LVRT-BC) e atuais (LVRT-H) de mitigação do LVRT;
- Investigar a contribuição que as técnicas de MPPT exercem sobre a estabilidade do sistema WECS em situações de afundamentos de tensão, operando em conjunto com os métodos de mitigação do LVRT;
- Analisar as ações médias dos controladores PI aplicando as técnicas de MPPT em conjunto com o controle de mitigação do LVRT;

1.3 Produções científicas

No decorrer da pesquisa foram desenvolvidos os seguintes artigos científicos:

- SILVA NETO, M. E.; AMORA, M. A. B.; PINTO, V. P. **Proposta e análise de métodos de rastreamento do ponto de máxima potência em aerogeradores de**

velocidade variável. Anais...In: XXIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA, Congresso Virtual, 23 a 26 de Novembro de 2020.

- SILVA NETO, M. E.; AMORA, M. A. B.; PINTO, V. P. **Maximum power point tracking methods applied to wind power generation.** *Brazilian Journal of Development*, v. 7, pp. 33714 – 33739, Abril. 2021.

1.4 Organização do trabalho

O Capítulo 2 apresentará os componentes utilizados para se realizar a conexão do sistema eólico na rede elétrica, sendo detalhado cada equipamento e controle utilizado.

O Capítulo 3 será abordado a problemática existente entre esses dois pontos listados: rastreamento do ponto de máxima potência e suportabilidade do sistema eólico as perturbações da rede, sendo realizado um paralelo entre ambos.

No Capítulo 4 será apresentado o algoritmo proposto neste trabalho, onde as descrições das suas características de operação serão abordadas.

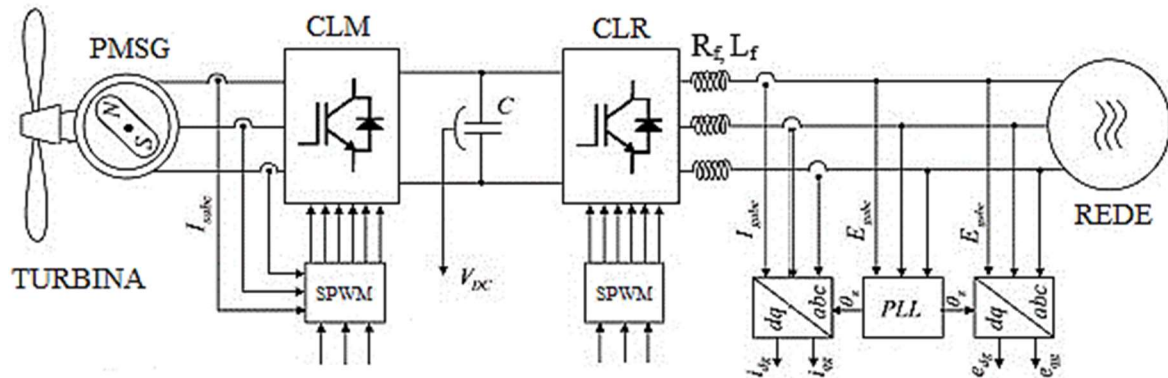
No Capítulo 5 são mostrados e discutidos os resultados obtidos ao longo das diversas simulações aplicadas, nos vários cenários propostos.

No Capítulo 6 serão comentadas as considerações finais do trabalho e sugeridas propostas para estudos futuros.

2 COMPONENTES DE UM WECS

O WECS é composto por um gerador PMSG, associado a um conversor de potência *back-to-back* para a conexão do mesmo na rede elétrica. Este é constituído por dois conversores com IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*- IGBT), em série com um link CC. A modulação aplicada para o controle do conversor foi a da modulação por largura de pulso senoidal (*Sinusoidal Pulse Width Modulation* - SPWM). O diagrama ilustrativo dos principais componentes está representado na Figura 2. Os valores utilizados para a parametrização de todo o sistema eólico no Psim está descrito no apêndice A.

Figura 2 - Topologia do WECS



Fonte: Adaptado de Tripathi, Tiwari e Singh (2019).

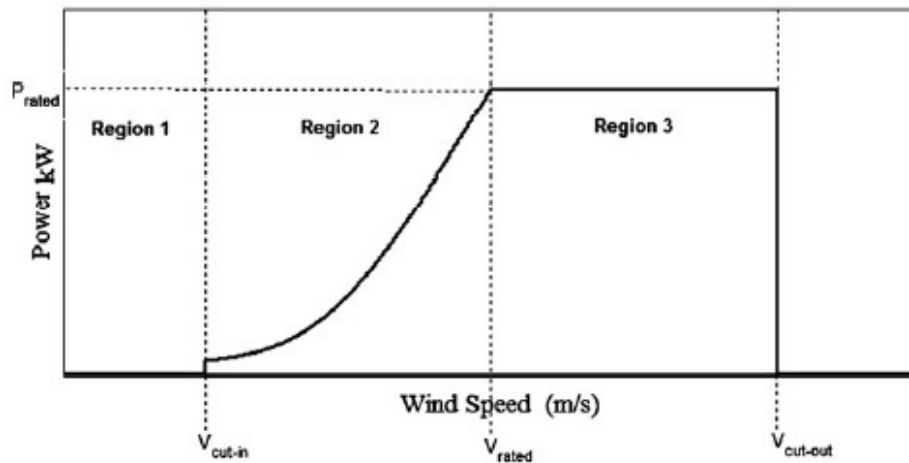
2.1 Turbina eólica

Embora as massas de ar sejam abundantes na natureza, elas possuem uma característica própria, variam constantemente de velocidade. Assim, sua energia cinética associada também modifica, alterando o nível de potência que as turbinas eólicas podem captar. Para compensar esta problemática, devem ser utilizadas turbinas de velocidade variável. Elas podem extrair a máxima potência para diversos valores de velocidade do vento, ajustando a velocidade de rotação do seu eixo.

Em Abdullah *et al.* (2012) são apresentadas algumas áreas de operação que devem ser obedecidas para um bom funcionamento das turbinas eólicas de velocidade variável. A região 1 é conhecida como de baixa velocidade, neste ponto a turbina deve ser desligada e desconectada da rede. Existe também uma velocidade mínima de acionamento chamada de V_{Cut_in} . Na região 2 será onde a turbina obterá sua velocidade nominal (V_{rated}), produzindo sua potência máxima e mantendo sua rotação constante. Por fim, na região 3, a turbina será desligada quando atingir um determinado valor de velocidade, conhecido por V_{Cut_out} ,

protegendo o gerador e a turbina de possíveis danos. A Figura 3 detalha esses limites. A vantagem em se utilizar a turbina de velocidade variável, está no fato de que ela pode operar para baixos valores de velocidade do vento, sem ruído aerodinâmico provocado pela baixa rotação e sem danos ao sistema.

Figura 3 - Curva de potência da turbina eólica



Fonte: Adaptado de Abdullah *et al.* (2012).

A turbina eólica, que é um dos principais dispositivos do WECS, fornece potência mecânica para o gerador por meio da equação (1) (FERREIRA, 2011):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

onde P_m é a potência mecânica de saída da turbina eólica (W), ρ a densidade do ar (Kg/m^3), A é a área varrida pelas pás (m^2), V a velocidade do vento (m/s), e $C_p(\lambda, \beta)$ o coeficiente de potência que depende da relação entre a velocidade tangencial da ponta das pás pela velocidade do vento (λ) e do ângulo de inclinação da pá (β).

A relação de λ também é conhecida por velocidade de ponta, ilustrada pela equação (2) (THONGAM e OUHROUCHE, 2011):

$$\lambda = \frac{R \omega_m}{V} \quad (2)$$

Sendo R o comprimento das pás (m) e ω_m a velocidade mecânica da turbina (rad/s).

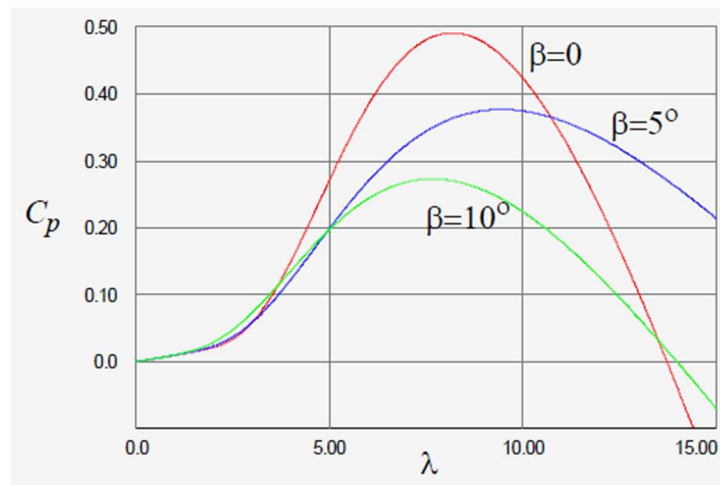
O coeficiente $C_p(\lambda, \beta)$, que depende de parâmetros do fabricante, pode ser demonstrada por uma possível relação apresentada em (FERREIRA, 2011):

$$C_p = 0,5 \left(116 \frac{1}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) \exp \left(-\frac{21}{\lambda_i} \right) + 0,01\lambda$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^3}$$
(3)

O parâmetro β , referente ao ângulo de ataque da pá eólica, altera o coeficiente de potência (C_p) da turbina. Assim, a potência mecânica captada também será modificada. Portanto, conforme Figura 4, será adotado o valor de zero para β , visando maximizar a extração de potência. O modelo da turbina eólica utilizada neste trabalho possui os valores máximos de $C_{p_opt}(\lambda, \beta)$ e λ_{opt} iguais a 0,48 e 8,1, respectivamente.

Figura 4 - Curva do coeficiente de potência



Fonte: PSim (2011)

Conforme análise da Figura 4, existe apenas uma forma de se obter os valores ótimos do coeficiente de potência e de lambda nas curvas, sendo este associado ao valor de β em zero. Assim, neste ponto de operação, o sistema WECS será capaz de extrair a máxima potência.

Reescrevendo a equação (2), e substituindo-a em (1) utilizando os valores máximos de C_p e λ , a potência mecânica máxima pode ser calculada por meio da equação (4), dependendo agora de alguns parâmetros, dentre os quais se destaca a velocidade de rotação da turbina (ω_m) (TIBOLA, 2009).

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^3}{\lambda_{opt}^3} C_{p_opt}$$
(4)

Portanto, os algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência operam utilizando diversas técnicas de controle, mantendo o valor de λ no seu valor máximo, o que necessariamente resulta também em um coeficiente de potência máximo. Para tal, controlar a velocidade de rotação do conjunto turbina e gerador é uma das práticas mais usuais, visto que a equação (2) relaciona tais grandezas. Sistemas eólicos de grande porte fazem uso da medição do vento para o cálculo dessa velocidade ideal que deve ser imposta ao WECS.

Essas medições acabam elevando os custos da instalação, principalmente para os sistemas de baixa potência. Portanto, os métodos de MPPT devem operar sem a necessidade do conhecimento de parâmetros do sistema e nem do vento, utilizando algoritmos que sejam perfeitamente adaptáveis às mudanças do ambiente.

2.2 Gerador PMSG

O gerador síncrono de ímã permanente é amplamente utilizado em sistemas eólicos, pois se diferencia dos demais por não precisar de fluxo de energia bidirecional, não possuir escorregamento, não necessitar de caixa de engrenagem acoplada à turbina eólica reduzindo assim o atrito mecânico e por possuir uma maior eficiência em comparação aos Geradores Gaiola de Esquilo (*Squirrel Cage Induction Generators - SCIG*) e aos Geradores de Indução Duplamente Alimentado (*Doubly Fed Induction Generator - DFIG*) (SANTOS, 2015; VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2015; RIBEIRO, 2020).

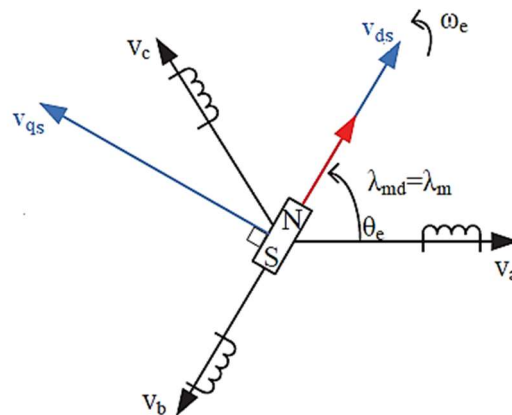
Este gerador pode ser representado em função de suas coordenadas de eixo direto e em quadratura ($qd0$), empregando a transformada desenvolvida por R. H. Park, em 1920 (BARBI, 1985). Ela permite que um sistema trifásico equilibrado de três eixos estacionário possa ser representado por meio de dois eixos perpendiculares entre si, girando com uma determinada velocidade angular síncrona elétrica (ω_e). Visando simplificar o modelo do gerador, é feito o alinhamento do eixo direto do novo sistema de coordenadas com o fluxo magnético do rotor (λ_m). Assim, o fluxo magnético produzido pelos ímãs será decomposto totalmente neste eixo ($\lambda_{md} = \lambda_m$), conforme ilustrado na Figura 5.

Vários trabalhos na literatura abordam o desenvolvimento matemático dessa transformação de eixos do PMSG (BOSE, 2002; TIBOLA, 2009; SANTOS, 2015; DUARTE, 2016). Desta forma, o mesmo pode ser representado em função das suas coordenadas dq , como descrito na equação (5) (TRIPATHI, TIWARI e SINGH, 2015a):

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s i_d + L_{ds} \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\
 V_{qs} &= R_s i_q + L_{qs} \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_m
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

onde V_{ds} e V_{qs} são as tensões de eixo direto e em quadratura de saída do gerador (V), i_d e i_q são as correntes de eixo direto e em quadratura de saída do gerador (A), R_s e a resistência do estator (Ω), L_{ds} e L_{qs} são as indutâncias de eixo direto e em quadratura do gerador (H), λ_m é o fluxo magnético do gerador (Wb) e ω_e é a velocidade elétrica do gerador (rad_élétricos/s).

Figura 5 - Transformação de coordenadas dq



Fonte: Adaptado de Duarte (2016).

A potência do sistema trifásico ABC (P_{abc}) também pode ser expressa em função da potência elétrica instantânea (P_e) utilizando a equação (DUARTE, 2016):

$$P_{abc} = \frac{3}{2} P_e
 \tag{6}$$

A potência elétrica (P_e) é composta por três parcelas: a primeira está relacionada as perdas nos enrolamentos do estator, a segunda refere-se a energia magnética armazenada nos enrolamentos e a última representa a potência mecânica disponível no eixo do gerador (P_m), dada pela equação (7) (SANTOS, 2015):

$$P_m = i_q \omega_e \left([L_d - L_q] i_d + \lambda_m \right)
 \tag{7}$$

Assim, desprezando as parcelas da potência que são dissipadas e armazenadas nos enrolamentos do estator, a potência mecânica será agora descrita pela equação (8) (DUARTE, 2016):

$$P_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{N}{2} i_q \omega_m \left([L_d - L_q] i_d + \lambda_m \right) \quad (8)$$

Sendo N o número de polos.

Com isso, o conjugado eletromecânico (T_e) pode ser calculado dividindo a equação (8) pela velocidade mecânica do gerador (ω_m), tendo como resultado (TRIPATHI, TIWARI e SINGH, 2015a):

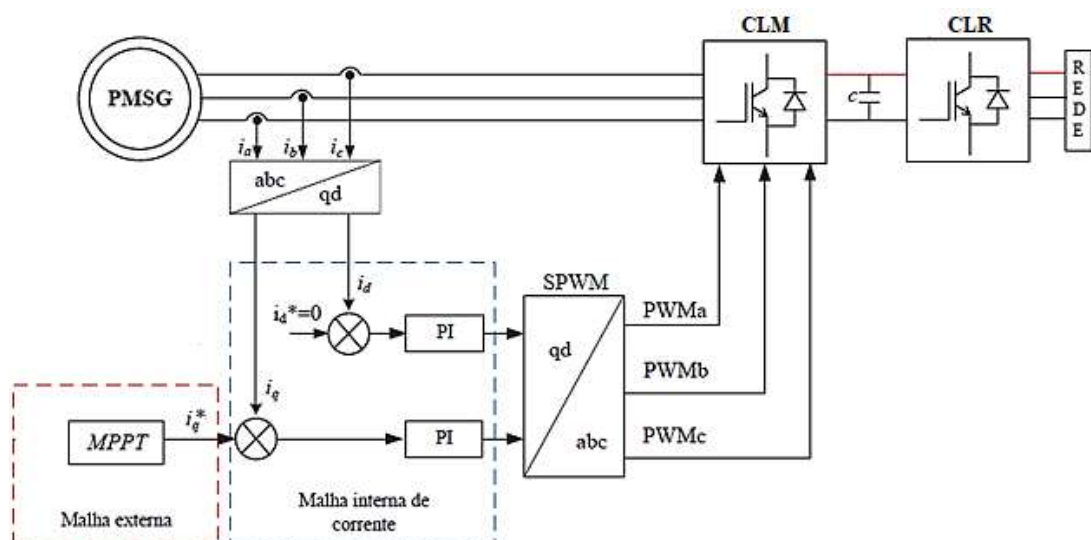
$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{N}{2} i_q \left([L_d - L_q] i_d + \lambda_m \right) \quad (9)$$

2.3 Conversor do lado da máquina (CLM)

Para que o PMSG possa extrair a máxima potência da turbina eólica, o retificador utilizado no WECS deve ser controlado de forma que a corrente de referência do eixo em quadratura (i_q^*) seja imposta pelo MPPT, como ilustrado na Figura 6. Também, visando um fato de potência unitário, a corrente de referência de eixo direto será imposta para zero ($i_d^* = 0$). Assim, a equação (9) pode ser reescrita por meio da equação (10), permitindo agora que o conjugado do gerador síncrono seja manipulado pelo controle da corrente de eixo em quadratura (i_q) (TIBOLA, 2009; SANTOS, 2015; DUARTE, 2016).

$$i_q = \frac{4 \cdot T_e}{3 \cdot N \cdot \lambda_m} \quad (10)$$

Figura 6 - Diagrama do sistema de controle do CLM



Fonte: Adaptado de Duarte (2016)

Assim, a corrente de referência de eixo em quadratura (i_q^*), responsável pela potência ativa gerada, será fornecida pelos vários métodos de MPPT abordados neste trabalho, forçando o PI a corrigir o erro existente, alterando o sinal do chaveamento do CLM, resultando na alteração da rotação do gerador síncrono.

Visando simplificar o controle, os termos de acoplamento e a tensão induzida presentes na equação (5) são consideradas perturbações a serem compensadas pelo sistema. Assim, a Função de Transferência (FT) da malha de corrente de eixo direto e em quadratura serão dadas por (SANTOS, 2015):

$$FT_{corrente_máquina}(s) = \begin{cases} \frac{1}{R_s + L_{ds}s} \\ \frac{1}{R_s + L_{qs}s} \end{cases} \quad (11)$$

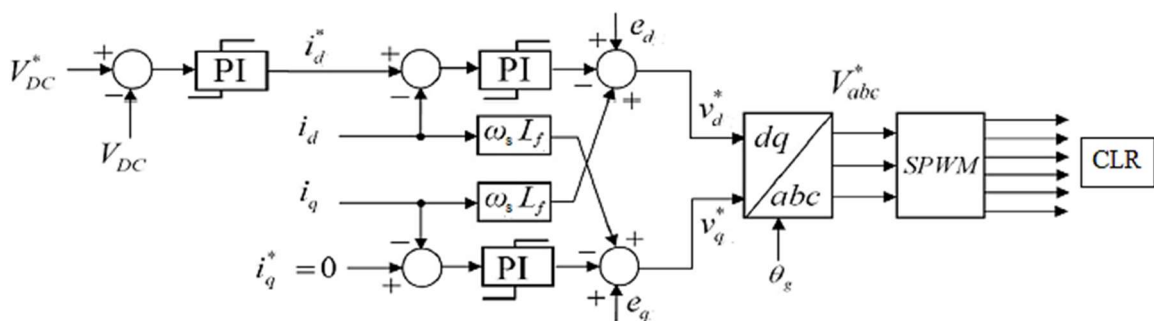
onde s é a variável no domínio da frequência.

Os parâmetros dos controladores PI utilizados para ajustar o chaveamento do CLM estão descritos no apêndice B deste trabalho, bem como o método aplicado para o seu dimensionamento.

2.4 Conversor do lado da rede (CLR)

Para realizar o controle do conversor do lado da rede (CLR) será preciso medir a tensão da rede elétrica, a corrente elétrica de cada fase e a tensão do link CC. Também, para que ocorra um sincronismo da tensão disponibilizada pelo conversor com a da rede, um controle de rastreamento da fase da tensão da rede elétrica será necessário, conhecido como Rastreamento da Fase em Circuito Fechado (*Phase Locked Loop* - PLL). Na Figura 7 está ilustrado o diagrama de bloco do controle do CLR.

Figura 7 - Diagrama do sistema de controle do CLR

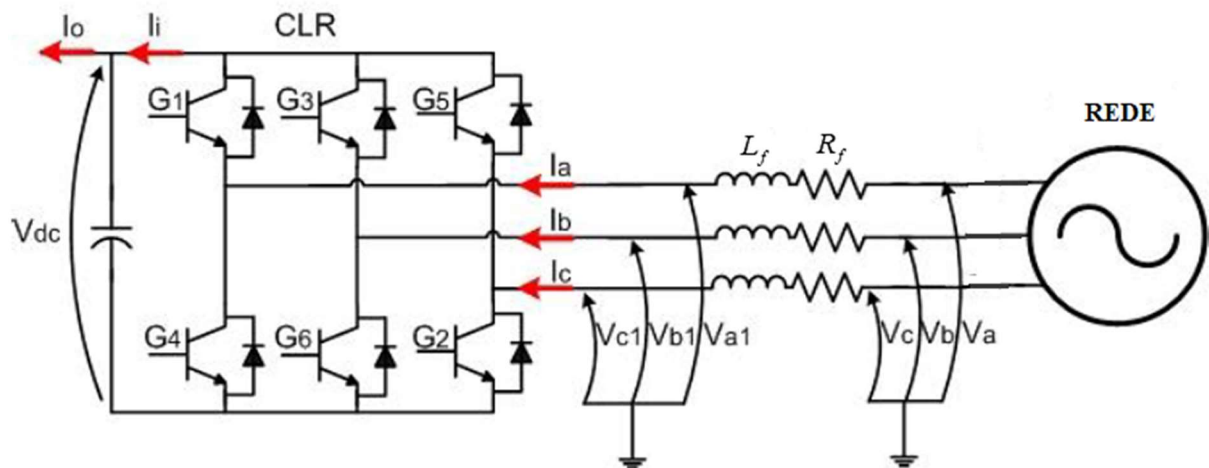


Fonte: Adaptado de Tripathi, Tiwari e Singh (2015a).

Visando operar com fator de potência unitário, a corrente de referência de eixo em quadratura será imposta para zero ($i_q^*=0$). Desta forma, o conversor irá operar modulando seu chaveamento para que nenhuma potência reativa seja absorvida pela rede. Já a referência da corrente de eixo direto (i_d^*), responsável pela potência ativa, terá sua referência fornecida pela malha externa de tensão. Tal situação está ilustrada na Figura 8.

A malha de externa de tensão monitora o nível de tensão (V_{dc}) no capacitor do link CC, forçando o controlador PI a fornecer a corrente de referência para a malha interna. Este capacitor deve operar com um nível de tensão específico (V_{dc}^*). Assim, quando esta tensão tende a crescer ou decrescer, o controle irá perceber um erro diferente de zero, enviando esse valor para a malha de corrente de eixo direto (i_d^*), que por sua vez deverá absorver ou fornecer potência ativa conforme necessidade do barramento.

Figura 8 - Estrutura CLR e rede elétrica



Fonte: Adaptado de Machado (2013).

Para o dimensionamento deste controle, deve-se aplicar a lei das malhas entre cada fase da rede elétrica e o conversor, obtendo a equação (10), como pode ser analisado na Figura 8 (MACHADO, 2013):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

sendo V_{a1} , V_{b1} , V_{c1} as tensões sintetizadas pelo CLR (V), V_a , V_b , V_c e I_a , I_b , I_c as tensões (V) e correntes (A) da rede elétrica, respectivamente. R_f é a resistência elétrica do filtro da rede (Ω) e L_f a indutância do filtro da rede (H).

Utilizando a transformada $dq0$ em (10) e sendo ω_s a frequência da rede elétrica, obtém-se a equação (11) (MACHADO, 2013):

$$\begin{aligned} V_d &= R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - \omega_s L_f i_q + V_{d1} \\ V_q &= R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + \omega_s L_f i_d + V_{q1} \end{aligned} \quad (13)$$

Também, as potências ativas e reativas da rede em função das suas coordenadas $dq0$ são descritas na equação (12) (MACHADO, 2013):

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} (V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q) \\ Q &= \frac{3}{2} (V_q \cdot i_d - V_d \cdot i_q) \end{aligned} \quad (14)$$

Fazendo o vetor tensão da rede elétrica se alinhar com o eixo direto, obtém-se V_d igual ao valor de pico da rede, enquanto a tensão de eixo em quadratura será zero ($V_q=0$). Portanto, a equação (12) será reescrita na equação (13) (SANTOS, 2015):

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} V_d i_d \\ Q &= -\frac{3}{2} V_d i_q \end{aligned} \quad (15)$$

Considerando a transformação $dq0$ e a modulação SPWM utilizada, a tensão de eixo direto da rede elétrica será obtida por:

$$V_d = \frac{\sqrt{3} m}{2\sqrt{2}} V_{dc} \quad (16)$$

sendo V_{dc} a tensão do barramento CC (V).

Aplicando a transformada de Laplace na equação (13) e fazendo manipulações algébricas na mesma, obtém-se a FT da malha de corrente do CLR, sendo dada por:

$$FT_{corrente_rede}(s) = \frac{1}{R_f + sL_f} \quad (17)$$

Os parâmetros dos controladores PI utilizados para ajustar o chaveamento do CLR estão descritos no apêndice B deste trabalho, bem como o método aplicado para o seu dimensionamento.

2.5 Considerações parciais

Nesta seção foi realizada uma descrição dos principais dispositivos que compõe o sistema eólico. Para tal, um breve desenvolvimento das equações que servem de suporte para o entendimento do controle destes equipamentos foi apresentado.

A turbina eólica, associada ao PMSG, são os principais pontos que devem ser analisados durante a extração da máxima potência do sistema. Assim, visando realizar o processamento desta potência, como também a conexão do WECS na rede elétrica, um conversor *back-to-back* foi utilizado.

Este conversor permite haver um desacoplamento entre o CLM e o CLM, facilitando a operação individual dos mesmos. O controle do CLM permite gerir o PMSG de modo que o mesmo extraia a máxima potência, enquanto o CLR auxilia na injeção do excedente da potência produzida na rede elétrica, evitando um aumento descontrolado da tensão do link CC. Este ponto pode causar uma desconexão indesejada do WECS da rede elétrica.

No próximo capítulo alguns algoritmos de MPPT serão apresentados, sendo realizado uma descrição das características e modo de operação de cada um deles.

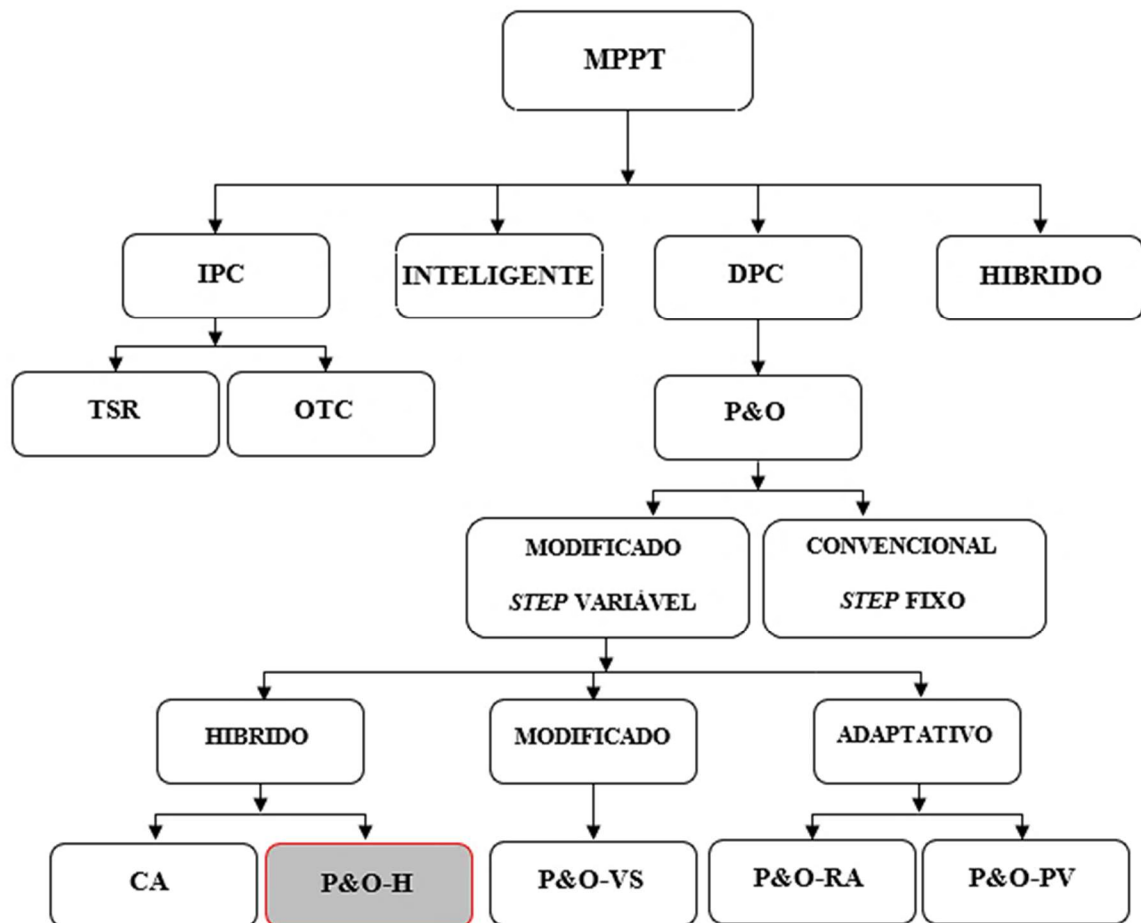
3 MÉTODOS DE MPPT

Neste capítulo será abordado os algoritmos de rastreo do ponto de máxima potência que serão implementados e proposto neste trabalho, sendo realizada uma descrição de suas características e modos de operação.

3.1 Algoritmos de rastreo do ponto de máxima potência (MPPT)

Os algoritmos de MPPT tem por função extrair a potência total fornecida pela turbina eólica, independentemente do valor da velocidade do vento, buscando sempre o MPP do WECS. Conforme revisão da literatura (MOUSA, YOUSSEF e MOHAMED, 2020), o MPPT pode ser classificado em quatro tipos: Controle de potência indireta (*Indirect Power Controller - IPC*), Controle da potência direta (*Direct Power Controller - DPC*), Híbrido, Inteligente. A Figura 9 detalha essa divisão.

Figura 9 - Classificação dos métodos de MPPT



Fonte: Adaptado de Mousa, Youssef e Mohamed (2019b, 2020).

A proposta IPC controla a potência elétrica ou mecânica de forma indireta, por meio de grandezas secundárias, como conjugado e velocidade. O DPC realiza o controle analisando diretamente a potência medida do sistema, verificando o resultado das perturbações impostas na velocidade de referência. Como exemplo deste tipo de MPPT, pode-se citar os métodos de P&O em geral. Os algoritmos híbridos são baseados na fusão de vários recursos de diferentes métodos de MPPT, visando eliminar as deficiências de cada um destes individuais. As técnicas inteligentes utilizam aplicações como rede neural, lógica *fuzzy*, algoritmos meta-heurísticos, dentre outros, para realizar a extração da máxima potência.

Alguns autores, dada a evolução na estratégia de rastreamento ao longo dos anos, indicam a tendência de aumento do uso dos algoritmos P&O, propondo que estes tenham uma classificação própria. A seguir serão comentados trabalhos que abordam a temática do MPPT.

Thongam *et al.* (2009) propõe um algoritmo de MPPT no qual não é necessário o conhecimento de parâmetros do sistema, velocidade do vento, dentre outros. Esse método fornece como saída à velocidade de referência para o controle da malha de velocidade do conversor da máquina. Este conceito foi aplicado em um WECS composto por um Gerador PMSG de 1,1 KW e conversor *back-to-back* conectado na rede. O algoritmo opera como um método P&O, visto que o mesmo gera incrementos e reduções da velocidade de referência, observado o resultado na potência elétrica gerada. As simulações realizadas mostram que a implementação aplicada nesse trabalho apresentou boa capacidade de rastreamento em condições de vento variável, sendo possível aplicar o método em uma vasta configurações de WECS.

Kazmi *et al.* (2011) propõe uma solução para os problemas existentes nos algoritmos de rastreamento do MPPT que se utilizam do método clássico de Busca em Subida (*Hill Climb Search* - HSC). A proposta implementada, além de evitar um rastreamento na direção errada devido às mudanças bruscas de vento, também elimina o problema entre velocidade de convergência e eficiência, visto que o mesmo adapta de forma interativa o tamanho do passo até atingir o valor de pico de potência. Também, elimina a presença de sensor para medição direta do vento. As simulações realizadas validam a eficiência e a velocidade de convergência da proposta quando comparada com o HSC clássico.

Thongam e Ouhrouche (2011) fazem uma revisão de alguns métodos de MPPT aplicados em WECS que utilizam PMSG, SCIG e DFIG. Foi realizada uma descrição concisa do princípio de operação de cada um destes algoritmos abordados no trabalho: Relação de Velocidade de Ponta (*Tip Speed Ratio* - TSR), Controle de Retroalimentação de Potência

(*Power Signal Feedback* - PSF) e HSC. Como o estudo realizado, foram analisados os resultados do WECS implementado em conjunto com o método do P&O modificado proposto em Thongam *et al.* (2009), sendo comprovada a eficiência deste último perante os algoritmos clássicos já citados.

Abdullah *et al.* (2012) realizam um estudo dos seguintes algoritmos de rastreamento de máxima potência: TSR, Controle de Torque Ótimo (*Optimal Torque Control* - OTC), PSF e P&O. Também, classifica os métodos de MPPT como com e sem sensores. O WECS implementado é composto com um gerador PMSG em série com o retificador trifásico a diodo e o conversor *boost*, alimentando uma carga resistiva. Os resultados obtidos apontam que o controle OTC apresentou o melhor resultado no quesito eficiência e velocidade de resposta. O P&O, apesar da simples implementação, tem como problema maior a escolha do tamanho do passo da perturbação.

Já em Lijun, Yongdong e Ronald (2013) é implementado um algoritmo de controle de potência multimodo adaptativo, no qual opera buscando o MPP ou não, para um sistema eólico baseado em PMSG e conversor *back-to-back* com link CC híbrido, composto por bateria e carga resistiva. Este método proposto é perfeitamente adaptável as mudanças do ambiente quando comparado ao HSC convencional. O WECS opera em uma microrede conectada à rede elétrica e em condições de ilhamento. As simulações e os resultados experimentais validam o método proposto operando no modo MPPT e não MPPT, apresentando resultados superiores aos métodos tradicionais.

Em Fathabadi (2017) é abordado à ideia dos rastreadores de potência elétrica máxima (*Maximum Electrical Power Tracker* - MEPT). Este método tende a extrair a potência elétrica máxima dos WECS, se diferenciando do MPPT clássico, no qual extrai apenas potência mecânica. Neste trabalho é descrito que os métodos de MPPT basicamente se comportam como rastreadores de potência mecânica máxima (*Maximum Mechanical Power Tracker* - MMPT). Também, foi implementado dois novos algoritmos baseados em MEPT e MMPT, sendo comparado a eficiência de ambos. As simulações realizadas comprovam a maior eficiência, atingindo 99,28% (MEPT) e 98,04% (MMPT), como também o menor tempo de convergência. Por fim, o WECS implementado baseia-se num PMSG trifásico de 600 W, associado ao conversor *boost*.

Mekalathur *et al.* (2018) fizeram uma revisão bibliográfica de diversos tipos de algoritmos de MPPT, sendo analisados os seguintes pontos para efeito de comparação: tempo de convergência, eficiência, treinamento, complexidade e medição da velocidade do vento.

Também, uma descrição dos principais tipos de técnicas de controle usados nos WECS foi realizada, podendo ser destacados: aerodinâmica das pás, controle do ângulo de *pitch*, controlador proporcional e integral, controlador *fuzzy*, controle por modo deslizante, sistema de controle integrado e o controle individual de *pitch*. Os autores aplicaram uma classificação dos algoritmos em dois tipos: os que realizam a medição da velocidade do vento (*Wind Speed Measurement* - WSR) e os que não fazem. Por fim, várias simulações são realizadas a fim de se comparar todos os algoritmos abordados com os dois métodos propostos em (FATHABADI, 2017).

Youssef *et al.* (2018) realizam uma modificação para superar as limitações do tamanho do passo fixo dos algoritmos de P&O, visando rastrear o MPP com precisão. Para tal, é proposta uma técnica de Passo Variável com Operação Multisetorial (*Variable Step Perturb and Observe* - VS-PO). Neste método, a curva de potência versus velocidade, que é dividida em quatro setores, é comparada com uma sintetizada. Assim, dependendo de qual setor operacional esteja o rastreamento, o tamanho do passo é diferenciado, apresentando maiores perturbações em situações mais distantes do MPP. Nas regiões mais próximas, será adotado um valor menor, evitando as oscilações. Também, este trabalho define uma classificação dos vários métodos de MPPT em dois tipos principais: IPC e DPC. Dentro deste último encontra-se o P&O, na qual também possui uma subclassificação: P&O convencional e P&O modificado. O WECS utilizado baseia-se no gerador PMSG de 1,5 MW, associado a um conversor *back-to-back* conectado na rede elétrica. Para a validação do método proposto foram realizadas simulações comparando o VS-PO com outros dois algoritmos convencionais do P&O. Os resultados obtidos mostram o aumento da eficiência do WECS quando aplicado o VS-PO.

Neste estudo de Mousa, Youssef e Mohamed (2019a) foi proposto um algoritmo de perturbação robusta e eficiente (*Robust Adaptive Perturb and Observe* - RA-PO) para rastrear o MPP do WECS que utiliza um gerador cinco fases PMSG de 1,5 MW, associado ao conversor *back-to-back* para a conexão na rede elétrica. Neste trabalho os métodos de MPPT são classificados em duas categorias: IPC e DPC. O RA-PO depende da estimação da velocidade do vento, por meio de um polinômio de terceiro grau, para calcular a Razão Adaptativa (D) responsável pelo aumento ou decréscimo da perturbação da velocidade. Assim, se o valor da velocidade real do gerador estiver longe da velocidade ideal, a razão D será máxima, sendo diminuída continuamente até que a velocidade ideal seja alcançada. As simulações realizadas comparam o método proposto, RA-PO, com uma série de algoritmos de P&O, dentre eles o proposto em Youssef *et al.* (2018). Os resultados validam a robustez e baixa oscilação do RA-

PA, apresentando a maior eficiência dentro todos (91,39%).

Bakhtiari e Nazarzadeh (2020) realizam o projeto do controle de um WECS utilizando o modelo dinâmico da turbina e do PMSG. Também, um estimador não linear baseado no Filtro de Kalman Estendido (*Extended Kalman Filter* - EKF) é utilizado para estimar a velocidade e as correntes do gerador sem a necessidade de sensores. Esta estimação serve de subsídio para o Controle com Retroalimentação *Feedforward* (*Feedback-Feedforward Controller* - FFC), que rastreia esses parâmetros nos seus valores desejados, forçando o conversor a operar na busca destes. O WECS simulado utiliza um gerador PMSG associado a um conversor *back-to-back* para a conexão na rede elétrica. De forma a validar as respostas dinâmicas do sistema, foram realizadas simulações comparado este controle com outros dois tipos amplamente utilizados na literatura, o controlador PI e a Gaussiana Quadrática Linear (*Linear Quadratic Gaussian* - LQG). Por fim, os resultados obtidos validam a robustez do EKF associado ao FFC.

Mousa, Youssef e Mohamed (2020) realizam uma concisa revisão dos mais diversos algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência aplicado no WECS, descrevendo em linhas gerais as topologias utilizadas. Conforme a literatura recente, os métodos de MPPT podem ser classificados em quatro tipos: IPC, DPC, Híbrido e Inteligentes. Os autores também realizam uma descrição aprofundada dos algoritmos de P&O, devido sua crescente aplicação nos últimos anos. Por isso, estes métodos foram subclassificados em convencionais e modificados. Os convencionais podem ter o tamanho do passo fixo ou ajustável. Já os modificados operam com função objetivo genérica, dividindo a curva de potência, com técnicas de otimização e os híbridos. Gráficos realizados neste trabalho mostram que 48% dos pesquisadores preferem utilizar tipos adaptativos de P&O, sendo o P&O híbrido, com 2%, um campo de pesquisa promissor para trabalhos futuros.

Em Mousa *et al.* (2021) é proposto um algoritmo robusto e inteligente baseado no princípio do método P&O, chamado de (*Intelligent and Robust Perturb and Observe* - IR-PO). Este reduz a área de busca do MPP baseando-se no valor da velocidade hipotético do gerador, calculado por meio da estimação da velocidade do vento. Um tamanho de passo adaptativo grande será utilizado nas situações no qual o rastreamento esteja abaixo da velocidade ótima hipotética. Caso contrário, tamanhos pequenos de perturbação serão aplicados. Assim, este método além de chegar rapidamente no ponto de máximo, apresenta baixa oscilação em torno do mesmo. Para validar a eficácia do algoritmo proposto foram realizadas simulações comparando o IR-PO com vários outros métodos de MPPT. Os resultados mostram que o IR-

PO apresentou os menores tempos de acomodação no MPPT, como também a maior eficiência dentre todos com 91,53 %.

Assim, o P&O pode ser subclassificado como convencional passo fixo e modificado passo variável. Dentro deste último são destacados os métodos modificados, adaptativos e os híbridos (MOUSA, YOUSSEF e MOHAMED, 2019b). Os métodos modificados foram utilizados de início para substituir o P&O convencional, visando melhorar a convergência e eficiência do mesmo, aplicando técnicas de rastreamento avançadas. Como exemplo da mudança de rastreamento tem-se: a divisão da curva de potência em vários setores; utilização de funções objetivas genéricas por meio de sintetizações de curvas; e a aplicação de técnicas de otimização.

Os algoritmos adaptativos são usados para reduzir a influência da inércia dos sistemas eólicos, aplicando perturbações adaptadas para o ponto de operação que se encontra o rastreamento. O tamanho do passo é reduzido continuamente até se aproximar de zero. Ao atingir essa situação, o sistema se estabelece exatamente no ponto de máxima potência. Tal estratégia soluciona o problema do *Tradeoff* eficiência versus velocidade do P&O convencional.

Os métodos híbridos destinam-se a desenvolver algoritmos altamente eficazes, associando características de vários métodos de rastreamento, em conjunto com o P&O convencional, modificado ou adaptativo. Isto permite fornecer perturbações distintas, pois depende de qual parte do método esteja sendo usado no momento atual da busca. Estes detalhes permitem um melhor rastreamento da máxima potência. Trata-se de uma linha de algoritmos ainda pouco explorada, com uma grande margem de desenvolvimento.

Neste sentido, visando contribuir com o desenvolvimento de técnicas mais robustas e eficientes para a extração da máxima potência dos sistemas eólicos, o método do controle proposto neste trabalho pode ser classificado dentro desta área pouco estudada, sendo chamado de P&O híbrido (P&O-H). Com isso, os autores visam estimular novas estratégias com esse perfil de rastreamento.

Diante do que foi descrito, os métodos de MPPT aplicados e proposto neste trabalho são detalhados a seguir, visando realizar uma melhor explicação das suas características de operação.

3.2 Métodos de MPPT utilizados como comparação no trabalho

3.2.1 Controle de torque ótimo (OTC)

O objetivo deste método é aproximar o conjugado eletromecânico do gerador (T_e)

ao valor de um conjugado de referência (T_e^*) para uma velocidade específica do vento, associado ao ponto de operação para a extração máxima de potência do sistema, como mostra a Figura 10. Para isso, o WECS deve operar próximo ao seu ponto de λ_{opt} , (YIN *et al.*, 2016). Com isso, se o rotor estiver operando em λ_{opt} , ele também estará em $C_{p_{opt}}$. A potência mecânica por ser expressa por meio destas duas constantes que dependem das características da turbina, descrita na equação (ABDULLAH *et al.*, 2012):

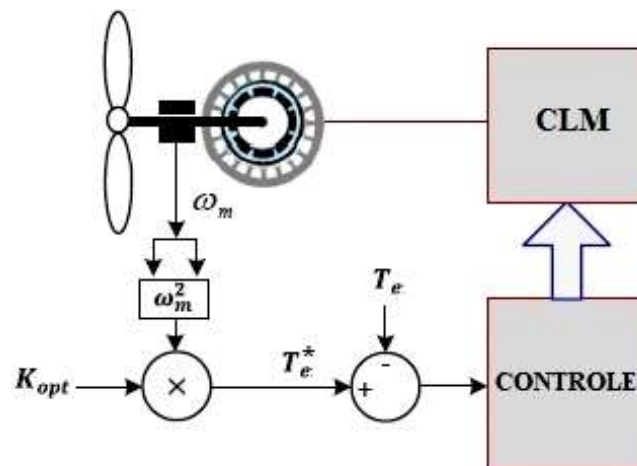
$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{\omega_m^3}{\lambda_{opt}^3} C_{p_{opt}} = K_{opt} \cdot \omega_m^3 \quad (18)$$

K_{opt} é obtido por meio de parâmetros previamente conhecidos da turbina, que independem da velocidade do vento. Com isso, o conjugado de referência do gerador pode ser dado por (ABDULLAH *et al.*, 2012):

$$T_e^* = K_{opt} \cdot \omega_m^2 \quad (19)$$

onde T_e^* é o conjugado de referência imposto ao sistema de conversão.

Figura 10 - Diagrama de blocos OTC



Fonte: Adaptado de Mousa *et al.* (2020).

Este conjugado de referência é comparado com o conjugado instantâneo do gerador. O erro gerado será modificado por um controlador proporcional integral de modo a fornecer a corrente de referência de eixo em quadratura (i_q^*) para o controle do conversor (DUARTE, 2016):

$$i_q^* = \frac{4T_e}{3N\lambda_m} \quad (20)$$

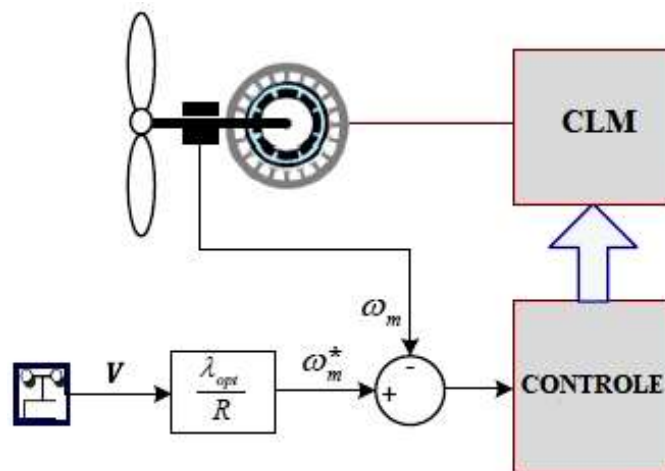
3.2.2 Relação de velocidade de ponta (TSR)

Este método de controle regula a velocidade de rotação da turbina a fim de manter o λ em um valor ótimo. Com isso, a energia extraída da turbina terá seu valor máximo. Ao comparar a velocidade de rotação da turbina (ω_m) com um valor de velocidade de referência (ω_m^*), o erro é enviado ao PI, forçando a turbina a alterar sua rotação, reduzindo o erro, como ilustrado na Figura 11. A velocidade de referência imposta ao WECS será dada por (ABDULLAH *et al.*, 2012):

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (21)$$

sendo ω_m^* a velocidade mecânica de referência da turbina (rad/s).

Figura 11 - Diagrama de blocos TSR



Fonte: Adaptado de Mousa *et al.* (2020).

Independentemente da velocidade do vento, λ_{opt} será constante, pois depende apenas dos parâmetros da turbina, que devem ser conhecidos. Também, este método exige a medição da velocidade do vento, impactando em custos de instalação e manutenção do sistema, principalmente de baixa potência (MEKALATHUR *et al.*, 2018).

3.2.3 Perturbe e observe de passo variável (P&O-PV)

Os métodos do tipo P&O são algoritmos amplamente utilizados em sistemas eólicos

para determinar o ponto de máxima potência. Apresentam vantagens como: não necessidade de medição do vento e fácil implementação. Baseiam-se na perturbação de uma variável de controle em pequenos passos e na observação das alterações na função objetivo (KAZMI *et al.*, 2011; MEKALATHUR *et al.*, 2018).

Escolher um tamanho de passo não é uma tarefa fácil, visto que isso impacta diretamente na eficiência do método. Uma perturbação grande pode permitir ao sistema chegar de forma rápida ao seu ponto de máximo, mas também pode causar oscilações em torno deste pico. Já um passo menor, reduz as perturbações, mas pode diminuir significativamente a velocidade de rastreamento do ponto de máximo (ABDULLAH *et al.*, 2012; BILLEL *et al.*, 2015). Ambas situações acabam reduzindo a eficiência do mesmo, impactando na geração de potência elétrica.

Diante disso, pretendendo melhorar a eficiência do algoritmo P&O, este trabalho analisa a implementação de um método iterativo de passo variável, visando contribuir com a extração de potência do WECS. Para isso, o algoritmo proposto em (THONGAM e OUHROUCHE, 2011), foi simulado e comparado com os outros métodos. Na Figura 12 está detalhado o fluxograma de operação do mesmo.

Este método de MPPT gera como resposta de saída um valor de velocidade mecânica de referência (ω_m) para a malha de velocidade do conversor do lado da máquina, usando informações sobre a magnitude e a mudança de direção da potência elétrica (P_e). Esta potência é medida, e se a diferença entre seus valores nos instantes de amostragem atuais e anteriores estiverem dentro de um limite de potência especificado, nenhuma ação é tomada. Entretanto, se a diferença estiver fora dessa faixa, incrementos na velocidade de referência são necessárias para se rastrear o ponto de máxima potência. A magnitude do incremento na velocidade de referência do sistema é calculada pela equação (THONGAM e OUHROUCHE, 2011):

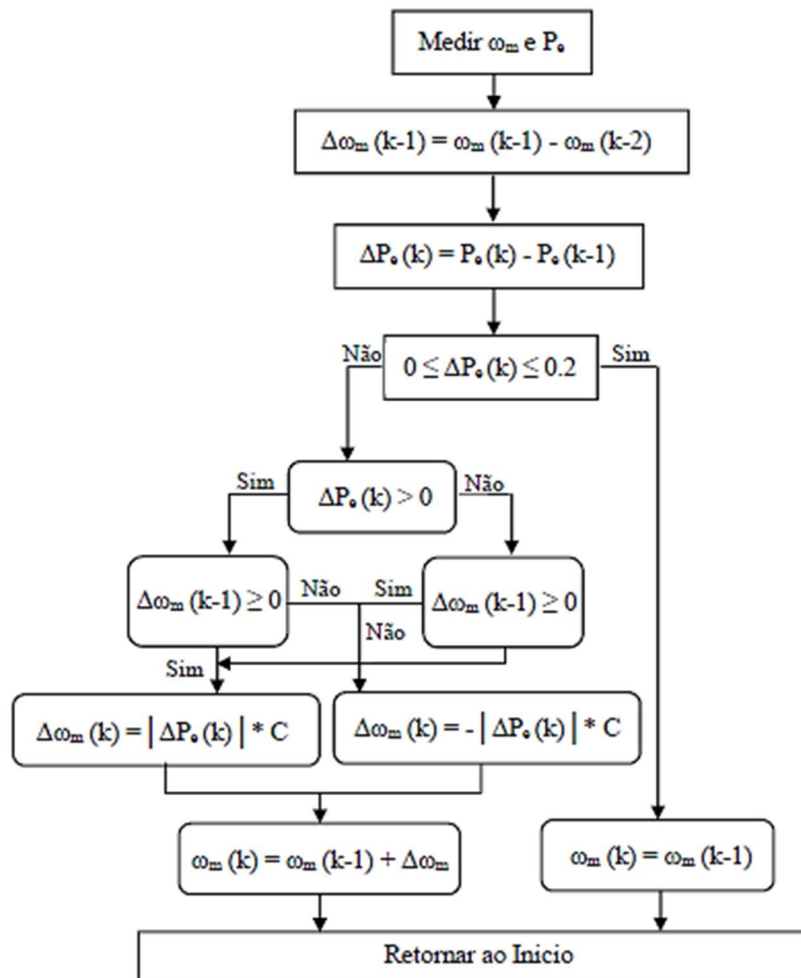
$$\Delta \omega_{m(k)} = |\Delta P_{e(k)}| \cdot C \quad (22)$$

onde C é uma constante empírica que auxilia na convergência do método e tem valor igual à $8 \cdot 10^{-5}$, $\Delta \omega_m$ é a variação de velocidade mecânica (rad/s) e ΔP_e a variação da potência elétrica (W).

Se a potência e a velocidade, juntas, tiverem variações positivas ou negativas, um acréscimo será imposto na velocidade. Caso contrário, deverá ser um decréscimo. Assim,

durante o rastreamento do ponto de máximo, esse produto mencionado na equação (18) diminui lentamente, se aproximando de zero quando o pico é encontrado. Portanto, as perturbações na velocidade, responsáveis pela perda significativa de eficiência na extração de potência são atenuadas, visto que a velocidade não irá ter grandes oscilações quando estiver próximo ao seu ponto ideal. Por este motivo, o P&O de passo variável é mais eficiente, quando comparado ao método convencional.

Figura 12 - Fluxograma do P&O-PV



Fonte: Adaptado de Thongam e Ouhrouche (2011).

3.2.4 Perturbe e observe multisetor de passo variável (P&O-VS)

Em Youssef *et al.* (2018) foi proposto um algoritmo de P&O multisetorial de passo variável, chamado P&O-VS, visando melhorar os problemas do P&O convencional. Neste método, foi sintetizada uma nova curva que divide a curva de potência mecânica versus velocidade em quatro partes: setor 1, setor 2A, setor 2B e setor 3, como ilustrado na Figura 13.

Essa nova curva é descrita pela equação (YOUSSEF *et al.*, 2018):

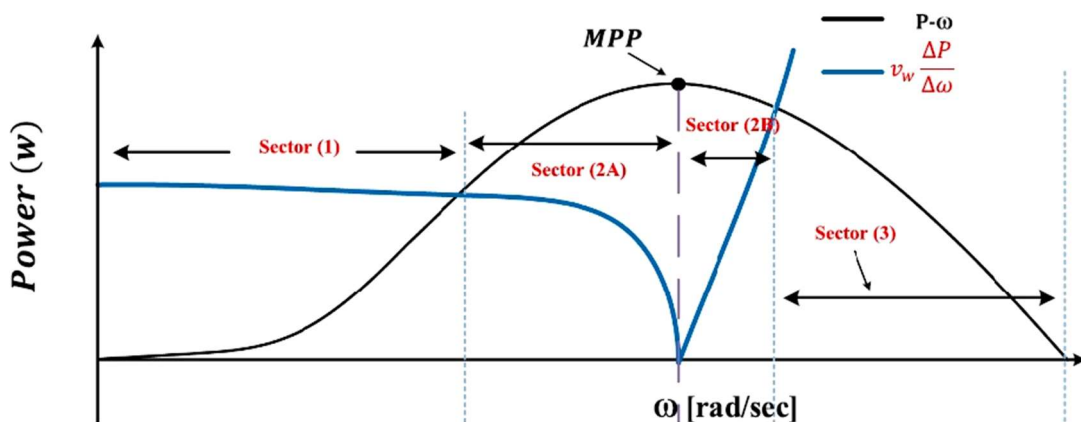
$$V \cdot \frac{\Delta P_m}{\Delta \omega_m} \quad (23)$$

onde ΔP_m é a variação da potência mecânica (W).

Desta forma, com base no setor de onde o ponto de operação está localizado, tamanhos de passo distintos são aplicados. Nas situações mais próximas ao máximo ponto de potência, regiões 2A e 2B, serão aplicados valores de perturbações pequenos, evitando assim as oscilações em torno do ponto de máxima potência. Quando o rastreamento estiver longe de atingir o seu ponto máximo, regiões 1 e 3, grandes valores de perturbação são usados, acelerando a convergência do método. O fluxograma do algoritmo está ilustrado na Figura 14. O sinal da diferença entre ambas as curvas será considerado para realizar os incrementos ou decrementos destas perturbações na velocidade de referência disponibilizada para a malha externa de velocidade. Os valores empíricos dos passos $\Delta \omega_1$ e $\Delta \omega_2$ neste trabalho são respectivamente 0,0001 e 0,08.

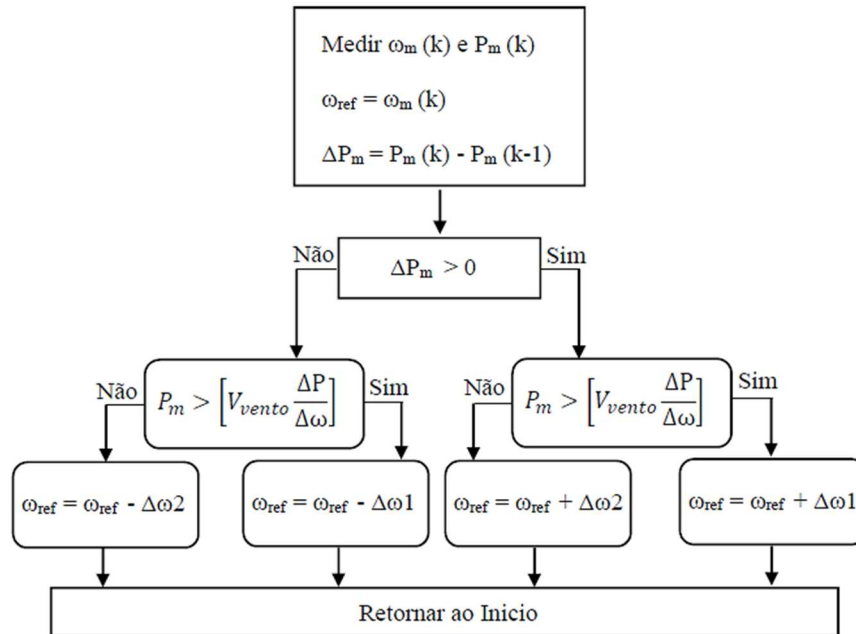
Um dos grandes problemas desta proposta está na necessidade da medição da velocidade do vento para o cálculo da curva sintetizada, conforme equação (23). Também, necessita da medição da potência mecânica (P_m) para poder identificar o sentido de convergência do rastreamento, o que eleva os custos da instalação. Vale salientar, que o mesmo, torna-se mais eficiente que o P&O convencional devido a escolha variável do tamanho da perturbação.

Figura 13 - Divisão da curva P- ω



Fonte: Adaptado de Youssef *et al.* (2018).

Figura 14 - Fluxograma do P&O-VS



Fonte: Adaptado de Youssef *et al.* (2018).

3.2.5 Perturbe e observe adaptativo robusto (P&O-RA)

Em Mousa, Youssef e Mohamed (2019a) foi proposto um algoritmo de P&O adaptativo robusto, chamado P&O-RA. Este utiliza a velocidade ideal do gerador para gerar o tamanho do passo adaptativo. Essa perturbação na velocidade depende da estimacão do vento, como também do conhecimento do valor de λ_{opt} do sistema. Neste trabalho será usado a medio direta do vento para calcular o mesmo. Assim, por meio da equao (21), a velocidade ideal será obtida. Na Figura 15 está exemplificado o fluxograma do método.

A razão adaptativa imposta pelo método para rastrear o ponto de máxima potência  descrita por (MOUSA, YOUSSEF e MOHAMED, 2019a):

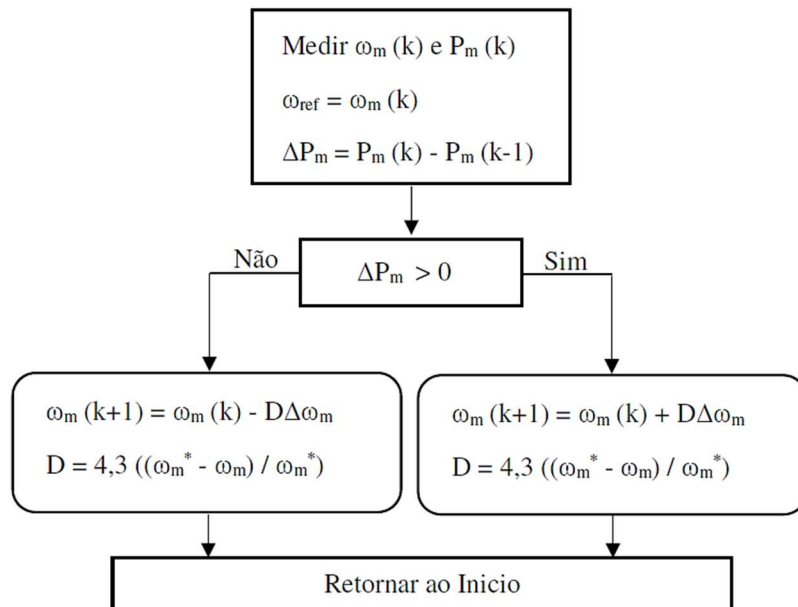
$$D = M \left(\frac{\omega_m^* - \omega_m}{\omega_m^*} \right) \quad (24)$$

sendo M  uma constante empírica de precisão da perturbao do controle com valor neste trabalho de 4,3.

Portanto, uma comparao entre a distância da velocidade instantânea e ideal  feita, resultando em uma razão adaptativa especifica para cada de ponto de operao do rastreamento. Quanto mais distante a medio instantânea estiver do valor ideal, maior será o passo do rastreamento. Caso contrário, um valor pequeno será aplicado. A potência mecânica (P_m) do

sistema será analisada visando identificar a direção do passo imposto. Este controle apresenta baixas oscilações entorno do ponto de máxima, associado com uma rápida convergência.

Figura 15 - Fluxograma do P&O-RA



Fonte: Adaptado de Mousa, Youssef e Mohamed (2019a).

3.2.6 Controle adaptativo (CA)

O algoritmo adaptativo proposto em Lijun, Yongdong e Ronald (2013) e modificado em Mekalathur *et al.* (2018), rastreia o ponto de máxima potência do sistema, sem a necessidade de sensores para a medição do vento, reduzindo assim os custos de instalação. Também, não requer o conhecimento prévio dos parâmetros da turbina eólica, obtidos por meio de testes empíricos (LIJUN, YONGDONG e RONALD, 2013). Sua rotina de execução alterna em três modos operacionais, baseados na detecção da alteração da potência elétrica, como descrito no fluxograma da Figura 16. Isto permite um rastreamento da potência perfeitamente adaptável as mudanças do ambiente (MEKALATHUR *et al.*, 2018).

O primeiro modo de operação está relacionado a um valor de velocidade do vento constante. Assim, se o rastreamento estiver longe do MPP, um método P&O com passo variável será aplicado, aumentando a velocidade de rastreo. Essa situação é ilustrada na equação (LIJUN, YONGDONG e RONALD, 2013; MEKALATHUR *et al.*, 2018):

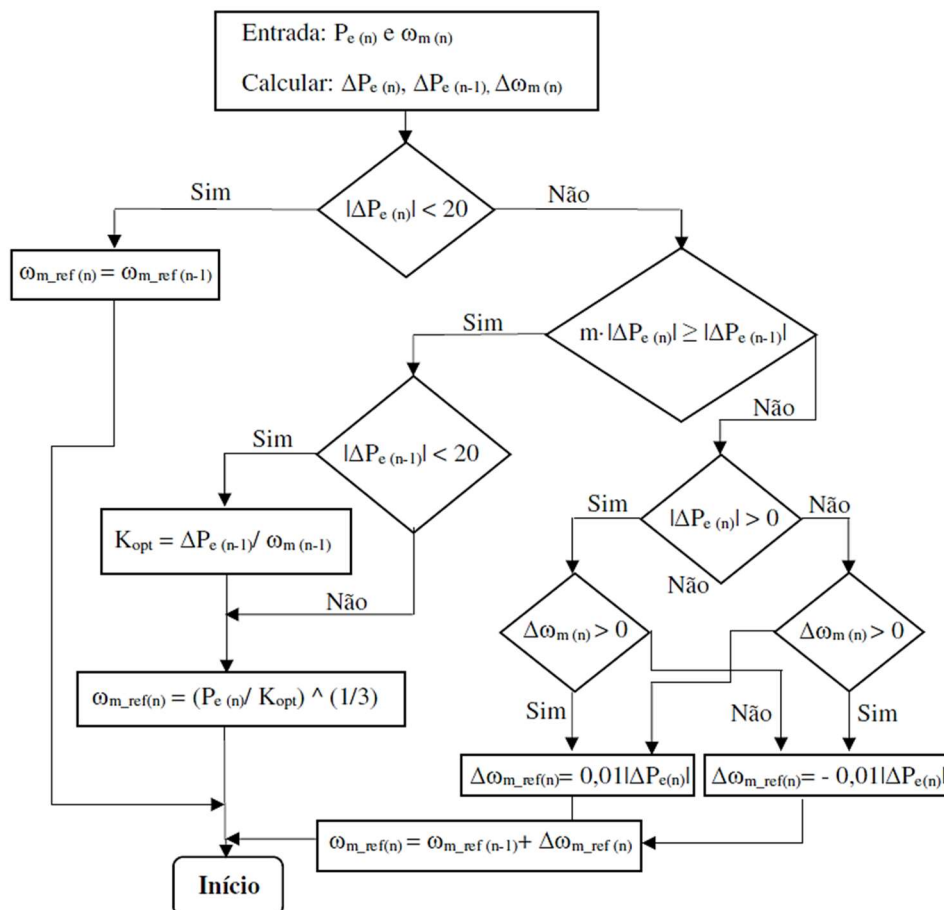
$$\Delta \omega_{m_ref(n)} = 0,01 \cdot |\Delta P_{e(n)}| \quad (25)$$

Onde $\Delta\omega_{m_ref(n)}$ é o tamanho do passo imposto a velocidade do gerador (rad/s) e n é a iteração atual do algoritmo.

O segundo modo de operação verifica se as variações de $\Delta\omega_{m_ref(n)}$ são pequenas, mantendo o sentido de rastreamento inalterado. Assim, quando $(\Delta P_{e(n)} < 20)$, a velocidade de referência será mantida no valor da interação anterior ($n-1$).

O terceiro modo verifica se houve uma mudança significativa na velocidade do vento. Neste caso, o algoritmo deve evitar oscilações devido ao tamanho do passo variável imposto pelo modo 1. Assim, uma potência ótima aproximada, conforme (26) (LIJUN, YONGDONG e RONALD, 2013; MEKALATHUR *et al.*, 2018), será aplicada até que não haja mudanças na velocidade do vento. Essa equação é baseada do método PSF, no qual depende da potência ótima mecânica, ilustrada na equação (18).

Figura 16 - Fluxograma do CA



Fonte: Adaptado de Lijun, Yongdong e Ronald (2013).

De forma a garantir que o K_{opt} não dependa da velocidade do vento e nem dos parâmetros da turbina, este valor pode ser descrito pela equação (27) (MEKALATHUR *et al.*,

2018).

$$K_{opt} = \frac{\Delta P_{e(n-1)}}{\omega_{m(n-1)}} \quad (26)$$

Com isso, a detecção da variação do vento ocorre quando $m \cdot \Delta P_{e(n)} \geq \Delta P_{e(n-1)}$. Assim, a velocidade de referência será dada pela equação (28) (LIJUN, YONGDONG e RONALD, 2013; MEKALATHUR *et al.*, 2018). Neste trabalho m é uma constante empírica de valor igual a 1,5.

$$\omega_{m_ref(n)} = \sqrt[3]{\frac{P_{e(n)}}{K_{opt}}} \quad (27)$$

3.3 Perturbe e observe híbrido (P&O-H)

Visando aumentar a eficiência e a velocidade de convergência do algoritmo que utiliza o controle adaptativo, este trabalho realizou alterações no método de Lijun, Yongdong e Ronald (2013), como demonstrado no fluxograma da Figura 17. De forma a garantir que K_{opt} continue não dependendo de parâmetros da turbina e de valores medidos, a equação (26) será reescrito pela equação (28), passando agora a ser estimado pela potência elétrica (P_e) e velocidade mecânica do gerador (ω_m), produzidos na iteração atual do método. Essa equação foi obtida do método PSF para se calcular o valor de K_{opt} sem a necessidade de parâmetros do sistema.

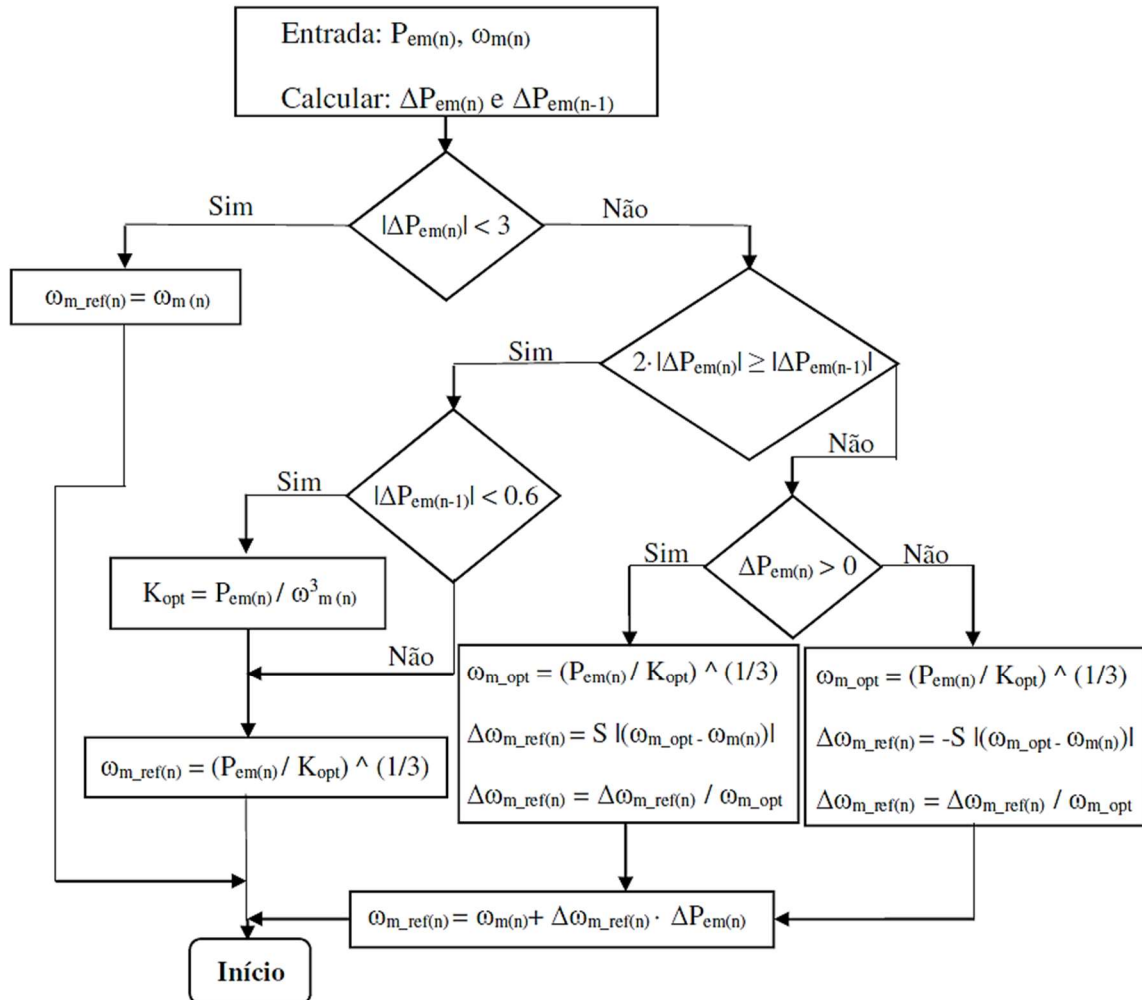
$$K_{opt} = \frac{P_{e(n)}}{\omega_{m(n)}^3} \quad (28)$$

Também, visando mitigar as oscilações na velocidade ocasionada pelas perturbações impostas na situação de vento constante pelo P&O, o método proposto irá utilizar a ideia aplicada em Mousa, Youssef e Mohamed (2019a). Assim, não será preciso medição ou estimativa da velocidade do vento para o cálculo da velocidade mecânica ótima (ω_{m_opt}), muito menos a necessidade de qualquer parâmetro empírico do sistema.

Essa velocidade ótima será estimada pela equação (29), utilizando o K_{opt} calculado na situação de variações de vento pela equação oriunda do PSF, junto da potência elétrica ($P_{e(n)}$) da iteração atual.

$$\omega_{m_opt} = \sqrt[3]{\frac{P_{e(n)}}{K_{opt}}} \quad (29)$$

Figura 17 - Fluxograma do P&O-H



Fonte: O próprio autor.

Portanto, a perturbação imposta na velocidade irá depender da razão adaptativa da equação (30), fornecendo valores adequados para cada ponto de operação do rastreamento. Quanto mais distante a velocidade atual do gerador ($\omega_{m(n)}$) estiver da velocidade ótima estimada (ω_{m_opt}), maior será o passo. Caso contrário, um valor pequeno será imposto, ocasionando baixa oscilação quando o sistema atingir seu ponto de máximo:

$$\Delta\omega_{m_ref(n)} = S \cdot \left(\frac{|\omega_{m_opt} - \omega_{m(n)}|}{\omega_{m_opt}} \right) \quad (30)$$

onde S é uma constante empírica de precisão do tamanho do passo do método, tendo seu valor

neste trabalho igual à 10^{-9} . O sinal da variação da potência elétrica será considerado a fim de realizar a adição ou subtração desta perturbação na velocidade de referência do sistema.

Assim, o método proposto neste trabalho pode ser classificado, conforme revisão bibliográfica, como um algoritmo P&O híbrido, devido à junção de várias características de técnicas de MPPT, visando aumentar a eficiência da extração de potência elétrica, o que acaba gerando também um tamanho de passo híbrido.

Vale ressaltar que este algoritmo não requer o conhecimento dos parâmetros do sistema e não precisa de medição ou estimativa da velocidade do vento para a sua implementação. Também, realiza a busca do ponto de máxima potência por meio da mudança de magnitude da potência elétrica, o que o torna um rastreador de potência elétrica máxima (MEPT). Isso faz que o mesmo maximize a produção da potência elétrica ao invés da potência mecânica. Todos estes pontos tornam o P&O-H perfeitamente aplicável em sistemas de baixa potência.

3.4 Considerações parciais

Nesta seção foi realizada uma vasta revisão bibliográfica sobre métodos de MPPT, sendo feita uma descrição das características de operação de cada um destes. Com isso, foi identificado uma linha de pesquisa ainda pouco explorada sobre o P&O, apresentando-se como uma ótima alternativa de aumento da eficiência desta classe.

Também, foi apresentando o MPPT proposto neste trabalho. Trata-se de um algoritmo de rastreamento que mescla características de convergência de outros métodos, visando melhor a eficiência da produção de potência ativa e a velocidade de rastreamento do MPP do mesmo, o P&O-H.

Assim, o P&O-H acaba adquirindo um tamanho de passo adaptativo, pelo fato do mesmo conseguir detectar mudanças nas condições do ambiente e alternar entre seus modos de operação, modificando a forma de rastreamento. Tal situação irá possibilitar o método tornar-se uma poderosa ferramenta de extração de potência.

No próximo capítulo será abordado os métodos de mitigação do LVRT abordado e proposto neste trabalho.

4 MÉTODOS DE LVRT

Neste capítulo será realizada uma descrição dos métodos de mitigação das perturbações oriundas da rede elétrica, conhecido na literatura com capacidade de suportar afundamentos de tensão (LVRT). Também, este trabalho propõe a utilização de um controle de baixo custo, contribuindo com o desenvolvimento de técnicas mais eficientes visando a estabilidade do WECS e da rede elétrica durante os afundamentos de tensão, o LVRT-H.

4.1 Capacidade de suportar afundamentos de tensão (LVRT)

Diversos trabalhos na literatura abordam WECS associados a PMSG e conectados na rede elétrica por meio de conversores *back-to-back*. Tal topologia também é utilizada em análise de afundamentos de tensão, simétricos e assimétricos, visando validar técnicas de mitigação destas perturbações em certos períodos de tempo. Os seguintes trabalhos aqui discutidos abordam as várias formas de controle de mitigação do LVRT.

No trabalho de Sim *et al.* (2012) é apresentado uma técnica de controle para sistemas eólicos compostos pelo PMSG e por conversores *back-to-back* que se baseia no PLL especial. Assim, para afundamentos de tensão distorcida e desequilibrada, a fase da tensão da rede será detectada por meio da sua sequência positiva. Também, é feito uma correção da referência da corrente visando reduzir os harmônicos das correntes ativa e reativa que serão injetadas na rede usando um filtro passa baixa de segunda ordem. As simulações realizadas comprovam que o método proposto é simples e de fácil realização, como também apresenta bom rendimento perante tensões de rede distorcidas e desequilibradas.

Em Alepuz *et al.* (2013) é proposto um controle para o conversor *back-to-back* com ponto de neutro visando atender aos requisitos dos afundamentos de tensão simétricos e assimétricos, conhecido por LVRT. Para isso, durante a perturbação, o controle do lado do PMSG opera visando armazenar o excedente de energia ativa na inércia do sistema turbina - gerador, enquanto a rede deve absorver a energia reativa vinda do link CC. O controle implementado neste trabalho permite que, durante uma falta na rede, a tensão do link CC seja rastreada agora pelo conversor da máquina, desativando momentaneamente o MPPT, e deixando a velocidade do gerador livre. Já o conversor da rede deve atender aos requisitos de potência ativa e reativa instantânea imposta pelas normas dos afundamentos de tensão. As simulações realizadas no trabalho validam o controle proposto. Os afundamentos aplicados foram de curta duração (60 ms).

Em Ivanqui (2014) é proposto um controle baseado na teoria da potência instantânea para gerenciar um sistema eólico que utiliza um PMSG de baixa potência (3 KW). Para a conexão do mesmo a rede elétrica, um conversor *back-to-back* é aplicado. Nesse trabalho o controle do conversor do lado da máquina opera de forma a manter a tensão do link CC constante, portanto, o valor de referência da malha de corrente é imposto pela potência ativa (P) e reativa (Q). Visando um melhor controle do conjugado do gerador, Q é ajustada para zero. Já P será uma composição da potência medida da rede elétrica com a fornecida pela malha de tensão. Com isso, a estabilidade do barramento CC é garantida frente a afundamentos simétricos e assimétricos na rede. O conversor do lado da rede irá garantir que a potência ativa e reativa fornecida pelo gerador seja entregue a rede elétrica, para tal, o controle da malha de corrente de eixo direto será fornecida pela potência gerada na turbina eólica. Para garantir um fator de potência unitário, a malha de corrente de eixo em quadratura será zero. De forma a validar o controle, foram realizadas simulações variando o vento e aplicando afundamentos de tensão.

Já em Tripathi, Tiwari e Singh (2015b) é utilizada uma abordagem de otimização nomeada: módulo ótimo e simétrico ótimo, para projetar os controladores PI que serão aplicados nas malhas de controle dos conversores do lado da rede e da máquina. Para tal, é usado um WECS de baixa potência (7,5 KW) associada ao PMSG e um conversor *back-to-back* para conexão na rede. A fim de validar o controle dimensionado, este trabalho realiza simulações variando o vento, e também aplica afundamentos simétricos e assimétricos de curta duração (60 ms) na rede. Durante o LVRT, a estratégia de controle do conversor da máquina é alterada, suspendendo temporariamente o algoritmo TSR por um valor de conjugado específico que depende de dois parâmetros: potência da rede e velocidade do gerador. Este conjugado irá permitir com que a potência ativa excedente seja armazenada na inércia da turbina – gerador, em outras palavras, a velocidade do sistema irá aumentar devido à incompatibilidade de conjugados. Já o controle do conversor da rede deve operar limitando a potência ativa absorvida, maximizando a potência reativa vinda do link CC. As simulações aplicadas validam o controle proposto.

Nasiri, Milimonfared e Fathi (2015) realizam uma vasta revisão e comparação de diversos métodos visando aumentar a capacidade de suportar afundamentos de tensão em turbinas eólicas que utilizam PMSG. Os principais tipos empregados na literatura são os baseados em dispositivos externos, que podem aumentar os custos das instalações destes WECS, e o controle modificado. Este último, além de evitar custos com a instalação de dispositivos externos, são altamente eficientes, principalmente quando aplicados em

conversores *back-to-back*, conforme simulações realizadas. Dentre os vários tipos, podem ser citados como controle modificado: controle do ângulo de *pitch* e a modificação dos controles dos conversores *back-to-back*. O trabalho também propõe um controle modificado onde a energia gerada pelo PMSG é controlada pelo eixo direto do conversor da rede. A energia reativa injetada continua a ser implementada pelo eixo em quadratura, conforme os requisitos LVRT da rede. Desta forma, a tensão do link CC será regulada pela malha de eixo em quadratura do conversor do lado da máquina. Já a de eixo direto é definida como zero. Em situações de falhas na rede, o gerador pode detectar a queda de tensão e diminuir sua potência gerada. Por fim, simulações de faltas simétricas e assimétricas são aplicadas em vários métodos de controle, onde o método proposto pelo trabalho apresentou uma alta eficiência.

Em Gajewski e Pienkowski (2018) é descrito um controle avançado de uma turbina eólica de velocidade variável que utiliza PMSG e conversor *back-to-back*. Assim, na ocorrência de afundamentos de tensão na rede, simétricos e assimétricos, os controladores do lado da rede e da máquina devem atender aos requisitos do LVRT, armazenando a potência excedente na inércia do conjunto turbina-gerador. Para validar a eficiência do esquema proposto foi montada uma bancada experimental. Em condições normais, o conversor da máquina opera rastreando o ponto de máxima potência do gerador, por meio do algoritmo TSR. Já o da rede controla o nível de tensão do barramento CC e a potência ativa e reativa injetada. Durante os afundamentos a prioridade do conversor da máquina é alterada. O TSR é suspenso temporariamente, e a malha de corrente de eixo em quadratura passa a monitorar a tensão do barramento CC. No lado da rede, o conversor deve atender aos requisitos do LVRT, absorvendo energia reativa do link CC e restringindo a potência ativa. Por fim, os resultados das simulações da bancada experimental confirmam a viabilidade do controle.

Em Tripathi, Tiwari e Singh (2019), foi mantido o controle proposto e a topologia usada em Tripathi, Tiwari e Singh (2015b), sendo realizadas comparações com outras estratégias de mitigação dos afundamentos de tensão na rede, aplicando resistores em paralelo ao barramento CC. Além disso, foram utilizados dois tipos de algoritmos de MPPT: o TSR e o OTC. Com as simulações, foi elaborada uma tabela onde é possível, dentre outros pontos, analisar os impactos do MPPT em conjunto com essa técnica de minimizar as perturbações nos seguintes parâmetros: aumento de velocidade do sistema, aumento da tensão do link CC, geração de potência ativa, potência reativa entregue a rede e etc. Com isso, é possível analisar o impacto de cada método de controle do WECS durante o LVRT.

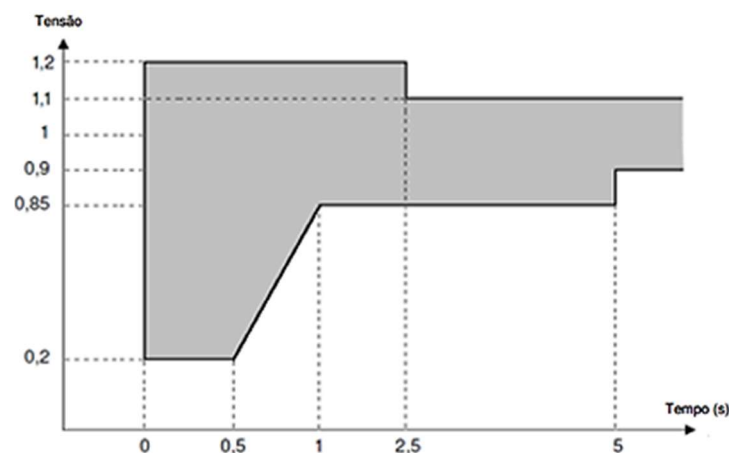
Ribeiro (2020) avalia os requisitos e o comportamento dinâmico de parques eólicos

mistos, frente a afundamentos de tensão na rede elétrica. A curva de suportabilidade a afundamentos de tensão é o principal requisito da regulamentação para a conexão à rede elétrica. Os WECS de velocidade variável que utilizam PMSG operam com conversores *back-to-back* para a conexão na rede, permitindo um desacoplamento entre o sistema de geração e a mesma. Em operação normal, o conversor do lado do PMSG opera controlando a velocidade de rotação da turbina, sendo nortado por um MPPT. Já o conversor do lado da rede tem por finalidade manter o nível de tensão do barramento CC constante. Para isso, o mesmo controla as potências ativas e reativas absorvidas pela rede, controlando as malhas de corrente de eixo direto e em quadratura, respectivamente. As simulações realizadas no trabalho mostram que o WECS composto por PMSG apresenta um comportamento superior ao DFIG quando considerado a injeção de potência ativa durante os afundamentos. Portanto, são mais robustos para essas situações.

4.2 LVRT híbrido (LVRT-H)

Na Figura 18, está ilustrada a curva de suportabilidade exigida pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), sendo este o requisito mínimo para a conexão na rede básica. O atendimento desta curva LVRT irá permitir que os geradores eólicos fiquem conectados ao sistema elétrico durante o período de afundamento, dando suporte para a estabilidade da mesma. Caso o nível de tensão no ponto de conexão fique abaixo da curva referida, será indicado a desconexão do sistema. Tal ponto é descrito no submódulo 3.6 do ONS (ONS, 2019).

Figura 18 - Curva de suportabilidade de afundamentos de tensão



Fonte: ONS (2019).

Na ocorrência de faltas, o operador nacional exige, dentre alguns pontos, que seja

injetado potência reativa na rede elétrica, contribuindo com estabilidade e com a recomposição dos valores nominais do sistema elétrico, após a perturbação. Também, é necessário manter o nível da tensão do barramento CC constante, visto que este é um requisito que pode acarretar na desconexão do sistema eólico da rede elétrica (ONS,2019).

Assim, visando contribuir com tais situações, este trabalho propõe aplicar o controle utilizado em Tripathi, Tiwari e Singh (2019), com uma modificação implementada neste trabalho no que se refere à injeção de potência ativa e reativa na rede, visto que adequações devem ser realizadas para o atendimento da curva de suportabilidade do ONS e das normas vigentes, sendo denominado de LVRT Híbrido (LVRT-H).

Em condições normais de operação do sistema eólico, o CLM irá gerenciar o rastreamento do ponto de máxima potência por meio dos algoritmos de MPPT descritos neste trabalho, enquanto o CLR deve manter o nível de tensão do link CC constante, operando com um fator de potência unitário.

Na presença dos afundamentos de tensão simétricos e assimétricos, esse controle é modificado, visando atender a demanda do LVRT. Na maioria dos casos é aplicado o método LVRT-BC, mas este necessita da instalação de dispositivos externos para a dissipação da potência gerada pelo WECS, elevando os custos de sua implantação. Como alternativa de baixo custo, surge o método proposto neste trabalho, pelo fato do mesmo não requer a instalação de equipamentos externos para seu funcionamento.

No LVRT-H, durante os afundamentos, no lado da máquina o rastreamento da máxima potência é suspenso temporariamente, sendo substituído por um valor de conjugado de referência que rastreia a potência instantânea da rede elétrica, conforme equação (31) (TRIPATHI, TIWARI e SINGH, 2019; TRIPATHI, TIWARI e SINGH, 2015b). Assim, a velocidade do gerador fica livre para armazenar a energia ativa produzida antes dos afundamentos. A potência agora gerada pelo novo conjugado ao longo do afundamento será transferida para o link CC, mantendo o mesmo constante, e o excedente absorvido pela rede elétrica. Após a transferência inicial de energia para o barramento CC, o WECS irá manter a potência gerada em zero por grande parte da ocorrência da perturbação, deixando o conversor da rede livre para atender as demandas do LVRT (TRIPATHI, TIWARI e SINGH, 2015b).

$$T_e^* = \frac{|(V_a \cdot I_a) + (V_b \cdot I_b) + (V_c \cdot I_c)|}{\omega_m} \quad (31)$$

No lado da rede, a estratégia durante os afundamentos é deixar o conversor livre para atender a demanda de potência reativa de acordo com o nível do afundamento, conforme as normas (E.ON NETZ, 2006) e (ONS, 2019). A potência ativa será injetada na rede elétrica somente nos casos onde existir excedente do mesmo no barramento CC. Tal situação será obtida apenas nos instantes iniciais do intervalo do afundamento, visto que o PMSG irá passar a maior parte do tempo sem produzir potência ativa, obedecendo o novo conjugado imposto pela equação (31).

A conformidade do fornecimento de potência reativa deve ser iniciada quando a redução na tensão da rede for menor que 85% do seu valor nominal, conforme submódulo 3.6. Neste trabalho, a potência ativa da rede opera em função do nível da tensão do link CC, fornecendo a corrente de referência para a malha de eixo direto (I_d^*). A potência reativa, controlada pela malha de corrente de eixo em quadratura (I_q), deve atender aos requisitos da equação a seguir (ONS, 2019):

$$i_q^* = \begin{cases} 0, & V_{falta} \geq 0,85 V_{rede} \\ K \cdot \frac{V_{rede} - V_{falta}}{V_{rede}} \cdot I_{rede}, & 0,85 V_{rede} > V_{falta} > 0,5 V_{rede} \\ I_{rede}, & V_{falta} \leq 0,5 V_{rede} \end{cases} \quad (32)$$

onde V_{rede} é o módulo da tensão nominal da rede elétrica obtida por meio do vetor tensão de eixo direto e em quadratura, V_{falta} é o valor da tensão durante a condição de afundamento, I_{rede} é a corrente nominal injetada na rede pelo sistema eólico e K é uma constante referente a inclinação da reta de requisito de injeção de corrente reativa, onde neste trabalho será igual a 2.

4.3 LVRT *braking chopper* (LVRT-BC)

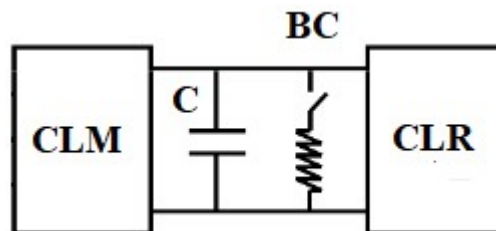
O LVRT-BC consiste em um método baseado no uso de dispositivos externos para dissipação ou armazenamento do excedente de potência presente no link CC do conversor *back-to-back*. A aplicação de bateria tem sido descartado, devido ao aumento dos custos na sua instalação. Como solução, utiliza-se um resistor em paralelo ao capacitor, visando dissipar a potência ativa produzida pelo WECS durante os afundamentos, visto que neste método o MPPT não é suspenso durante as perturbações, permitindo que o CLR opera atendendo a demanda do LVRT (NASIRI, MILIMONFARED e FATHI, 2015).

Este resistor de alta potência é inserido no sistema quando um afundamento de

tensão é detectado na rede elétrica, por meio de um IGBT. A Figura 19 ilustra o local de instalação do mesmo. Após a estabilização dos valores nominais de tensão da rede, estes dispositivos são desconectados, por meio da comutação do transistor. Isso permite que a potência gerada pelo WECS não seja acumulada no capacitor, evitando assim o aumento do nível de tensão do barramento CC a valores não aceitáveis.

Neste trabalho, foi considerado a situação de que toda a potência gerada é dissipada por um resistor de 89Ω , utilizado nas simulações deste trabalho. Isso irá forçar a rede a ter que fornecer um certo valor de potência ativa visando manter o nível de tensão do barramento estável. Já a potência reativa, durante os afundamentos, será controlado pela equação (32), conforme norma regulamentadora (ONS, 2019).

Figura 19 - *Back-to-back* associado ao *braking chopper* (BC)



Fonte: O próprio autor.

4.4 Contribuição do MPPT no auxílio do LVRT

Visando contribuir com técnicas mais eficientes e de baixo custo, esta dissertação realiza uma análise dos métodos de mitigação dos afundamentos de tensão associado aos algoritmos de MPPT aqui abordados, nos quais possuem características distintas, resultando em extração de potências diferentes. Também, de certa maneira, irão contribuir de formas diferentes durante a situação de LVRT.

Tais características interferem em diversos fatores de análise da teoria do controle clássico, como o *overshoot*, tempo de estabilização do sistema e valores médios das ações dos controladores do CLM e CLR. Normalmente, tais situações não são analisadas quando os métodos de MPPT são estudados, muito menos na presença de falhas simétricas e assimétricas, sendo de fundamental importância na estabilidade do WECS e da rede elétrica.

O LVRT-H, proposto neste trabalho, opera substituindo o MPPT durante o período de ocorrência dos afundamento por um valor de conjugado que rastreia a potência da rede. Assim, durante esse intervalo, o PMSG irá apenas produzir potência ativa visando reestabelecer

o valor da tensão nominal do barramento CC, contribuindo assim para que o CLR opere atendendo a demanda de injeção de potência reativa na rede, conforme norma da ONS. Este fato irá ajudar tanto na reinicialização da rede elétrica de forma mais rápida, como também na estabilidade da mesma durante o tempo da ocorrência destas perturbações.

Assim, com a suspensão do MPPT temporariamente e com a injeção da potência ativa na rede apenas em casos esporádicos de recomposição da tensão do barramento CC durante os afundamentos, será possível obter uma redução das ações médias dos controladores do CLM e CLR, visto que os níveis do fluxo de potência vindo da máquina para a rede serão reduzidas drasticamente, contribuindo para uma maior estabilidade do sistema durante o período da perturbação.

Já o LVRT-BC opera de forma distinta. Como o MPPT não é desligado durante o período do afundamento, o controlador do CLM é forçado a agir de forma contínua durante todo a simulação, elevando o valor médio do mesmo. Embora exista um resistor de alta potência necessário para dissipar a potência ativa produzida pelo PMSG evitado que a mesma seja injetada na rede, esta última deverá fornecer a potência ativa necessária para manter o nível do barramento CC constante durante o intervalo da perturbação, o que acaba exigindo uma maior ação dos controladores do CLR. Nota-se assim que ambas as técnicas de mitigação exercem influencias distintas no sistema, principalmente quando associados aos métodos de MPPT.

Os métodos de MPPT listados neste trabalho irão atuar em conjunto com as técnicas de LVRT-H e LVRT-BC, visando identificar ganhos que os diferentes algoritmos possam gerar, seja no controle do conversor da máquina ou da rede elétrica. Outro ponto importante que também deve ser analisado está na máxima oscilação causada ao barramento CC, visto que o mesmo pode causar uma desconexão obrigatória do sistema eólico da rede elétrica.

Diante disso, este trabalho visa investigar de forma mais detalhada como o MPPT escolhido pode contribuir ou não para que o WECS, conectado na rede elétrica, possua uma maior estabilidade de operação, principalmente em condições de falhas no sistema elétrico. Para tal, a ação média dos controles PI do conversor da máquina e da rede serão medidas e analisadas (seção 5.2), no intuito de mostrar que os métodos de rastreamento da máxima potência podem sim contribuir na operação estável do sistema eólico interligado com a rede elétrica e em situações de perturbações de tensão, visto o avanço da penetração desta fonte na matriz energética do país.

4.5 Considerações parciais

Nesta seção foi apresentado um método de mitigação dos afundamentos de tensão proposto neste trabalho, necessário para auxiliar o WECS nos momentos de instabilidade no fornecimento da tensão da rede elétrica, o LVRT-H. Este apresenta vantagens frente ao LVRT-BC pelo seu baixo custo de implementação, visto que dispositivos externos não serão necessários para sua atuação. Também, um paralelo entre os métodos de MPPT e LVRT foi realizado, permitindo identificar as contribuições que cada algoritmo de MPPT podem apresentar. No próximo capítulo será realizado simulações e comentários sobre cada um dos cenários apresentados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de validar todos os pontos abordados nos tópicos anteriores, este trabalho realiza uma série de simulações utilizando os softwares Psim e Matlab, visando detalhar tais afirmações. Para isso, primeiramente, será feita uma análise comparativa da eficiência de extração de potência de todos os métodos de MPPT abordados e proposto: TSR, OTC, CA, P&O-PV, P&O-VS, P&O-RA, P&O-H.

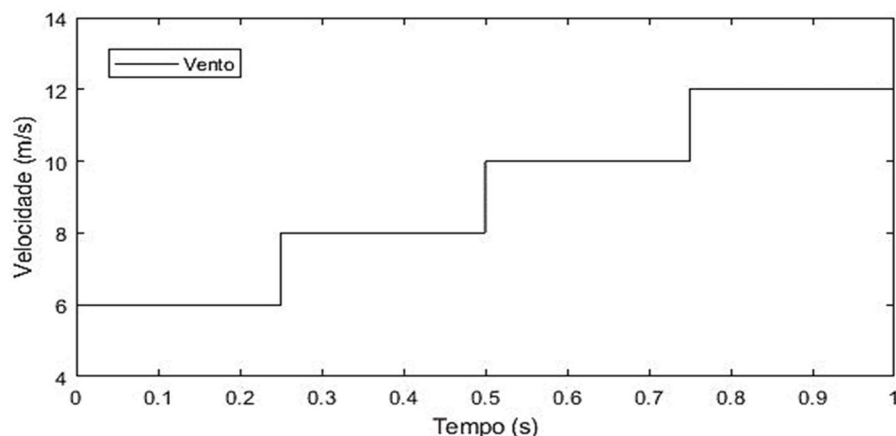
Em seguida, o WECS em conjunto com os quatro melhores algoritmos identificados nas simulações de eficiência, serão submetidos a afundamentos de tensão simétricos e assimétricos provenientes da rede elétrica, onde os mesmos irão operar em conjunto com as técnicas de mitigação destas perturbações: LVRT-H e LVRT-BC, sendo investigado a contribuição que cada um dos métodos de rastreamento escolhidos fornecem para o suporte da estabilidade da rede elétrica e do sistema eólico.

Por fim, a ação média dos controladores PI dos conversores da rede e da máquina serão analisadas, visando identificar quais controles são mais impactados com as técnicas de MPPT e as de mitigação.

5.1 Comparativo da eficiência dos métodos de MPPT estudados

As estratégias de controle proposta e abordadas para o WECS de velocidade variável foram simuladas utilizando um software de simulação de sistemas de potência, em diversas condições de velocidade do vento, como ilustrado na Figura 20. Como citado anteriormente, os parâmetros utilizados para parametrizar o sistema WECS está descrito no apêndice A deste trabalho.

Figura 20 - Velocidade do vento

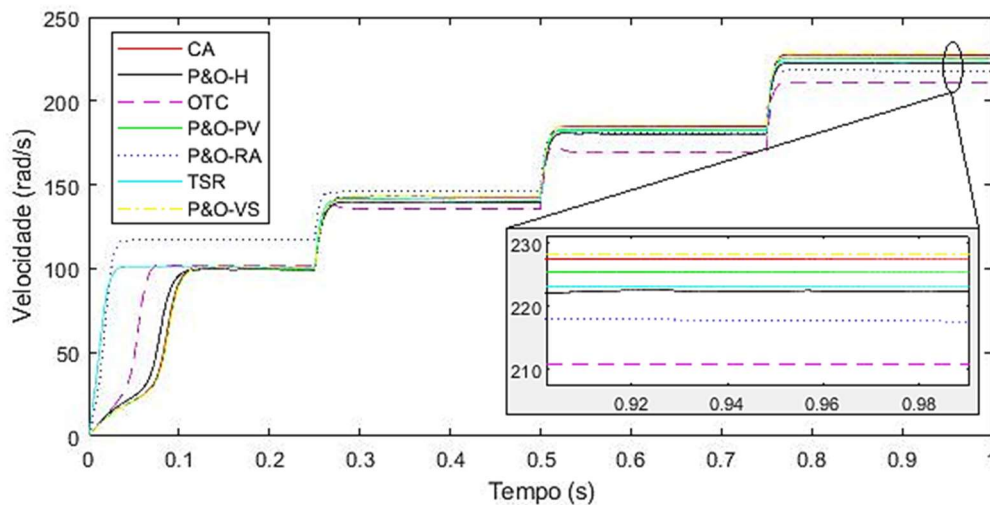


Fonte: O próprio autor.

A Figura 21 demonstra o comportamento da velocidade do gerador sobre a ação de cada um dos métodos de MPPT. Nota-se que, inicialmente, P&O-RA e TSR apresentam uma rápida convergência da velocidade. Este último também requerer uma medição direta do vento, assim como P&O-RA. Os demais algoritmos possuem uma convergência mais lenta no início em virtude da natureza da perturbação da rotação, com exceção ao OTC, que impõe um valor de conjugado para a máquina. Além disso, CA e P&O-H apresentam um ponto positivo que é a estimação do K_{opt} , onde nos estágios iniciais da simulação o mesmo ainda encontra-se em convergência para seu valor ideal, não precisando assim do conhecimento de parâmetros do sistema.

Diante disso, é possível observar que durante toda a simulação, mesmo com cada um dos métodos de MPPT operando de forma diferente, tendem a convergir para valores próximos de velocidade, visando controlar a rotação do gerador para extraírem a máxima potência do WECS, independentemente da velocidade do vento.

Figura 21 - Velocidade do gerador na extração da máxima potência

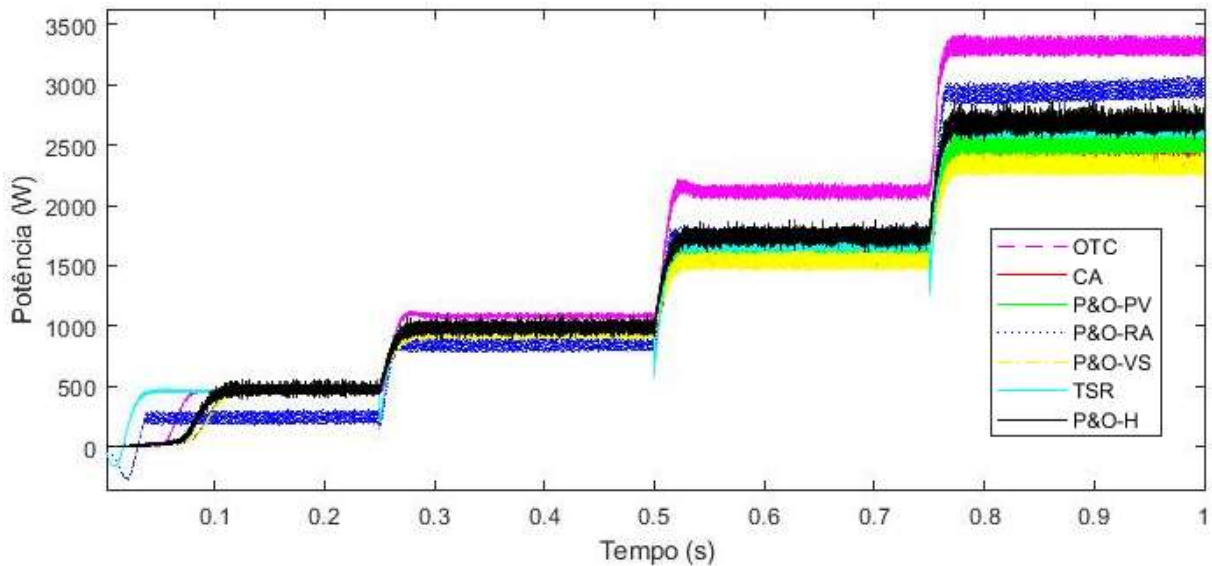


Fonte: O próprio autor.

O P&O-H possui vantagens frente aos demais métodos. Por possuir etapas de operação distintas, acaba se tornando eficiente, mesmo sem precisar das medições do vento e do conhecimento dos parâmetros do sistema. Seu rastreamento, voltado para as alterações da potência elétrica, permite uma ótima produção da mesma. A Figura 22 mostra o comportamento da potência elétrica gerada pelos métodos de MPPT abordados e proposto neste trabalho. O P&O-H consegue extrair uma maior potência quando comparada com o CA, apresentando-se como uma ótima alternativa para aplicações de WECS, principalmente pela sua robustez perante mudanças do vento. Apresenta uma eficiência de 64,05%, atrás apenas do OTC. Este

último obteve o melhor resultado. Vale ressaltar que o resultado de alguns métodos estão sobrepostos, mas que na Tabela 2 pode-se analisar melhor os valores obtidos.

Figura 22 - Potência elétrica dos métodos de MPPT



Fonte: O próprio autor.

O OTC impõe um conjugado de referência para o sistema, sendo então comparado com o valor instantâneo do gerador, no qual impõe a corrente de referência do eixo em quadratura. Também, o mesmo apresenta uma rápida convergência elétrica em todos os pontos de variação do vento, possuindo, como descrito na Tabela 1, a maior eficiência dentre os métodos. O OTC é amplamente aplicado nos mais diversos WECS e vastamente citado na literatura de MPPT, mas apresenta um ponto negativo devido requer o conhecimento dos parâmetros do sistema.

O P&O-PV opera realizando tamanhos de passos variáveis à medida que se aproxima do ponto de máxima potência. O mesmo fornece baixa oscilação na velocidade e apresenta uma boa convergência, resultando em uma eficiência de 60,33%. Vale lembrar que ele não requer conhecimento da velocidade do vento, muito menos dos parâmetros do sistema.

O P&O-RA apresenta ótima convergência para variações da velocidade do vento, resultando em um valor de eficiência elevado, como descrito na Tabela 1. Entretanto, como ponto negativo, necessita dos dados da velocidade do vento para sua execução.

O TSR necessita da medição da velocidade do vento para gerar uma rotação de referência para o respectivo controle da malha de velocidade. Apresenta uma boa convergência da potência elétrica em situações de variações do vento, apresentando eficiência próxima aos

dos melhores métodos, com 63,74%.

O P&O-VS apesar de não apresentar grandes oscilações de velocidade, deixa a desejar na convergência elétrica. Apresentou a menor eficiência dentre todos os MPPT simulados, mas muito próximo do CA.

Na Tabela 1 foi realizado um resumo dos percentuais de potência de cada um dos métodos citados. Conforme equação (4), a potência mecânica média considerada para o cálculo da eficiência foi de 2213,80 W. O algoritmo proposto neste trabalho, P&O-H, apresentou uma ótima eficiência, principalmente quando comparado com o CA. O OTC, por suas características de imposição de conjugado ótimo para a malha de corrente, apresentou o maior valor dentre todos, com 76,43 %, sendo um método robusto e de rápida convergência, mas que requer o conhecimento de alguns parâmetros do sistema. Outro ponto importante, o P&O-RA, apesar da necessidade da medição do vento, possui um valor de eficiência elevado, da ordem de 63,82%, superando o TSR e o P&O-PV, que também requerem tal medição.

Tabela 1 - Eficiência média dos métodos de MPPT

Método	Potência Elétrica (W)	Eficiência (%)
TSR	1411,19	63,74
OTC	1692,13	76,43
P&O-VS	1255,48	56,71
P&O-PV	1335,76	60,33
P&O-RA	1412,92	63,82
CA	1273,95	57,54
P&O-H	1418,14	64,05

Fonte: O próprio autor.

Na Tabela 2 estão descritos os pontos necessários para que os mais diversos métodos de MPPT aqui abordando possam ser executados. O P&O-H se destaca dos demais pelo fato de não requerer o conhecimento de nenhum parâmetro do sistema, como também não realizar a medição do vento, associando tais características a uma elevada eficiência, como descrito na Tabela 1.

Portanto, diante dos resultados obtidos nas Tabelas 1 e 2, e conforme revisão da literatura, pode-se afirmar que o P&O-H, enquadrado dentro de um segmento pouco estudado pelos pesquisadores, surge como um algoritmo perfeitamente aplicável em sistemas eólicos, apresentando ótima eficiência quando comparada com os vários outros métodos aqui abordados. Também, o mesmo não requer sensores para medições da velocidade do vento e

nem a necessidade do conhecimento dos parâmetros da turbina, contribuindo ainda mais para sua ampla utilização na extração de potência.

Tabela 2 - Características de operação do MPPT

Método	Medição do Vento	Necessidade dos Parâmetros do Sistema
TSR	Sim	Sim
OTC	Não	Sim
P&O-VS	Sim	Sim
P&O-PV	Não	Não
P&O-RA	Sim	Sim
CA	Não	Não
P&O-H	Não	Não

Fonte: O próprio autor.

5.2 Análise do afundamento de tensão simétrico e assimétrico

Para investigar o impacto que os algoritmos de rastreamento de máxima potência: TSR, OTC, P&O-H e P&O-RA, exercem sobre os controles LVRT-H e LVRT-BC, quando afundamentos simétricos e assimétricos são aplicados, uma série de simulações foram realizadas. Vale salientar que o P&O-H e o LVRT-H são algoritmos propostos por esse trabalho, visando obter métodos robustos e mais eficientes. Os parâmetros utilizados na parametrização do sistema eólico estão descritos no Apêndice A, onde a velocidade do vento foi fixada em 10 m/s para todos os cenários abordados.

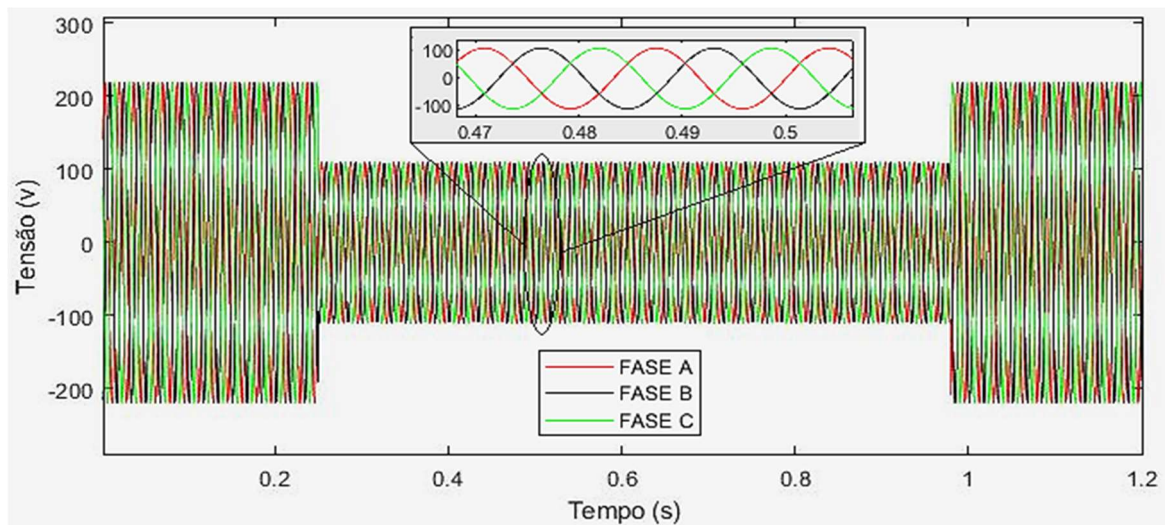
5.2.1 LVRT híbrido (LVRT-H) associado ao afundamento simétrico

Utilizando o controle LVRT-H, este trabalho visa analisar os impactos do MPPT na estabilidade do WECS e da rede elétrica, onde um afundamento de 50% do valor nominal de 220 V foi aplicado nas tensões das fases A, B e C da rede, conforme ilustrado na Figura 23. Seguindo o gráfico disponível na Figura 18, o tempo máximo de duração do afundamento deve ser de 0,73 segundos, sendo iniciado no instante de 0,25 segundos, e finalizando em 0,98 segundos. O tempo total de simulação é de 1.2 segundos. Os resultados da avaliação comparativa entre os métodos de MPPT e cada um dos pontos analisados estão abordados a seguir.

Na Figura 24 é possível constatar que na ocorrência do afundamento, a velocidade do gerador PMSG aumenta em todas as situações, validando a afirmação de que o sistema

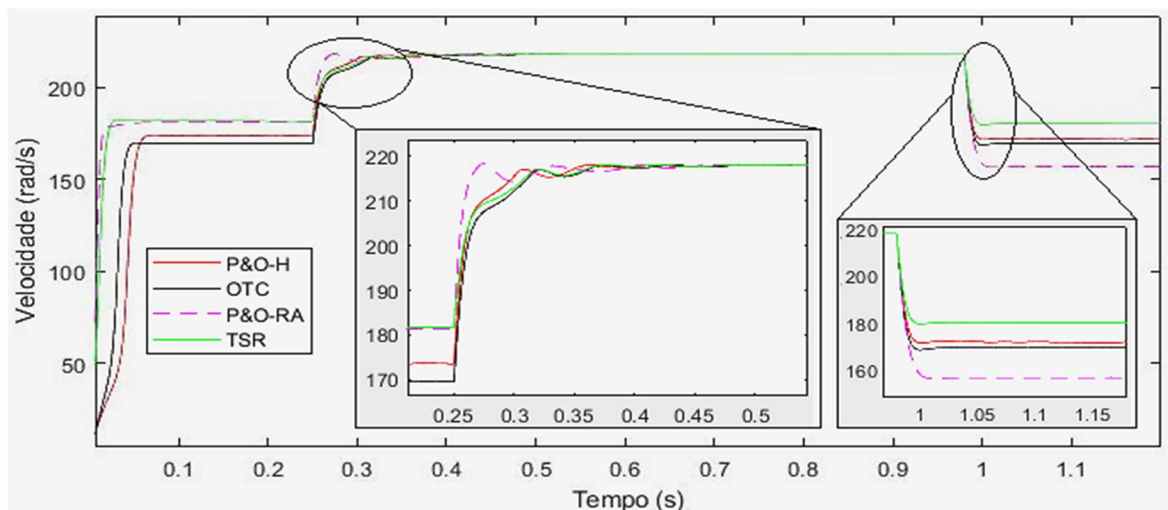
armazena a energia ativa gerada antes da perturbação. Como o controle do MPPT é suspenso temporariamente por um conjugado que rastreia a potência instantânea da rede elétrica, a velocidade do sistema passa a ficar livre. Então, essa diferença agora existente entre os conjugados da turbina e do gerador força o sistema a se estabilizar em uma velocidade maior, necessária para absorver a energia anteriormente produzida, permanecendo nesta até que o WECS volte ao seu controle normal.

Figura 23 - Afundamento simétrico na tensão da rede elétrica



Fonte: O próprio autor.

Figura 24 - Velocidade do gerador com LVRT-H associado ao afundamento simétrico



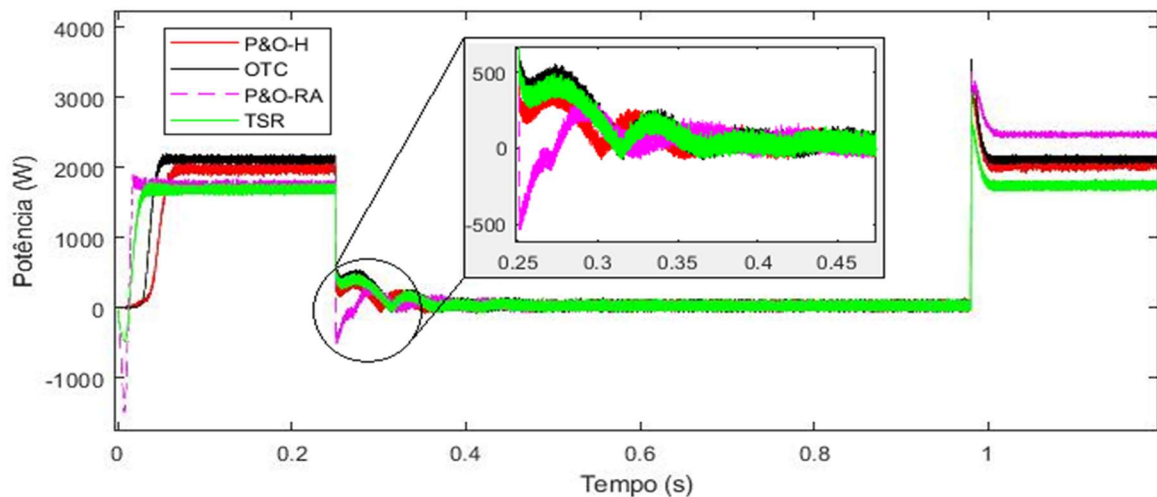
Fonte: O próprio autor.

Essa diferença de velocidade existente entre os métodos antes do afundamento de tensão é explicada pelo fato de que cada um dos mesmos possui um aproveitamento diferente

de extração de potência elétrica. Após a estabilização da tensão da rede elétrica, as velocidades tendem a voltar para seus valores nominais. Assim, OTC e P&O-H apresentaram as maiores porcentagem de aumento de velocidade, pois são os métodos com maior produção de energia. Por isso, precisam de uma maior rotação final para dissipar a energia anteriormente gerada.

Na Figura 25 pode ser analisado a geração da potência ativa. Durante o afundamento, o sistema eólico, por um curto instante de tempo, produz potência elétrica necessária para manter o nível de tensão do link CC constante, tendo em vista que a mesma irá decrescer, como ilustrado na Figura 26. Como a alteração aplicada neste trabalho foi a de não restrição da potência ativa injetada na rede e a de monitoramento da tensão no capacitor, o excedente de potência acaba sendo absorvida pela rede elétrica, evitando um aumento descontrolado da tensão no barramento CC. A restrição aplicada em Tripathi, Tiwari e Singh (2015) é inviável quando o tempo de análise do afundamento é superior a 60 ms. Sem o controle da tensão, seria necessário um capacitor muito grande para que o mesmo não descarregue durante os 0,73 segundos impostos neste trabalho.

Figura 25 - Potência ativa gerada com LVRT-H associado ao afundamento simétrico



Fonte: O próprio autor.

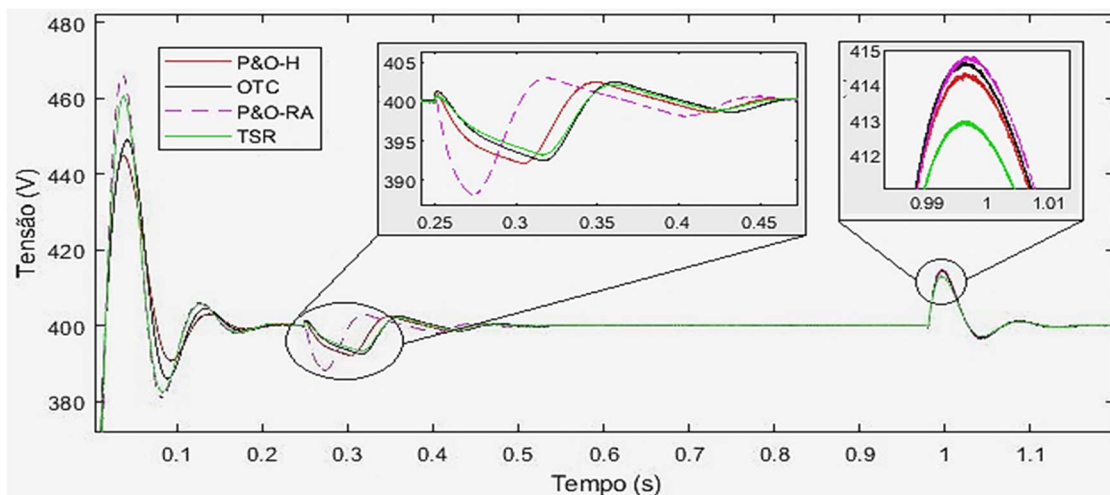
Após a estabilização do link CC, ainda durante o afundamento, a produção de potência ativa por parte do gerador se mantém praticamente zero, o que leva também a uma injeção nula do mesmo na rede. Neste momento, o CLR irá operar apenas atendendo a potência reativa vindo do barramento CC. Por fim, após a normalização da tensão nominal da rede, o CLM volta ser operado pelo MPPT, extraindo a máxima potência conforme eficiência de cada método e o CLR continua a controlar a tensão no barramento CC, mas agora com fator de

potência unitário.

Vale salientar que, devido à característica dos métodos OTC e P&O-RA, visando evitar um pico de potência na retomada do mesmo, foi utilizado um limitador de corrente no valor de 15 A. Esta ação é necessária para evitar a queima de algum componente ou atuador na situação de uma implementação prática do mesmo. Os demais algoritmos não requerem tal artifício de proteção.

A Figura 26 ilustra a tensão do link CC quando os vários métodos de MPPT estão operando. No momento em que o afundamento é detectado, a geração de energia ativa vindo do gerador é reduzida bruscamente, sendo substituída pela equação (31), na qual rastreia a potência instantânea da rede elétrica. Isso faz com que a tensão do barramento comece a decrescer. Por sua vez, o CLR continua o monitoramento desta tensão. Assim, o controle da malha de eixo direto da rede detecta um erro de tensão agora existente, que é automaticamente passada para a geração do WECS, no qual irá produzir potência elétrica por um curto período de tempo, forçando a tensão do link CC a se estabilizar. O excedente desta potência é injetado na rede, evitando que haja um aumento indevido da tensão.

Figura 26 - Tensão do link CC com LVRT-H associado ao afundamento simétrico



Fonte: O próprio autor.

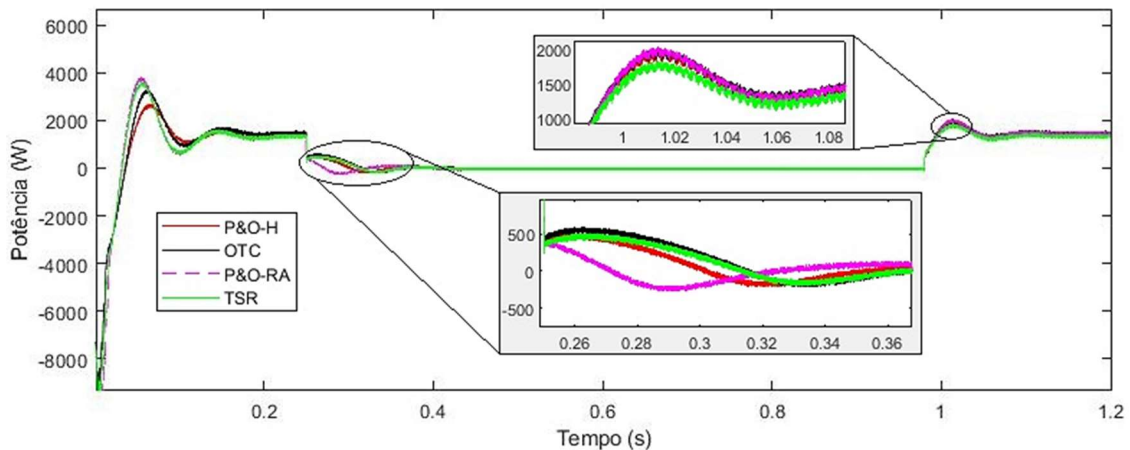
Após a estabilização da tensão, a geração deixa de produzir potência ativa, o que ocasiona uma injeção nula da mesma na rede. Em compensação, durante o resto do tempo da falta, a rede elétrica absorve energia reativa, essencial para auxiliar na retomada do sistema as suas condições normais. Com a normalização da tensão nominal da rede, a tensão do link CC sofre um pequeno pico.

Na Figura 26 é possível perceber que o método P&O-H causou baixas oscilações

no barramento CC, contribuindo assim para a estabilidade do sistema durante os afundamentos. Já o P&O-RA apresentou os maiores picos na tensão quando comparada com os demais métodos, sendo um ponto negativo para o mesmo.

As Figuras 27 e 28 ilustram a potência ativa e reativa injetada na rede, respectivamente. Nota-se que, durante o intervalo do afundamento, entre 0,25 segundos e 0,98 segundos, as potências sofrem uma inversão de comportamento. A potência ativa inicialmente apresenta valores menores que os nominais, estabilizando-se em zero na maior parte do tempo. Isso ocorre pelo fato da tensão do barramento contínuo já estar normalizada, permitindo a geração do WECS para de atuar neste período.

Figura 27 - Potência ativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento simétrico

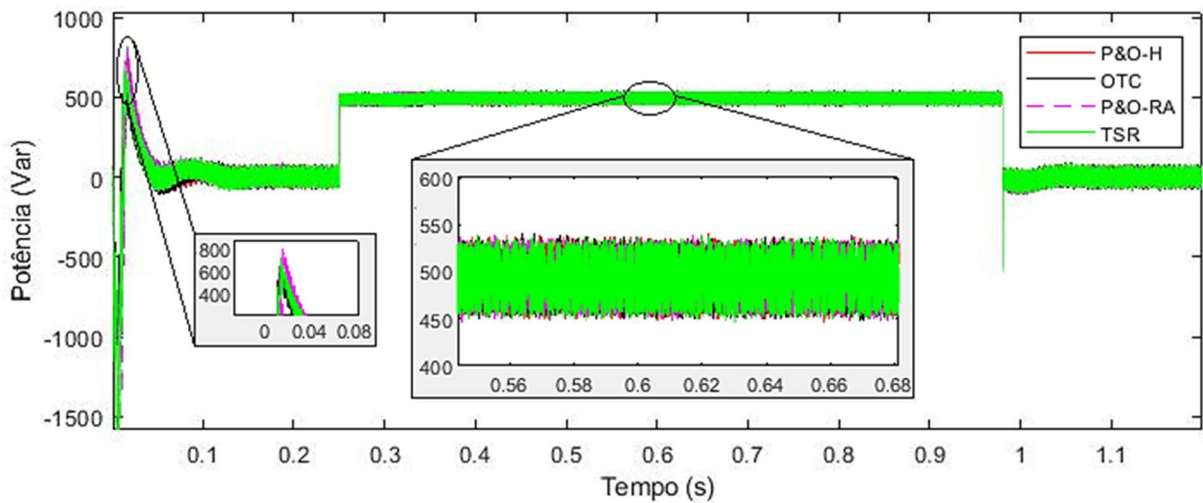


Fonte: O próprio autor.

Já a potência reativa absorvida pela rede é máxima durante todo o período do afundamento, obedecendo aos valores estipulados na equação (32), sendo este o principal fator que deve ser atendido para mitigar o LVRT na rede, conforme ilustrado na Figura 28. O valor da corrente nominal da rede deve ser fornecido pela malha de eixo em quadratura (i_q). Após a readequação das tensões na rede, o CLM e o CLR, voltam a operar no modo convencional. Visando evitar picos de potência reativa indesejados nos momentos de mudança de referência, foi utilizado um limitador de 600 Var, inserido após o regime transitório inicial do WECS.

Também, foi analisado a ação de controle de cada um dos três controladores do CLR e do CLM, identificando as possíveis contribuições na redução do esforço médio de cada PI. Para isso, foi elaborada a Tabela 3, onde consta todos os valores médios para cada um destes seis controladores ao longo das simulações realizadas, conforme ilustrado nas Figuras 6 e 7.

Figura 28 - Potência reativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento simétrico



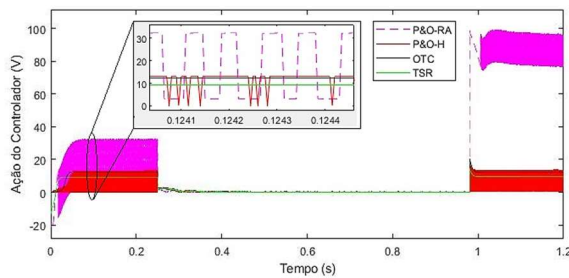
Fonte: O próprio autor.

Visando facilitar o entendimento, a Tabela 3 foi dividida em três setores, evitando que o período de estabilização inicial do sistema interferisse no valor médio da ação dos controladores. Assim, o setor 1 refere-se ao intervalo de tempo compreendido entre 0 e 0.25 segundos. O setor 2 compreende o tempo entre 0.25 segundos e 0.98 segundos, por fim, o setor 3 está associado ao intervalo de 0.98 segundos até 1.2 segundos. Em cada trecho foi considerado o valor médio do controlador associado a sua malha de controle, sendo identificado em **negrito** o menor valor obtido.

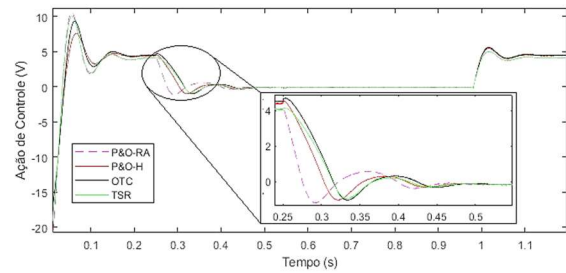
Na Figura 29 está ilustrado a ação dos controladores do CLM e do CLR utilizando LVRT-H. A ação do controlador de velocidade está demonstrado na Figura 29a. Percebe-se que durante os períodos de estabilização do sistema, antes e depois do afundamento, o P&O-RA apresenta os maiores valores. Em contrapartida, o P&O-H apresentou valores máximos e mínimos menores que o método anterior, forçando a ação média do controlador ser reduzida. Tal situação pode ser constatada no setor 1 e 3 do afundamento simétrico da Tabela 3, confirmando a robustez do método proposto. O TSR obtém a menor média nestes dois intervalos de análise.

Na Figura 29b está ilustrado as ações dos controladores da corrente de eixo direto da máquina (i_d) utilizando LVRT-H. Nesta situação o P&O-RA apresentou os melhores resultados no intervalo do setor 1 e durante a perturbação. Após a normalização das tensões

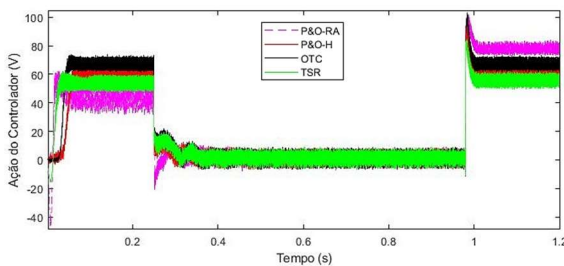
Figura 29 - Ação dos controladores do CLR e CLM utilizando LVRT-H associado ao afundamento simétrico



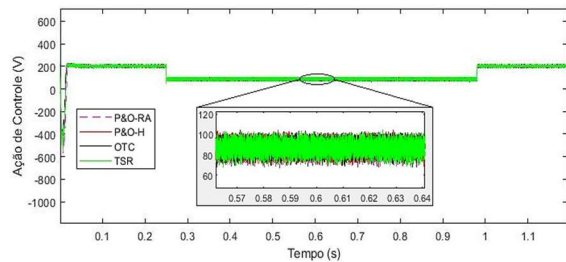
a) Ação do controlador de velocidade



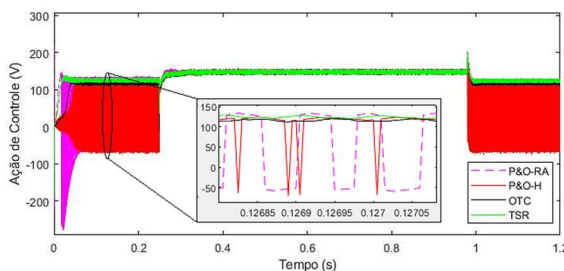
d) Ação do controlador de tensão



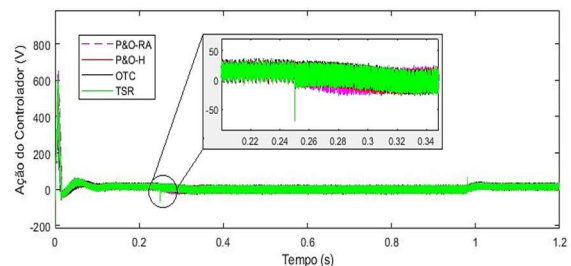
b) Ação do controlador eixo d da máquina



e) Ação do controlador eixo da rede



c) Ação do controlador eixo q da máquina



f) Ação do controlador eixo q da rede

Fonte: O próprio autor.

na rede elétrica, o TSR obteve o menor valor médio.

A Figura 29c demonstra a ação dos controladores da corrente de eixo em quadratura da máquina (i_q) utilizando LVRT-H, responsável pela produção de potência ativa do PMSG. De forma semelhante ao encontrado na Figura 29a, tanto P&O-H como o P&O-RA oscilam entre valores máximos e mínimos. Tal situação permite que o método proposto neste trabalho obtenha o menor valor durante o intervalo entre 0 e 0,25 segundos. Já durante a perturbação, o OTC apresenta a melhor resposta, e por fim, no intervalo entre 0,98 e 1,2 segundos, o P&O-RA obtém o menor valor médio.

Na Figura 29d pode-se analisar as oscilações impostas ao controlador da tensão do link CC utilizando LVRT-H. Observa-se que no intervalo antes do afundamento, entre 0 e 0,25 segundos, o P&O-H apresenta o menor *overshoot* durante a estabilização inicial do sistema.

Durante o período da perturbação, o P&O-RA obteve o menor valor, e por fim, entre 0,98 e 1.2 segundos, o TSR apresentou o melhor resultado. Isso comprova que cada método interfere de maneira distinta no sistema, principalmente após perturbações impostas ao sistema.

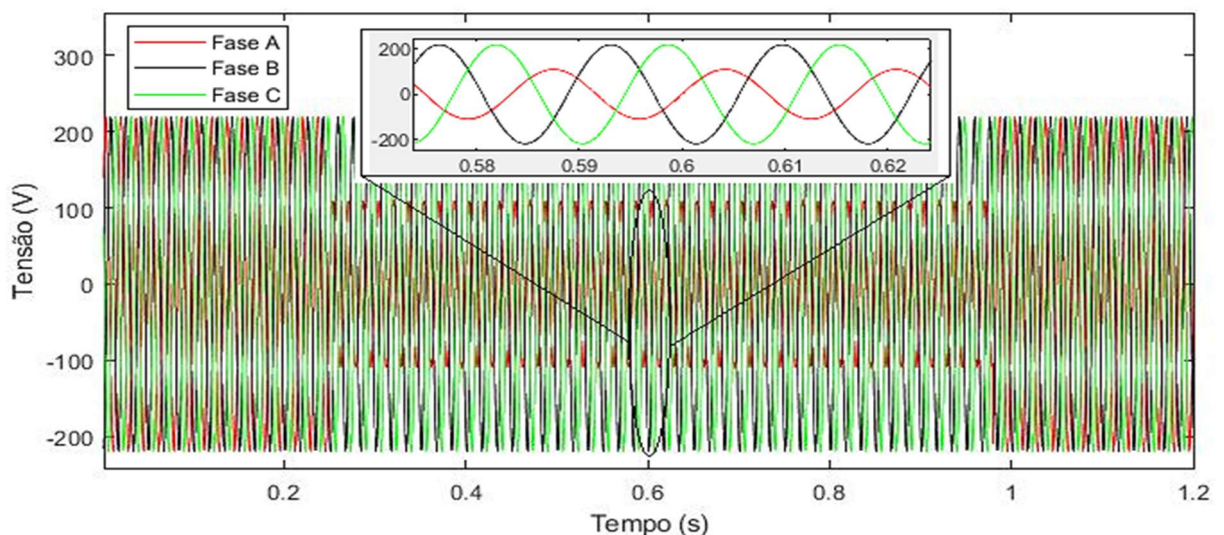
Nas Figuras 29e e 29f estão representados as ações de controle impostas pelo PI de eixo direto e em quadratura do CLR, respectivamente, utilizando LVRT-H. Percebe-se que em todas as situações houve uma redução das ações de controle no momento dos afundamentos, intervalo entre 0,25 segundos e 0,98 segundos. Tal fato é justificado pela característica imposta pelo LVRT-H.

Vale salientar que o P&O-H, nas Figuras 29e e 29f, apresentou os melhores resultados nos intervalos antes e depois do afundamento, setores 1 e 2 da Tabela 3, contribuindo assim para um menor esforço de controle. Tais pontos citados mostram que o método proposto possui uma contribuição maior na redução da ação média dos controladores associados ao CLR.

5.2.2 LVRT híbrido (LVRT-H) associado ao afundamento assimétrico

Agora, um afundamento de 50% do valor nominal de 220 V foi aplicado apenas na fase A da rede, como ilustrado na Figura 30. O tempo de duração do mesmo foi de 0,73 segundos, sendo iniciado no instante de 0,25 segundos, e finalizando em 0,98 segundos. O tempo total de simulação é de 1.2 segundos.

Figura 30 - Afundamento assimétrico na tensão da rede elétrica

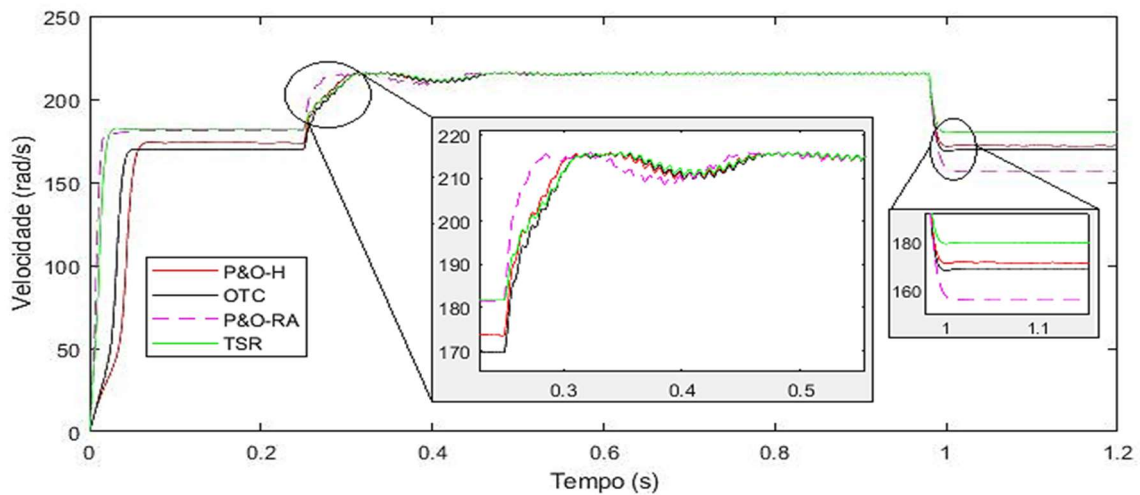


Fonte: O próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 31, o comportamento da velocidade dos métodos de MPPT é semelhante aos obtidos na Figura 24. Durante os afundamentos, o controle

da rotação fica livre, absorvendo a potência ativa gerada anteriormente pelo PMSG. Nota-se que a apresenta uma oscilação constante durante todo o período de falta, justificado pelo fato do conjugado implementado também oscilar, devido a falha assimétrica da rede. Esta oscilação presente na velocidade é eliminada no momento da recomposição do sistema. Assim como descrito anteriormente, os métodos OTC e P&O-H sofrem as maiores porcentagens de aumento de velocidade. Quando a falta na rede é normalizada, as velocidades tendem a voltar para seus valores nominais de operação.

Figura 31 - Velocidade do gerador com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

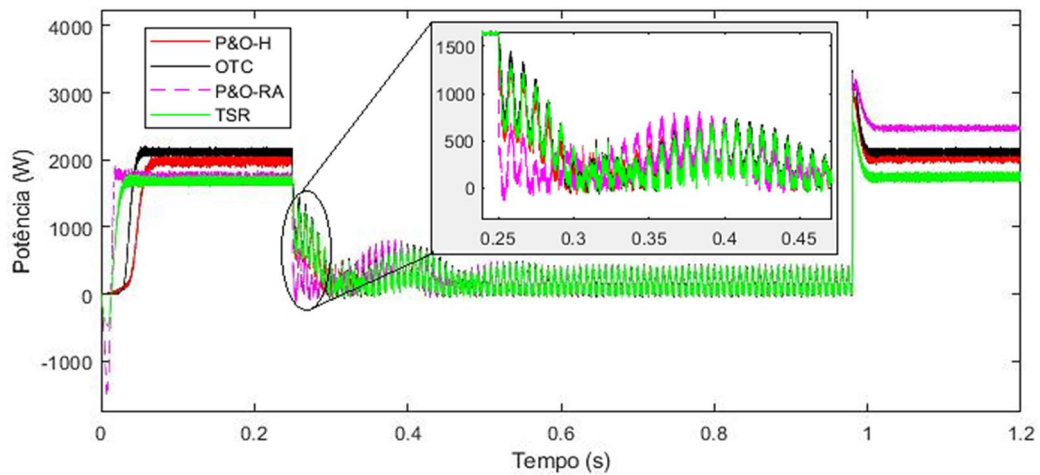
A Figura 32 mostra que no geral o comportamento da potência ativa gerada pelo WECS antes e depois do afundamento são semelhantes as obtidas na Figura 25. Durante a redução da tensão na fase A da rede, intervalo entre 0,25 segundos e 0,98 segundos, o sistema eólico irá produzir potência nos instantes iniciais, recompondo a tensão do barramento CC, que inicialmente decresce. Entretanto, agora devido as oscilações inerentes a perturbação da rede, a potência gerada oscila entorno de zero.

A potência gerada durante os instantes iniciais do afundamento é maior que a produzida em condições de faltas simétricas. Isso ocorre devido à oscilação presente na potência da rede elétrica, que está sendo agora rastreada pelo gerador. Novamente, devido à característica dos métodos OTC e P&O-RA, visando evitar um pico de potência na retomada do mesmo, foi utilizado um limitador de corrente no valor de 15 A. Os demais métodos possuem picos de retomada inferiores, não necessitando de tal artifício.

Na Figura 33 é possível identificar os efeitos causados pela falta assimétrica na rede

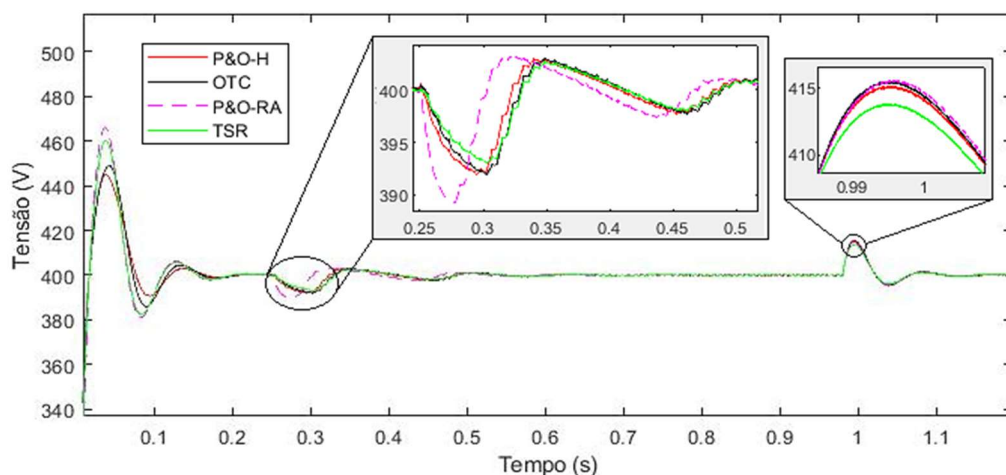
elétrica. Como a potência gerada pelo WECS está oscilando devido o afundamento, durante o intervalo entre 0,25 segundos e 0,98 segundos, a tensão do barramento CC apresenta tal comportamento, mesmo depois da estabilização da tensão. O P&O-RA causou a maior oscilação em todos os três intervalos analisados. Os demais algoritmos tiveram um aumento dos seus valores médios, quando comparados a situação de falta simétrica, como pode ser analisado na Tabela 3, justificado pela oscilação inerente ao processo do afundamento assimétrico.

Figura 32 - Potência ativa gerada com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

Figura 33 - Tensão do link CC com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico

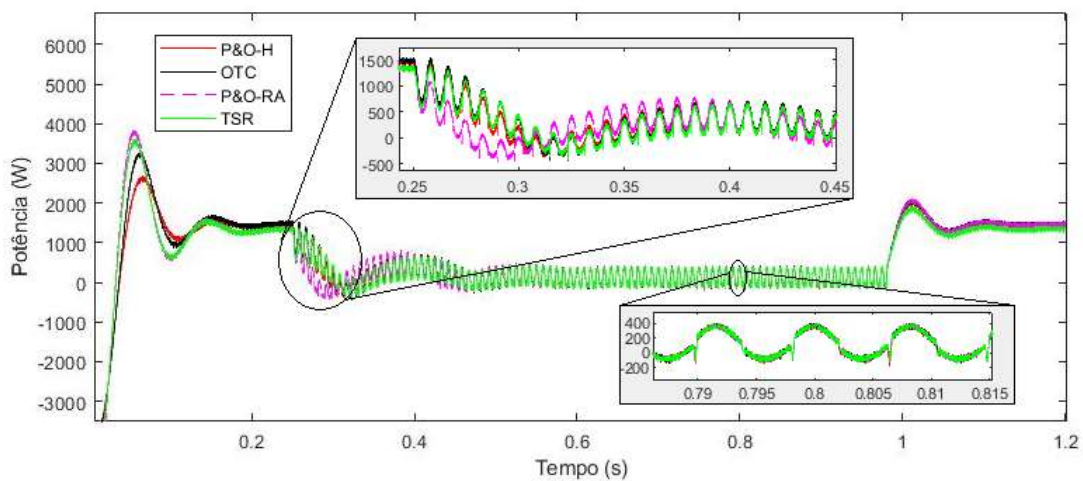


Fonte: O próprio autor.

Nas Figuras 34 e 35 é possível perceber que ocasionado pela falta assimétrica, os valores de potência ativa e reativa, respectivamente, oscilam entorno de seus valores médios,

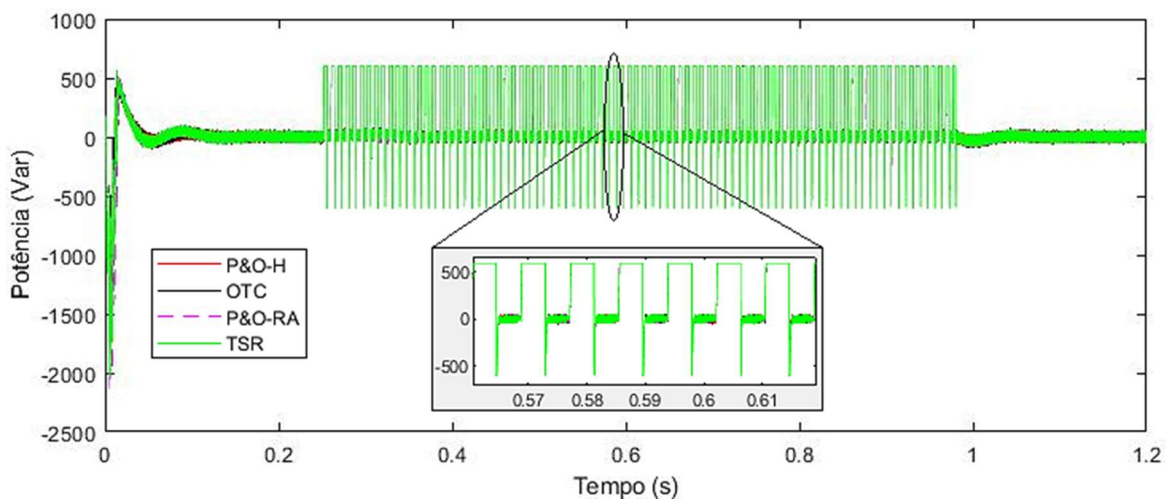
devido a tensão desequilibrada da fase A. Portanto, a potência média de ambas acaba sendo elevada, quando comparada a situação de falta simétrica. Após a normalização das tensões, os métodos de MPPT voltam a operar, e o CLR volta a receber as respectivas potências ativas geradas pelo WECS, com fator de potência unitário. Visando evitar picos de potência reativa indesejados nos momentos de mudança de referência, foi utilizado um limitador de 600 Var, inserido após o regime transitório inicial (setor 1) do WECS.

Figura 34 - Potência ativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

Figura 35 - Potência reativa da rede com LVRT-H associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 36 está ilustrado a ação dos controladores do CLM e do CLR utilizando LVRT-H. Percebe-se que os resultados obtidos na Figura 36a são semelhantes com os da Figura

29a, principalmente nos intervalos antes e depois do afundamento, setores 1 e 3. Conforme pode ser analisado na tabela 3, durante o tempo da perturbação assimétrica, houve um aumento do valor médio da ação dos controladores do CLM e CLR, demonstrando que este tipo de afundamento requer um maior esforço do PI para sua estabilização.

Na Figura 36b encontra-se a ação do controle da corrente de eixo direto da máquina utilizando LVRT-H. O P&O-RA obteve os melhores resultados nos intervalos 1 e 2, conforme Tabela 3. As oscilações presentes durante o tempo da falta são justificadas pela característica da perturbação imposta pela rede, incorporada também pelo controle.

Os valores obtidos na Figura 36c, utilizando LVRT-H, são semelhantes aos encontrados na Figura 29c, com exceção do intervalo onde o afundamento se faz presente. Neste setor, os valores médios dos controladores tiveram uma pequena redução, quando comparada com a situação simétrica. Tal ponto pode ser analisado na Tabela 3.

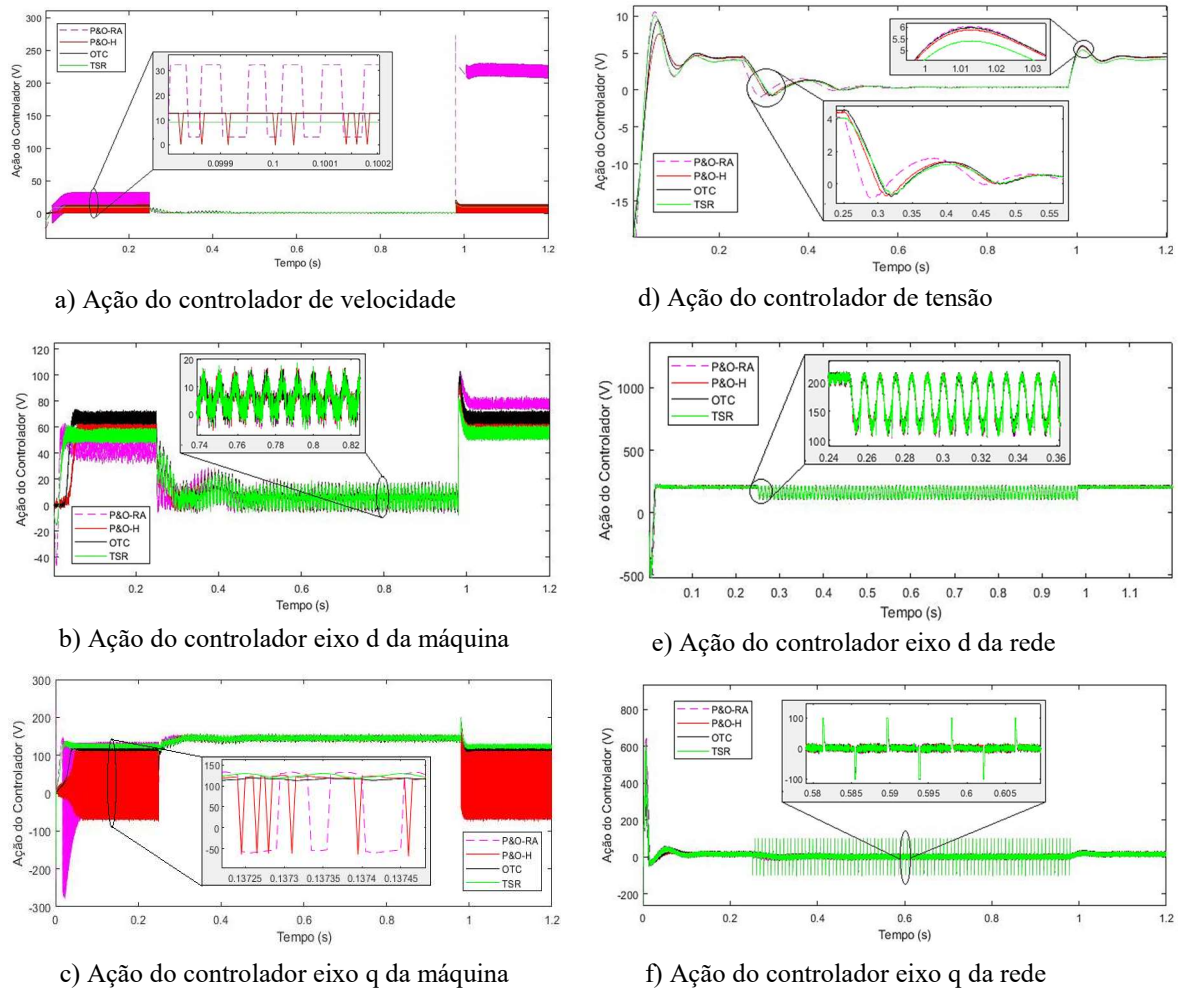
No controlador da tensão utilizando LVRT-H, ilustrado na Figura 36d, percebe-se o efeito causado pela falta assimétrica. Durante o período entre 0,25 segundos e 0,98 segundos, existe uma oscilação no sinal de atuação do controlador, resultando no aumento do valor médio obtido, fato justificado pela oscilação do sinal de controle. Tal situação acaba impactando também na retomada do sistema, intervalo entre 0,98 segundos e 1,2 segundos, onde os valores médios sofrem um pequeno aumento quando comparado ao caso ilustrado na Figura 29d. No intervalo inicial da simulação, entre 0 e 0,25 segundos, o sistema se comporta de forma semelhante ao da falta simétrica.

Nas figuras 36e e 36f estão representados as ações de controle impostas pelo PI de eixo direto e em quadratura do CLR, respectivamente, utilizando LVRT-H. Percebe-se que em ambas as situações existem oscilações dos sinais de controle, variando entorno de sua referência, durante o intervalo de 0,25 segundos e 0,98 segundos. Tal fato é justificado pela característica imposta pela falta assimétrica. Vale salientar que o P&O-H, em ambos os casos, apresentou os melhores resultados, como também pode ser analisado na Tabela 3, contribuindo tanto para um menor esforço de controle do CLR como para a estabilidade da rede.

5.2.3 LVRT braking chopper (LVRT-BC) associado ao afundamento simétrico

Agora, utilizando o controle LVRT-BC, será aplicado um afundamento de 50%

Figura 36 - Ação dos controladores do CLR e CLM utilizando LVRT-H associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

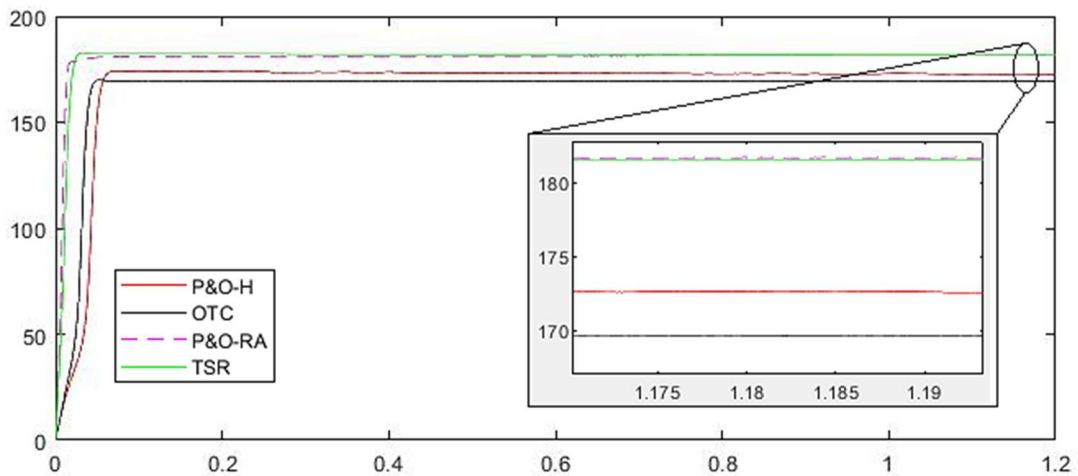
no valor nominal de 220 V nas tensões das fases A, B e C da rede, conforme ilustrado na Figura 23. O tempo máximo de duração do afundamento continua sendo de 0,73 segundos, iniciando no instante de 0,25 segundos, e finalizando em 0,98 segundos. O tempo total de simulação é de 1.2 segundos. Para dissipar a potência gerada pelo WECS durante os afundamentos, um resistor de 89Ω será aplicado em paralelo ao capacitor do link CC, evitando assim que o excedente de potência seja injetada na rede elétrica. Este artifício será utilizado apenas no momento da detecção da perturbação.

Na Figura 37 está ilustrado o comportamento da velocidade do PMSG. Diferente do método anterior, o LVRT-BC não suspende o MPPT durante os afundamentos na rede elétrica. Assim, para o gerador produzir a máxima potência, sua velocidade deve ser controlada em um certo valor. Como o vento foi fixado em 10 m/s para todas os cenários implementados,

a rotação do PMSG deverá se manter constante, obedecendo as características de cada MPPT.

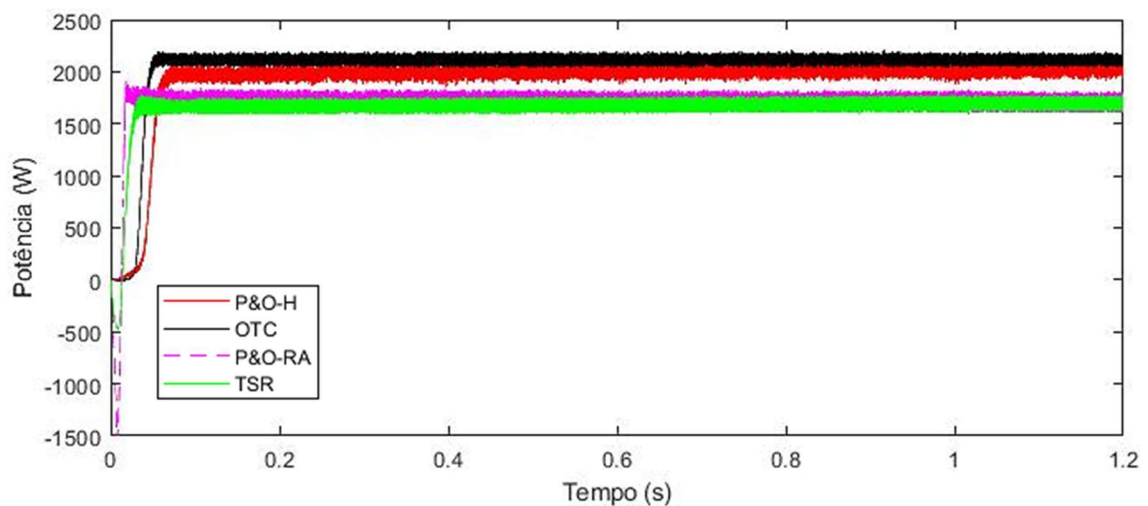
A Figura 38 ilustra a geração da potência ativa do WECS. Como o LVRT-BC mantém o MPPT ativo, a potência irá se manter constante durante todo o intervalo de análise, o que não ocorre na Figura 25. Essa situação irá forçar todos os controladores, durante o tempo do afundamento (intervalo entre 0,25 segundos e 0,98 segundos), a terem suas ações médias elevadas, quando comparadas na aplicação do LVRT-H.

Figura 37 - Velocidade do gerador com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico



Fonte: O próprio autor.

Figura 38 - Potência ativa gerada com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico

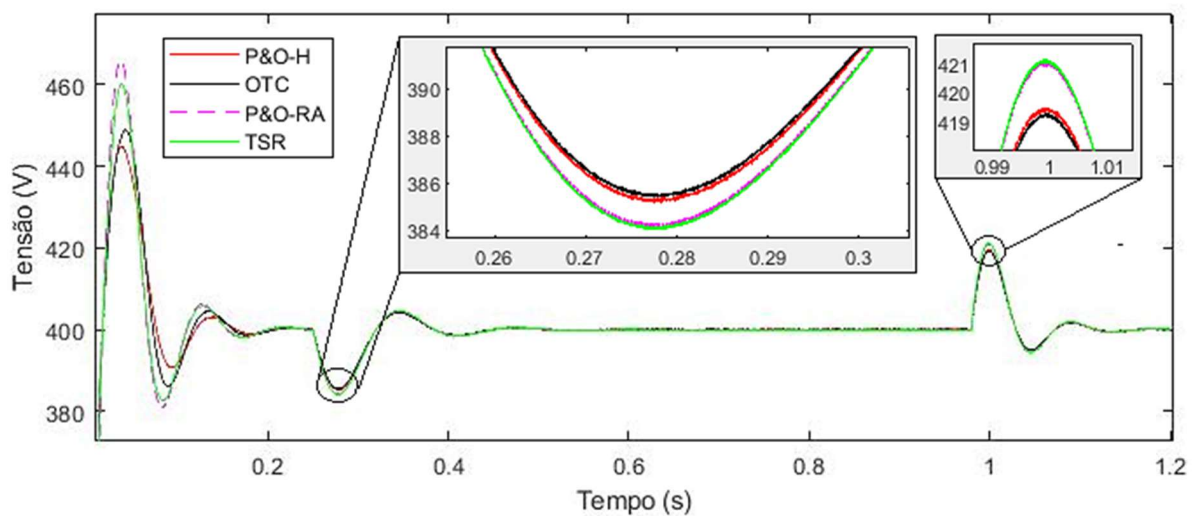


Fonte: O próprio autor.

O comportamento da tensão do barramento CC está demonstrado na Figura 39.

Devido a aplicação do método LVRT-BC, no qual insere o resistor em paralelo ao capacitor no momento do afundamento, a oscilação presente na tensão é maior que a obtida na situação da Figura 26, com LVRT-H. Conseqüentemente, as ações médias dos controladores também serão elevadas. O fato de toda a potência gerada pelo PMSG durante a perturbação da rede ser consumida pelo resistor, é o que permite uma queda de tensão maior no barramento até a sua normalização. Percebe-se que o P&O-H de modo geral apresenta os melhores resultados de oscilação, conforme demonstrado na Tabela 4.

Figura 39 - Tensão do link CC com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico



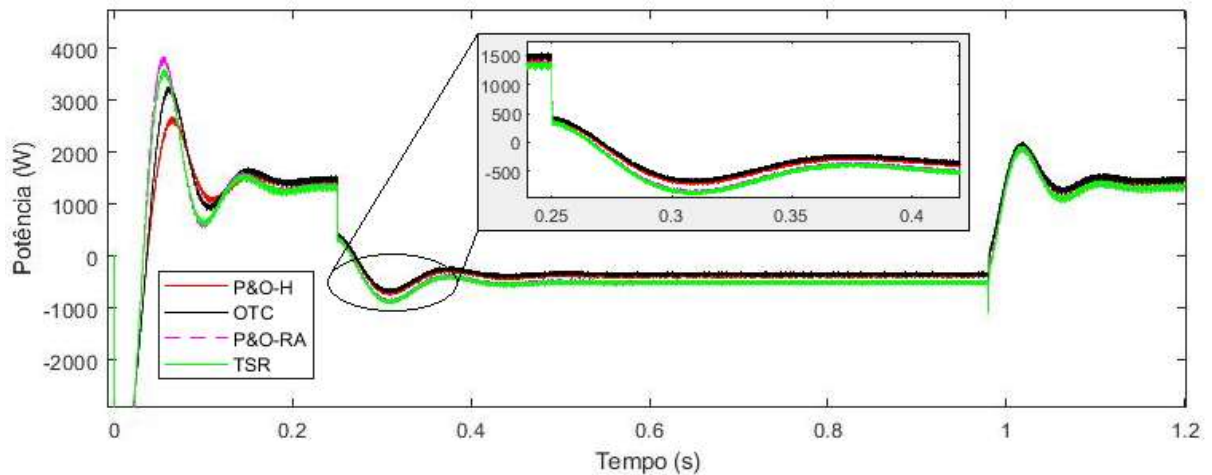
Fonte: O próprio autor.

A Figura 40 ilustra o comportamento da potência ativa na rede. No intervalo de tempo antes e depois do afundamento (setores 1 e 3), a potência ativa excedente vindo do link CC é absorvida pela rede. Mas, no intervalo da perturbação, toda a potência gerada pelo PMSG é dissipada no resistor, sendo necessário o fornecimento desta pela rede elétrica, visando recompor a tensão do barramento CC e mantendo-a constante durante o tempo restante da falta. Neste momento, a rede deve fornecer essa potência, permanecendo assim até a normalização da tensão nominal da mesma. Tal ponto irá requerer uma maior ação do controlador da corrente de eixo direto, forçando o mesmo a ter seu valor médio elevado, quando comparado com o LVRT-H.

Na Figura 41 acontece o inverso. Quando a perturbação na rede é imposta (setor 2), o controle é modificado, passando a absorver corrente reativa vindo do barramento CC, como descrito na equação (32), atendendo ao requisito do LVRT imposto pelo ONS. Tal situação irá impactar na ação média do controlador de eixo em quadratura, forçando o mesmo a ter um valor

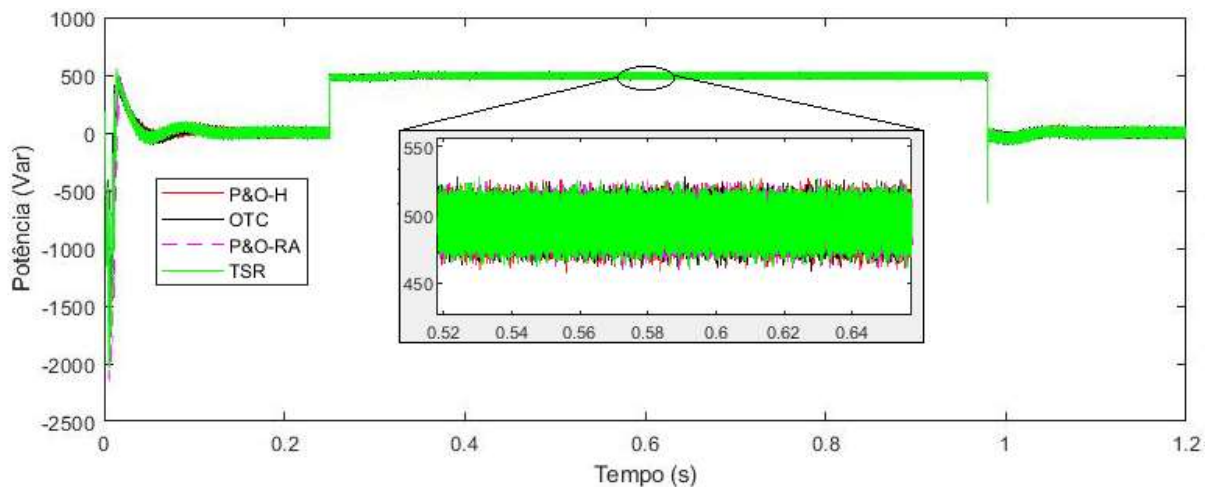
maior que o obtido na situação do LVRT-H. Como citado, foi usado um limitador de 600 Var.

Figura 40 - Potência ativa da rede com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico



Fonte: O próprio autor.

Figura 41 - Potência reativa da rede com LVRT-BC associado ao afundamento simétrico



Fonte: O próprio autor.

Também, foi analisado a ação de controle de cada um dos três controladores do CLR e do CLM, identificando as possíveis contribuições obtidas em cada um dos PI. Para isso, foi elaborada a Tabela 4, onde consta todos os valores médios para cada um dos seis controladores ao longo das simulações realizadas. Como descrito anteriormente, essa tabela foi dividida em três setores, evitando que o período de estabilização inicial do sistema interferisse no valor médio obtido.

Na Figura 42 está ilustrado a ação dos controladores do CLM e do CLR utilizando

LVRT-BC. Pelo fato deste último não suspender o MPPT, o controlador de velocidade irá atuar de maneira contínua mantendo a rotação do PMSG no seu valor ideal, extraindo assim a máxima potência do WECS durante toda a simulação, como ilustrado na Figura 42a. Em contrapartida, no intervalo do afundamento da tensão da rede, os esforços do PI são elevados de forma significativa, quando comparado com o LVRT-H, sendo um ponto negativo para o LVRT-BC. Pode-se analisar que o TSR apresenta o menor esforço de controle nos três setores analisados, como descrito na Tabela 4.

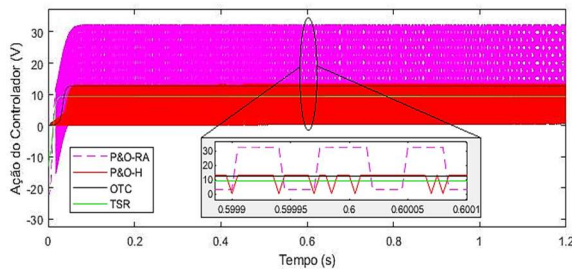
Nas Figuras 42b e 42c está ilustrado o comportamento do controlador da corrente de eixo direto e em quadratura do CLM utilizando LVRT-BC. Pelo fato citado anteriormente, da não suspensão do MPPT, estes controladores apresentam esforços contínuos durante a simulação. Tal situação resulta no aumento do valor médio do controlador da Figura 42b e 42c, quando comparada com a obtida no LVRT-H, durante o afundamento. O P&O-RA e P&O-H apresentaram os melhores resultados nestes dois controladores.

Tais pontos são justificados pelo fato de que, durante o afundamento, o WECS continua a produzir a máxima potência, o que necessita de um esforço contínuo do PI, possibilitando que o conjugado do PMSG seja controlado apenas pela corrente de eixo em quadratura, conforme equação (10). Com o LVRT-H isso não ocorre, devido o MPPT ser substituído pelo conjugado que rastreia a potência instantânea da rede elétrica, permitindo o PI não atuar durante este período de perturbação.

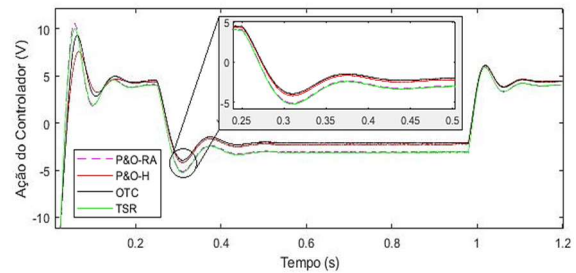
A Figura 42d ilustra o comportamento do controlador de tensão do CLR utilizando LVRT-BC. Nota-se que na acomodação inicial do sistema, intervalo entre 0 e 0,25 segundos, o P&O-H possui o menor *overshoot*. Durante o período de afundamento, entre 0,25 e 0,98 segundos, momento em que o resistor é inserido no link CC, a tensão no capacitor apresenta uma grande diminuição, e conseqüentemente, requerendo um esforço maior do controlador para sua estabilização, quando comparado ao mesmo intervalo do LVRT-H. Percebe-se que o controlador está impondo uma ação negativa, devido a rede ter que fornecer a potência ativa necessária para manter o nível de tensão do barramento constante. Por fim, após a normalização do sistema, entre 0,98 e 1,2 segundos, o PI apresenta picos de retomada levemente maiores que os obtidos na situação com o LVRT-H.

A Figura 42e ilustra o comportamento da ação do controle da corrente de eixo

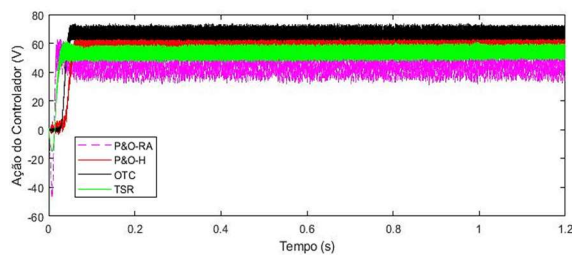
Figura 42 - Ação dos controladores do CLR e CLM utilizando LVRT-BC associado ao afundamento simétrico



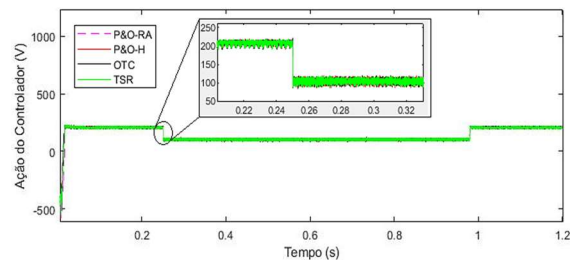
a) Ação do controlador de velocidade



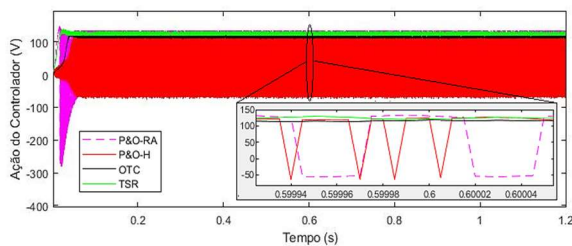
d) Ação do controlador de tensão



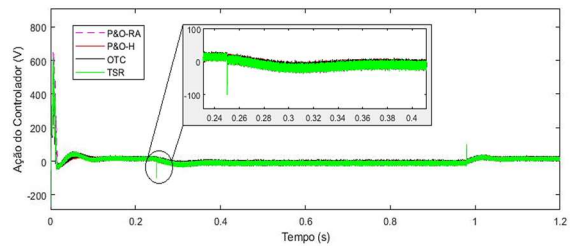
b) Ação do controlador eixo d da máquina



e) Ação do controlador eixo d da rede



c) Ação do controlador eixo q da máquina



f) Ação do controlador eixo q da rede

Fonte: O próprio autor.

direto da rede utilizando LVRT-BC. Durante o afundamento, percebe-se um aumento na ação do controlador, devido a rede agora fornecer energia ativa para o link CC, mantendo o capacitor no seu nível de tensão nominal. O P&O-H apresentou os melhores resultados nos setores analisados.

Na Figura 42f é possível comprovar que, durante o afundamento, a rede tende a absorver a potência reativa vindo do barramento CC, devido a perturbação simétrica. Por isso, a ação média do controlador de eixo em quadratura sofre um aumento, quando comparada a situação do LVRT-H.

5.2.4 LVRT braking chopper (LVRT-BC) associado ao afundamento assimétrico

Visando analisar a estabilidade, agora um afundamento de 50% do valor nominal

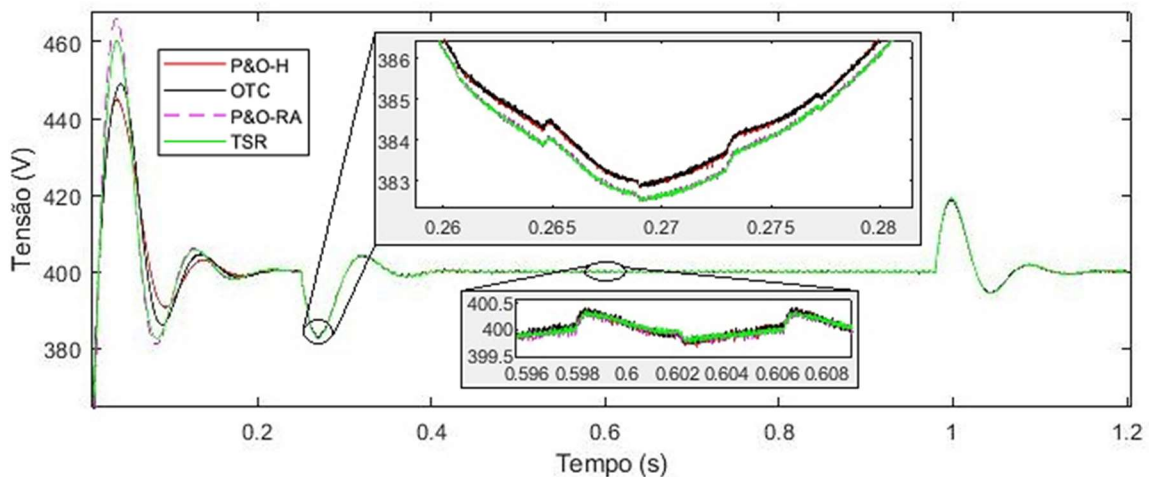
de 220 V foi aplicado apenas na fase A da rede, como ilustrado na Figura 30. O tempo de duração do mesmo foi de 0,73 segundos, sendo iniciado no instante de 0,25 segundos, e finalizando em 0,98 segundos. O tempo total de simulação é de 1.2 segundos.

Como descrito anteriormente, neste método de controle de mitigação, o MPPT não é suspenso durante o afundamento de tensão, deixando o sistema de geração isolado de qualquer tipo de falha ocorrido no lado do CLR. Assim, o PMSG opera de forma a manter sua velocidade em um determinado valor fornecido pelo MPPT, extraíndo a máxima potência do WECS, conforme ilustrado na Figura 37.

De maneira similar, a potência ativa produzida pelo WECS durante todo o intervalo de teste é a mesma da obtida na Figura 38. O MPPT que mais produz potência ativa é o OTC, seguido em ordem decrescente pelo P&O-H, P&O-RA e TSR. Nota-se que, como o CLM é totalmente isolado do CLR, os afundamentos da rede não são sentidos pela geração, sendo um ponto positivo dessa topologia. Estas duas situações das Figuras 37 e 38 podem ser comprovadas analisando a Tabela 4.

Agora, pela característica da falta assimétrica, a oscilação da tensão no barramento CC durante o intervalo inicial da perturbação é maior que o obtido na situação de falta simétrica, como ilustrado na Figura 43, utilizando LVRT-BC. Este fato é justificado devido a potência elétrica da rede também apresentar esse comportamento, de oscilar entorno do seu valor de referência. Como descrito anteriormente, a rede, neste momento, fornece a potência necessária para estabilizar o link CC, uma vez que o resistor está a dissipar a potência ativa produzida pelo WECS.

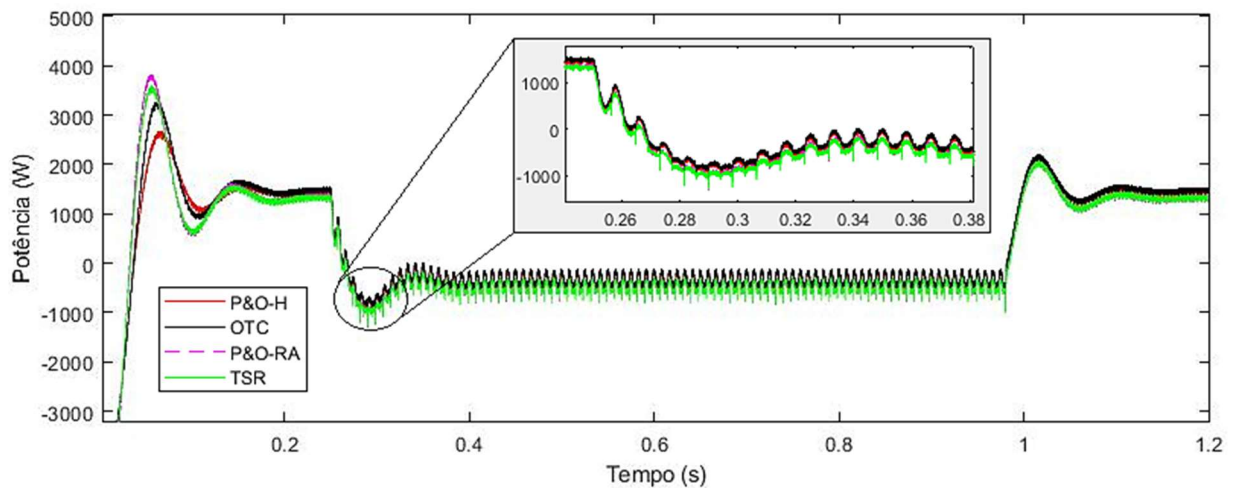
Figura 43 - Tensão do link CC com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 44 está ilustrado a oscilação presente na potência ativa da rede fornecida ao link CC durante o intervalo da perturbação utilizando o LVRT-BC. Por conta disso, a tensão no barramento absorve tal comportamento. Como o resistor, inserido no sistema durante o afundamento, tende a dissipar a energia produzida pelo PMSG, a rede elétrica passa ter a responsabilidade de fornecer a mesma, estabilizando a tensão, evitando assim a desconexão do sistema eólico. Nota-se também que, nos setores 1 e 3, a rede está absorvendo a potência ativa produzida pelo WECS.

Figura 44 - Potência ativa da rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico



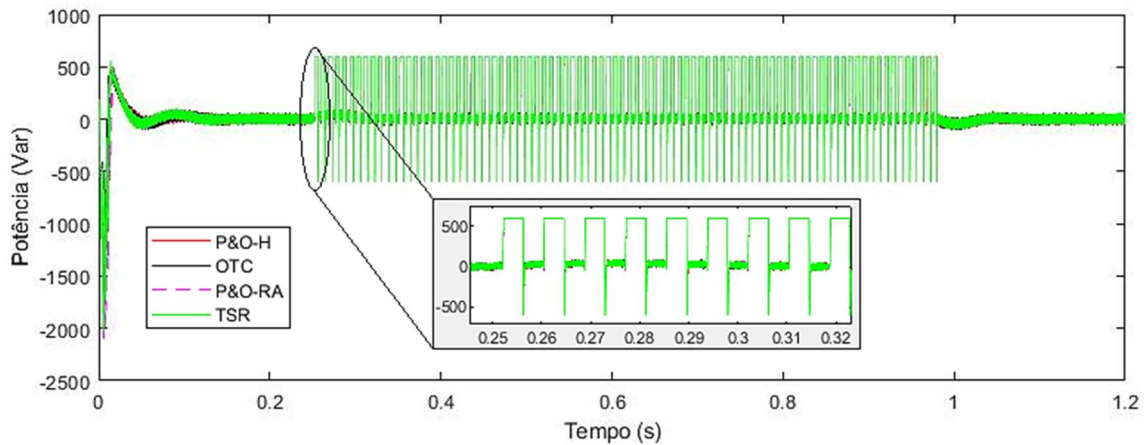
Fonte: O próprio autor.

A potência reativa injetada na rede elétrica está ilustrada na Figura 45 utilizando LVRT-BC. No instante em que o sistema detecta o afundamento da tensão, essa potência tende a oscilar durante o tempo da falta, requerendo um esforço maior do controle para sua normalização. Assim, com a retomada das condições normais da rede, o sistema tende a operar de forma estável, obtendo fator de potência unitário. Nesta simulação, conforme descrito anteriormente, também foi utilizado um limitador de potência de 600 Var, evitando picos indesejados da mesma durante as mudanças de referência.

Como o LVRT-BC não interfere na forma e no controle do CLM durante as faltas na rede, pelo fato do *back-to-back* ser isolado, as Figuras 42a, 42b e 42c são semelhantes as obtidas nas condições do afundamento assimétrico. Tal afirmação pode ser constatada na Tabela 4, analisando as malhas de velocidade, de eixo d da máquina e de eixo q da máquina, tanto no afundamento simétrico e assimétrico. Tais valores são idênticos. Portanto, de forma geral, o P&O-RA apresenta os melhores resultados no CLM quando comparados aos demais

métodos de MPPT. Já o P&O-H apresenta bons resultados nestes quesitos.

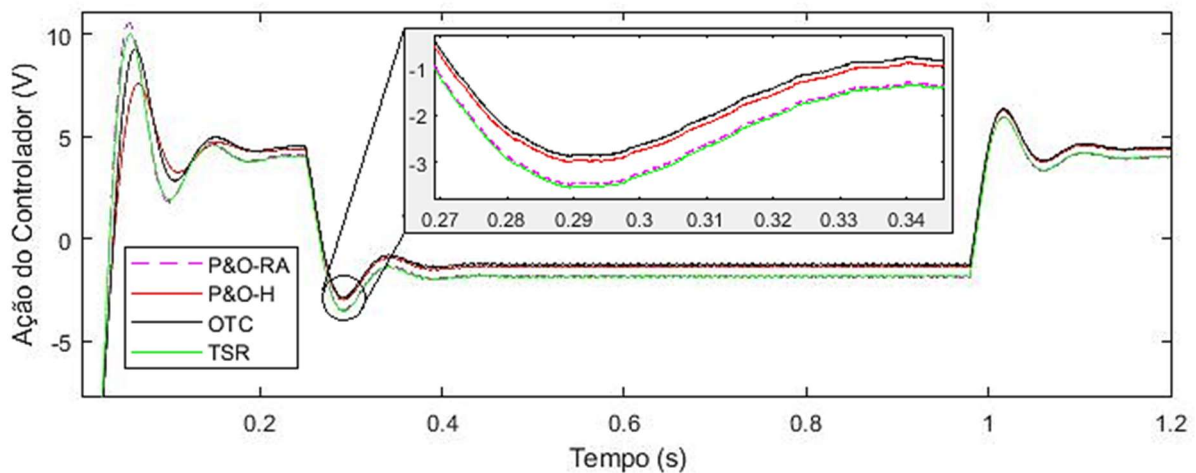
Figura 45 - Potência reativa da rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

Agora, no controle do CLR os resultados obtidos são modificados, devido a potência fornecida pela rede oscilar, dada a característica da falta assimétrica. Na Figura 46 está ilustrada a ação do controlador de tensão utilizando LVRT-BC. Embora a oscilação presente no intervalo inicial do afundamento eleve o esforço do controlador, a ação média do mesmo acaba sendo reduzida, quando comparada com a situação do afundamento simétrico. Tal fato é justificado pela aumento do valor médio da tensão obtida no barramento, ocasionado pela oscilação. Assim, o PI irá reduzir sua atuação média junto ao fornecimento de potência ativa. Estes valores podem ser consultados na Tabela 4.

Figura 46 - Ação do controlador PI tensão com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico

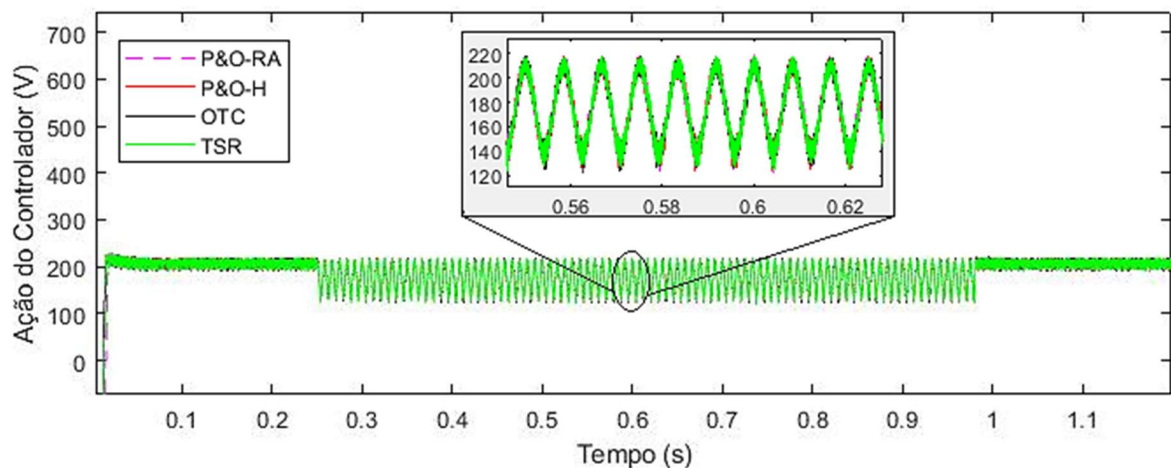


Fonte: O próprio autor.

Mas, quando comparada aos valores obtidos no LVRT-H, o controlador de tensão utilizando LVRT-BC tem em ambas as situações, de afundamento simétrico e assimétrico, um elevado aumento do seu valor médio, sendo um ponto negativo para o LVRT-BC. Visto que um dos principais pontos a serem analisados está na estabilidade da rede elétrica durante os afundamentos, com baixas oscilações no barramento CC.

Por fim, as Figuras 47 e 48 demonstram o comportamento dos controles das correntes de eixo direto e em quadratura da rede elétrica utilizando o LVRT-BC, respectivamente. Como citado anteriormente, na Figura 47, durante o afundamento, nota-se a presença da oscilação na ação do PI, devido os fatores provenientes do tipo da falta. Esta situação aumenta o valor da ação média do mesmo, contribuindo para um maior esforço. Com isso, o P&O-H apresentou os melhores resultados.

Figura 47 - Ação do controlador eixo d da rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

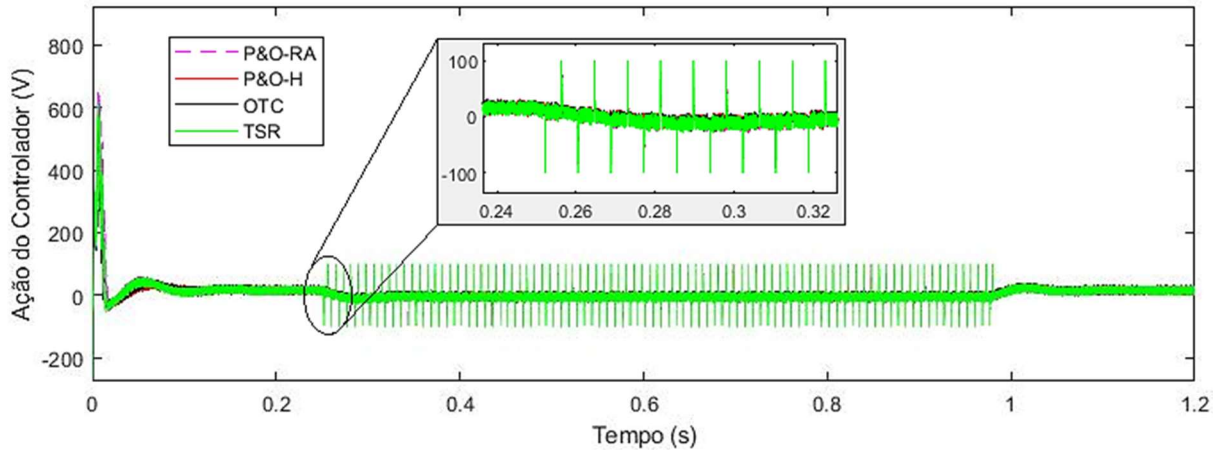
Já na Figura 48 está ilustrado a ação do controlador de eixo em quadratura da rede elétrica utilizando o LVRT-BC. A falta assimétrica afeta elevando a ação média deste PI, quando comparada a situação de falta simétrica. Novamente, o LVRT-BC apresenta este ponto negativo, uma vez que os valores obtidos no LVRT-H são bem menores.

Com os resultados obtidos ao longo dos vários cenários estabelecidos, foi construído as Tabelas 3 e 4. Estas foram divididas em três setores, evitando assim que o período inicial de estabilização do sistema interferisse no valor médio da ação dos controladores.

O setor 1 refere-se ao intervalo de tempo compreendido entre 0 e 0.25 segundos. O setor 2 compreende o tempo entre 0.25 segundos e 0.98 segundos, por fim, o setor 3 está

associado ao intervalo de 0.98 segundos até 1.2 segundos. Em cada trecho foi considerado o valor médio do controlador associado a sua malha.

Figura 48 - Ação do controlador eixo q da rede com LVRT-BC associado ao afundamento assimétrico



Fonte: O próprio autor.

Visando facilitar o entendimento da tabela, foi marcado de **negrito** os melhores valores obtidos em cada um dos três trechos estabelecidos, conforme cada controlador. Assim, é possível se ter uma melhor visão das contribuições obtidas por cada método de MPPT, quando operando em conjunto com os controles de mitigação LVRT-BC e LVRT-H.

Portanto, diante de tudo que foi descrito nos tópicos anteriores, pode-se comprovar que sim, os métodos de MPPT possuem características que auxiliam na estabilidade do sistema eólico, quando os mesmos são submetidos a afundamentos de tensão oriundos da rede elétrica.

Estas análises colaboram com a necessidade de desenvolvimento de mais métodos híbridos na literatura, visto que a junção de características distintas das mais diversas classes de MPPT acabam resultando em algoritmos robustos e adaptativos, para as mais diversas situações.

5.3 Considerações parciais

As simulações realizadas neste tópico mostram que o OTC obteve a maior eficiência na extração de potência elétrica do WECS, mas não é um método que obteve bons resultados mediante análise da ação média dos controladores do CLR e CLM, demonstrando

Tabela 3 - Ação médias dos controladores PI submetidos a afundamentos associado ao LVRT-H

AFUNDAMENTO	ENERGIA PI	OTC			P&O-H			P&O-RA			TSR		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SIMÉTRICO	VELOCIDADE	10,86	0,30	12,67	9,64	0,25	11,90	17,23	0,19	87,54	9,04	0,26	9,78
	EIXO D MÁQUINA	56,99	3,01	68,37	49,86	2,66	64,51	47,58	2,53	78,83	49,78	2,88	56,36
	EIXO Q MÁQUINA	103,98	146,45	117,60	97,26	146,71	113,52	99,34	147,00	110,09	119,95	146,74	124,56
	TENSÃO	6,02	0,42	4,34	5,78	0,36	4,28	6,05	0,28	4,32	5,82	0,38	3,96
	EIXO D REDE	207,56	86,77	202,97	207,55	86,77	203,00	210,24	86,78	203,09	208,41	86,78	203,21
	EIXO Q REDE	32,30	8,79	16,36	31,43	8,65	16,15	38,63	8,66	16,29	34,07	8,74	15,12
ASSIMÉTRICO	VELOCIDADE	10,86	1,06	12,66	9,66	1,02	11,93	17,23	0,96	218,78	9,04	1,00	9,76
	EIXO D MÁQUINA	56,99	7,23	68,24	49,98	6,95	64,60	47,58	6,44	78,83	89,78	6,96	56,26
	EIXO Q MÁQUINA	103,98	144,42	117,62	97,26	144,59	113,53	99,34	144,90	109,98	119,95	144,68	124,48
	TENSÃO	6,03	0,60	4,44	5,79	0,57	4,38	6,08	0,53	4,43	5,84	0,58	4,06
	EIXO D REDE	210,81	165,20	206,50	210,80	165,14	206,56	212,42	165,16	206,52	211,70	165,20	206,71
	EIXO Q REDE	32,33	10,09	16,56	31,39	10,03	16,39	37,40	10,05	16,53	33,69	10,04	15,25

Fonte: O próprio autor.

Tabela 4 - Ação médias dos controladores PI submetidos a afundamentos associado ao LVRT-BC

AFUNDAMENTO	ENERGIA PI	OTC			P&O-H			P&O-RA			TSR		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SIMÉTRICO	VELOCIDADE	10,86	12,50	12,51	9,62	11,56	11,67	17,27	17,66	17,58	8,93	9,24	9,33
	EIXO D MÁQUINA	56,98	67,00	67,08	49,77	62,19	62,71	47,73	48,69	48,64	49,25	53,29	53,80
	EIXO Q MÁQUINA	104,00	116,08	116,10	97,15	113,14	112,59	98,84	93,30	94,26	120,16	124,32	124,17
	TENSÃO	6,03	2,16	4,34	5,79	2,33	4,28	6,08	3,07	3,96	5,81	3,14	3,95
	EIXO D REDE	210,76	87,28	206,49	210,65	87,23	206,56	212,47	87,24	206,64	211,76	87,30	206,67
	EIXO Q REDE	32,33	8,73	16,50	31,35	9,19	16,23	37,39	11,41	15,06	33,58	11,61	14,99
ASSIMÉTRICO	VELOCIDADE	10,86	12,50	12,51	9,62	11,54	11,69	17,27	17,62	17,51	8,93	9,24	9,33
	EIXO D MÁQUINA	56,98	67,02	67,07	49,77	62,12	62,76	47,73	48,56	48,38	49,25	53,31	53,79
	EIXO Q MÁQUINA	104,00	116,09	116,10	97,15	113,05	112,62	98,84	93,79	95,11	120,16	124,33	124,17
	TENSÃO	6,03	1,32	4,41	5,79	1,43	4,34	6,08	1,87	3,96	5,81	1,89	3,98
	EIXO D REDE	210,76	165,33	206,48	210,65	165,30	206,49	212,47	165,38	206,68	211,76	165,32	206,65
	EIXO Q REDE	32,33	10,42	16,48	31,35	10,62	16,26	37,39	11,40	14,85	33,58	11,42	14,94

Fonte: O próprio autor.

que existe sim relação entre MPPT e estabilidade do sistema.

O P&O-RA apresentou bons resultados nos controladores do CLM. Já o método proposto neste trabalho, P&O-H, além de apresentar uma ótima eficiência na extração de potência, conforme Tabela 1, também apresentou bons resultados na ação média dos controladores do CLR, dando suporte para a rede elétrica durante os períodos de afundamento e recomposição das condições nominais da tensão. Tal situação foi constatada em situações usando o LVRT-BC e LVRT-H, tornando-o um método de MPPT robusto e de ampla utilização para os sistemas eólicos.

Os resultados obtidos ao longo das simulações do LVTR foram resumidas nas Tabelas 3 e 4. Nelas, pode-se ter uma melhor visão dos dados obtidos em cada um dos controladores e trechos analisados, concluindo-se que os métodos de MPPT, em conjunto com as técnicas de mitigação do LVRT, interferem na estabilidade do sistema como um todo.

O método proposto neste trabalho, o LVRT-H, demonstrou contribuições significativas na redução da ação média de todos os controladores durante o intervalo de afundamento, tanto nas condições de perturbação simétrica como assimétrica. Também, apresentou os menores níveis de oscilação no barramento CC, contribuindo com a estabilidade do sistema eólico, e por consequência, da rede elétrica. Desta forma, ambas as técnicas propostas neste trabalho, o LVRT-H e o P&O-H, apresentam ótimas contribuições para o sistema eólico conectado na rede elétrica, tornando-se métodos perfeitamente aplicáveis, contribuindo assim para o desenvolvimento desta fonte renovável.

No próximo capítulo será apresentado as considerações finais deste trabalho.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tratou do estudo de diversos algoritmos de MPPT aplicados em um sistema eólico de baixa potência conectado na rede elétrica, onde uma série de simulações foram implementadas. Para a realização destas, foi utilizada uma turbina eólica de velocidade variável, associada a um gerador síncrono de ímã permanente. Por fim, a conexão deste sistema na rede elétrica ficou a cargo do conversor bidirecional *back-to-back*.

Também, este estudo propôs um novo algoritmo de MPPT chamado de P&O-H. Este método se utiliza de características de rastreamento do MPP combinados de diversas classes para elevar a sua velocidade de convergência e a eficiência na extração de potência elétrica. Tal controle se enquadra dentro de uma linha de pesquisa do P&O ainda pouco explorada pelos pesquisadores, com grande potencial de desenvolvimento, destacando-se dos demais por ser um MPPT que não requer o conhecimento de nenhum parâmetro do sistema, sendo perfeitamente adaptável às condições do ambiente.

Como forma de contribuir com a estabilidade do sistema como um todo, foi apresentada uma estratégia de controle simples e de baixo custo, ainda pouco aplicada, visando aumentar a confiabilidade tanto do sistema eólico como da rede elétrica em situações de afundamentos de tensão simétricos e assimétricos, o LVRT-H. Essa abordagem se justifica pelo fato de a geração eólica tornar-se cada vez mais importante para a matriz energética brasileira, com um grande número de parques instalados e em construção.

Assim, o autor realiza um paralelo entre o MPPT e a estabilidade do sistema eólico durante os afundamentos ocorridos na rede elétrica, demonstrando que os algoritmos de extração de potência abordados e proposto têm impactos positivos e negativos na mitigação do LVRT.

Para validar tais afirmações, simulações foram aplicadas utilizando os softwares Psim e Matlab. Primeiro, visando quantificar a eficiência do P&O-H, foi feita uma comparação da porcentagem de extração de potência de cada método aqui abordado, sendo impostas variações na velocidade do vento para tal. Como resultado, o algoritmo proposto, obteve 64,05% de aproveitamento, ficando atrás apenas do OTC, com o melhor valor, de 76,43%, sem entretanto precisar da medição do vento ou o conhecimento dos parâmetros do sistema.

O P&O-H apresentou também contribuições significativas na redução da energia dos controladores vinculados ao controle do CLR, em todas as situações onde o LVRT-H e LVRT-BC foi aplicado, tornando-o um método eficiente e de ampla utilização.

O método de mitigação LVRT-H apresentou grande redução da ação média dos controladores durante o intervalo dos afundamentos simétricos e assimétricos, quando comparada com a técnica do LVRT-BC, contribuindo assim para uma maior estabilização da rede elétrica e do sistema eólico. Por ser uma técnica que não requer dispositivos externos para seu funcionamento, torna-se de baixo custo, podendo ser aplicado nas mais diversas situações do WECS.

Com isso, este trabalho conseguiu comprovar tais pontos ainda não abordados na literatura, permitindo se estabelecer novas métricas para a melhor escolha dos algoritmos de MPPT que deverão ser aplicados aos sistemas eólicos, visando maximizar a extração de potência, associado a um controle eficiente na mitigação de perturbações oriundas da rede elétrica.

6.1 Propostas para Trabalhos Futuros

O autor pretende desenvolver métodos de MPPT híbridos, adotando agora técnicas de inteligência computacional aplicada como a busca harmônica (*Harmony Search* - HS), visando melhorar a eficiência de rastreamento dos mesmos. Também, analisar os impactos que podem ser adicionados pela utilização dessa tecnologia.

Outra sugestão é desenvolver métricas mais claras de classificação dos algoritmos de MPPT, aplicando métodos estatísticos como a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação, visto que na revisão literária aplicada neste trabalho foi identificado que tal ponto acaba sendo descrito por meio de padrões subjetivos de cada um dos autores que utilizam tal classificação, contribuindo assim para uma padronização de escolha.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, M. A.; YATIM, A. H. M.; TAN, C. W.; SAIDUR, R. **A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 16, p. 3220– 3227, Junho. 2012.

ABEEólica. **Associação brasileira de energia eólica**. 2021. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/noticias/jornal-nacional-brasil-tem-batido-sucessivos-records-na-geracao-de-energia-eolica-2/>>. Acesso em: 17 de setembro de 2021.

ALEPUZ,S.;CALLE,A.; MONGE,S. B.; KOURO,S.; WU, B. **Use of stored energy in PMSG rotor inertia for low-voltage ride-through in back-to-back NPC converter-based wind Power systems**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 60, pp. 1787–1795, Maio. 2013.

ANDREW, Z.; YUN, W. L.; YASSER, M. **Mechanical stress comparison of PMSG wind turbine LVRT methods**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 36, pp. 682 – 692, Junho. 2021.

BARBI, Ivo. **Teoria Fundamental do Motor de Indução**. 1a edição, Florianópolis: Ed. da UFSC. Eletrobras.1985.

BAKHTIARI, F.; NAZARZADEH, J. **Optimal estimation and tracking control for variable-speed wind turbine with PMSG**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, v. 8, pp. 159 – 167, Janeiro. 2020.

BOSE, Bimal K. **Modern Power Electronics and AC Drives**. Prentice Hall PTR, 2002.

DUARTE, Odilio de Souza. **Algoritmo mppt para sistema de geração de energia eólica de pequeno porte com pmsg**. 2016. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2016.

E.ON Netz GmbH, **Grid code: high and extra high voltage**, Germany, Abril, 2006.

FATHABADI, H. **Novel maximum electrical and mechanical power tracking controllers for wind energy conversion systems**. IEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 5, nº 4, Dezembro. 2017.

FERREIRA, Abel António de Azevedo. **Sistema de produção de energia eólica**. 2011. 191f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) -

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2006.

GAJEWSKI, P.; PIENKWSKI, K. **Control of wind turbine system with PMSG for low voltage ride through**. International Symposium on Electrical Machines (SME), p. 1-5, New York: IEEE, 2018.

GWEC. **Global wind energy council**. 2021. Disponível em:<<https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/04/Jobs-Note-April-2021-2.pdf>>. Acesso em: 17 de setembro de 2021.

HUANG, C.; LI, F.; JIN, Z. **Maximum power point tracking strategy for large-scale wind generation systems considering wind turbine dynamics**. Transactions on Industrial Electronics, volume 62, 10, 2015.

IVANQUI, Josmar. **Controle de geradores síncronos com ímãs permanentes em aerogeradores sob condições de afundamento de tensão da rede elétrica: falhas simétricas e assimétricas**. 2014. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

KAZMI, S. M. R.; GOTO, H.; GUO, H.; ICHINOKURA, O. **A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems**. Transactions on Industrial Electronics, volume 58, 8, 2011.

LEE, J.; KIM, Y. **Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode rectifier**. IET Renewable Power Generation, volume 10, 9, 2016.

LIJUN, H.; YONGDONG, L.; RONALD, G. H. **Adaptative multi-modo power control of a direct-driver pm wind generation system in a microgrid**. Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 1, p. 217 – 225, Dezembro. 2013.

MACHADO, Isaac Rocha. **Geração elétrica a partir de ondas do mar – modelo completo e análise do sistema de armazenamento de energia**. 2013. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (COPEL), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MEKALATHUR, B. H. K.; BALASUBRAMANIAN, S.; PADMANABAN, S.; FREFE, B.

Review on control techniques and methodologies for maximum power extraction from wind energy systems. IET Renewable power generation, 14, Agosto. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). 2021. **Boletim de monitoramento do sistema elétrico.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2021/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-julho-2021-v2.docx/view>>. Acessado em 17 de Setembro de 2021.

MOUSA, H. H. H.; YOUSSEF, A. R.; MOHAMED, E. E. M. **Study of robust adaptive step-sizes p&o mppt algorithm for high-inertia wt with direct-driven multiphase pmsg.** Int Trans Electr Energ Syst, Maio de 2019a.

MOUSA, H. H. H.; YOUSSEF, A. R.; MOHAMED, E. E. M. **Hybrid and adaptive sectors p&o mppt algorithm based wind generation system.** Renewable Energy, p. 1412 – 1429, Junho de 2019b.

MOUSA, H. H. H.; YOUSSEF, A. R.; MOHAMED, E. E. M. **State of the art perturb and observe mppt algorithms based wind energy conversion systems: a technology review.** International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, p. 25, Outubro. 2020.

MOUSA, H. H. H.; YOUSSEF, A. R.; HAMDAN, I.; AHAMED, M.; MOHAMED, E. E. M. **Performance assessment of robust p&o algorithm using optimal hypothetical position of generator speed.** IEEE Access, vol. 9, p. 30469 – 30485, Fevereiro de 2021.

MUSUNURI, S.; GINN, H. L. **Comprehensive review of wind energy maximum power extraction algorithms.** IEEE Power and Energy Society General Meeting. doi:10.1109/pes.2011.6039023, pp. 8, 2011.

NASIRI, M.; MILIMONFARED, J.; FATHI, S. H. **A review of low-voltage ride through enhancement methods for permanent magnet synchronous generator based wind turbines.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 399–415, Março. 2015.

OLIVEIRA JUNIOR, Jorge Luiz Watters. **Desenvolvimento de plataforma emuladora de turbina eólica para estudos de algoritmos de MPPT eólicos inteligentes.** 2016. 193f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

ONS. **Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.** 2019.

PSim. **Psim user's guide**. Powersim Inc. 2011

RIBEIRO, Renata Kelly Ferreira. **Avaliação dos requisitos LVRT de parques eólicos**. 2020. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SANTOS, Guilherme Viana. **Sistemas de controle aplicado aerogeradores síncronos com conversor back-to-back**. 2015. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015.

SIM, J. B.; KIM, K. C.; SON, R. W.; OH, J. K. **Ride-through of PMSG wind Power system under the distorted and unbalanced grid voltage dips**. J. Electr. Eng. Technol, v. 7, nº 6, p. 898–904, Agosto. 2012.

THONGAM, J. S.; BOUCHARD, P.; EZZAIDI, H.; OUHROUCHE, M. **Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems**. IEE International Electric Machines and Drives Conference, p. 1832 – 1837, 2009.

THONGAM, J. S.; OUHROUCHE, M. **MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems**. Dr. Rupp Carriveau, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, 22. Intech, China, 2011.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009. 285 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Minas Gerais, Florianópolis, 2009.

TRIPATHI, S. M.; TIWARI, A. N.; SINGH, D. **Grid-integrated permanente magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: A technology review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 1288 – 1305, Junho. 2015a.

TRIPATHI, S. M.; TIWARI, A. N.; SINGH, D. **Optimum design of proportional-integral controllers in grid integrated PMSG-based wind energy conversion system**. International Transaction on Electrical Energy System, pp. 1006 – 1031, Agosto. 2015b.

TRIPATHI, S. M.; TIWARI, A. N.; SINGH, D. **Low-voltage ride-through enhancement with the ω and T controls of PMSG in a grid-integrated wind generation system**. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 13, pp. 1979–1988, Fevereiro. 2019.

VIJAYALAKSHMI, S.; GANAPATHY, V.; VIJAYAKUMAR, K.; DASH, S.S. **Maximum power point tracking for wind power generation system at variable wind speed using a hybrid technique.** International Journal of Control and Automation, Vol. 8, n.7, pp. 357-372, 2015.

YIN, M.; LI, W.; CHUNG, C. Y.; ZHOU, L.; CHEN, Z.; ZOU, Y. **Optimal torque control based on effective tracking range for maximum power point tracking of wind turbines under varying wind conditions.** IET Renewable power generation, volume 11, 10, 2016.

YOUSSEF, A. R.; ALI, A. I. M.; SAEED, M. S. R.; MOHAMED, E. E. M. **Advanced multi-sector P&O maximum power point tracking technique for wind energy conversion system.** Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, pp. 89 – 97, Novembre. 2018.

APÊNDICE A – PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA EÓLICO

Os parâmetros aqui listados são referentes ao software Psim versão 9.1.1.

PARÂMETROS DO GERADOR

Parâmetro	Valor
Resistência do enrolamento (R_s)	2,875 Ohms
Indutância do eixo direto (L_d)	8,5 mH
Indutância do eixo quadratura (L_q)	8,5 mH
Tensão induzida de pico fase-neutro	126,96 V_{pk}/K_{rpm}
Momento de inércia (J)	0,001 Kg m ²
Coefficiente de Atrito (B)	0,001 N.m
Fluxo Magnético (ψ_m)	0,175 Wb
Pares de polos	4

Fonte: (FERREIRA, 2011).

PARÂMETROS DA TURBINA

Parâmetro	Valor
Potência nominal	5 KW
Velocidade do vento base	12 m/s
Velocidade mecânica base	1500 Rpm
Momento de inércia (J)	0.001 Kg m ²
Coefficiente de potência (C_{p_opt})	0,48
Relação de velocidade de ponta (λ_{opt})	8,1

Fonte: (FERREIRA, 2011).

PARÂMETROS DA REDE ELÉTRICA

Parâmetro	Valor
Tensão link DC	400 V
Capacitor do link DC	2 mF
Resistência do filtro	1
Indutância do filtro	10 mH
Tensão da rede elétrica	220/380 V
Frequência de chaveamento	20 KHz

Fonte: (FERREIRA, 2011).

APÊNDICE B – PARÂMETROS DOS CONTROLADORES PI

1. CONVERSOR DO LADO DA MÁQUINA

1.1 Malha externa de velocidade

A função de transferência da malha de velocidade do gerador é dada pela seguinte equação:

$$FT_{velocidade}(s) = \frac{1}{B + s \cdot J}$$

onde J é o momento de inercia e B o coeficiente de atrito do gerador.

Aplicando o projeto do controlador abordado em (SANTOS, 2015), o controlador de velocidade do tipo PI será sintonizado impondo uma banda passante menor que 40 vezes a banda passante da malha interna de corrente ($F_{ch} = 50$ Hz). Assim, o ganho proporcional (K_p) e o tempo de integração (t_i) do controlador serão dados por:

$$T_{mf} = \frac{1}{F_{ch} \cdot 2 \cdot \pi} = 0,003183$$

$$t_i = \frac{J}{B} = \frac{0,001}{0,001} = 1$$

$$K_p = \frac{t_i \cdot B}{T_{mf}} = \frac{1 \cdot 0,001}{0,003183} = 0,3141$$

Realizando ajustes nos parâmetros do controlador PI visando adequar o controle as diversas características de MPPT abordadas neste trabalho, K_p e t_i foram ajustados para os seguintes valores:

Ganhos do controlador de velocidade do CLM associado ao MPPT

MPPT	Parâmetro	Valor
TSR	K_p	0,125
	t_i	20
P&O-PV	K_p	0,045
	t_i	1,45
CA	K_p	0,045
	t_i	1,55

P&O-H	K_p	0,075
	t_i	20
P&O-VS	K_p	9
	t_i	0.001
P&O-RA	K_p	5
	t_i	0.01

Fonte: O próprio autor.

1.1 Malha interna de corrente

Com base na equação (11), a função de transferência da malha de corrente de eixo direto e em quadratura da máquina será descrita por:

$$FT_{corrente_máquina}(s) = \frac{1}{2,875 + s \cdot 8,5 \cdot 10^{-3}}$$

Assim, aplicando o projeto do controlador PI abordado em (SANTOS, 2015), onde a banda passante da malha de corrente deve ser dez vezes menor que a frequência de chaveamento do conversor da máquina ($F_{ch} = 20\text{K Hz}$), o ganho proporcional (K_p) e o tempo de integração (t_i) do controlador serão dados por:

$$T_{mf} = \frac{1}{0,1 \cdot F_{ch} \cdot 2 \cdot \pi} = 0,00007958$$

$$K_p = \frac{L_s}{T_{mf}} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3}}{0,00007958} = 106,8107$$

$$\tau_i = \frac{L_s}{R_s} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3}}{2,875} = 0,002956$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} = \frac{106,8107}{0,002956} = 36133,525$$

$$t_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{106,8107}{36133,525} = 0,002956$$

Realizando ajustes nos parâmetros do controlador PI visando reduzir os picos de corrente indesejados ao longo das simulações, K_p e t_i foram ajustados para os seguintes valores:

Ganhos do controlador da corrente do CLM

Parâmetro	Valor
K_p	15
t_i	0.0055

Fonte: O próprio autor.

2. CONVERSOR DO LADO DA REDE

2.1 Malha externa de tensão

A função de transferência da malha de tensão do barramento CC é dada pela seguinte equação:

$$FT_{tensão}(s) = \frac{3V_{dc}}{2V_d} \cdot \frac{1}{s \cdot C}$$

Assim, aplicando o projeto do controlador PI abordado em (SANTOS, 2015), onde a banda passante da malha de tensão deve ser vinte vezes menor que a banda passante da malha de corrente ($F_{ch} = 100$ Hz), o ganho proporcional (K_p) e o tempo de integração (t_i) do controlador serão dados por:

$$K_{DC} = 1,5 \cdot \frac{3V_{dc}}{2V_d \cdot C} = 1363,63$$

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n}{K_{DC}} = \frac{2 \cdot 0,8 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 100)}{1363,63} = 0,7372$$

$$K_i = \frac{\omega_n^2}{K_{DC}} = \frac{394783,50}{1363,63} = 289,5092$$

$$t_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{0,7372}{289,5092} = 0,002546$$

Realizando ajustes nos parâmetros do controlador PI, K_p e t_i foram ajustados para os seguintes valores:

Ganhos do controlador de tensão do CLR

Parâmetro	Valor
K_p	0.12
t_i	0.009

Fonte: O próprio autor.

2.2 Malha interna de corrente

Com base na equação (17), a função de transferência da malha de corrente de eixo direto e em quadratura da rede elétrica será descrita por:

$$FT_{corrente_rede}(s) = \frac{1}{1 + s \cdot 10 \cdot 10^{-3}}$$

Assim, aplicando o projeto do controlador PI abordado em (SANTOS, 2015), onde a banda passante da malha de corrente deve ser dez vezes menor que a frequência de chaveamento do conversor da rede ($F_{ch} = 20\text{K Hz}$), o ganho proporcional (K_p) e o tempo de integração (t_i) do controlador serão dados por:

$$T_{mf} = \frac{1}{0,1 \cdot F_{ch} \cdot 2 \cdot \pi} = 0,00007958$$

$$K_p = \frac{L_f}{T_{mf}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,00007958} = 125,66$$

$$K_i = \frac{R_f}{T_{mf}} = \frac{1}{0,00007958} = 12566,36$$

$$t_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{125,66}{12566,36} = 0,01$$

Realizando ajustes nos parâmetros do controlador PI visando reduzir os picos de corrente indesejados ao longo das simulações, K_p e t_i foram ajustados para os seguintes valores:

Ganhos do controlador da corrente do CLR

Parâmetro	Valor
K_p	60
t_i	0.02

Fonte: O próprio autor.

APÊNDICE C – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-PV

```

Static int cont=0;
Static float Wm, Wm_atual,
Wm_ant_1, Wm_ant_2, Variacao_Wm_ant, Variacao_Wm_atual;
Static float POT, Pot_atual, Pot_ant, Variacao_Pot;

Wm=in[0];
POT=in[1];

if(cont==0){

    Wm_atual=Wm;
    Wm_ant_1=0;
    Wm_ant_2=0;
    Variacao_Wm_ant=Wm_ant_1-Wm_ant_2;
    Pot_atual=POT;
    Pot_ant=0;
    Variacao_Pot=Pot_atual-Pot_ant;
cont=cont+1;
}

if(cont==1){

    Wm_ant_1=Wm_atual;
    Wm_ant_2=0;
    Wm_atual=Wm;
    Variacao_Wm_ant=Wm_ant_1-Wm_ant_2;
    Pot_ant=Pot_atual;
    Pot_atual=POT;
    Variacao_Pot=Pot_atual-Pot_ant;
cont=cont+1;

}else{

    Wm_ant_2=Wm_ant_1;
    Wm_ant_1=Wm_atual;
    Wm_atual=Wm;
    Variacao_Wm_ant=Wm_ant_1-Wm_ant_2;
    Pot_ant=Pot_atual;
    Pot_atual=POT;
    Variacao_Pot=Pot_atual-Pot_ant;
cont=cont+1;
}

if(0 <= Variacao_Pot <= 0.2){

    Wm_atual= Wm_ant_1;
out[0]=Wm_atual;

}else{

if(Variacao_Pot > 0){

if(Variacao_Wm_ant >= 0){

```

```
        Variacao_Wm_atual=sqrt(Variacao_Pot*Variacao_Pot)*0
        .00008;
        Wm_atual=Wm_ant_1 + Variacao_Wm_atual;
out[0]=Wm_atual;
    }else{
        Variacao_Wm_atual=-
        (sqrt(Variacao_Pot*Variacao_Pot)*0.00008);
        Wm_atual=Wm_ant_1 + Variacao_Wm_atual;
out[0]=Wm_atual;
    }
}else{
    if(Variacao_Wm_ant >= 0){
        Variacao_Wm_atual=-
        (sqrt(Variacao_Pot*Variacao_Pot)*0.00008);
        Wm_atual=Wm_ant_1 + Variacao_Wm_atual;
out[0]=Wm_atual;
    }else{
        Variacao_Wm_atual=sqrt(Variacao_Pot*Variacao_Pot)*0
        .00008;
        Wm_atual=Wm_ant_1 + Variacao_Wm_atual;
out[0]=Wm_atual;
    }
}
}
```

APÊNDICE D – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-VS

```

Static int cont=0;
Static float Wm, Wm_atual, Wm_ant, Variacao_Wm;
Static float POT, Pot_atual, Pot_ant, Variacao_Pot;
Static float Vento;

Wm=in[0];
Vento=in[1];
POT=in[2];
if (cont==0){

    Wm_atual=Wm;
    Wm_ant=0;
    Variacao_Wm=Wm_atual-Wm_ant;
    Pot_atual=POT;
    Pot_ant=0;
    Variacao_Pot=Pot_atual-Pot_ant;
cont=cont+1;

} else{

    Wm_ant=Wm_atual;
    Wm_atual=Wm;
    Variacao_Wm=Wm_atual-Wm_ant;
    Pot_ant=Pot_atual;
    Pot_atual=POT;
    Variacao_Pot=Pot_atual-Pot_ant;
cont=cont+1;
}

if (Variacao_Pot > 0){

if (Pot_atual > (Vento*(Variacao_Pot/Variacao_Wm))){

out[0]= Wm + (Variacao_Pot*0.0001);

} else{

out[0]= Wm + (Variacao_Pot*0.08);

}

} else{

if (Pot_atual > (Vento*(Variacao_Pot/Variacao_Wm))){

out[0]= Wm - (Variacao_Pot*0.0001);

} else{

out[0]= Wm - (Variacao_Pot*0.08);

}

}

```


APÊNDICE E – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-RA

```

Static int cont=0;
Static float Wm, Wm_atual, Wm_ant, Variacao_Wm;
Static float POT, Pot_atual, Pot_ant, Variacao_Pot;
Static float Vento, D;

Wm=in[0];
Vento=in[1];
POT=in[2];

if(cont==0){

    Wm_atual=Wm;
    Wm_ant=0;
    Variacao_Wm=Wm_atual-Wm_ant;
    Pot_atual=POT;
    Pot_ant=0;
    Variacao_Pot=Pot_atual-Pot_ant;
    cont=cont+1;

}else{

    Wm_ant=Wm_atual;
    Wm_atual=Wm;
    Variacao_Wm=Wm_atual-Wm_ant;
    Pot_ant=Pot_atual;
    Pot_atual=POT;
    Variacao_Pot=Pot_atual-Pot_ant;
    cont=cont+1;
}

if(Variacao_Pot > 0){

    D=4.3*(((8.1*Vento)/0.75)-Wm)/((8.1*Vento)/0.75);
    out[0]= Wm + D;

}else{

    D=4.3*(((8.1*Vento)/0.75)-Wm)/((8.1*Vento)/0.75);
    out[0]= Wm - D;

}

```

APÊNDICE F – CÓDIGOS DO ALGORITMO CA

```

Static int cont=0;
Static float POT, Pot_atual, Pot_ant, variacao_Pot_atual, variacao_Pot_ant;
Static float Wm, Wm_atual, Wm_ant, variacao_Wm_atual,
Wm_ref_atual, Wm_ref_ant, X, step;
Static float K_opt=0;

Wm=in[0];
POT=in[1];

if(cont==0){

    Pot_ant=0;
    Pot_atual=POT;
    variacao_Pot_ant=0;
    variacao_Pot_atual=Pot_atual-Pot_ant;
    Wm_ant=0;
    Wm_atual=Wm;
    variacao_Wm_atual=Wm_atual-Wm_ant;
    cont= cont+1;

}else{

    Pot_ant=Pot_atual;
    Pot_atual=POT;
    variacao_Pot_ant=variacao_Pot_atual;
    variacao_Pot_atual=Pot_atual-Pot_ant;
    Wm_ant=Wm_atual;
    Wm_atual=Wm;
    variacao_Wm_atual=Wm_atual-Wm_ant;
    Wm_ref_ant=Wm_ref_atual;
    cont= cont+1;

}

if(sqrt (variacao_Pot_atual*variacao_Pot_atual) < 20){

    Wm_ref_atual=Wm_ref_ant;
    out[0]=Wm_ref_atual;

}else{

if(1.5*sqrt (variacao_Pot_atual*variacao_Pot_atual)>= sqrt
(variacao_Pot_ant*variacao_Pot_ant)){

if(sqrt (variacao_Pot_ant*variacao_Pot_ant) < 20){

        K_opt=((variacao_Pot_ant)/(Wm_ant));
        X=Pot_atual / K_opt;
        Wm_ref_atual= pow(X, (1/3));
        out[0]=Wm_ref_atual;
        out[1]=K_opt;

}else{

```

```

                X= Pot_atual / K_opt;
                Wm_ref_atual= pow(X, (1/3));
out[0]=Wm_ref_atual;
out[1]=K_opt;

        }

}else{

if(sqrt(variacao_Pot_atual*variacao_Pot_atual)> 0){

if(variacao_Wm_atual > 0){

step=0.01*sqrt(variacao_Pot_atual*variacao_Pot_atual);
                Wm_ref_atual=Wm_ref_ant+step;
out[0]=Wm_ref_atual;

}else{

step=-0.01*sqrt(variacao_Pot_atual*variacao_Pot_atual);
                Wm_ref_atual=Wm_ref_ant+step;
out[0]=Wm_ref_atual;
        }

}else{

if(variacao_Wm_atual > 0){

step=-0.01*sqrt(variacao_Pot_atual*variacao_Pot_atual);
                Wm_ref_atual=Wm_ref_ant+step;
out[0]=Wm_ref_atual;

}else{

step=0.01*sqrt(variacao_Pot_atual*variacao_Pot_atual);
                Wm_ref_atual=Wm_ref_ant+step;
out[0]=Wm_ref_atual;
        }
    }
}
}

```

APÊNDICE G – CÓDIGOS DO ALGORITMO P&O-H

```

Static int cont=0;
Static float Pot_EM_atual, Pot_EM_ant, D_pot_atual, D_pot_ant;
Static float D_Wm_Ref, X;
Static float Wm_atual, Iq, wm, Wm_Ref_atual, Wm_Ref_ant;
Static float K_opt=0;

wm=in[0];
Iq=in[1];

if(cont==0){

    Wm_atual=wm;
    Pot_EM_atual=0.75*8*Iq*0.175*wm;
    Pot_EM_ant=0;
    D_pot_atual=Pot_EM_atual-Pot_EM_ant;
    D_pot_ant=0;
    cont=cont+1;

}else{

    Wm_atual=wm;
    Pot_EM_ant=Pot_EM_atual;
    Pot_EM_atual=0.75*8*Iq*0.175*wm;
    D_pot_ant=D_pot_atual;
    D_pot_atual =Pot_EM_atual - Pot_EM_ant ;
    cont=cont+1;

}

if(sqrt(D_pot_atual*D_pot_atual) < 3){

if(cont==0){

    Wm_Ref_atual=Wm_atual;
    out[0]=Wm_Ref_atual;

}else{

    Wm_Ref_ant=Wm_Ref_atual;
    Wm_Ref_atual=Wm_atual;
    out[0]=Wm_Ref_atual;

}

}else{

if(2*sqrt(D_pot_atual* D_pot_atual)>=sqrt(D_pot_ant* D_pot_ant)){

if(sqrt(D_pot_ant*D_pot_ant)< 0.65){

    K_opt=((Pot_EM_atual)/(Wm_atual*Wm_atual*Wm_atual));
    X=Pot_EM_atual/K_opt;
    Wm_Ref_ant=Wm_Ref_atual;
}
}
}
}

```

```

        Wm_Ref_atual= pow(X, (1/3));
out[0]=Wm_Ref_atual;
out[1]=K_opt;

}else{

        Wm_Ref_ant=Wm_Ref_atual;
        X=Pot_EM_atual/K_opt;
        Wm_Ref_atual= pow(X, (1/3));
out[0]=Wm_Ref_atual;
out[1]=K_opt;

        }

}else{

if(D_pot_atual > 0){

        X=Pot_EM_atual/K_opt;
        D_Wm_Ref=0.000000001*sqrt((( pow(X, (1/3))-Wm_atual)/
pow(X, (1/3))) * (( pow(X, (1/3))-Wm_atual)/ pow(X, (1/3))));
        Wm_Ref_ant=Wm_Ref_atual;
        Wm_Ref_atual=Wm_atual+(D_Wm_Ref*D_pot_atual);
out[0]=Wm_Ref_atual;

}else{

        X=Pot_EM_atual/K_opt;
        D_Wm_Ref=-0.000000001*sqrt((( pow(X, (1/3))-Wm_atual)/
pow(X, (1/3))) * (( pow(X, (1/3))-Wm_atual)/ pow(X, (1/3))));
        Wm_Ref_ant=Wm_Ref_atual;
        Wm_Ref_atual=Wm_atual+(D_Wm_Ref*D_pot_atual);
out[0]=Wm_Ref_atual;

        }

}

}

```