

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle e Automação e Computação



Luiz Otávio Limurci dos Santos

Modelagem e Simulação de um Sistema de Energia Eólica
Utilizando Motor Síncrono de Imã Permanente

Blumenau
2019

Luiz Otávio Limurci dos Santos

Modelagem e Simulação de um Sistema de Energia Eólica Utilizando Motor Síncrono de Imã Permanente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Maccari Junior

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Blumenau
Departamento de Engenharia de
Controle e Automação e Computação

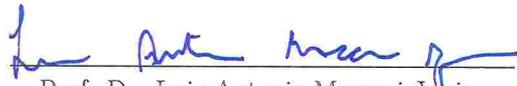
Blumenau
2019

Luiz Otávio Limurci dos Santos

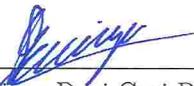
Modelagem e Simulação de um Sistema de Energia Eólica Utilizando Motor Síncrono de Imã Permanente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Luiz Antonio Maccari Junior
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador



Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Adriano Péres
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 21 de janeiro de 2020

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, tiveram impacto positivo em meu crescimento pessoal e profissional.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e irmã pois, apesar da distância, sempre me incentivaram e apoiaram durante os momentos bons e ruins nos cinco anos em que estive longe.

Agradeço também meus amigos, especificamente Bruno Depizzol e Jessica Sornas, assim como minha namorada, Gabriela Antunes, por todos os momentos de companheirismo que compartilhamos durante o período da graduação.

Agradeço ao meu orientador, professor Luiz Antônio Maccari Jr., pelas oportunidades de dadas no período de iniciação científica, e nos auxílios prestados durante a realização deste trabalho.

Por fim, deixar registrada a minha gratidão por todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram com meu trabalho.

Resumo

O presente trabalho tem como enfoque tratar de um sistema de energia eólica que utiliza um motor síncrono de ímã permanente, no qual se realizou um estudo do funcionamento bem como sua modelagem matemática para aplicação de técnicas de controle. A partir de técnicas de transformação de referências, as correntes e tensões do sistema foram convertidas de sinais CA para sinais CC. Isso permitiu que todo o projeto de controle, composto por malhas internas e externas, pudesse ser realizado no domínio da frequência através de controladores de topologia proporcional-integradora. Para obtenção dos resultados o modelo do sistema físico foi descrito no *software PSIM*, que disponibiliza componentes com características próximas ao comportamento real. Por fim, foram realizadas comparações entre as saídas no *PSIM* e as esperadas pelo projeto dos controladores em ambiente MATLAB.

Palavras-Chave: 1. Energia Eólica. 2. Eletrônica de Potência. 3. Controle de Siste-

mas.

Abstract

The present work focuses on a wind energy system that uses a permanent magnet synchronous motor, in which a study of the operation was performed as well as its mathematical modeling for the application of control techniques. From reference transformation techniques, system currents and voltages were converted from AC signals to DC signals. This allowed the entire control project, consisting of internal and external meshes, to be performed in the frequency domain through integrator-proportional topology controllers. To obtain the results the physical system model was described in the PSIM software, which provides components with characteristics similar to the real behavior. Finally, comparisons were made between the outputs in PSIM and those expected by the design of controllers in MATLAB environment.

Keywords: 1. Wind Energy. 2. Power Electronics. 3. Control Systems.

Lista de figuras

Figura 1 – Consumo de energia elétrica[1].	14
Figura 2 – Capacidade de produção de energia eólica global.[2].	15
Figura 3 – Evolução do tamanho das turbinas eólicas(ϕ :diâmetro do rotor, H :altura da torre)[3].	16
Figura 4 – WECS de velocidade variável com soft starter [4].	17
Figura 5 – WECS de velocidade variável com PWM back-to-back[4].	17
Figura 6 – WECS de velocidade variável com conversor CC-CC tipo boost[4].	17
Figura 7 – Esquemático da topologia escolhida[4].	18
Figura 8 – Vetor \vec{x} e sistema de referências abc [4].	19
Figura 9 – Transformação do sistema de coordenadas de três eixos abc para os eixos dq . [4]	20
Figura 10 – Principais componentes de uma turbina eólica [5].	22
Figura 11 – Esquemático do fluxo de ar através de um disco vazado [5].	23
Figura 12 – Curva de potência por velocidade do vento.	24
Figura 13 – Coeficiente de potência por velocidade λ e ângulo β	25
Figura 14 – Potência desenvolvida na turbina em função da velocidade de rotação.	26
Figura 15 – Diagrama simplificado para o método MPPT com perfil de potência da turbina.	26
Figura 16 – Diagrama simplificado para o método MPPT com velocidade rotacional ideal.	27
Figura 17 – Diagrama simplificado para o método MPPT com controle de torque ótimo.	28
Figura 18 – Configuração do gerador síncrono de ímãs permanentes [4].	29
Figura 19 – Circuito equivalente do PMSG na referência dq.	30
Figura 20 – Arquitetura inversor trifásico conectado a rede.	31
Figura 21 – Circuito PLL.	33
Figura 22 – Estrutura para o circuito de controle completo.	34
Figura 23 – Estrutura para o circuito de potência.	36
Figura 24 – Diagrama de blocos para o desacoplamento das correntes.	37
Figura 25 – Resposta ao degrau das correntes no lado da turbina em malha aberta.	38
Figura 26 – Diagrama de Bode das correntes no lado da turbina em malha aberta.	39
Figura 27 – Margens de ganho de fase para a malha de corrente.	40
Figura 28 – Resposta ao degrau da malha de corrente.	40
Figura 29 – Diagrama de blocos para a malha de velocidade.	41
Figura 30 – Resposta ao degrau da velocidade em malha aberta.	42

Figura 31 – Diagrama de Bode da velocidade em malha aberta.	42
Figura 32 – Margens de ganho e fase para a malha de velocidade.	43
Figura 33 – Resposta ao degrau da malha de velocidade.	44
Figura 34 – Estrutura de controle para o circuito conectado à rede[4].	45
Figura 35 – Diagrama de blocos para o desacoplamento das correntes.	46
Figura 36 – Resposta ao degrau das correntes no lado da rede em malha aberta. . .	47
Figura 37 – Diagrama de Bode das correntes no lado da rede em malha aberta. . .	48
Figura 38 – Resposta ao degrau da malha de corrente.	49
Figura 39 – Margens de ganho de fase para a malha de corrente.	49
Figura 40 – Diagrama de blocos para a malha da tensão do barramento.	50
Figura 41 – Resposta ao degrau da tensão no barramento no lado da rede em malha aberta.	50
Figura 42 – Diagrama de Bode da tensão no barramento no lado da rede em malha aberta.	51
Figura 43 – Margens de ganho e fase para a malha de tensão do barramento.	52
Figura 44 – Resposta ao degrau da malha de tensão do barramento.	52
Figura 45 – Resultado do cálculo para sincronização.	54
Figura 46 – Circuito montado para simulação.	55
Figura 47 – Validação da modelagem matemática para a corrente.	56
Figura 48 – Validação da modelagem matemática para a tensão do barramento. . .	57
Figura 49 – Validação da modelagem matemática para as correntes da turbina. . .	58
Figura 50 – Validação da modelagem matemática para a velocidade.	59
Figura 51 – Perfil da velocidade do vento imposta ao sistema.	60
Figura 52 – Resultado da simulação completa com variação da velocidade do vento. .	61
Figura 53 – Resultado da simulação completa com variação da tensão no barramento. .	62
Figura 54 – Potência ativa gerada na turbina em função do vento.	63
Figura 55 – Potência reativa injetada na rede elétrica.	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre os métodos MPPT(<i>+</i> : <i>bom</i> , <i>+/-</i> : <i>regular</i> , <i>-</i> : <i>ruim</i>).[6]	28
Tabela 2 – Parâmetros do gerador e turbina	36
Tabela 3 – Parâmetros da malha do inversor conectado a rede	45

Lista de Siglas e Abreviaturas

PLL	<i>Phase-Lock Loop</i>
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
GSIP	<i>Gerador Síncrono de Imãs Permanentes</i>
PI	<i>Proporcional-Integrador</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>
ERS	<i>Eixo de referências síncronos</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
PMP	<i>Ponto de Máxima Potência</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
WECS	<i>Wind Energy Conversion System</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.1.3	Organização	18
2	MODELAGEM DO SISTEMA	19
2.1	Transformação de Referências abc/dq	19
2.2	Turbina Eólica	21
2.2.1	Componentes e Mecanismos	21
2.2.2	Características de Potência	23
2.2.3	Rastreamento de Máxima Potência	25
2.2.3.1	MPPT com Perfil de Potência da Turbina	26
2.2.3.2	MPPT com Velocidade Rotacional Ideal	27
2.2.3.3	MPPT com Controle de Torque Ótimo	27
2.3	Gerador Síncrono de Imãs Permanentes (PMSG)	28
2.4	Inversor Trifásico Conectado à Rede	30
3	METODOLOGIA	34
3.1	Sistema Completo	34
3.2	Malha da Turbina	35
3.2.1	Projeto de Controle da Malha de Corrente	36
3.2.2	Projeto de Controle da Malha de Velocidade	41
3.3	Malha do Lado da Rede	44
3.3.1	Projeto de Controle da Malha de Corrente	45
3.3.2	Projeto de Controle da Tensão do Barramento	49
4	RESULTADOS E SIMULAÇÕES	53
4.1	Configurações para Simulação	53
4.2	Malha da Rede	56
4.2.1	Controle das Correntes	56
4.2.2	Controle do Barramento CC	57
4.3	Malha da Turbina	58
4.3.1	Controle das Correntes	58
4.3.2	Controle de Velocidade	59
4.4	Validação do Modelo Completo	59

4.4.1	Análise da Velocidade e Tensão	60
4.4.2	Análise da Potência Ativa e Reativa	62
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	66

1 Introdução

As perspectivas para a população mundial seguem uma tendência crescente. Como consequência, o consumo e demanda de energia elétrica aumentam em conformidade. Pesquisas desenvolvidas pela Agência Internacional de Energia (IEA) mostram o crescimento do consumo de eletricidade, em escala global. O ano de 2017 apresentou um aumento de 4,6% em relação a 2016[1], como mostra a Figura 1.

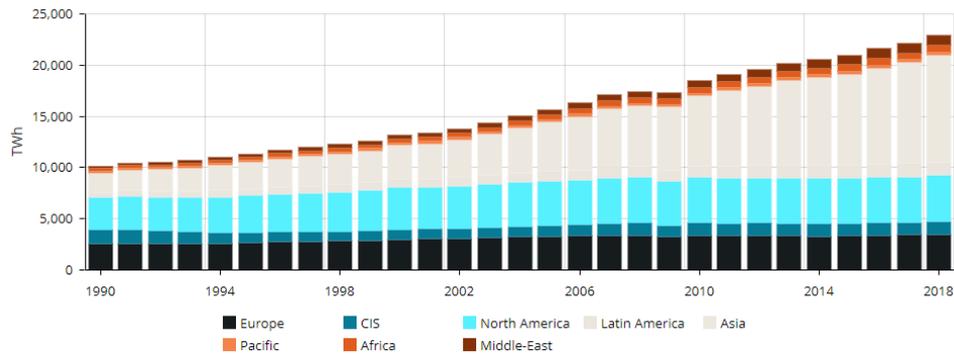


Figura 1 – Consumo de energia elétrica[1].

Para atender às demandas exigidas, são utilizadas diferentes fontes para a obtenção de energia. Combustíveis fósseis, em particular o carvão e petróleo, foram as forças motrizes que impulsionaram o desenvolvimento nos últimos séculos. Visto que são produtos naturais não-renováveis existem em quantidade finita a ser explorada. Outro aspecto negativo de sua utilização são os poluentes produzidos no processo de queima.

Os gases lançados à atmosfera constituem um grave problema na atualidade. Entre os principais estão o efeito estufa e aquecimento global. Com o intuito de reduzir as consequências das emissões de gases foram realizadas uma série de conferências e pactos entre países. Protocolo de Kyoto(1997)[7], Rio +20(2012) e Tratado de Paris(2015) são exemplos de esforços coletivos realizados com o intuito de conscientizar e definir acordos que garantissem um desenvolvimento sustentável e diminuição de poluentes gerados.

De maneira concomitante, o estudo de alternativas para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis recebeu um enorme incentivo [8]. Por exemplo, a redução nos custos de painéis fotovoltaicos permitiu que no ano de 2015 a Itália apresentasse que 7,7% de sua energia gerada fosse vinda do sol.

A força dos ventos também se mostra uma excelente alternativa à utilização de combustíveis fósseis. Essa fonte de energia tem sido aproveitada em diferentes atividades humanas há centenas de anos. Moagem de grãos e bombeamento de água são exemplos disso. Porém, apenas a partir da década de 1980 que a tecnologia disponível permitiu que se produzisse eletricidade em larga escala [2].

Com o avanço tecnológico, representado por uma diminuição nos custos das turbinas, aliado a programas de incentivo governamentais, a indústria de geração de energia eólica atingiu um crescimento de aproximadamente 25% ao ano desde 2000, conforme é apresentado na Figura 2 [6]. Apesar deste crescimento ser importante, a questão chave é o desejo de aumentar a porção que a energia dos ventos, e demais fontes renováveis, representam na parcela total. No ano de 2013 a energia eólica foi responsável por produzir aproximadamente 318 *GW*, correspondendo a um percentual de 3% da demanda energética global para aquele ano.

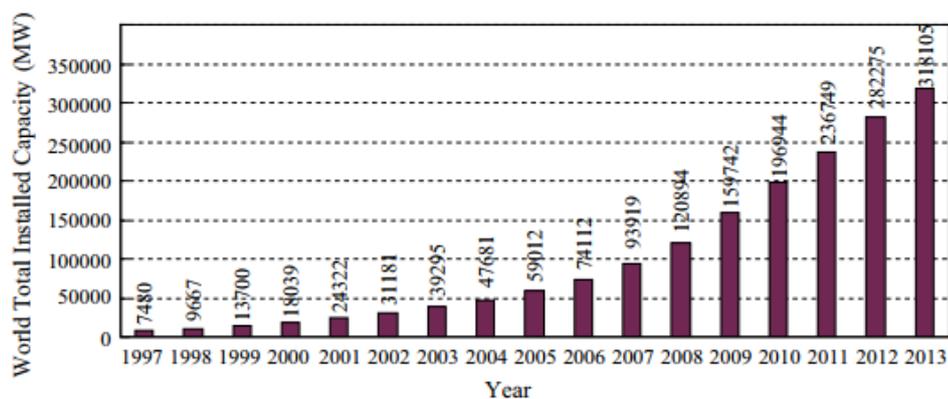


Figura 2 – Capacidade de produção de energia eólica global.[2].

As turbinas eólicas não possuem um tamanho padrão. Podem variar tanto em dimensão quanto capacidade de produção, de maneira a permitir que seja implementada em diferentes ambientes. Turbinas de pequeno e médio porte são normalmente utilizadas em associação a outras fontes de energia, como fotovoltaica e geradores a diesel.

Por outro lado, quanto maior o tamanho, maior é a capacidade de geração e menor são os custos relativos de produção, instalação e manutenção. A Figura 3 ilustra a evolução do tamanho e da capacidade de geração das turbinas.

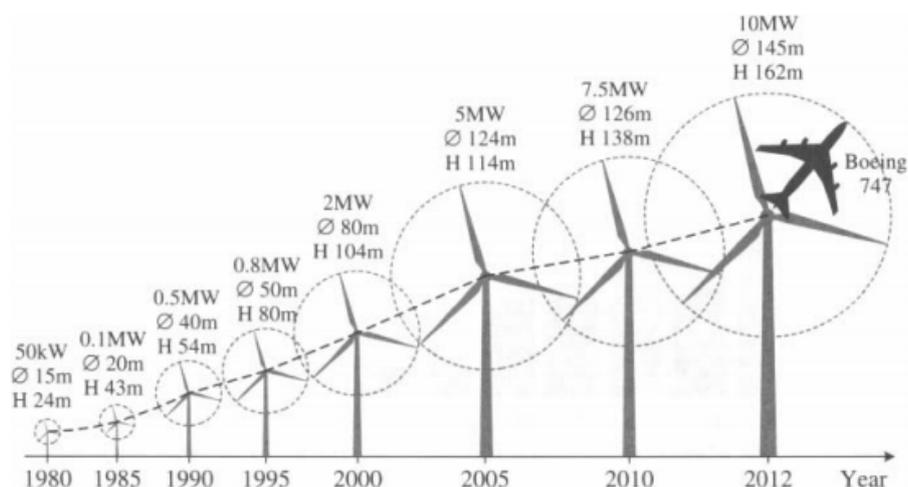


Figura 3 – Evolução do tamanho das turbinas eólicas (ϕ : diâmetro do rotor, H : altura da torre) [3].

Tendo em vista que existe um desejo e necessidade para a troca das fontes principais de geração de eletricidade, o objetivo é otimizar sua capacidade de produção. Pensando nesse aspecto, uma turbina eólica pode ter pico de produção com velocidade de rotação fixa ou variável (em razão de sua construção) [9]. Um outro aspecto construtivo a ser levado em consideração são os geradores acoplados às turbinas. Estes são separados em dois grandes grupos: Geradores de indução e síncronos, cada um com respectivas subdivisões.

Neste projeto o enfoque principal será nos Geradores Síncronos, comumente utilizados em sistemas com capacidade desde poucos kilowatts até megawatts. Essa classe de geradores é dividida de acordo com a maneira que seu fluxo magnético é gerado, podendo ser por meio de enrolamentos ou através de ímãs permanentes.

Os geradores de ímã permanente não necessitam de escovas para gerar seu fluxo magnético, ao contrário de geradores síncronos tradicionais. Dessa forma, uma maior densidade de potência pode ser alcançada, permitindo a redução das dimensões dos motores, assim como seu stress térmico [4]. Por outro lado, o custo dos materiais são mais elevados.

Para garantir que esse tipo de motor opere de forma que tire proveito máximo do vento para gerar energia elétrica, é necessário aplicar técnicas de controle que garantam uma otimização do sistema. O projeto deste deve ser capaz de integrar a turbina eólica com a rede elétrica (trifásica).

Para garantir que esta conexão seja feita de maneira adequada, são utilizados circuitos conversores de potência (Wind Energy Conversion System, representado pela sigla WECS). Existem diferentes topologias, cuja recomendação varia de acordo com o tipo de turbina eólica e sua capacidade de geração. Alguns exemplos de topologias são apresentados a seguir.

O primeiro, construído conforme a Figura 4, trata-se de um gerador de indução, no qual é implementado um soft starter para redução da influência dos transitórios eletro-

magnéticos gerados na conexão com a rede[4].

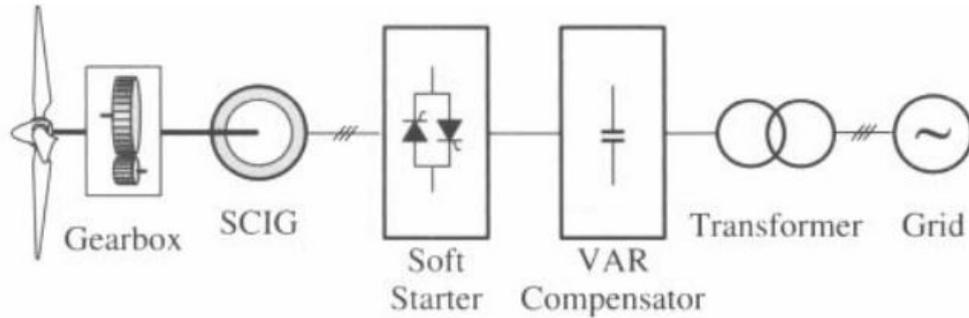


Figura 4 – WECS de velocidade variável com soft starter [4].

Na topologia da Figura 5 podem ser utilizados tanto geradores de indução (do tipo gaiola de esquilo), quanto síncronos conectados a dois conversores PWM back-to-back e um filtro LC[4].

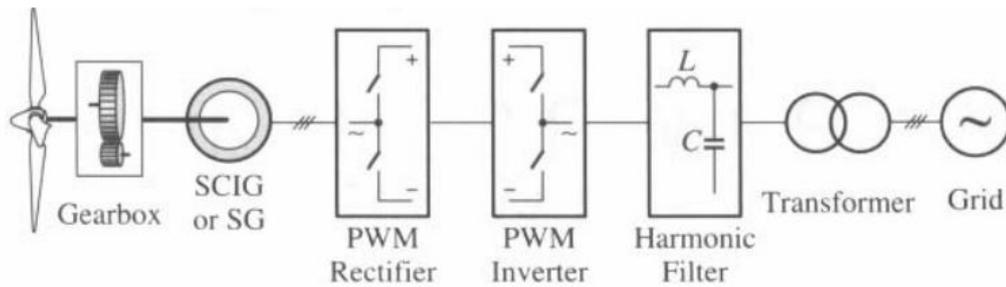


Figura 5 – WECS de velocidade variável com PWM back-to-back[4].

Um sistema eólico de velocidade variável, desta vez apenas para geradores síncronos, é apresentado na Figura 6. Para este caso, utiliza-se um diodo como retificador conectado a um conversor CC-CC elevador de tensão, seguido por um filtro LC[4].

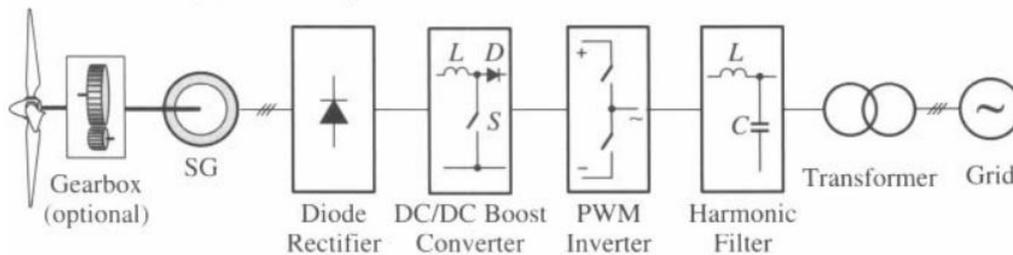


Figura 6 – WECS de velocidade variável com conversor CC-CC tipo boost[4].

Neste trabalho, será utilizada uma topologia baseada naquela da Figura 5, e é apresentada na Figura 7.

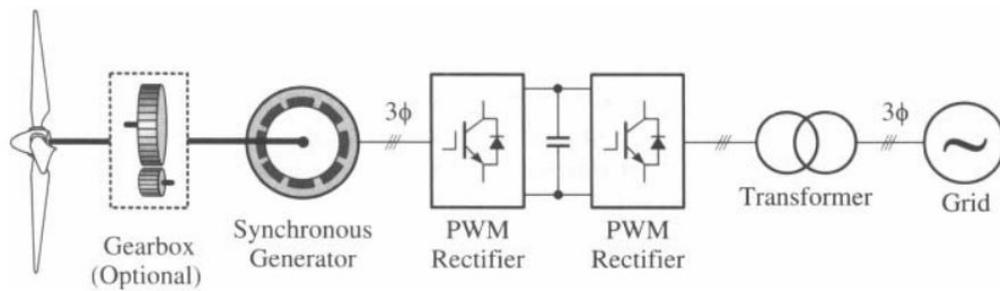


Figura 7 – Esquemático da topologia escolhida[4].

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente projeto tem como principal objetivo a obtenção de um modelo matemático para descrever o comportamento de uma turbina eólica a utilizar um motor síncrono de ímã permanente. Assim como o projeto de controle a ser feito no MATLAB a partir dos modelos simplificados, que na sequência serão testados no PSIM, o qual permite a simulação do sistema com maiores detalhes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelagem do motor síncrono de ímã permanente (PMSM);
- Projeto de controle para um conversor back-to-back utilizando um filtro indutivo de saída
- Controle da potência ativa gerada pela turbina, para garantir rastreamento de potência máxima.
- Controle da potência reativa que será injetada na rede elétrica

1.1.3 Organização

Este trabalho é dividido em 5 capítulos. O presente capítulo apresenta uma introdução na qual é feita uma contextualização da problemática que envolve a demanda energética mundial e apresenta alternativas para solucioná-la. O segundo capítulo é composto por uma fundamentação teórica que explica os conceitos utilizados durante o projeto. Em seguida são apresentadas as metodologias desenvolvidas para resolução do problema. O Capítulo 4 é constituído de análises e avaliações dos resultados obtidos por meio de simulações e modelos teóricos. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado.

2 Modelagem do Sistema

2.1 Transformação de Referências abc/dq

Observando o esquemático da Figura 7, percebe-se que o sistema é conectado à rede elétrica trifásica. Isso representará uma dificuldade na análise e obtenção dos modelos matemáticos para realização do controle. Portanto, é necessária a utilização de técnicas que simplifiquem e facilitem a simulação e implementação digital de controladores em sistemas de energia eólica. As técnicas mais utilizadas são as matrizes de Clark e Park. Estas convertem sinais trifásicos (abc) em bifásicos ($\alpha\beta$) e constantes (dq) [10].

Essa transformação considera uma variável elétrica trifásica, representada por um vetor \vec{x} que rotaciona com velocidade ω sobre um sistema referencial estacionário abc , conforme a Figura 8.

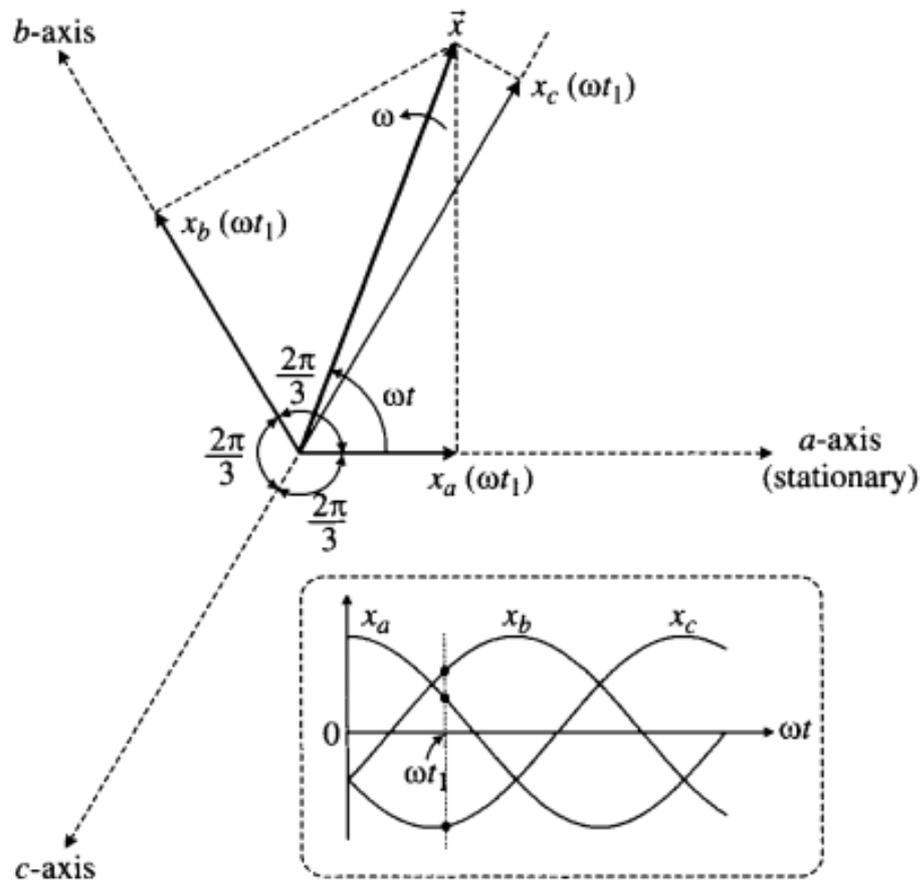


Figura 8 – Vetor \vec{x} e sistema de referências abc [4].

Esse sistema de três fases pode ser transformado em outro, de duas fases, definidas pelos eixos d (direto) e q (quadratura), perpendiculares entre si, conforme a Figura 9. A

transformação é realizada através das relações trigonométricas entre os eixos e projeções, que serão dadas por:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

É feita a multiplicação por um ganho na equação, geralmente $2/3$ ou $\sqrt{2}/3$. A vantagem do primeiro é que a magnitude de tensão é equivalente nos sistemas de dois e três eixos, enquanto o segundo ganho é utilizado para que seja mantido o valor de potência. O valor de θ é obtido por meio de um circuito identificador de fase que será abordado em maiores detalhes em sessões seguintes.

Além disso, vale salientar que o sistema trifásico só poderá ser totalmente descrito em coordenadas constantes d e q quando for balanceado, ou seja:

$$x_a + x_b + x_c = 0 \quad (2.2)$$

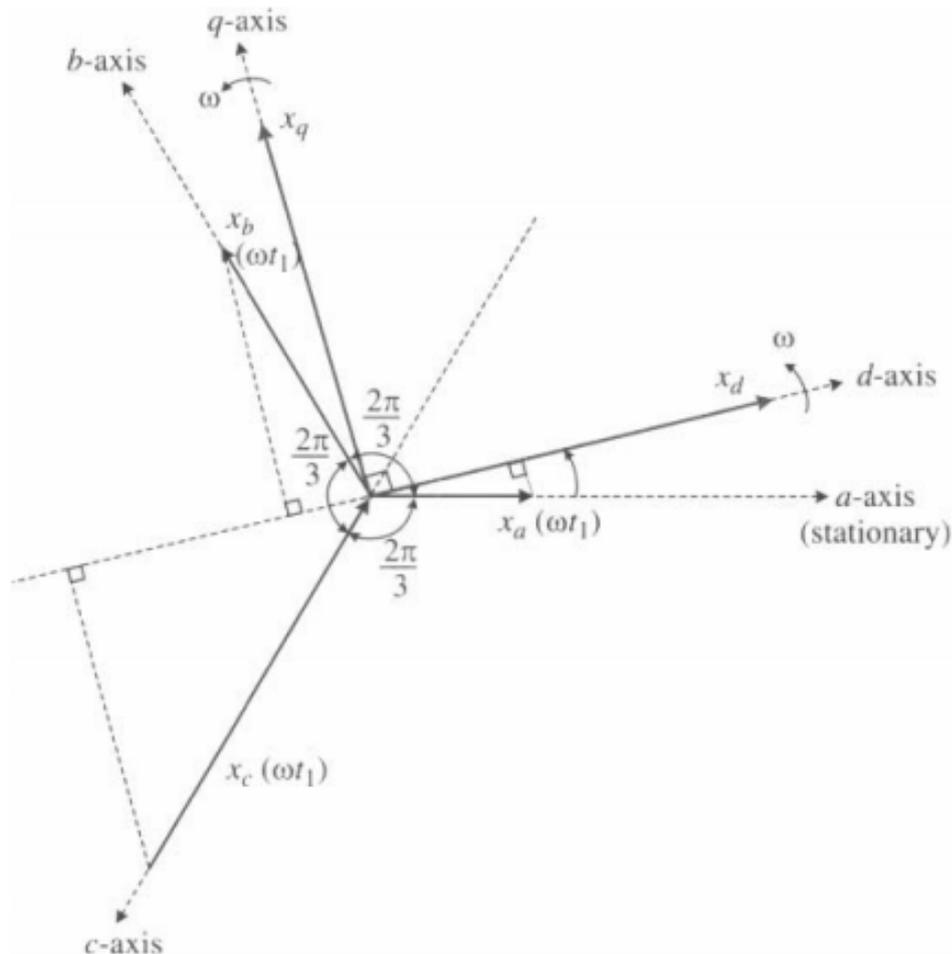


Figura 9 – Transformação do sistema de coordenadas de três eixos abc para os eixos dq . [4]

O contrário também é válido na transformação inversa dq/abc , dada por:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.2 Turbina Eólica

Turbinas eólicas são mecanismos construídos para o propósito de transformar energia cinética, proveniente dos ventos, em energia rotacional disponível no eixo. Esta será então convertida em elétrica por meio de um gerador acoplado. Existem, porém, outros componentes, descritos na subseção a seguir, que servem de auxílio para que a tarefa seja cumprida de maneira controlada, eficaz e confiável.

Outro tópico de grande importância que deve ser abordado é a influência do vento em diversas etapas do processo da conversão de energia. Em especial no que diz respeito a otimização da potência gerada. Essa análise apresentada na Seção 2.2.3 evidencia que a velocidade do vento influencia diretamente no projeto de controle para garantir otimização de potência desenvolvida.

Tal fato torna necessário o aprofundamento em técnicas para o controle da potência, torque e ângulo de incidência do vento.

Maiores detalhe quanto aos equipamentos adicionais que fazem parte do sistema de geração eólica serão abordados a seguir.

2.2.1 Componentes e Mecanismos

Na Figura 10 são apresentados os componentes principais que compõe uma turbina eólica. A Nacelle dá suporte aos mais importantes equipamentos do sistema, estando incluso, a caixa de engrenagens e o gerador elétrico.

A esquerda da Nacelle encontram-se as pás da turbina, que são movidas pelo vento e transmitem a energia para o eixo do motor. Existem mecanismos localizados nas extremidades das pás que operam como um freio, porém, devido às dimensões do sistema, não são capazes de parar totalmente o movimento. Desta forma, dada uma velocidade do vento qualquer, sempre existirá uma rotação residual da turbina, com velocidades muito inferiores à nominal.

A engrenagem conta com um eixo mais lento a esquerda, conectado a um mais rápido (usualmente em uma proporção de 50 vezes) à direita. Tal qual transformadores elétricos, as caixas de transmissão são comumente utilizadas no acoplamento de sistemas mecânicos a fim de transmitir velocidade e torque. Neste caso específico, a turbina apresenta um limite mínimo e máximo de rotação que não garante boa flexibilidade para seu controle. Desta forma, eleva-se as velocidades de modo que o gerador opere em valor nominal.

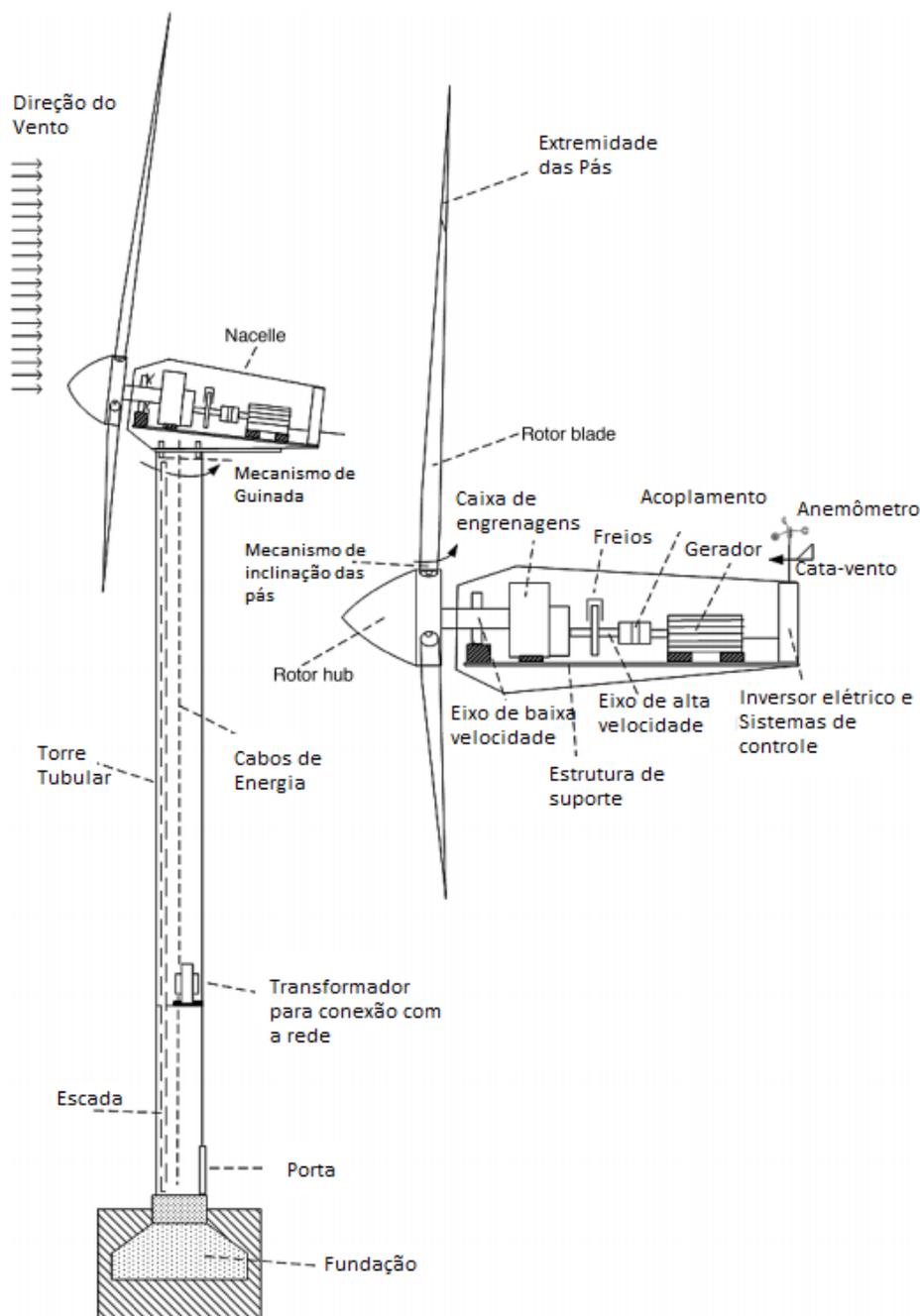


Figura 10 – Principais componentes de uma turbina eólica [5].

O gerador elétrico acoplado ao eixo de rotação mais elevada comumente aparecem em uma das seguintes topologias: Geradores de indução ou ímãs permanentes.

Os Sistemas de controle são os encarregados por monitorar a rotação e potência desenvolvida via sensores presentes no equipamento. A velocidade do vento medida pelo anemômetro é utilizada para inicializar e parar a turbina em função de valores mínimos e máximos pré estabelecidos (usualmente na faixa entre 5 a 25 m/s). Já as medições feitas pelo cata-vento são empregadas no mecanismo de guinada para melhor posicionamento das pás.

2.2.2 Características de Potência

Considerando que o vento é um fluido, é possível realizar um estudo da potência gerada em uma turbina tendo como base a energia cinética do vento, balanço de energia e aplicação da equação de Bernoulli. A turbina pode ser entendida como um disco poroso que se opõe ao fluxo do vento, gerando um diferencial de pressão entre suas faces, conforme na Figura 11 [11].

Para obtenção de uma relação entre potência e velocidade do vento, algumas considerações são feitas. O ar é um fluido incompressível e as variáveis de potência, densidade do ar, e velocidade possuem valores constantes para qualquer seção transversal do tubo.

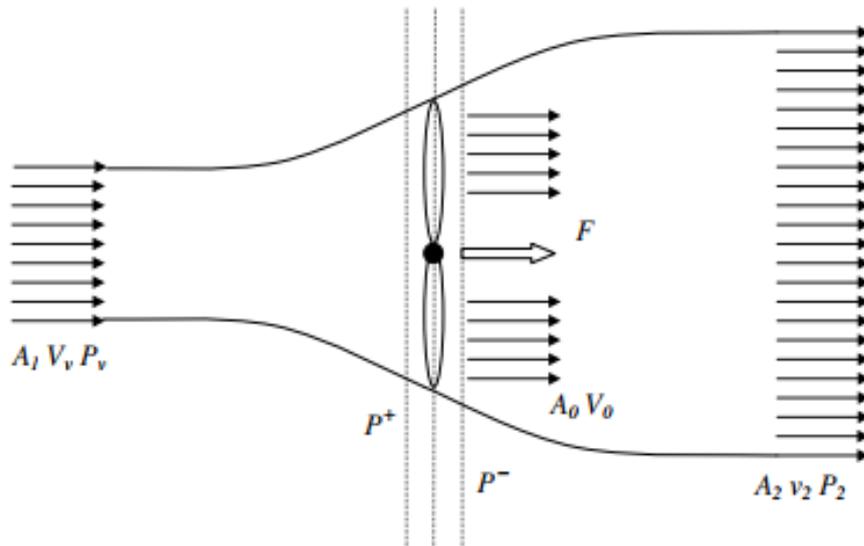


Figura 11 – Esquemático do fluxo de ar através de um disco vazado [5].

Dada uma velocidade do vento V_w (m/s), área transversal A (m) e densidade do ar ρ (kg/m^3), a potência desenvolvida é expressa por:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (2.4)$$

É possível traçar uma curva de potência por velocidade do vento, que ilustra o comportamento do sistema frente a variações de entrada. A relação entre as variáveis é dada por uma equação de terceira ordem, conforme visto em (2.4) e ilustrado pela Figura 12. A curva é caracterizada por três etapas de velocidade. A velocidade de início, como o nome sugere, representa o ponto no qual a turbina começa a desenvolver potência o suficiente para compensar as perdas.

A velocidade de corte é o valor máximo de operação antes do desligamento. Para valores maiores, a turbina deve ser parada para evitar danos.

O intervalo entre estas duas extremidades é aquela na qual o sistema produz a potência nominal

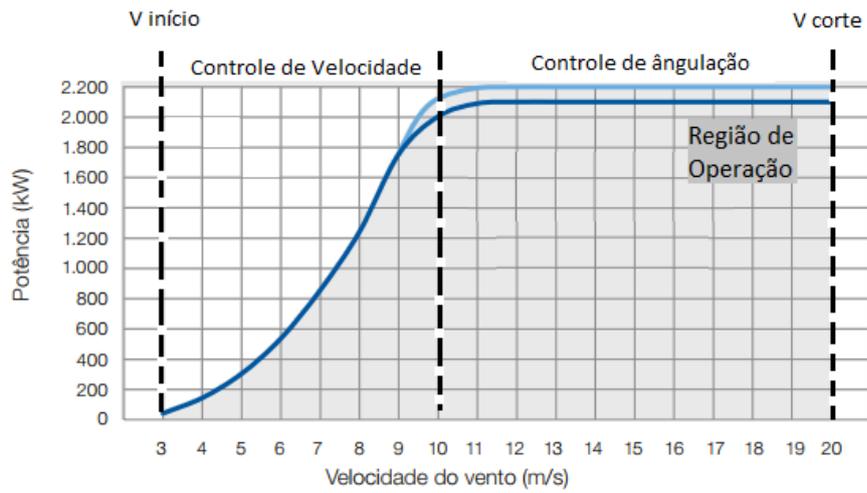


Figura 12 – Curva de potência por velocidade do vento.

Na prática, o valor dado por (2.4) não é alcançado em razão de aproximações e não idealidades. Dessa forma, a potência mecânica transmitida no eixo da turbina será calculada através de:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho A V_w^3 \quad (2.5)$$

Onde C_p é um coeficiente adimensional que representa a efetividade de transformação de energia do sistema. Este coeficiente é uma função do ângulo de inclinação (*pitch angle*) β e velocidade da extremidade das pás λ . A última, é escrita como:

$$\lambda = \frac{2\pi R \omega_R}{60 V_w} \quad (2.6)$$

A Figura 13 ilustra a relação entre o coeficiente de potência para variações de λ e β . Segundo [12], C_p pode ser descrito por meio de uma equação genérica baseada no modelo da turbina do tipo:

$$C_p = \frac{1}{2} \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\left(\frac{21}{\lambda_i}\right)} \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.8)$$

Por fim, o torque mecânico T_m produzido pela turbina será uma função da potência desenvolvida e velocidade rotacional.

$$T_m = \frac{P_{mec}}{\omega_R} \quad (2.9)$$

É possível traçar uma curva para a relação do coeficiente de potência em função da variação da velocidade rotacional e ângulo β . Pelas equações (2.5), (2.6) e (2.7) a potência desenvolvida é diretamente proporcional ao valor de C_p . Este, por sua vez, varia conforme o vento e a rotação do gerador através de λ .

Desta forma, extrai-se a maior potência quando o coeficiente é máximo. A relação entre estas variáveis é apresentada na Figura 13.

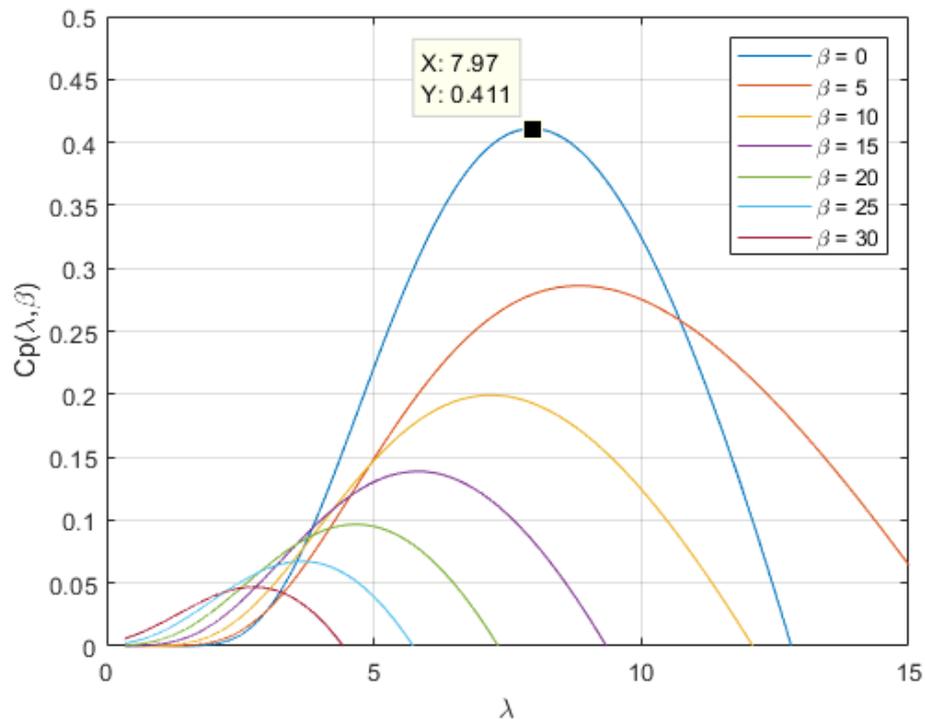


Figura 13 – Coeficiente de potência por velocidade λ e ângulo β .

2.2.3 Rastreamento de Máxima Potência

É de grande interesse que a máxima potência elétrica seja extraída de sistemas de geração de energia, apresentando, ou não, conexão com a rede elétrica. Para atingir tal objetivo, existem técnicas de rastreamento de máxima potência, ou MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) que proporcionam a operação contínua no ponto de máxima potência (PMP).

Conforme visto pela equação (2.5), a potência desenvolvida é dependente da velocidade do vento, um parâmetro variável. Desta forma, é necessário o ajuste da velocidade de rotação da turbina para garantir uma otimização da extração de potência em cada instante de operação[4].

Existem diferentes métodos para obtenção do comportamento desejado. Todos eles baseiam-se no controle da rotação ω_m de modo que a velocidade rotacional λ fique em seu valor ótimo, conforme visto na Figura 13. As relações entre potência, torque e ve-

locidade da turbina podem ser vistas em (2.5), (2.6) e (2.9). A Figura 14 apresenta as características de potência em razão da velocidade de rotação.

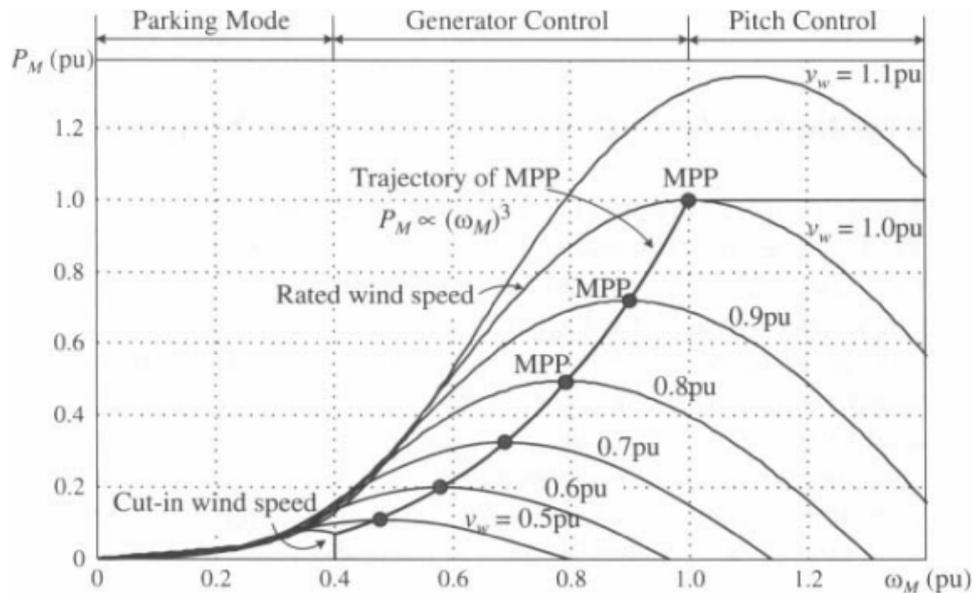


Figura 14 – Potência desenvolvida na turbina em função da velocidade de rotação.

2.2.3.1 MPPT com Perfil de Potência da Turbina

Este primeiro método de rastreamento para potência máxima é baseado no perfil de comportamento da turbina eólica. Esse comportamento, explicitado em uma curva, conforme a Figura 14, geralmente fornecida pelo fabricante permite que dado uma velocidade do vento, o sistema sempre opere no MPP[10].

Na Figura 15 é evidenciado que a partir de uma medição da velocidade do vento, uma referência de potência é gerada para a malha de controle.

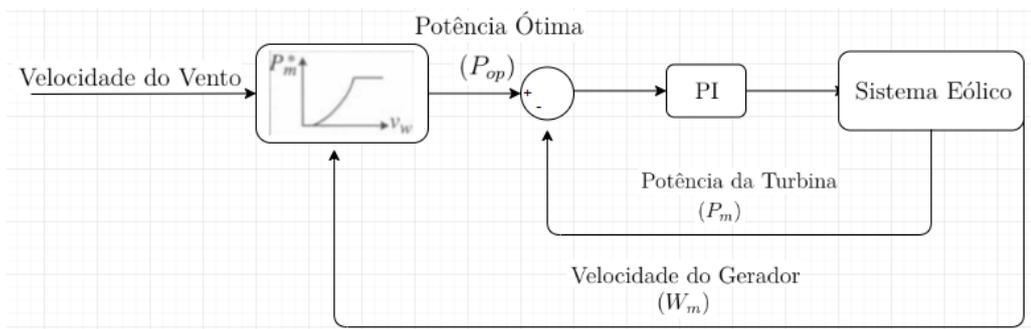


Figura 15 – Diagrama simplificado para o método MPPT com perfil de potência da turbina.

Por ser um método que tem como base o comportamento dinâmico da turbina, caso essa informação não seja disponibilizada pelo fabricante do equipamento, é necessário rea-

lizar uma série de experimentos para levantamento dos parâmetros. O custo elevado desta operação pode representar uma grande dificuldade para implementação desta técnica[13].

Apesar deste possível revés, a aplicação deste método, quando todos os parâmetros são conhecidos, é simples e rápida. Basta realizar a associação via gráfico.

2.2.3.2 MPPT com Velocidade Rotacional Ideal

A potência para dada velocidade do vento é máxima quando a rotação atinge seu valor ideal. Este corresponderá ao chamado *tip speed ratio* ideal, no ponto em que $\lambda = \lambda_{op}$. Este valor, pode ser obtido através das equações descritas anteriormente, que resultam na Figura 13.

Este método força o sistema a permanecer no ponto de máxima potência, através de uma malha de controle conforme a Figura 16. Apesar de aparentar simplicidade na implementação, a medição precisa da velocidade do vento trás dificuldades e desafios. Usualmente utiliza-se modelos matemáticos para sua estimação [14].

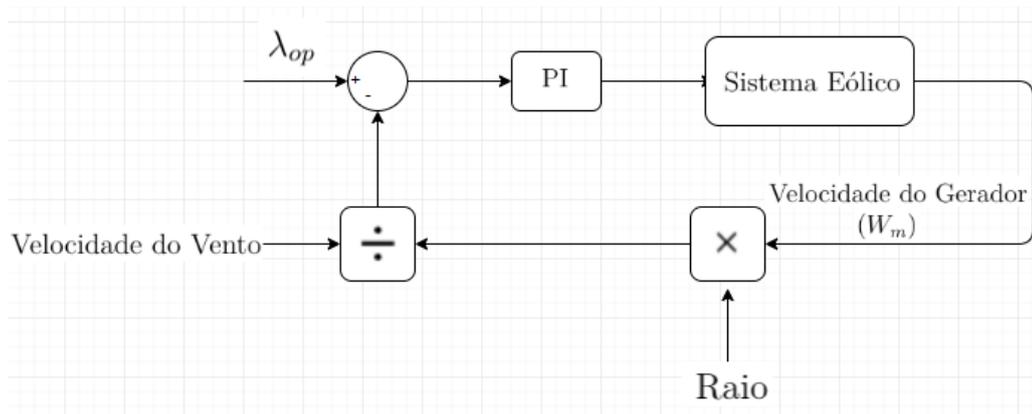


Figura 16 – Diagrama simplificado para o método MPPT com velocidade rotacional ideal.

2.2.3.3 MPPT com Controle de Torque Ótimo

Partindo novamente do pressuposto que se o sistema operar ao redor da valor λ_{op} , é garantida uma máxima conversão de energia. Este método baseia-se no controle do Torque, a partir da relação (2.9).

Um valor de ganho K_{op} é calculado de acordo com parâmetros construtivos do gerador [13], e multiplicado pelo quadrado da velocidade rotacional medida, para gerar o torque de referência da malha de controle.

Um ponto negativo deste método em comparação aos anteriores se dá pelo fato da velocidade do vento não ser medida. Significando portanto, que alterações desta variável não são refletidas no sinal de referência[13].

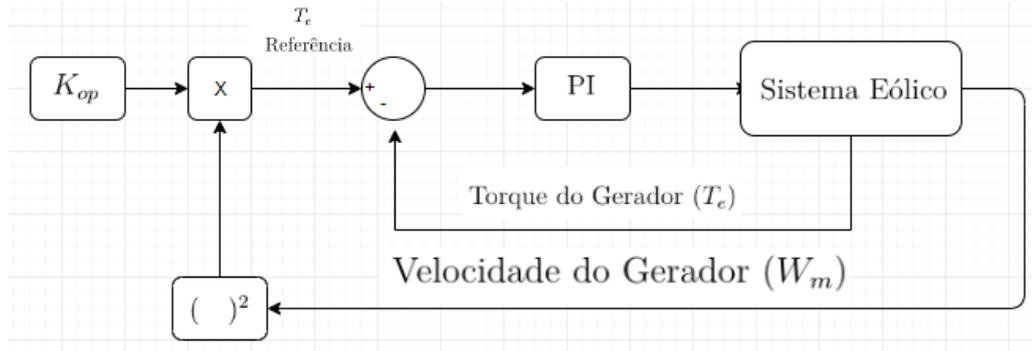


Figura 17 – Diagrama simplificado para o método MPPT com controle de torque ótimo.

Em [6], foi realizada uma comparação entre as técnicas de rastreamento de máxima potência, citadas anteriormente, e os resultados são apresentados na Tabela 1. Foi levado em consideração a necessidade de se conhecer, ou medir, alguns parâmetros do sistema. Bem como das características de resposta obtidas. Os critérios de avaliação foram rastreamento de referência, complexidade e performance, onde + representa boa resposta, enquanto – uma má resposta.

Tabela 1 – Comparação entre os métodos MPPT(+: bom, +/-: regular, -: ruim).[6]

	Velocidade Ideal	Torque ótimo	Perfil de Potência
Velocidade do vento	Precisa	Não	Não
Velocidade do gerador	Precisa	Precisa	Precisa
Características construtivas da turbina	Precisa	Não	Precisa
Rastreamento de referência para velocidade	+	–	+/-
Complexidade	+	+	+
Performance com vento variável	+	–	+/-

A partir das informações apresentadas a respeito das três técnicas de otimização para a potência, será optado pela implementação de rastreamento através da velocidade rotacional ideal. Pelo resultado das comparações, este método permite bom rastreamento para referência de velocidade e boa performance. A dificuldade de medição da velocidade do vento será superada, visto que se assumirá um sensor ideal no sistema.

2.3 Gerador Síncrono de Imãs Permanentes (PMSG)

Conforme mencionado na Seção 1, existem diferentes tipologias de motores utilizadas em um sistema de energia eólica. Neste trabalho será dado enfoque aos motores síncronos de imãs permanentes.

Desta arquitetura é possível ainda realizar uma subdivisão em polos salientes ou não-salientes, de acordo com a construção e parâmetros do motor. Antes de um maior aprofundamento matemático e construtivo, deve-se ter em mente que a nomenclatura utilizada pare se referir ao equipamento varia de acordo com a direção do fluxo de potência no sistema. Quando o fluxo é da rede para a carga através da máquina, esta atua como motor. O oposto representa um gerador. Uma vez que a máquina será acoplada ao eixo de uma Turbina eólica, ela atuará como um gerador, responsável por transformar energia cinética em elétrica, e transmiti-la à rede.

A característica principal deste tipo construtivo é possuir fluxo magnético criado a partir de ímãs permanentes. Por não possuir enrolamentos, nem escovas, no rotor, o tamanho, peso e perdas por fricção são reduzidos. Outra vantagem deste tipo de máquina em relação às de enrolamento é a redução do barulho produzido durante a operação, por não necessitar de um sistema de engrenagens.

Em contrapartida, o preço e risco da perda de magnetização são elevados [15]. A tecnologia disponível atualmente para construção destes equipamentos permitem um diâmetro externo máximo de 8 metros. Qualquer valor maior é impraticável [6]. A Figura 18 mostra um esquemático da construção de um PMSG.

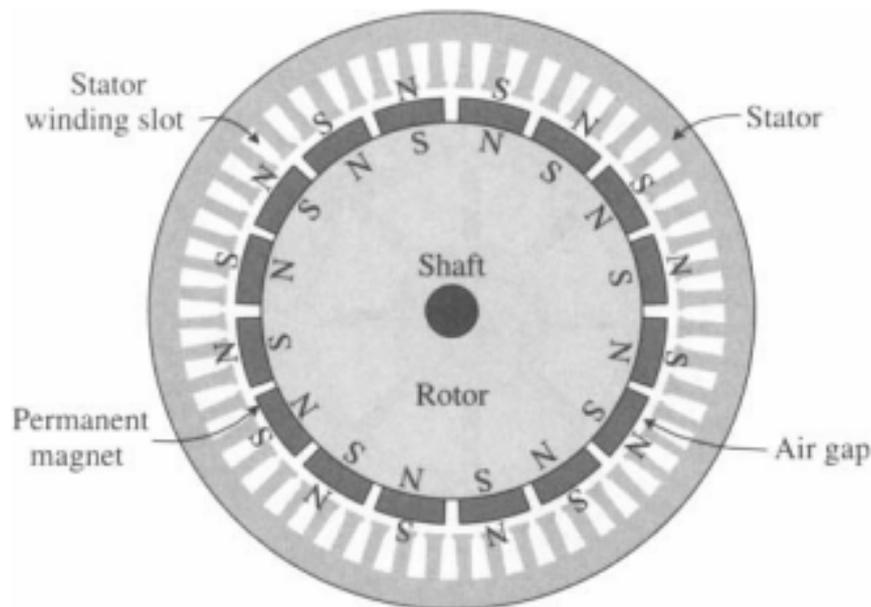


Figura 18 – Configuração do gerador síncrono de ímãs permanentes [4].

A modelagem matemática do PMSG é realizada nos eixos de referência síncronos (ERS), explicada anteriormente na Seção 2.1. O comportamento do gerador neste sistema de coordenadas é descrito pelos circuitos equivalentes apresentados na Figura 19, com λ_r representando o fluxo magnético e p o número de polos.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e L_q i_{qs} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} \quad (2.10)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \lambda_r + L_q \frac{di_{qs}}{dt} \quad (2.11)$$

Os modelos são válidos tanto para casos de polos salientes (as indutâncias são diferentes), quanto não-salientes (indutâncias iguais).

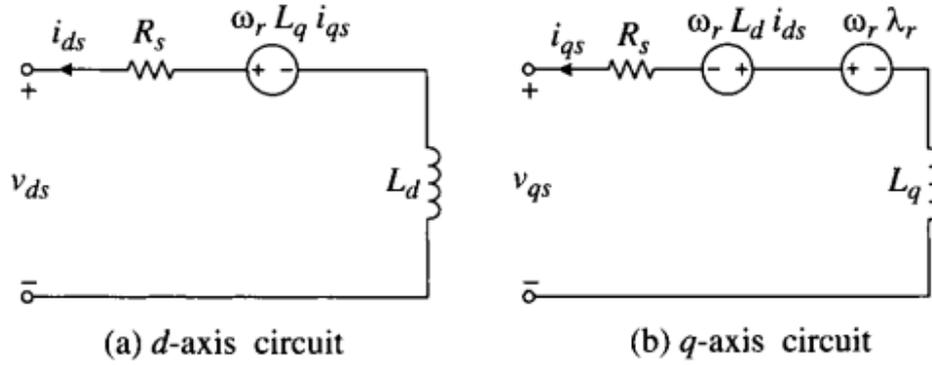


Figura 19 – Circuito equivalente do PMSG na referência dq.

Com R_s sendo a resistência do rotor, L_q e L_d as indutâncias equivalentes. O torque eletromagnético produzido pelo gerador será descrito por:

$$T_e = \frac{3p}{2} [\lambda_r i_{qs} - (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (2.12)$$

Para uma tipologia não-saliente, com $L_d = L_q$, (2.12) pode ser reescrita como:

$$T_e = \frac{3p}{2} \lambda_r i_{qs} \quad (2.13)$$

A velocidade angular da rotação do gerador, por sua vez, será descrita como uma função do torque elétrico (T_e) e mecânico (T_m).

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = -B_m \omega_m + T_e - T_m \quad (2.14)$$

Onde J é o momento de inércia e B_m é o coeficiente de amortecimento do gerador.

2.4 Inversor Trifásico Conectado à Rede

Grande parte das fontes de energias renováveis produzem uma tensão de saída CC ou possuem um estágio CC, necessitando de um tratamento para que seja conectada a rede

elétrica comercial. Os inversores são circuitos responsáveis por garantir que tanto o valor de tensão, quanto de frequência da saída sejam iguais aos da rede elétrica.

Por conta disso, o controle adequado deste circuito, de modo que seja garantido os requisitos estipulados pelas companhias elétricas, é de extrema importância.

Das técnicas de projeto para controle existentes, três recebem destaque no âmbito de inversores. São elas controle por histerese, preditivo e proporcional-integrador (PI). O controle por histerese apresenta um transiente mais rápido, com frequência de chaveamento e *ripple* elevado. O controle preditivo garante boa performance em regime permanente e boa dinâmica, mas é sensível à variação dos parâmetros do sistema [16].

O controle PI, por sua vez, corresponde a uma das técnicas de controle mais comumente utilizadas. É montado a partir de dois parâmetros (K_p e K_i) que multiplicam e integram, respectivamente, o sinal do erro para garantir erro nulo para sinais CC em regime permanente.

Em função desta característica, este controlador poderá ser aproveitado neste sistema, uma vez que, é possível transformá-lo em um sistema referencial síncrono, constante. Na Figura 20 é apresentado um esquemático do sistema do inversor trifásico.

De maneira análoga ao que foi visto para o gerador síncrono, a representação matemática do circuito equivalente nos eixos de coordenada dq serão do tipo:

$$v_{gd} = -L_f \frac{di_{gd}}{dt} - R_f i_{gd} + \omega_s L_f i_{gq} + v_d \quad (2.15)$$

$$v_{gq} = -L_f \frac{di_{gq}}{dt} - R_f i_{gq} - \omega_s L_f i_{gd} + v_q \quad (2.16)$$

Onde L_f e R_f representam as indutâncias e resistências do filtro utilizado.

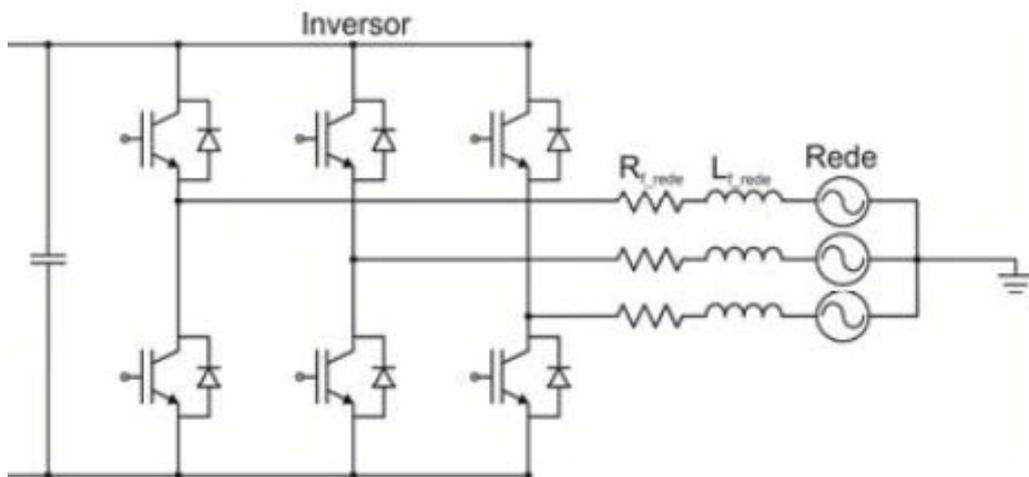


Figura 20 – Arquitetura inversor trifásico conectado a rede.

Os valores de potência ativa e reativa deste circuito são descritas por:

$$P_g = -\frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) \quad (2.17)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2}(v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq}) \quad (2.18)$$

Partindo do pressuposto que o eixo dq é alinhado com d , pode-se admitir que a componente $v_{gd} = V_s$ e $v_{gq} = 0$, permitindo com que (2.17) e (2.18) sejam reescritas como:

$$P_g = -\frac{3}{2}V_s i_{gd} \quad (2.19)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}V_s i_{gq} \quad (2.20)$$

Percebe-se que a potência ativa é dependente da corrente i_{gd} enquanto a reativa, i_{gq} . Logo, estas são controladas diretamente pelos valores de corrente. As equações (2.15) e (2.16) podem ser reescritas de modo a obter o modelo dinâmico para o inversor conectado à rede:

$$V_s = -L_f \frac{di_{gd}}{dt} - R_f i_{gd} + \omega_s L_f i_{gq} + v_d \quad (2.21)$$

$$0 = -L_f \frac{di_{gq}}{dt} - R_f i_{gq} - \omega_s L_f i_{gd} + v_q \quad (2.22)$$

Ainda da Figura 20, é notada a existência de um capacitor no acoplamento entre o inversor do gerador e da rede. Sua função é garantir que o barramento DC não sofra variação de tensão considerável, impedindo que perturbações de um lado do circuito influencie no outro.

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{3}{2} \frac{V_s}{v_{dc}} \cdot i_{gd} \quad (2.23)$$

Com i_{dc} representando uma corrente que flui do circuito de potência para este. Uma última análise que pode ser feita do esquemático apresentado é a necessidade de sincronização das correntes e tensões desta malha, com o valor de frequência e fase da rede. É essencial que estes estejam em sincronia, para garantir que o gerador injete energia ao sistema elétrico.

Existem algumas técnicas utilizadas para esta finalidade. A primeira, e mais simples, delas faz o cálculo de θ_g a partir da medição das tensões de fase V_{ag} , V_{bg} e V_{cg} da rede elétrica, seguida de uma transformação de referências, dessa vez $abc/\alpha\beta$ [17].

$$\theta_g = \tan^{-1} \frac{v_\beta}{v_\alpha} \quad (2.24)$$

O segundo método é chamado *Phase-Lock Loop* (PLL) [18]. É uma malha fechada que detecta a fase da rede conforme visto na Figura 21, onde é apresentado um circuito de exemplo disponibilizado pelo software *PSIM*.

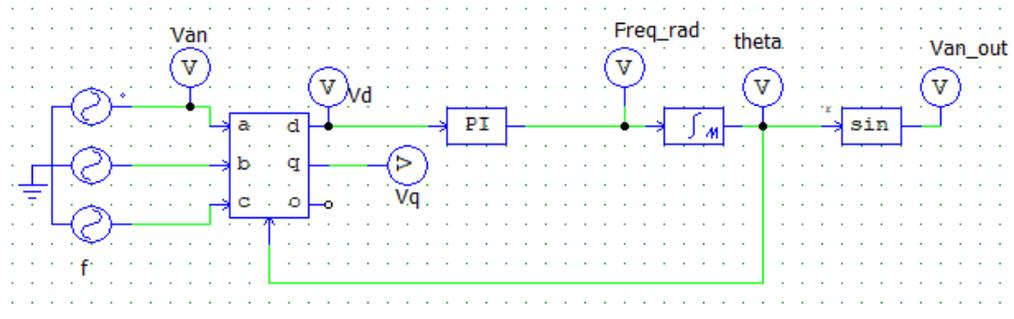


Figura 21 – Circuito PLL.

3 Metodologia

3.1 Sistema Completo

Conforme já citado anteriormente neste trabalho, a arquitetura que compreende o sistema gerador de energia eólico é complexa. Dos componentes que a compõe, destacam-se uma turbina, gerador síncrono, retificador e um inversor, Figura 7.

Para que os objetivos definidos inicialmente sejam atingidos, deve-se implementar uma topologia de controle de malhas internas e externas, de acordo com a Figura 22 e definir algumas especificações para o comportamento das malhas.

De modo a garantir um controle da potência ativa gerada pela turbina eólica, a malha externa para a velocidade ω_m deverá ser capaz de rastrear uma referência gerada através do método MPPT de velocidade rotacional ideal. O sinal de controle da velocidade, por sua vez, atua como referência para a corrente i_{qs} , uma vez que a potência ativa é diretamente dependente desta.

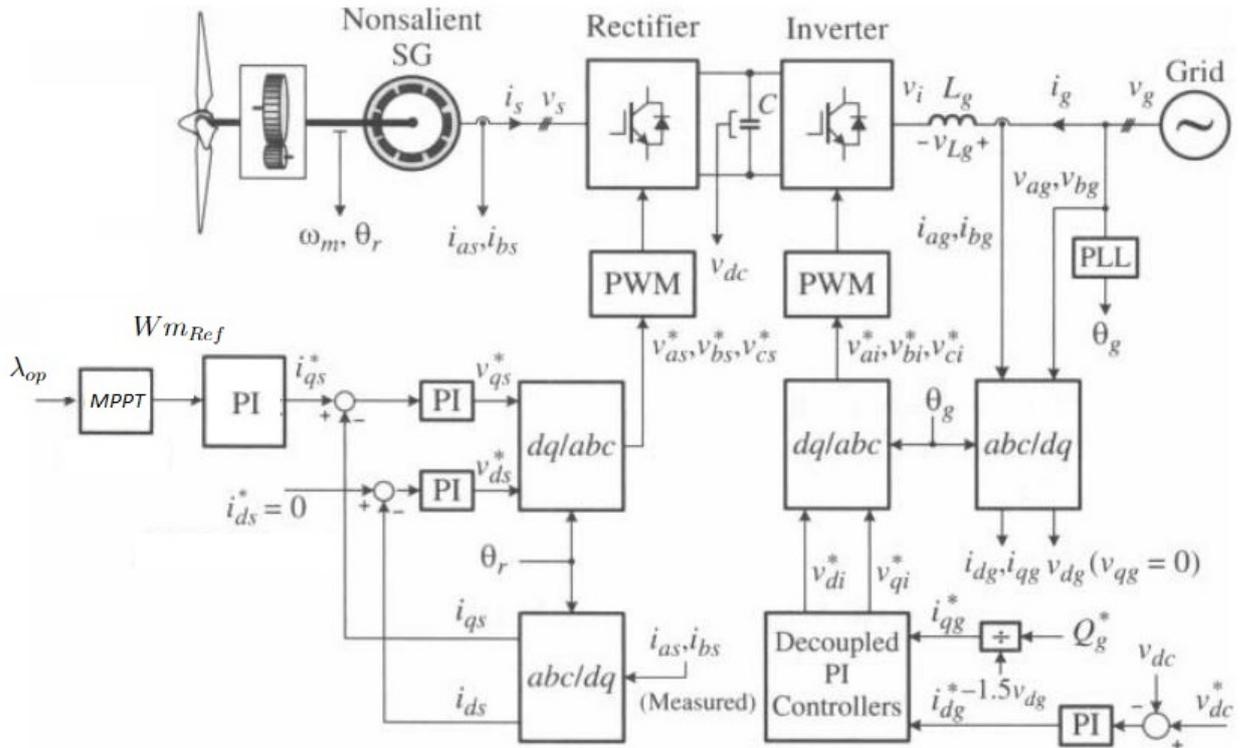


Figura 22 – Estrutura para o circuito de controle completo.

Conforme já mencionado na seção 1.1.3, a metodologia utilizada para realização do presente trabalho foi o desenvolvimento de forma desacoplada da modelagem e projeto de controle para as malhas de geração de energia e conexão com a rede. Isso se torna

possível a partir da adição de um capacitor na conexão entre o retificador e inversor, que isola as duas malhas.

Como todo sistema controlado algumas especificações de seu comportamento, quando em regime permanente, devem ser estabelecidas. Para todas as malhas, deve-se garantir um erro nulo para sinais de referência do tipo CC. Para a velocidade de rotação do gerador, especificamente, esta deve sempre operar no PMP, conforme já explicitado em 2.2.3.

As malhas internas, representada pelas correntes i_{qs} e i_{ds} deverão apresentar dinâmicas com velocidades muito maiores que as externas, mas também garantindo rastreamento de referência. Os tempos de acomodação foram definidos de modo que a malha elétrica apresentasse dinâmicas mais rápidas que a malha mecânica. Os valores específicos apresentados a seguir servem para validação dos controladores.

1. Malha da turbina:

$$T_{5\%}i_{qs} = 0,005s \quad (3.1)$$

$$T_{5\%}i_{ds} = 0,005s \quad (3.2)$$

$$T_{5\%}\omega_m = 0,15s \quad (3.3)$$

2. Malha do lado da rede:

$$T_{5\%}i_{qs} = 0,001s \quad (3.4)$$

$$T_{5\%}i_{ds} = 0,001s \quad (3.5)$$

$$T_{5\%}V_{dc} = 0,015s \quad (3.6)$$

O grande desafio a ser superado durante este processo, é a não idealidade dos componentes utilizados em simulação, que acarretarão em diferenças em comparação com o modelo teórico. Tal característica torna o desacoplamento imperfeito, impossibilitando o funcionamento isolado entre todos os circuitos.

3.2 Malha da Turbina

A malha de potência compreende a partição do sistema composta pela turbina eólica e gerador síncrono, conectados a um retificador. Tal arquitetura pode ser compreendida pela Figura 23.

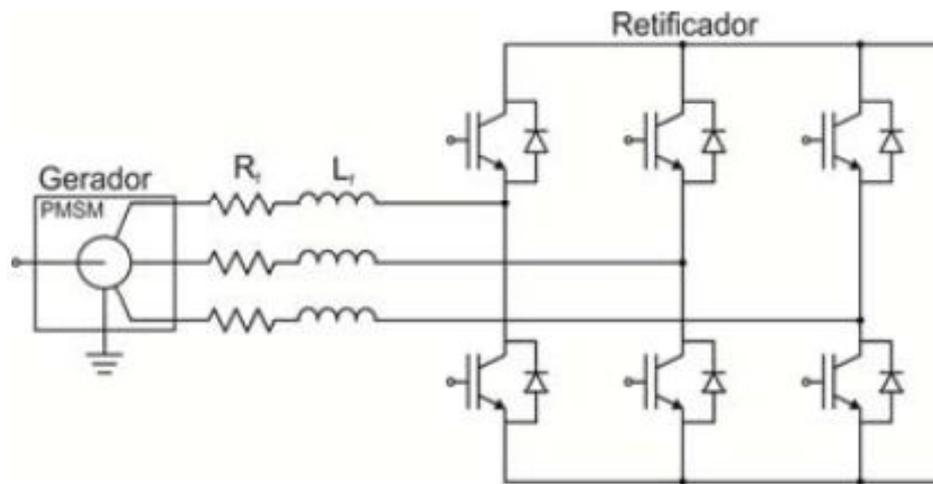


Figura 23 – Estrutura para o circuito de potência.

Os componentes utilizados durante os cálculos e simulações para esta parte do sistema tem valores extraídos de artigos encontrados na literatura que são apresentados conforme a Tabela 2[19].

Tabela 2 – Parâmetros do gerador e turbina

Componente	Valor
R_s	$1m\Omega$
L_q	$1mH$
L_d	$1mH$
J	$0,1\mu kg/m^2$
B_m	0,1
Número de polos	30
$V_{pk}/krpm$	7112
Potência nominal da turbina	$2kW$

3.2.1 Projeto de Controle da Malha de Corrente

O projeto de controle para esse sistema é iniciado reiterando a afirmação que será utilizada uma topologia de malhas internas, para o controle das correntes, e externa para a velocidade. Para obtenção das funções de transferência, deve-se aplicar a transformada de Laplace nas equações diferenciais apresentadas em (2.10), (2.11) e (2.14), resultando em:

$$V_{ds} = i_{ds}(L_d s + R_s) - \omega_e L_q i_{qs} \quad (3.7)$$

$$V_{qs} = i_{qs}(L_q s + R_s) + \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \lambda_R \quad (3.8)$$

Nota-se que as dinâmicas das correntes são acopladas entre si, ou seja, i_{ds} afeta i_{qs} e vice-versa. Esse tipo de comportamento não é ideal, uma vez que o projeto para o controlador leva em consideração apenas a relação direta de entrada (tensão) e saída (corrente).

Portanto, é necessária a adição de termos de desacoplamento para diminuir a influência das dinâmicas de uma malha na outra. O esquemático é apresentado no diagrama da Figura 24.

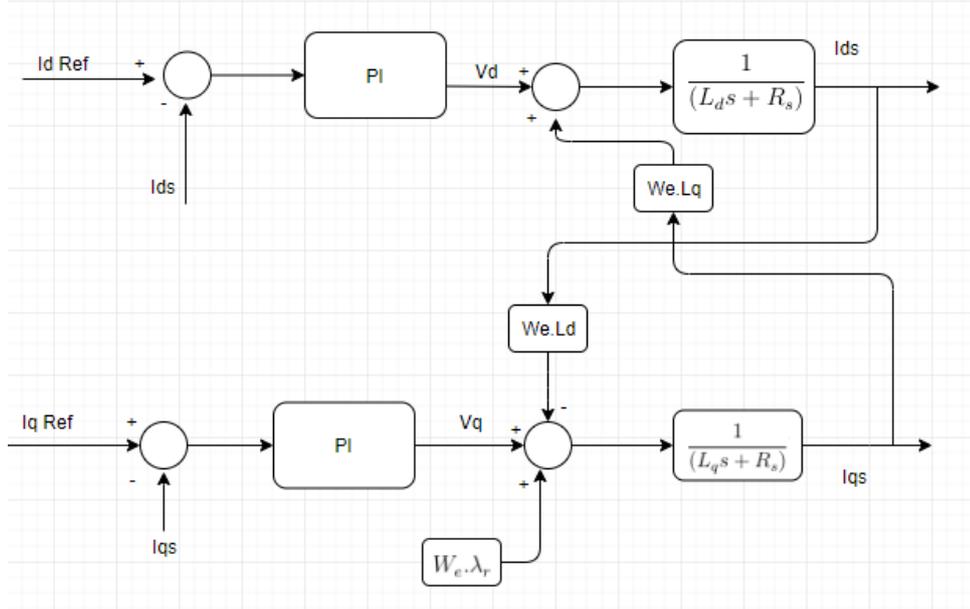


Figura 24 – Diagrama de blocos para o desacoplamento das correntes.

Adicionando os termos de desacoplamento mostrados na Figura 24 nas equações (3.7) e (3.8), tem-se que:

$$V_{ds} = i_{ds}(L_d s + R_s) - \omega_e L_q i_{qs} + \underbrace{\omega_e L_q i_{qs}}_{\text{desacoplador}} \quad (3.9)$$

$$V_{qs} = i_{qs}(L_q s + R_s) + \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \lambda_R \underbrace{-\omega_e L_d i_{ds} - \omega_e \lambda_R}_{\text{desacoplador}} \quad (3.10)$$

Simplificando, pode-se perceber que com o desacoplamento, são obtidas equações de primeira ordem que relacionam as correntes e tensões nos eixos d e q . Logo, pode-se afirmar que a corrente i_{qs} , assim como a potência reativa, são controladas pela tensão V_q . Enquanto i_{ds} e potência ativa desenvolvida pela turbina são controladas por v_d .

$$\frac{i_{ds}(s)}{V_{ds}(s)} = \frac{1}{(L_d s + R_s)} \quad (3.11)$$

$$\frac{i_{qs}(s)}{V_{qs}(s)} = \frac{1}{(L_q s + R_s)} \quad (3.12)$$

Visto que o gerador síncrono utilizado possui polos não-salientes, os valores de indutância L_q e L_d são iguais. Dessa forma, o mesmo controlador pode ser implementado nas duas malhas. Substituindo os valores dos componentes em (3.11) e (3.12), obtém-se a função de transferência numérica para as correntes.

$$\frac{i_{(d,q)s}(s)}{V_{(d,q)s}(s)} = \frac{1000}{(s + 1)} \quad (3.13)$$

Por meio da resposta ao degrau unitário na Figura 25, assim como diagrama de Bode da Figura 26, pode-se perceber que as correntes apresentam dinâmica muito lenta, ganho de 1000 em regime permanente e permite a passagem de baixas frequências.

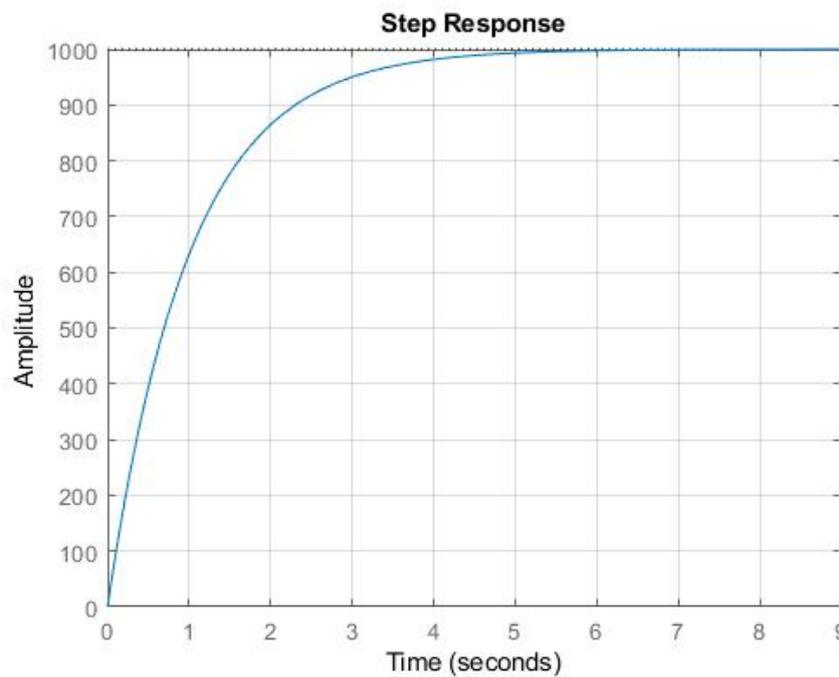


Figura 25 – Resposta ao degrau das correntes no lado da turbina em malha aberta.

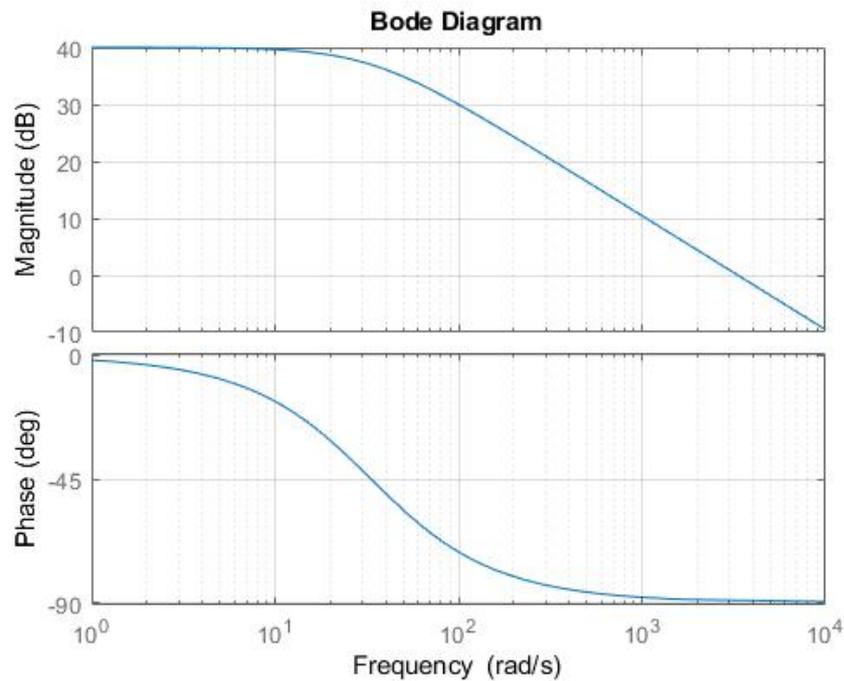


Figura 26 – Diagrama de Bode das correntes no lado da turbina em malha aberta.

Relembrando as especificações de projeto, definidas anteriormente, o sistema em malha fechada deve rejeitar perturbações do tipo degrau, bem como apresentar erro nulo em regime permanente. A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 2, os controladores PI para as malhas de corrente, de modo que o valor de referência seja alcançado em 0,005 segundo é do tipo:

$$C_i(s) = \frac{1,9189(s + 480,3)}{s} \quad (3.14)$$

Apesar da topologia de controlador PI ser consideradas simples, sua utilização neste sistema é satisfatório por uma série de razões. A primeira tem relação com a baixa complexidade dos processos. Após realizados os desacoplamentos, as dinâmicas, em ambas as malhas de controle, são descritas por funções de 1^a ordem, num sistema de uma entrada, uma saída (SISO).

Outro motivo é a capacidade deste controlador em garantir um rastreamento de referência, através do ganho proporcional, e erro nulo para sinais CC, devido a ação integral.

O comportamento do sistema pode ser avaliado a partir de uma análise do diagrama de bode de malha aberta na Figura 27. Observa-se que a margem de ganho tem valor maior que o recomendado ($> 6Db$), enquanto a margem de fase apresenta valor positivo, garantindo assim estabilidade para o sistema.

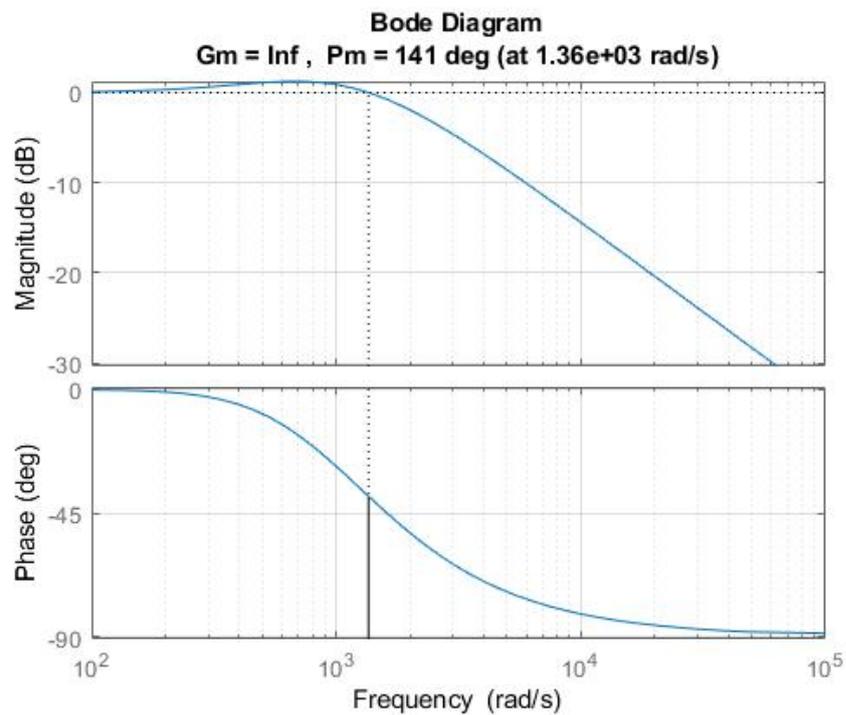


Figura 27 – Margens de ganho de fase para a malha de corrente.

Observando agora a dinâmica do sistema frente uma entrada do tipo degrau unitário, vista na Figura 28, nota-se que a resposta é capaz de rastrear referências do tipo CC. O regime permanente é alcançado num tempo próximo àquele proposto nas especificações de projeto.

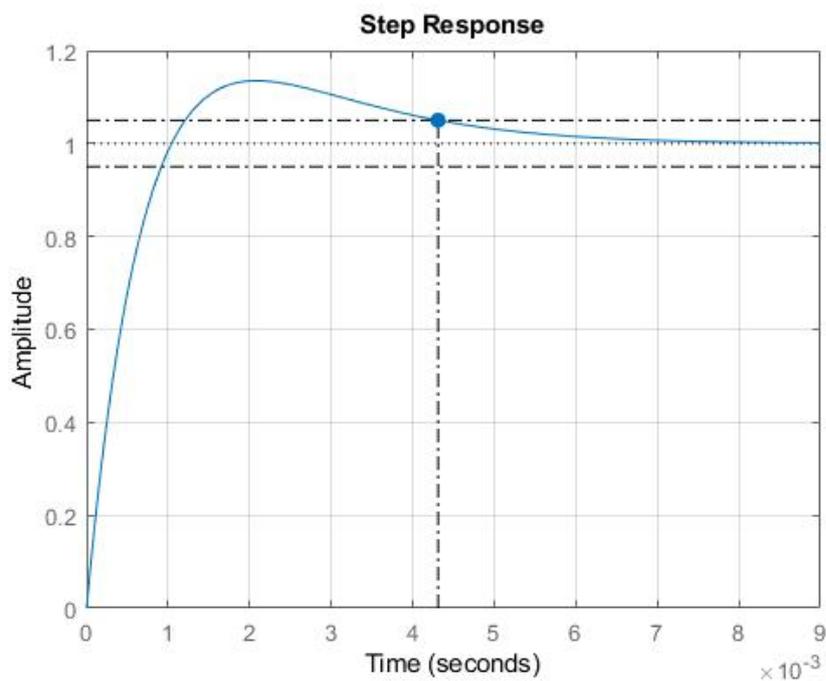


Figura 28 – Resposta ao degrau da malha de corrente.

3.2.2 Projeto de Controle da Malha de Velocidade

Uma vez que o projeto para a malha interna esteja concluído, pode-se dar início ao controle de velocidade do gerador. A relação que permite o controle em cascata deste sistema é apresentada em (2.12) e o diagrama de blocos é visto na Figura 29.

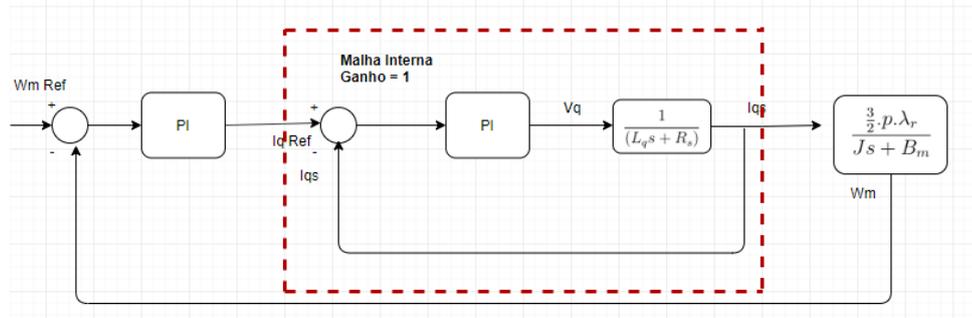


Figura 29 – Diagrama de blocos para a malha de velocidade.

Aplicando a transformada de Laplace na equação, tem-se que:

$$\frac{\omega_m(s)}{i_{qs}(s)} = \frac{\frac{3}{2} \cdot p \cdot \lambda_r}{Js + B_m} - \frac{T_m}{Js + B_m} \quad (3.15)$$

Aplicando os valores da Tabela 2 em (3.15), tem-se como função de transferência:

$$\frac{\omega_m(s)}{i_{qs}(s)} = \frac{1164,7}{(s + 1)} \quad (3.16)$$

As Figuras 30 e 31 apresentam a resposta ao degrau e diagrama de Bode em malha aberta, respectivamente, para a velocidade rotacional do gerador.

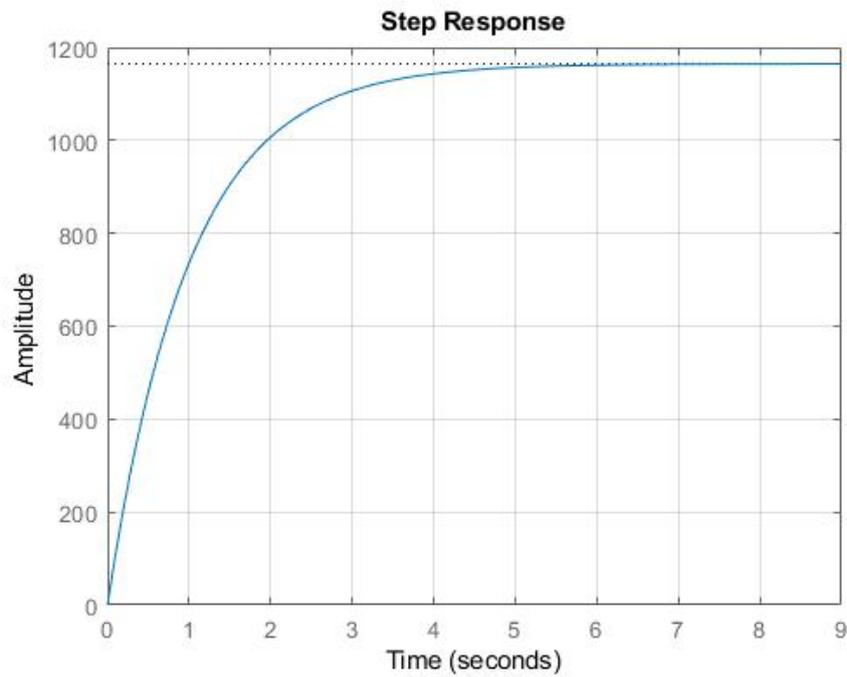


Figura 30 – Resposta ao degrau da velocidade em malha aberta.

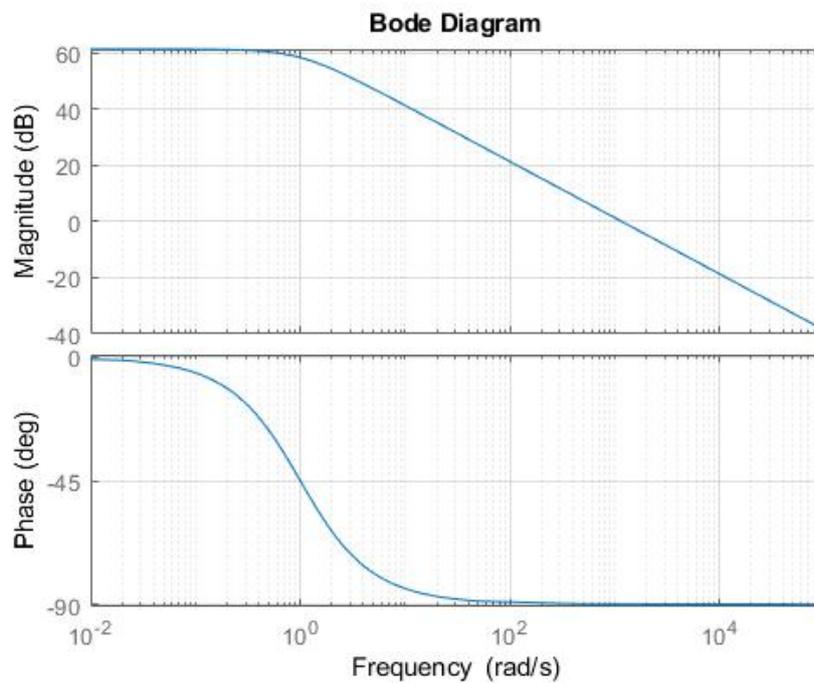


Figura 31 – Diagrama de Bode da velocidade em malha aberta.

Novamente é desejado que o comportamento em regime permanente para a velocidade rotacional do gerador apresente erro nulo para a referência aplicada, bem como a capacidade de rejeição para perturbações do tipo CC.

Considera-se também que o tempo de assentamento para a malha externa deve ser tal que as dinâmicas internas não interfiram na externa. É estabelecido então, que uma seja no mínimo 10 vezes mais rápida que a outra. O controlador PI projetado para ω_m capaz de garantir esses requisitos é do tipo:

$$C_{\omega_m}(s) = \frac{0.046242(s + 13.97)}{s} \quad (3.17)$$

É possível avaliar o comportamento do sistema a partir das margens de ganho e fase na Figura 32. Percebe-se que a malha fechada apresenta uma característica de estabilidade, representado por valor de ganho e fase positivos. Além disso, a frequência de corte para a malha externa se mostra 10 vezes menor que a malha das correntes.

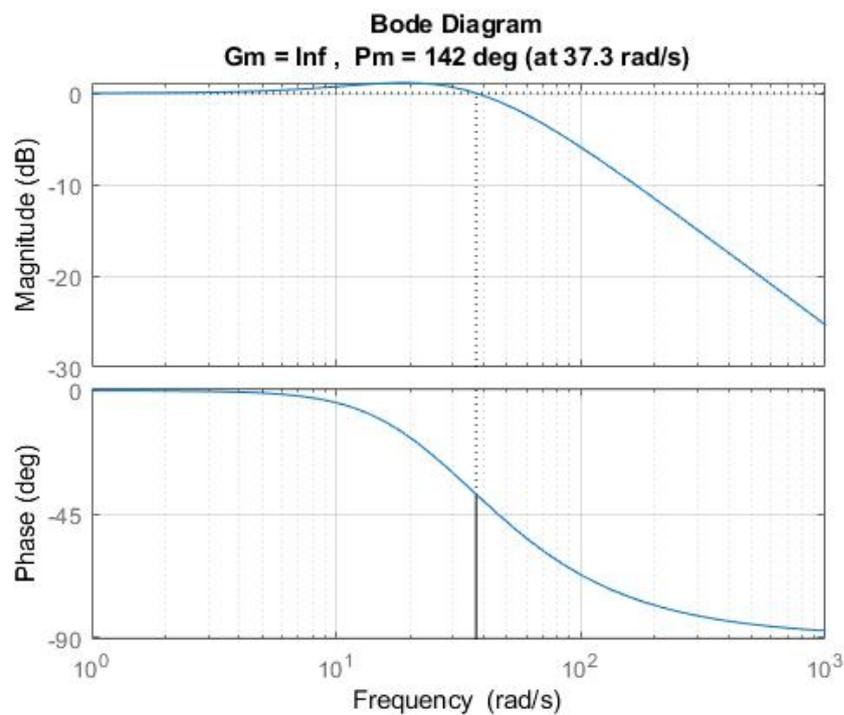


Figura 32 – Margens de ganho e fase para a malha de velocidade.

Outra forma de se avaliar a frequência de corte, ou tempo de acomodação, é através de uma resposta ao degrau, conforme a Figura 33. Percebe-se que a malha externa atinge seu valor em regime num tempo de aproximadamente 30 vezes o da malha interna, apresentada pela Figura 28.

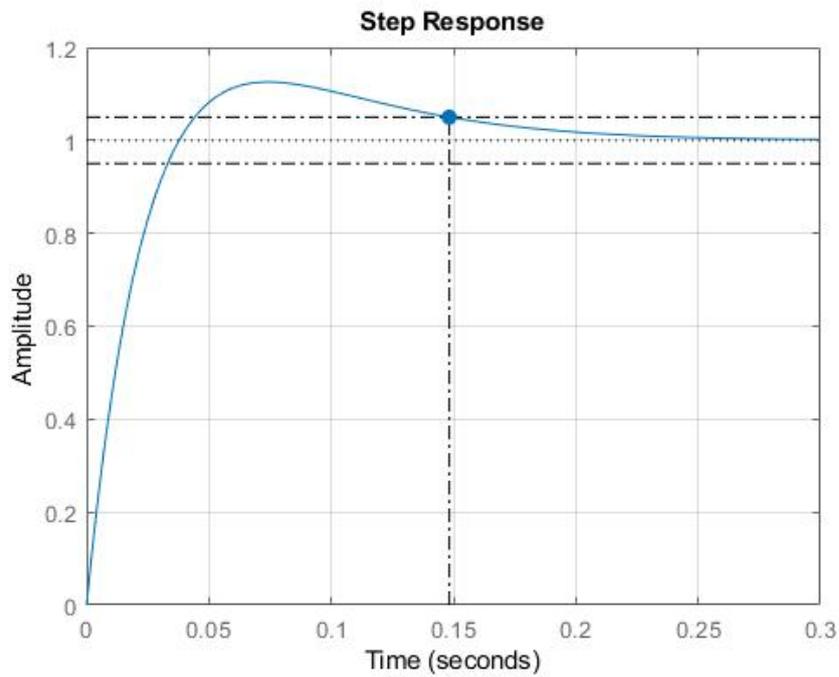


Figura 33 – Resposta ao degrau da malha de velocidade.

Por fim, se for garantido o desacoplamento correto entre as malhas de controle, as dinâmicas da corrente i_{qs} não afetarão a velocidade.

3.3 Malha do Lado da Rede

A malha da rede compreende o circuito inversor conectado à rede elétrica. Tal arquitetura pode ser compreendida pela Figura 34.

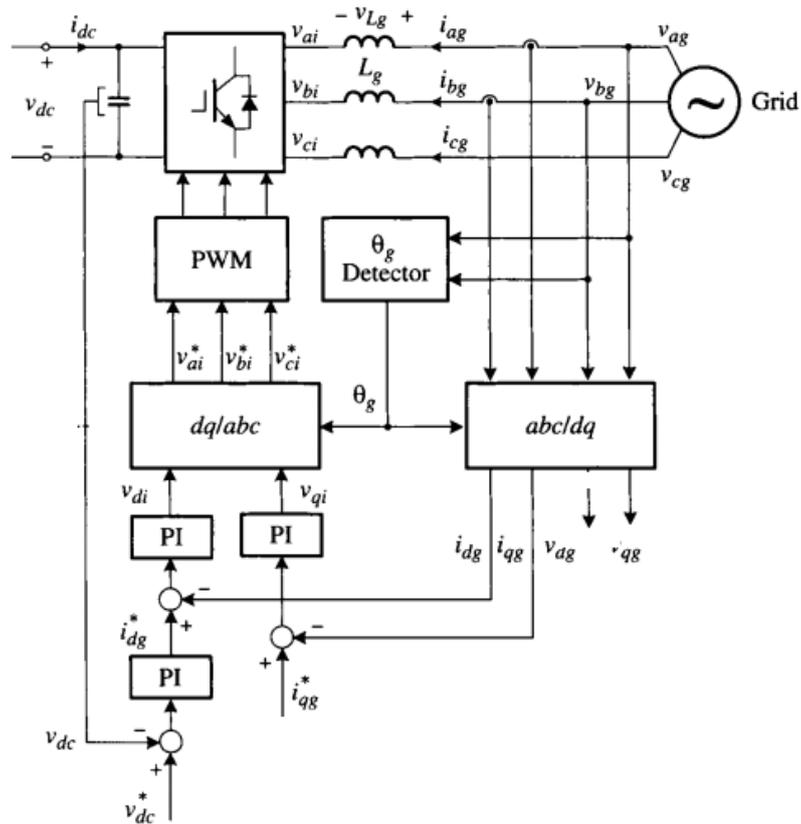


Figura 34 – Estrutura de controle para o circuito conectado à rede[4].

Os componentes que serão utilizados para os cálculos, e posteriormente simulação, tem valores apresentados conforme visto pela Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da malha do inversor conectado a rede

Componente	Valor
R_f	$10m\Omega$
L_f	$0,3mH$
C	$10mF$
Tensão de Rede	$110V$
Frequência da Rede	$60Hz$
Frequência PWM	$20kHz$

3.3.1 Projeto de Controle da Malha de Corrente

A lógica que será utilizada para o projeto de controle das malhas de corrente para este lado do circuito será a mesma apresentada em 3.2.1. Isso significa que, novamente deve-se dimensionar os parâmetros de desacoplamento entre as malhas. Realizando a transformada de Laplace para (2.15) e (2.16) são obtidas as relações:

$$V_d = (L_s + R)i_{gd} - \omega_s L_s i_{gq} + V_{gd} \quad (3.18)$$

$$V_q = (L_s + R)i_{gq} + \omega_s L_s i_{gd} + V_{gq} \quad (3.19)$$

O esquemático do desacoplamento é apresentado na Figura 35.

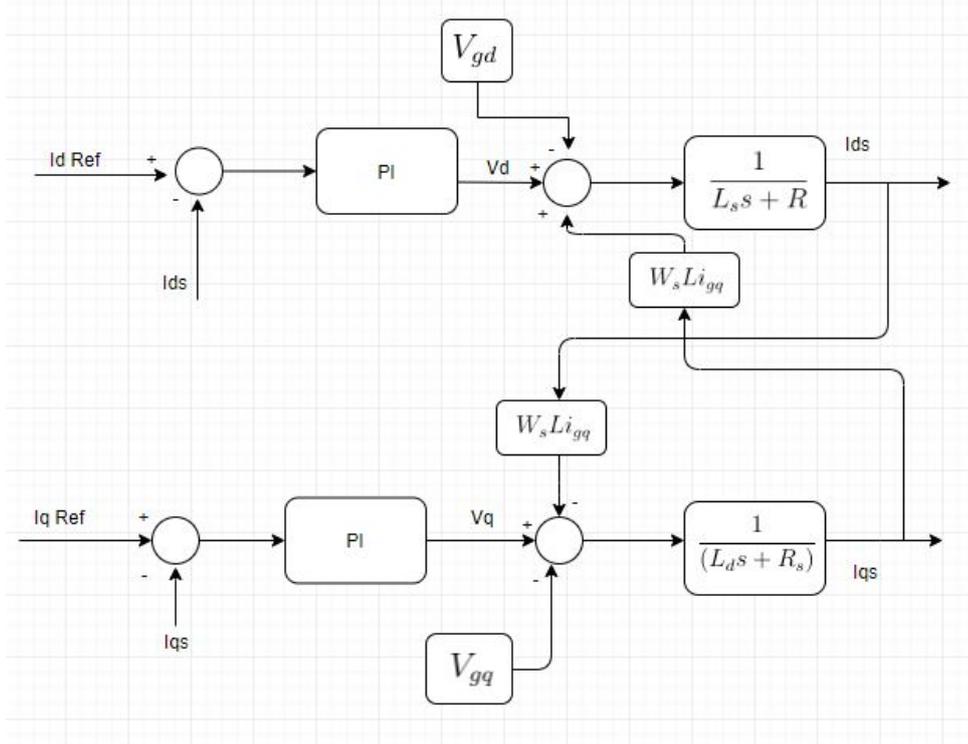


Figura 35 – Diagrama de blocos para o desacoplamento das correntes.

Adicionando os termos de desacoplamento em (3.18) e (3.19), percebe-se novamente que o controle das correntes são dependentes das tensões nos eixos d e q .

$$V_d = (L_s + R)i_{gd} - \omega_s L_s i_{gq} + V_{gd} + \underbrace{\omega_s L_s i_{gq} - V_{gd}}_{\text{desacoplador}} \quad (3.20)$$

$$V_q = (L_s + R)i_{gq} + \omega_s L_s i_{gd} + V_{gq} + \underbrace{-\omega_s L_s i_{gd} - V_{gq}}_{\text{desacoplador}} \quad (3.21)$$

A função de transferência numérica é encontrada realizando a simplificação de (3.18) e (3.20), seguido pela substituição dos valores da Tabela 3. A equação resultante será do tipo:

$$\frac{i_{(d,q)}(s)}{V_{(q,d)}(s)} = \frac{1}{0,0003s + 0,01} \quad (3.22)$$

Mais uma vez plota-se a resposta ao degrau unitário e diagrama de Bode para a função de transferência obtida, conforme demonstrado pelas Figuras 36 e 37. Neste caso, a dinâmica desta malha se mostra naturalmente muito mais rápida se comparada à corrente no lado da turbina. O diagrama de Bode, por sua vez, mantém o formato de um filtro passa-baixa, com ganho de 40dB de magnitude para sinais constantes.

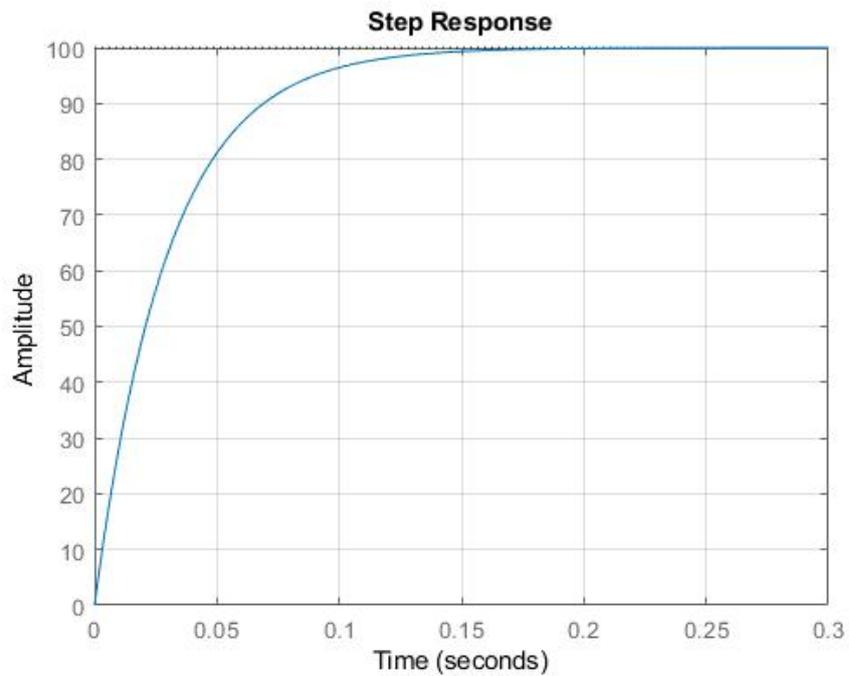


Figura 36 – Resposta ao degrau das correntes no lado da rede em malha aberta.

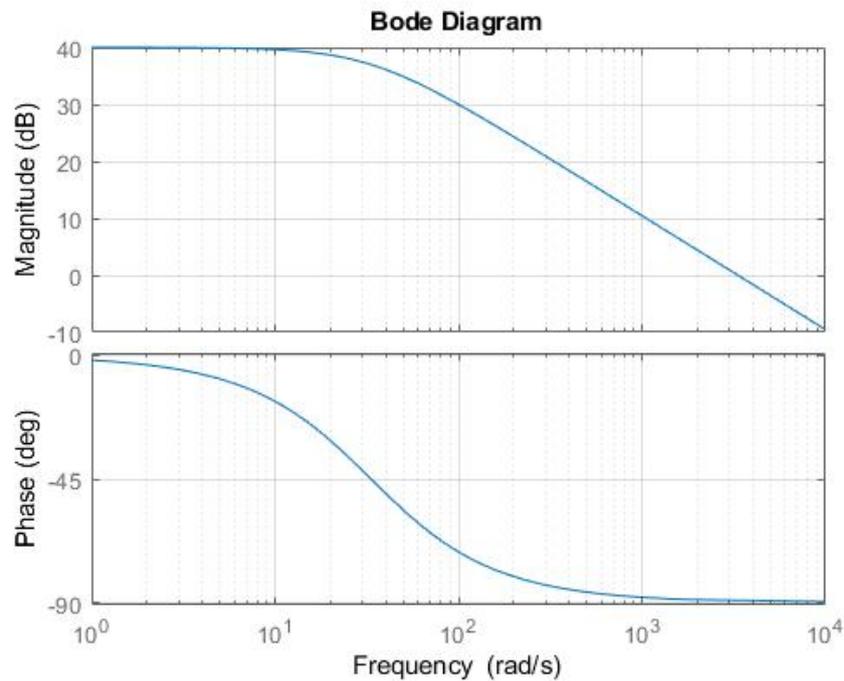


Figura 37 – Diagrama de Bode das correntes no lado da rede em malha aberta.

Utilizando novamente controladores de topologia proporcional-integradora, a fim de que as especificações requisitadas sejam alcançadas, o controlador que garante um tempo de acomodação igual a $1,0ms$ é:

$$C_i(s) = \frac{2,87(s + 2408)}{s} \quad (3.23)$$

Analisando as margens de ganho de fase no diagrama de bode da Figura 39, assim como a resposta do sistema a um degrau unitário, avalia-se de maneira positiva o comportamento da malha fechada em relação aos requisitos de projeto

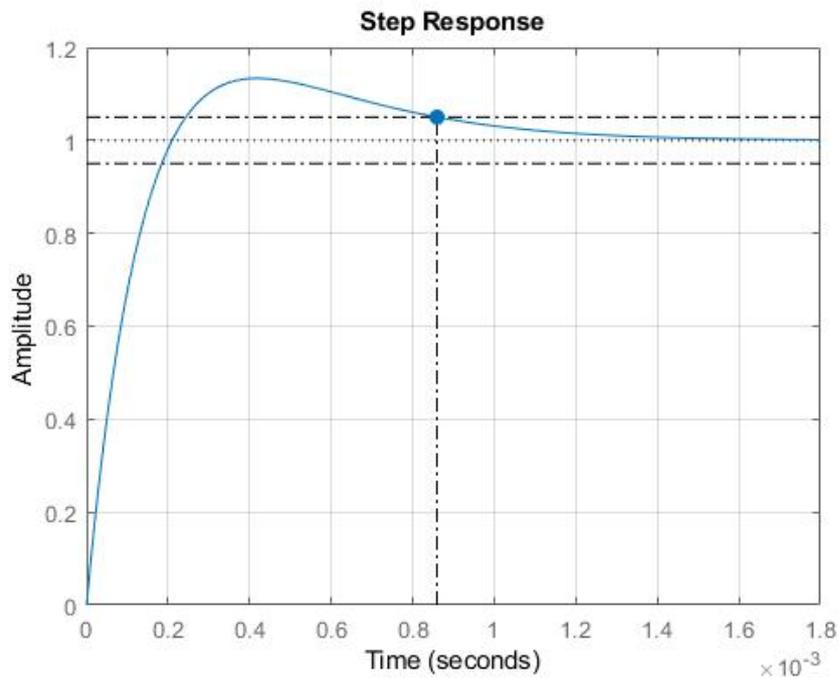


Figura 38 – Resposta ao degrau da malha de corrente.

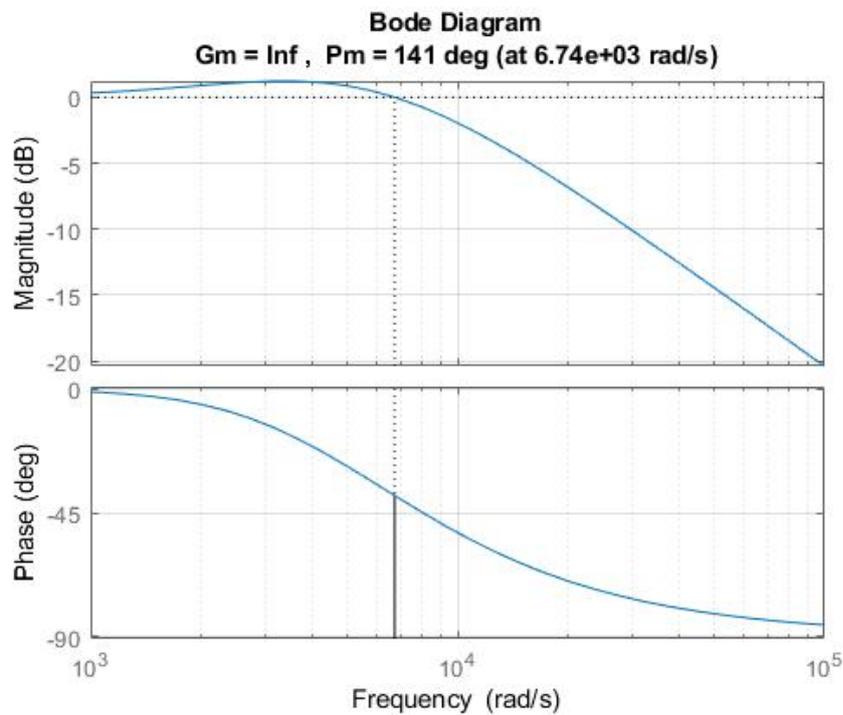


Figura 39 – Margens de ganho de fase para a malha de corrente.

3.3.2 Projeto de Controle da Tensão do Barramento

Finalizado o projeto da malha interna, a atenção é redirecionada para o controle do barramento CC, que tem comportamento dado por (2.23). A relação entre as malhas de

controle é apresentada na Figura 40

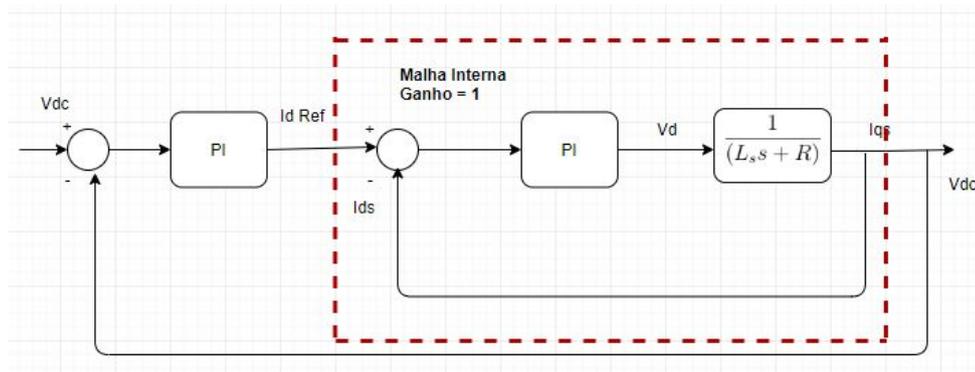


Figura 40 – Diagrama de blocos para a malha da tensão do barramento.

Substituindo os valores dos componentes utilizados em simulação na função de transferência para a tensão do barramento apresentada em (3.24) será dada por:

$$\frac{V_{dc}(s)}{i_{ds}(s)} = \frac{-33.6833}{s} \quad (3.24)$$

Na Figura 41, na qual é apresentada a saída do barramento quando aplicado um degrau unitário na entrada, é visto que este se trata de um sistema instável. Pelo Bode, na Figura 42, nota-se o comportamento característico para a equação de um sistema composto por um integrador puro.

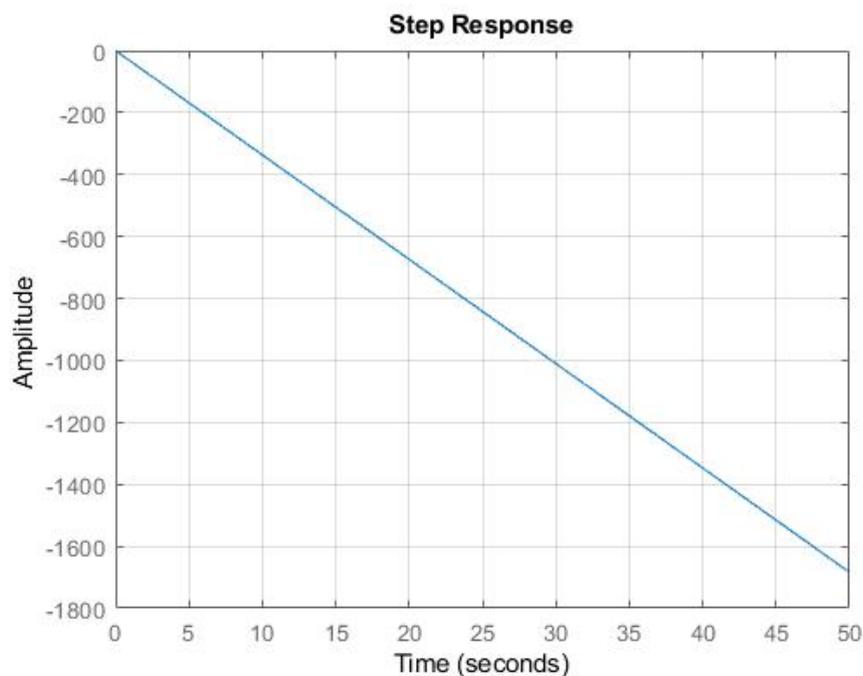


Figura 41 – Resposta ao degrau da tensão no barramento no lado da rede em malha aberta.

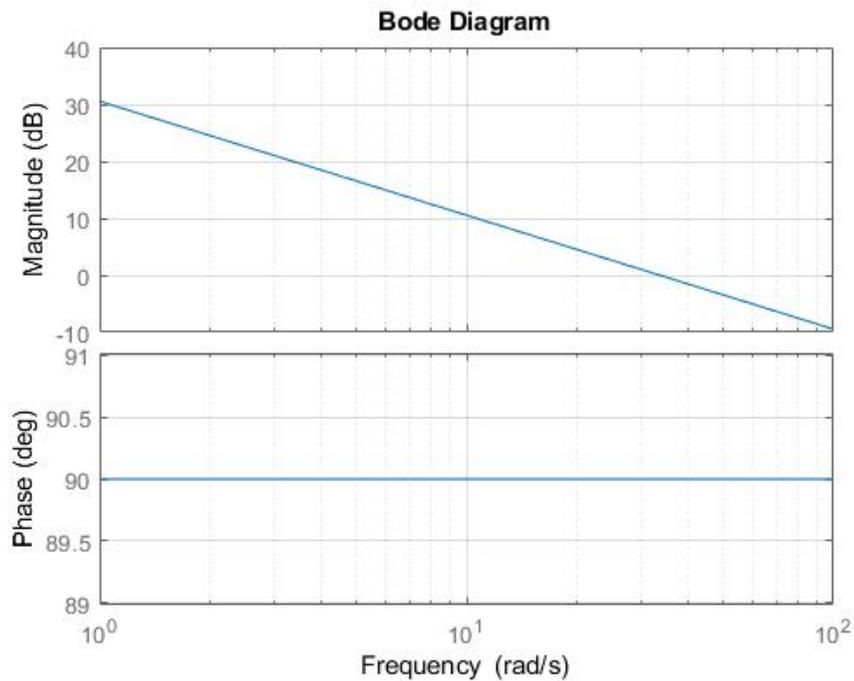


Figura 42 – Diagrama de Bode da tensão no barramento no lado da rede em malha aberta.

Com base na função de transferência em (3.24) e relembrando as especificações para o comportamento do sistema, o controlador que será inserido nesta malha será:

$$C_{Vdc}(s) = \frac{-19,002(s + 160)}{s} \quad (3.25)$$

Por fim, faz-se uma análise das margens no diagrama de bode, e resposta ao degrau de amplitude unitária, Figuras 43 e 44 para verificar a validade do projeto. É visto que ambas as margens de ganho e fase possuem valores positivos, o que demonstra a estabilidade do sistema após a inserção do controlador (3.25).

De acordo com a resposta ao degrau, percebe-se a existência de um coeficiente de amortecimento, em virtude da máxima ultrapassagem, assim como tempo de acomodação semelhante ao desejado.

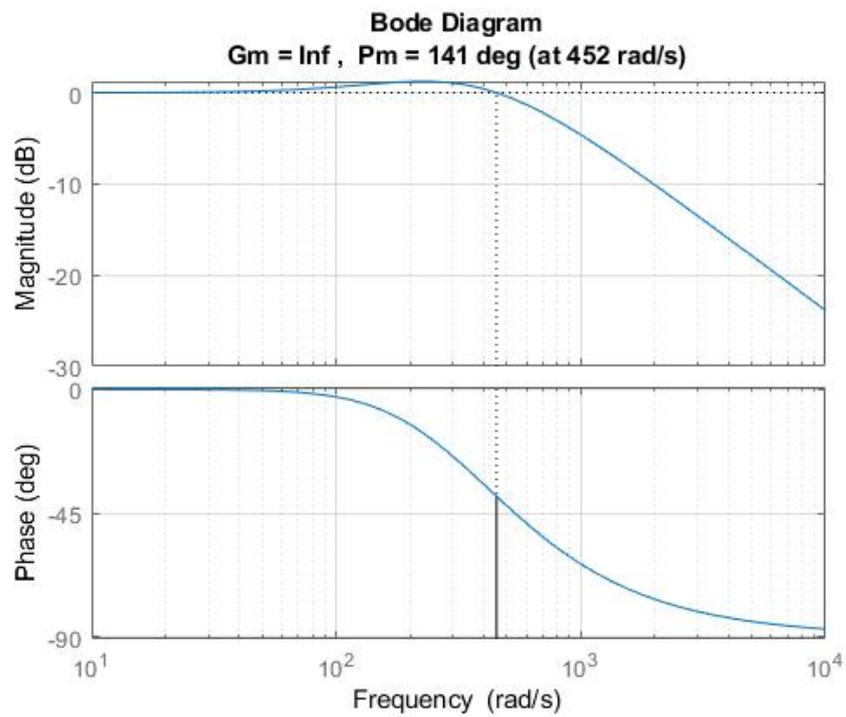


Figura 43 – Margens de ganho e fase para a malha de tensão do barramento.

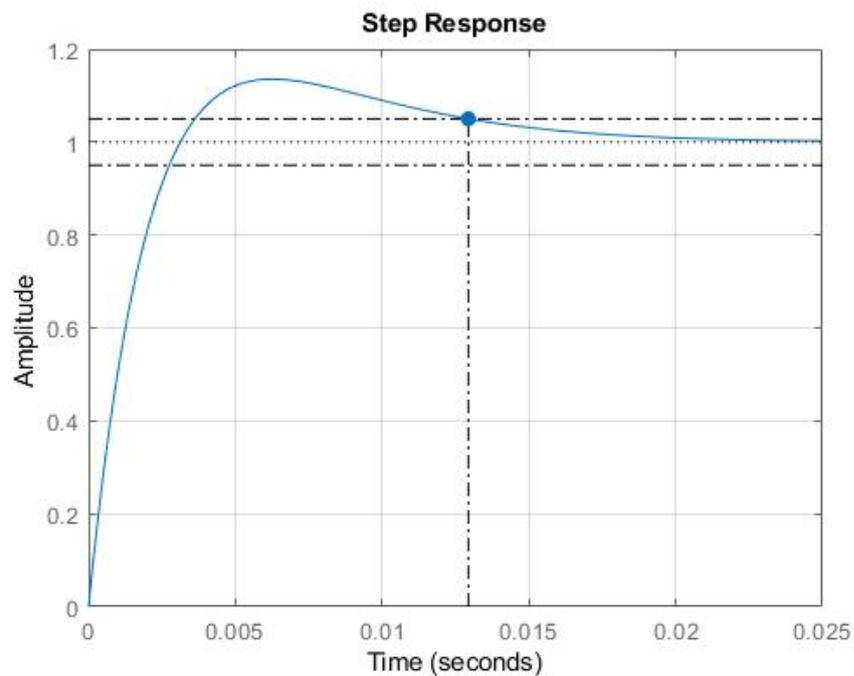


Figura 44 – Resposta ao degrau da malha de tensão do barramento.

Satisfeitos os requisitos, pode-se dar início às simulações, apresentadas na próxima seção.

4 Resultados e Simulações

A partir das funções de transferência obtidas nos capítulos anteriores, são apresentadas nesta seção os resultados obtidos a partir da implementação dos controladores projetados no simulador. Inicialmente é realizada uma introdução as características do software utilizado para as simulações, assim como uma análise do comportamento e particularidades dos elementos que o compõe. Em seguida, será realizada uma comparação entre os resultados teóricos em MATLAB e os obtidos da simulação em *PSIM*.

4.1 Configurações para Simulação

As simulações dos sistemas foram realizadas no software *PSIM*. Uma vantagem deste simulador é a grande diversidade de elementos presentes em sua biblioteca, que permite uma fidelidade maior entre os resultados obtidos nas simulações, com a realidade. Para tal, foram utilizados os modelos matemáticos que descrevem o comportamento tanto da turbina eólica em 2.2.2, bem como para o retificador em 2.3.

Apesar de o *PSIM* possuir blocos prontos para a transformação de referências abc/dq e dq/abc , optou-se por não utilizá-los. Em vez disso, foram construídos a partir de blocos em linguagem C. Tal escolha foi feita pois notou-se que existem duas notações diferentes para as transformadas. A primeira notação, utilizada pelo *PSIM* considera que o eixo de quadratura está 90° adiantada em relação ao eixo direto, enquanto na bibliografia estudada, o eixo q está 90° atrasado em relação a d . Tal diferença representa uma troca de sinais que acaba por influenciar todos os modelos.

Para garantir a validade dos modelos matemáticos utilizados durante a modelagem dos sistemas, as transformações utilizadas por toda a simulação foram as seguintes:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Antes de iniciar as análises do sistema simulado completo, é interessante verificar o resultado do sistema de sincronização inserido. Conforme citado durante a revisão teórica, determinar a frequência e fase corretas da rede elétrica permitirá que a potência desenvolvida pelos geradores seja transferida corretamente na rede. Para tal, mede-se as

tensões de linha V_a e V_b e calcula-se o arco tangente da divisão da primeira pela segunda, conforme (21).

Considerando que a rede tem frequência igual a $60Hz$, a fase calculada utilizando o equacionamento se mostra correta quando comparada com a tensão V_a medida. Esta metodologia utilizada retorna um ângulo θ que varia entre $[-\pi, \pi]$.

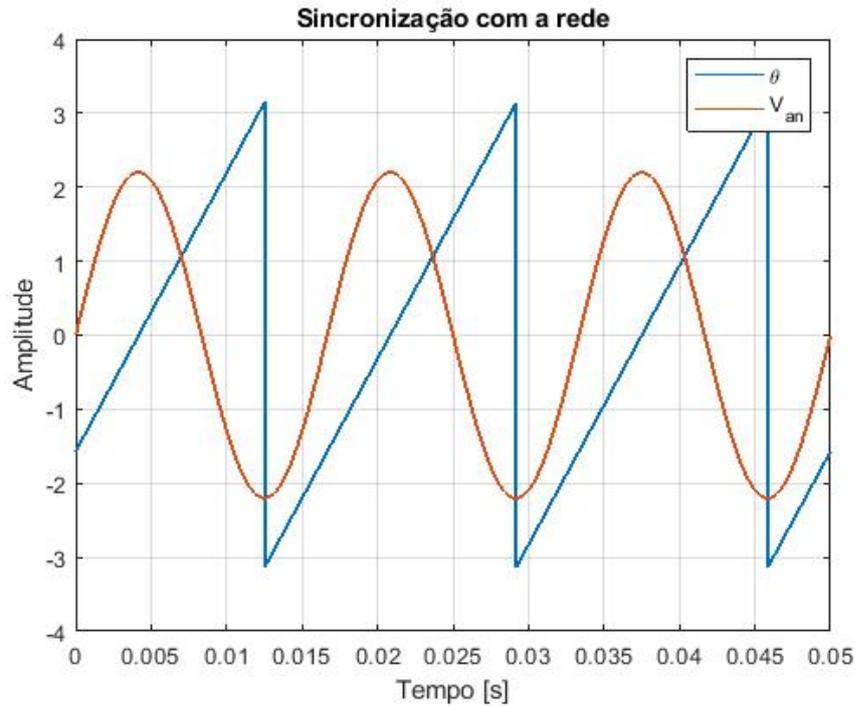


Figura 45 – Resultado do cálculo para sincronização.

Outros parâmetros necessários para simulação completa deste sistema podem ser determinados a partir das definições apontadas pelo próprio software *PSIM*, no componente da Turbina Eólica. Conforme visto em [20] o valor para o fluxo magnético do gerador, bem como seu coeficiente de atrito serão dados por:

$$\lambda_R = \frac{60.V_{pk}/krpm}{\sqrt{3}.\pi.p.1000} \quad (4.3)$$

$$B_m = \frac{J}{\tau_{eixo}} \quad (4.4)$$

Onde J é o momento de inércia do gerador, e τ_{eixo} é a constante de tempo do eixo de acoplamento. Os valores numéricos dos parâmetros são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

O sistema completo para simulação pode ser visualizado na Figura 46. As seções abaixo abordam os resultados obtidos a partir do circuito montado.

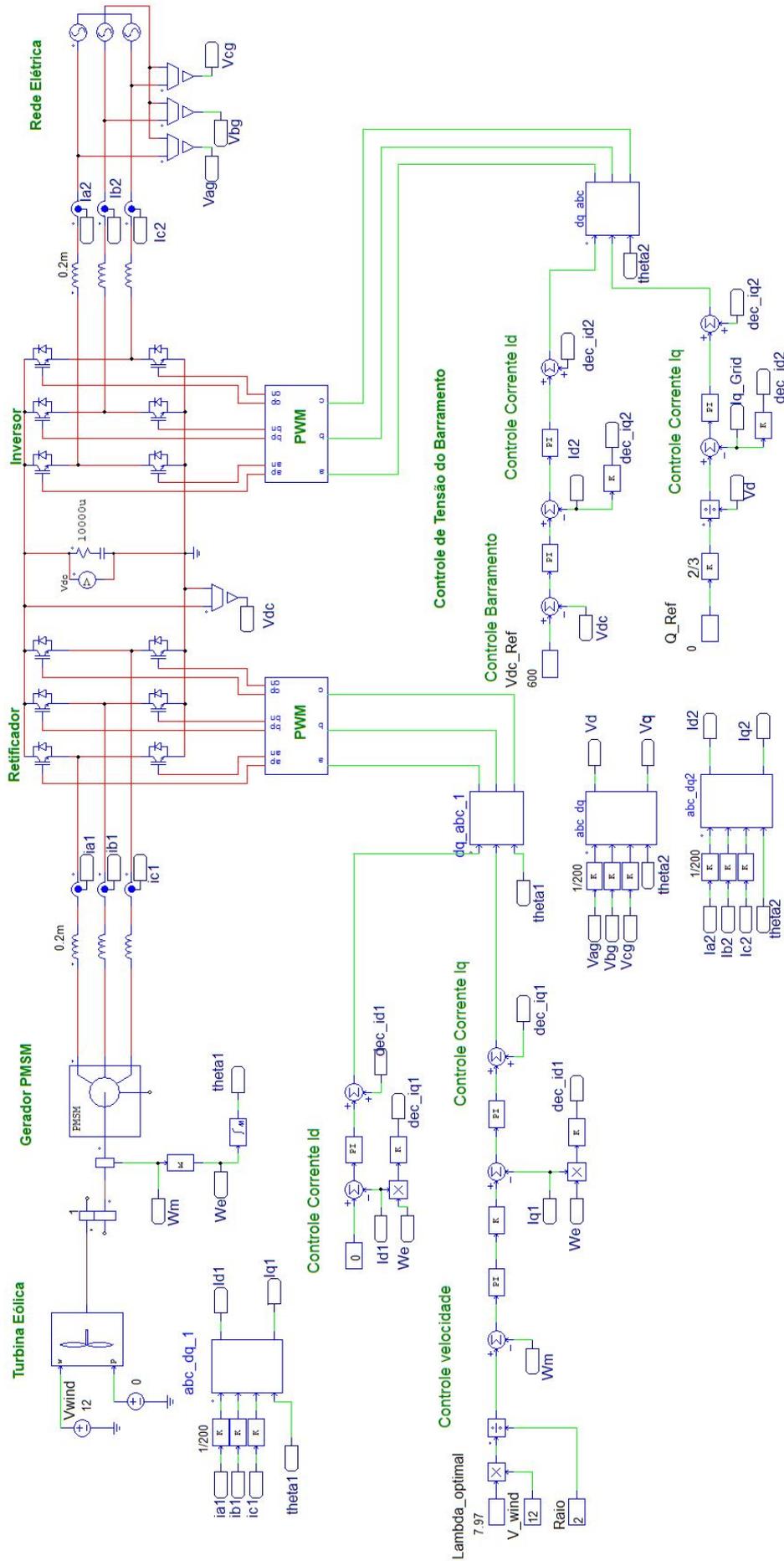


Figura 46 – Circuito montado para simulação.

4.2 Malha da Rede

4.2.1 Controle das Correntes

Como uma forma de validar os modelos obtidos para as dinâmicas das correntes, inicialmente será fixada uma tensão para o barramento CC, em seu valor nominal, de 600V. Isso permite que tanto a referência gerada para i_{ds} quanto para i_{qs} podem ser inseridas manualmente.

Visto que é do interesse do projetista que a potência reativa entregue a rede seja sempre o mais próximo de zero possível, e que esta é originada na malha de i_{qs} , sua referência não será alterada para estes experimentos. Qualquer variação que aconteça nesta malha é decorrente da não idealidade do desacoplamento.

As dinâmicas das correntes frente a variações de referência para i_{ds} são apresentadas na Figura 47.

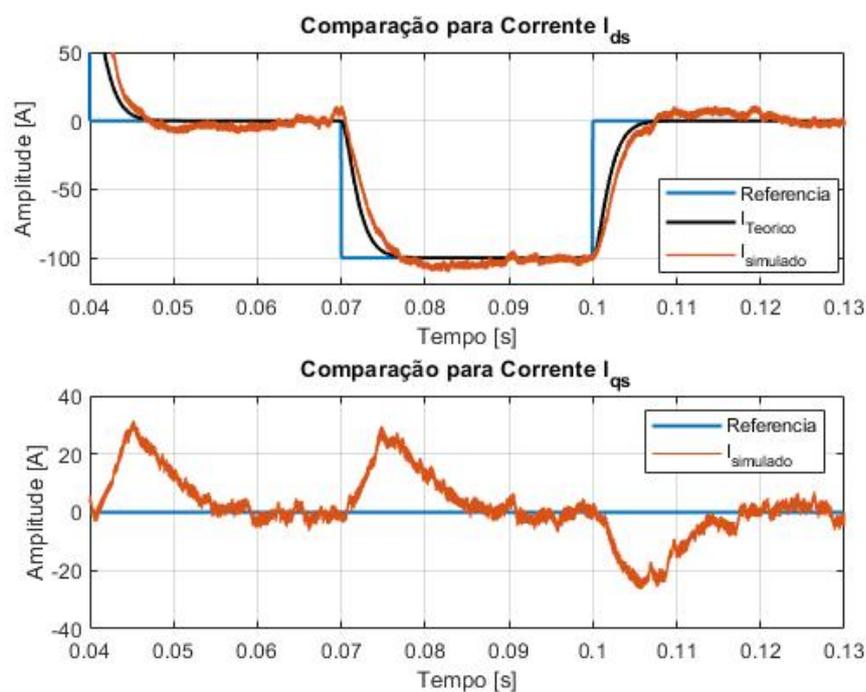


Figura 47 – Validação da modelagem matemática para a corrente.

Percebe-se que a dinâmica de i_{ds} se mostrou muito próxima daquela apresentada pelo modelo teórico obtido a partir da função de transferência desacoplada. O controlador desta malha foi capaz de atender às especificações de projeto, tanto para o tempo de acomodação quanto ao erro nulo em regime. Porém, avaliando a resposta para i_{qs} é notado que o desacoplamento implementado não foi perfeito, Uma vez que variações de i_{ds} causaram distúrbios em seu comportamento. Apesar disso, o sistema de controle se mostrou capaz de rejeitar estas perturbações e retornar o valor de saída conforme a referência aplicada.

4.2.2 Controle do Barramento CC

Realizadas as validações para as malhas internas de corrente, deve-se repetir o processo para o modelo da tensão do barramento CC.

Mantendo a velocidade do vento constante em seu valor nominal, pode-se avaliar a modelagem para a tensão do barramento por meio de uma comparação entre a saída medida no circuito simulado e a partir da própria função de transferência, dado uma mesma referência. Esta comparação pode ser vista na Figura 48.

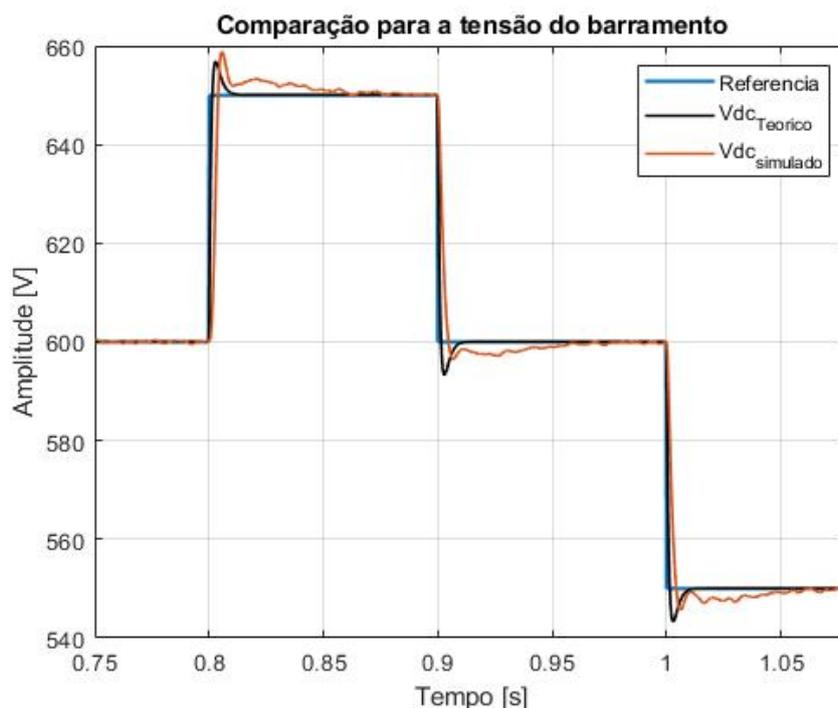


Figura 48 – Validação da modelagem matemática para a tensão do barramento.

Percebe-se que o modelo obtido matematicamente se mostrou diferente daquele representado na prática, uma vez que as respostas possuem dinâmicas com boa diferença. Uma explicação deste comportamento se dá pelo fato do desacoplamento implementado apresentar comportamento ideal apenas em regime permanente, conforme visto anteriormente na Figura 47. Na teoria este desacoplamento é exato tanto em regime, quanto durante o transitório.

Outro aspecto que deve ser considerado, é que o modelo matemático para a tensão do barramento foi linearizado em torno do ponto de operação de 600V. Logo, quando a operação do circuito difere deste ponto, é esperado que o comportamento do mesmo não seja o ideal.

Apesar disso, a malha de controle ainda sim foi capaz de garantir rastreamento de referências e rejeição de perturbações do tipo CC, conforme era requisitado.

4.3 Malha da Turbina

Nas seções abaixo será considerado apenas o lado esquerdo do circuito da Figura 22, composto pelo retificador e geradores eólico e síncrono. São considerados os componentes da Tabela 2 para realização dos projetos de controle.

4.3.1 Controle das Correntes

Repete-se o procedimento realizado para validação das correntes da malha de rede, desta vez na malha da turbina, cuja função de transferência é dada por (3.13). São fixadas tanto velocidade rotacional, quanto tensão do barramento, a fim de que sua influência no comportamento das correntes seja reduzida. A comparação resultante da simulação é apresentada na Figura 49. Assim como o ocorrido anteriormente, é evidente pela imagem que os termos desacopladores não foram capazes de eliminar totalmente as influências entre as malhas.

Apesar disso, analisando as amplitudes máximas atingidas por i_{ds} , este valor varia no intervalo entre $[-5, 5]$ Amperes, que representa algo próximo à 5% da referência aplicada em i_{qs} .

A corrente i_{qs} , por sua vez, se mostrou muito próxima ao comportamento obtido de maneira teórica. Comprovando desta maneira, que a função de transferência representa bem o comportamento real.

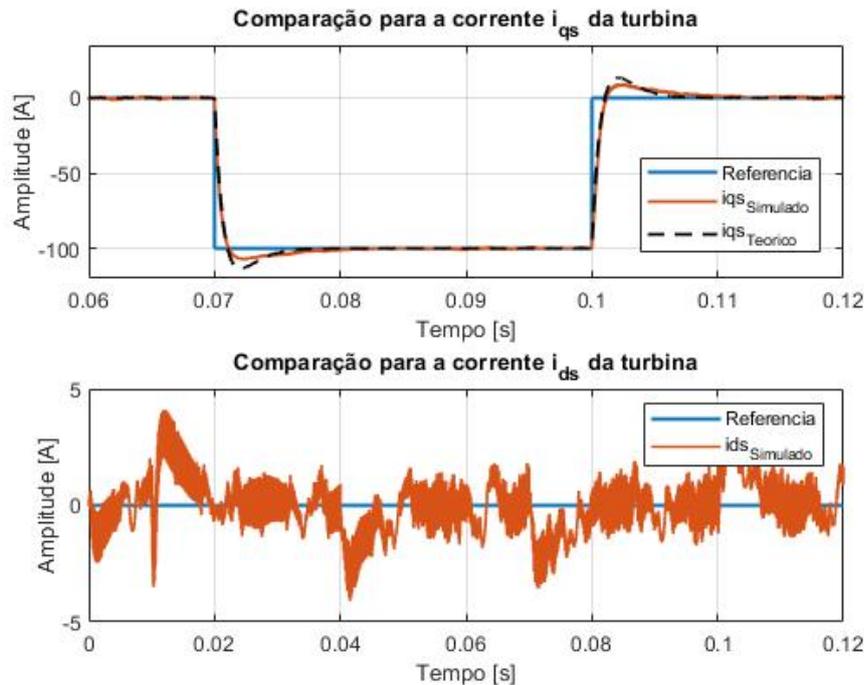


Figura 49 – Validação da modelagem matemática para as correntes da turbina.

4.3.2 Controle de Velocidade

Por fim, deve-se verificar se o comportamento da malha de velocidade obtida por meio das equações de estado do sistema representam de maneira fiel as dinâmicas dos componentes do *PSIM*. Fixando mais uma vez a tensão do barramento em 600V, para evitar as influências da malha da rede na malha da turbina.

Realizando a simulação, são obtidas as curvas para velocidade conforme demonstrado pela Figura 50. Novamente o comportamento obtido para ambas as saídas se mostraram muito semelhantes no que diz respeito tempo de acomodação, bem como à máxima ultrapassagem. Tais aspectos comprovam, mais uma vez, que os modelos matemáticos encontrados na literatura são verídicos.

Porém, deve-se atentar ao fato da existência de uma mínima diferença, em virtude da não idealidade do desacoplamento, já citado anteriormente.

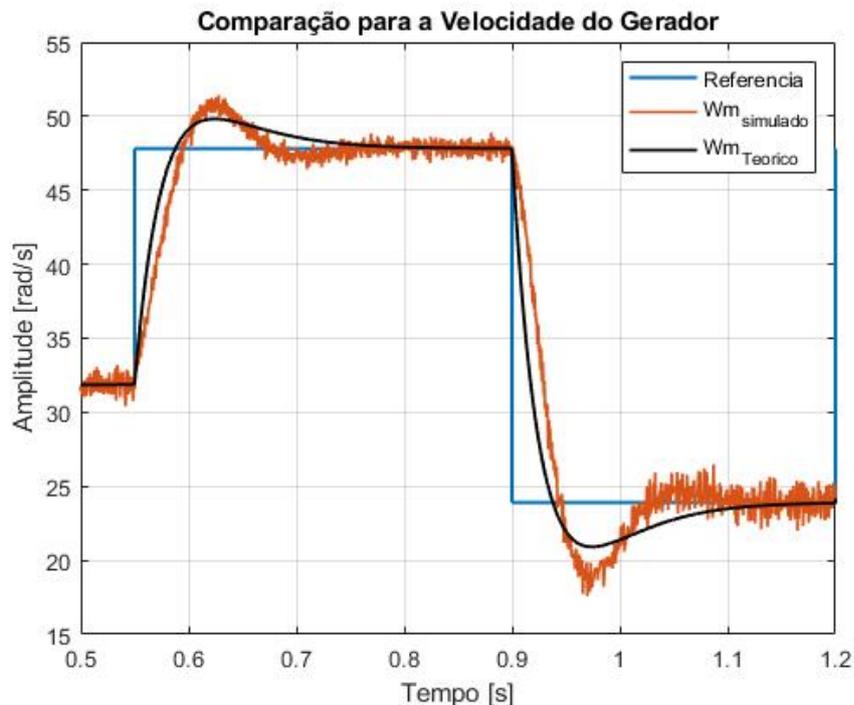


Figura 50 – Validação da modelagem matemática para a velocidade.

4.4 Validação do Modelo Completo

Após todos os modelos matemáticos terem sido validados de maneira individual, o próximo passo a ser seguido é conectar todas as malhas e avaliar os comportamentos das variáveis de interesse. Será dada uma maior atenção nas malhas externas, de velocidade do gerador e tensão do barramento, pois estas são responsáveis pelas potências cujo controle é o objetivo principal deste trabalho.

Como visto na seção 2.2.3, na qual são abordadas as técnicas de rastreamento de máxima potência, a velocidade do vento é um parâmetro primordial para o funcionamento deste sistema, influenciando diretamente tanto a potência desenvolvida, quanto o valor de referência para a velocidade rotacional do gerador.

Para tal foi considerado um perfil de velocidade para o vento, conforme a Figura 51, que durante um intervalo de tempo assume seu valor nominal de $12m/s$, variando também para velocidades mais baixas.

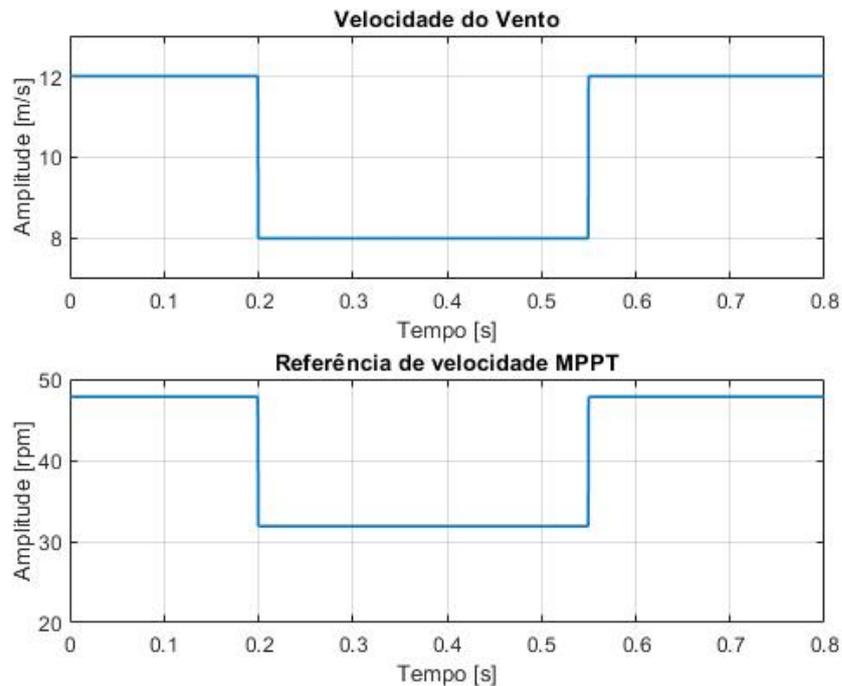


Figura 51 – Perfil da velocidade do vento imposta ao sistema.

O valor de referência para W_m é calculado conforme:

$$W_m^{ref} = \frac{\lambda_{op} \cdot V_{wind}}{Raio} \quad (4.5)$$

Com base nisto, faz-se a simulação do sistema eólico conectado a rede completo, contendo variações de referência para as duas malhas externas. Os resultados e análises são apresentados a seguir.

4.4.1 Análise da Velocidade e Tensão

Inicialmente é variado a velocidade do vento que aciona o rotor da turbina, com a referência para o barramento mantida no valor nominal. O comportamento de tensão e velocidade podem ser vistos na Figura 52. A dinâmica simulada para a rotação do gerador se mostra muito semelhante aquela obtida pela teoria, assegurando mais uma vez que o controlador projetado obteve êxito em sua função.

É interessante analisar que a resposta do barramento não sofreu grandes influências causadas pelas mudanças na referência, apresentando apenas pequenas variações ao redor do ponto de interesse.

O contrário também se mostra verdadeiro, pela Figura 53 fica evidente que alterações no valor do barramento causam uma maior interferência na malha da turbina, mas que logo são rejeitadas pelos controladores implementados. Apesar disso, as dinâmicas mantiveram seu comportamento de acordo com as funções de transferência retiradas da literatura.

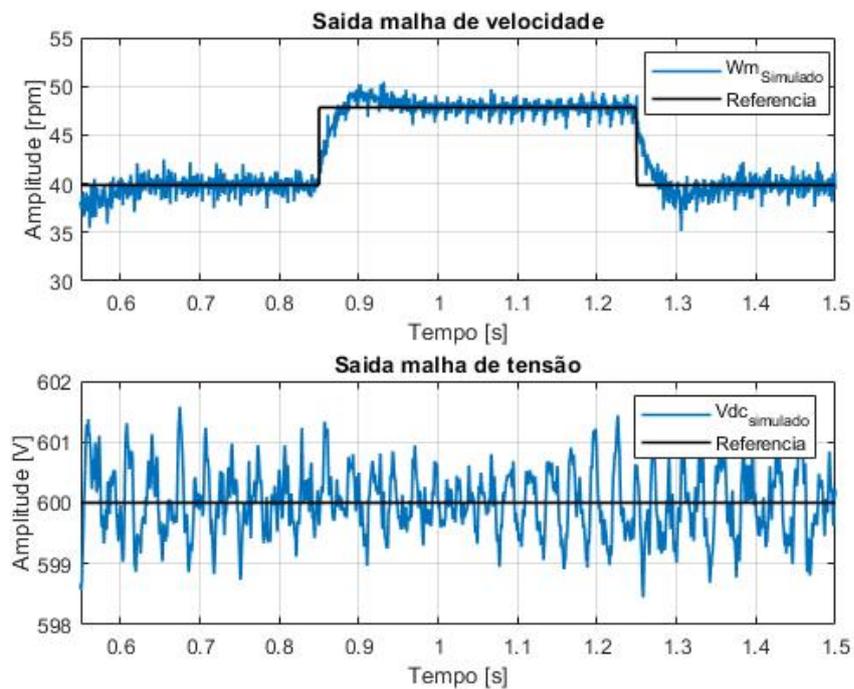


Figura 52 – Resultado da simulação completa com variação da velocidade do vento.

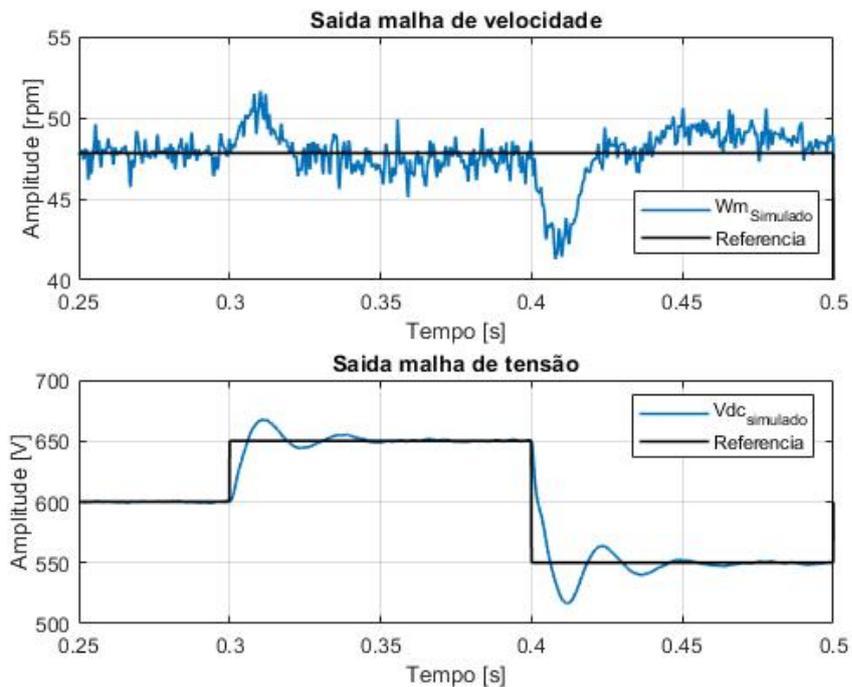


Figura 53 – Resultado da simulação completa com variação da tensão no barramento.

4.4.2 Análise da Potência Ativa e Reativa

Em uma última etapa de análise, são levantados os resultados para as potências a fim de se verificar se os objetivos principais deste projeto foram bem sucedidos. Para a potência ativa do gerador será repetido o perfil de vento, utilizado previamente, como uma variável de entrada.

Pela Figura 54, nos períodos de tempo em que a velocidade do vento apresentou seu valor nominal de $12m/s$, a potência ativa que o sistema injetou na rede foi muito próxima do máximo desenvolvido pela turbina eólica. Com um valor em torno de 1850 Watts, isso representa aproximadamente uma eficiência de 92,5% apresentada pelo sistema. Esse valor elevado coloca em evidência a vantagem da utilização de geradores síncronos com ímãs permanentes no acoplamento de turbinas eólicas.

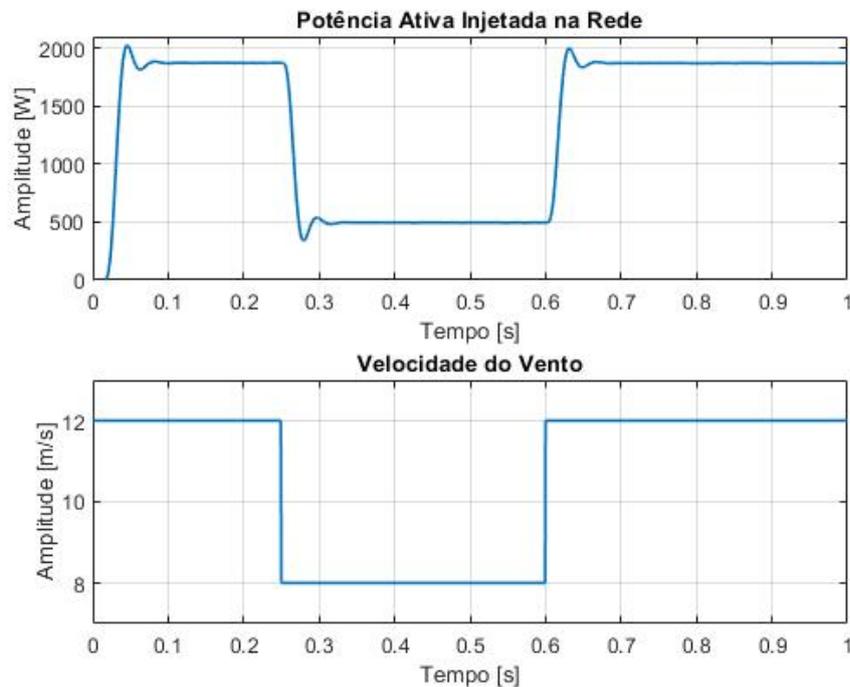


Figura 54 – Potência ativa gerada na turbina em função do vento.

Já no controle da potência reativa, varia-se o valor de referência para a malha de corrente i_{qs} no lado da rede após o sistema se encontrar em regime permanente em relação as malhas de velocidade e tensão do barramento. O resultados da Figura 55 mostram que o circuito tem valor correto em regime permanente, conforme o sinal de referência aplicado. Porém, é notável a existência de uma oscilação ao redor deste valor.

Tal característica se dá pela maneira com que foi definido o equacionamento inicial das correntes. Foi considerado que o desacoplamento seria ideal, capaz de remover toda influência entre as malhas. Isso não se mostra verdade, conforme já demonstrado durante a validação dos controladores, nas Figuras 47 e 49. Apesar disso, o intervalo oscilatório é pequeno, de aproximadamente $\pm 50\text{VAR}$.

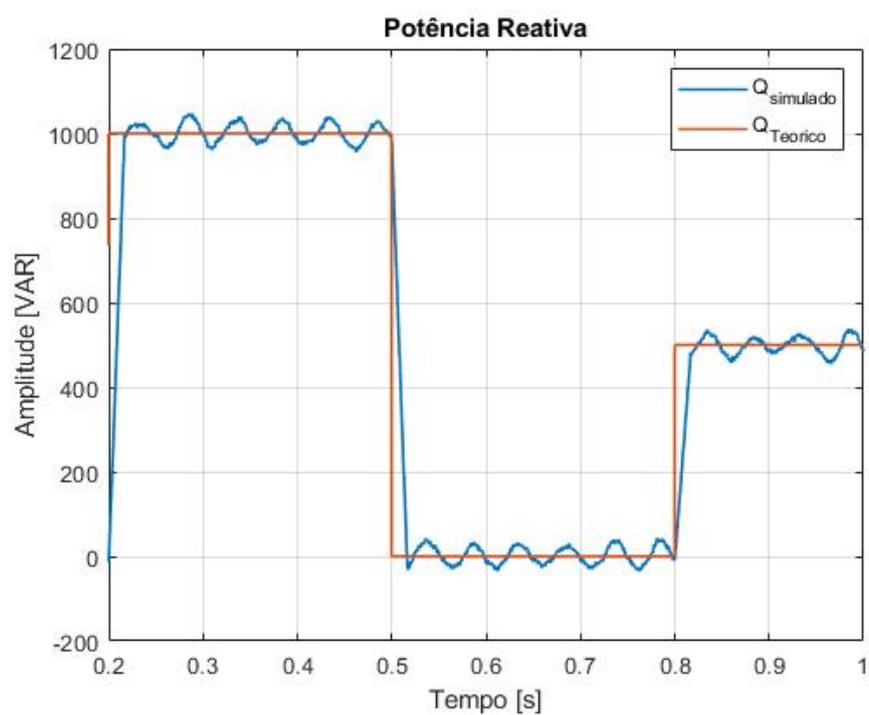


Figura 55 – Potência reativa injetada na rede elétrica.

5 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivos a realização da modelagem matemática e simulação de um sistema de geração de energia eólica com motor síncrono de ímãs permanentes. No processo de revisão da literatura percebeu-se que existe uma busca ávida pela otimização da potência desenvolvida pela máquina através de técnicas de MPPT, neste caso com enfoque no método de velocidade rotacional ideal.

Para tal, são desenvolvidos projetos de controle que utilizam como base uma simplificação por meio de transformações de referência. Sinais trifásicos são convertidos em valores constantes, possibilitando que se utilizem controladores de topologia simples, como PI e arquiteturas de cascata para as malhas.

Para validação dos modelos obtidos o sistema foi implementado no *software* de simulações *PSIM*, o qual permitiu avaliar o comportamento das variáveis de interesse frente certas perturbações e comparar seus resultados com a teoria. Estes se mostraram satisfatórios, mesmo considerando a não idealidade dos componentes e desacoplamentos implementados.

Em uma perspectiva para trabalhos futuros é sugerido o refinamento da simulação para aplicar e comparar diferentes técnicas de controle neste sistema. É interessante, também, que sejam implementados os demais métodos de rastreamento de máxima potência estudados. Assim como, uma análise com mais profundidade nos perfis de potência e torque gerados pela turbina e potências ativa e reativa inseridas na rede elétrica.

Referências

- 1 THE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Electricity Consumption*. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/electricity>>. Acesso em: 15 ago. 2019.
- 2 BOSSANYI, E. et al. *Wind energy handbook*. [S.l.]: New York: Wiley, 2000.
- 3 HAU, E. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- 4 WU, B. et al. *Power conversion and control of wind energy systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 76.
- 5 ABAD, G. et al. *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 85.
- 6 CHENG, M.; ZHU, Y. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 88, p. 332–347, 2014.
- 7 NATIONS, U. Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. United Nations, 1998.
- 8 GREENWOOD, C. et al. Global trends in sustainable energy investment 2007–analysis of trends and issues in the financing of renewable energy and energy efficiency in oecd and developing countries. *Untersuchung im Auftrag des United Nations Environment Programme*, 2007.
- 9 KLEMPNER, G.; KERSZENBAUM, I. *Handbook of large turbo-generator operation and maintenance*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 38.
- 10 KRAUSE, P. C. et al. *Analysis of electric machinery and drive systems*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2002. v. 2.
- 11 NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor*. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. v. 2.
- 12 BARAMBONES, O.; ALKORTA, P.; SEN, M. D. L. Wind turbine output power maximization based on sliding mode control strategy. In: IEEE. *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. [S.l.], 2010. p. 364–369.
- 13 ABDULLAH, M. A. et al. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 16, n. 5, p. 3220–3227, 2012.
- 14 DUARTE, O. d. S. et al. *Algoritmo MPPT para sistema de geração de energia eólica de pequeno porte com PMSG*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- 15 KUMAR, G. R. et al. Modeling and speed control of permanent magnet synchronous motor at constant load torque using psim. IET, 2011.

- 16 ZENG, Q.; CHANG, L. Study of advanced current control strategies for three-phase grid-connected pwm inverters for distributed generation. In: IEEE. *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005*. [S.l.], 2005. p. 1311–1316.
- 17 KUNG, Y.-S.; HUANG, P.-G. High performance position controller for pmsm drives based on tms320f2812 dsp. In: IEEE. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, 2004*. [S.l.], 2004. v. 1, p. 290–295.
- 18 ROTZOLL, R. R.; PRAKASH, J. *System and method for phase lock loop gain stabilization*. [S.l.]: Google Patents, 1997. US Patent 5,625,325.
- 19 JINBO, M. et al. Sistema eólico de velocidade variável com pmsg conectado à rede elétrica. *Blucher Mathematical Proceedings*, v. 1, n. 1, p. 487–496, 2015.
- 20 MANUAL, P. U. *Powersim Inc. 2003*.