



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOSE DALISON FIGUEIREDO LEMOS

**SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA COM CONEXÃO À REDE
TRIFÁSICA UTILIZANDO GERADOR DE INDUÇÃO DE ROTOR
BOBINADO**

João Pessoa – PB
Novembro/2017

JOSE DALISON FIGUEIREDO LEMOS

**SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA COM CONEXÃO À REDE
TRIFÁSICA UTILIZANDO GERADOR DE INDUÇÃO DE ROTOR
BOBINADO**

**Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao departamento de
Engenharia Elétrica como um dos
pré-requisitos para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Elétrica sob orientação do prof.
Dr. Rogério Gaspar de Almeida.**

JOÃO PESSOA – PB

Novembro/2017

L557s Lemos, Jose Dalison Figueiredo

Sistema de geração de energia eólica com conexão à rede trifásica utilizando gerador de indução de rotor bobinado./ Jose Dalison Figueiredo Lemos. – João Pessoa, 2017.

49f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Geração de Energia 2. Eólica 3. Rotor Bobinado 4. Trifásico I.Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 621.3(043)

**Sistema de Geração de Energia Eólica com Conexão à Rede Trifásica Utilizando
Gerador de Indução de Rotor Bobinado**

**Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica como um dos Pré-Requisitos para a Obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica**

Data de Aprovação: ____/____/____

Nota: _____

Aprovado por:

Prof.: Rogério Gaspar de Almeida. (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof.: Nady Rocha. (Examinador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof.: Darlan Alexandria Fernandes. (Examinador)
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado o dom da vida e por sempre está ao meu lado, principalmente nos momentos difíceis.

A toda minha família, em especial aos meus avós; Manoel Jose de Figueiredo e Severina Lemos; a minha mãe, Damiana Figueiredo Lemos, e a minha irmã, Dayane Lemos Lopes.

Agradeço ao meu orientador, professor Rogério Gaspar de Almeida, pela paciência, dedicação, motivação e magnífica orientação durante todo este trabalho.

Agradeço a todos os Professores do departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba em especial ao meu co-orientador, professor Nady Rocha, e ao Professor Alexsandro José Virgíneo dos Santos pelos ensinamentos e companheirismo durante a graduação.

E finalmente, agradecer aos meus amigos que de alguma forma contribuíram para minha formação, não citarei nomes para não cometer injustiças.

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso trata-se de um sistema de geração de energia eólica baseado no gerador de indução de rotor bobinado, DFIG, conectado à rede elétrica. Esta topologia proposta é formada por com um conversor CA-CC-CA, conhecido como *back-to-back*. Este conversor faz a conexão da máquina com a rede elétrica garantindo tensões equilibradas para diferentes tipos de velocidades. Também é apresentada a modelagem do gerador, modelagem dos conversores e estratégias de controle e modulação por largura de pulso, PWM. E por fim são tratadas as simulações do modelo proposto e conclusões acerca do trabalho.

Palavras-chaves: Gerador de Indução de Rotor Bobinado, Geração de Energia Eólica, Conversores *back-to-back*, Modulação PWM.

Abstract

This work of conclusion of course is a system of wind energy generation based on the generator of induction of coiled rotor, DFIG, connected to the electric grid. This proposed topology consists of a CA-CC-CA converter, known as back-to-back. This converter makes the connection of the machine to the electrical network guaranteeing balanced voltages for different types of speeds. Also presented is generator modeling, converter modeling and PWM pulse width modulation and control strategies. Finally, simulations of the proposed model and conclusions about the work are discussed.

Keywords: Winding Rotor Induction Generator, Wind Power Generation, back-to-back converters, PWM Modulation.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	9
1.1	Motivação Acerca da Elaboração desse Trabalho.....	10
1.2	Objetivos.....	10
1.3	Organização do Documento.....	11
2	Máquinas de indução assíncrona.....	12
2.1	Máquina de Indução de Rotor Bobinado.....	13
2.1.1	Campo Magnético Girante.....	14
2.1.2	Escorregamento da Máquina de Indução de Rotor Bobinado.....	14
2.1.3	Modelo Matemático de uma Máquina de Indução de Rotor Bobinado.....	14
2.1.4	Representação odq da Máquina de Indução de Rotor Bobinado.....	18
2.1.4.1	Expressões dos fluxos em odq.....	19
2.1.4.2	Expressões das tensões em odq.....	20
2.1.4.3	Expressão do conjugado em odq.....	20
2.1.4.4	Expressão da potência em odq.....	20
2.2	Gerador de Indução de Rotor Bobinado.....	21
3	A Geração Eólica no Brasil e no Mundo.....	22
3.1	Vantagens e Desvantagens.....	22
3.2	Aerogeradores.....	23
3.2.1	Aerogeradores Assíncronos de Velocidade Fixa.....	24
3.2.2	Aerogeradores Síncronos de Velocidade Variável.....	25
3.2.3	Aerogeradores Assíncronos de Velocidade Variável.....	26
4	Caracterização do sistema teste.....	28
4.1	Conversor <i>Back-To-Back</i>	28
4.1.1	Modelo do Conversor do Lado da Rede.....	29
4.1.2	Modelo do Conversor do Lado do Rotor.....	29
4.2	Topologia de Controle Adotada.....	30
4.2.1	Estratégia de Controle do Conversor G.....	31
4.2.2	Estratégia de Controle do Conversor R.....	34
5	Análises e Resultados.....	36
6	Conclusões.....	44
7	Referências Bibliográficas.....	45
	Anexo A – Sistema Teste.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistema de geração eólica com máquina de indução de rotor bobinado [2].	11
Figura 2- Motor de indução de rotor bobinado [5].	12
Figura 3- Rotor bobinado [5].	13
Figura 4- Máquina trifásica simétrica [4].	15
Figura 5- Convenções adotadas para as grandezas em uma bobina [4].	15
Figura 6- Aerogerador de eixo vertical [18].	23
Figura 7- Aerogerador de eixo horizontal [18].	24
Figura 8 - Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo [19].	25
Figura 9 - Gerador com velocidade variável com conversor de potência nominal [19].	26
Figura 10- Gerador com velocidade variável com conversor de potência parcial [19].	27
Figura 11- Topologia de geração eólica utilizando DFIG e conversores de potência.	28
Figura 12- Estratégia de controle do conversor G.	33
13	33
Figura 14- Estratégia de controle do conversor R.	36
Figura 15 - Formas de onda do conjugado mecânico e conjugado elétrico do gerador.	38
Figura 16- Formas de onda da tensão e da referência de tensão no barramento CC.	38
Figura 17- Formas de onda da corrente rotórica referente à componente i_{rd} e sua referência.	39
Figura 18- Formas de onda da velocidade do rotor da máquina e de sua respectiva referência.	40
Figura 19- Formas de onda da corrente rotórica referente à componente i_{rq} e sua referência.	40
Figura 20 - Formas de ondas da potência ativa e reativa do gerador.	41
Figura 21- Formas de onda das tensões de fase na carga.	42
Figura 22- Formas de onda das correntes eficazes na carga.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking mundial de expansão da capacidade instalada de energia eólica.	9
Tabela 2 - Parâmetros do gerador de indução de rotor bobinado.	37
Tabela 3 - Parâmetros utilizados na simulação.....	37
Tabela 4 - Valores do conjugado mecânico e conjugado elétrico do gerador	38
Tabela 5 - Valores da tensão de referência e da tensão do barramento CC.	38
Tabela 6 - Valores da componente de corrente d e sua respectiva referência.....	39
Tabela 7 - Valores da velocidade do rotor da máquina e da referência de velocidade.	40
Tabela 8 - Valores da componente de corrente q e sua respectiva referência.....	41
Tabela 9 - Valores da potência ativa e reativa produzidas pela máquina.	41
Tabela 10 - Valores eficazes das tensões de fase na carga.	42
Tabela 11 - Valores das correntes eficazes na carga.	43

1 INTRODUÇÃO

Diante de todas as tecnologias desenvolvidas pela humanidade, o sistema energético mundial ainda é refém dos combustíveis fósseis para geração de energia elétrica. O gás natural, o xisto e o carvão mineral são utilizados em usinas termelétricas, para aquecer água, gerando vapor, para movimentar uma turbina, acoplada a um gerador produzindo energia elétrica [1].

O grande problema enfrentado pelo setor energético está em atender a crescente demanda de energia elétrica sem afetar o meio ambiente, ou seja, o compromisso ambiental em gerar energia limpa, de qualidade e de baixo custo. Os ambientalistas estão cada vez mais preocupados com o grande crescimento dos níveis de emissão de CO_2 que contribui para o aquecimento global e mudanças climáticas. No entanto diversas fontes de energia renováveis desempenham papel importante no cenário mundial, com destaque para a geração eólica [2].

A geração eólica no Brasil apresenta um crescimento bastante significativo. O país é líder na produção eólica na América Latina. O ranking divulgado pela Global Wind Energy Council (GWEC), organização internacional especializada em energia eólica. Segundo o GWEC, houve uma expansão de 2,014 MW na geração de energia no ano passado, que acabou colocando o Brasil na quinta posição do ranking mundial de capacidade instalada, e ocupando a nona posição no ranking de capacidade acumulada de geração eólica com 10,740 MW. Segundo o Sistema Interligado Nacional (SIN), os parques eólicos brasileiros representam 6% da energia elétrica gerada no país [3]. Na Tabela 1 é apresentado o ranking mundial de expansão da capacidade instalada de geração eólica em 2016.

Tabela 1- Ranking mundial de expansão da capacidade instalada de energia eólica.

Ranking Mundial da GWEC		
País	Energia (MW)	Percentual (%)
China	23,328	42,7
EUA	8,203	15
Alemanha	5,443	10
Índia	3,612	6,6
Brasil	2,014	3,7

Fonte: [1]

1.1 Motivação

A geração de energia elétrica através de aerogeradores vem conquistando o cenário mundial e no Brasil não é diferente. Hoje se tem vários parques eólicos ou fazendas eólicas interligadas a rede elétrica. Na Literatura há duas classificações para sistemas eólicos: os de velocidades constantes e os de velocidade variável. Para aplicações com velocidade fixa, os motores de indução com rotor em gaiola de esquilo dominaram o cenário eólico. Estes foram bastante utilizados na década de 80 e 90, devido sua simplicidade, robustez e baixo custo de operação. Este sistema possui a desvantagem de ter um multiplicador de velocidade para adaptar a velocidade da turbina eólica com a velocidade requerida pelo gerador. Apesar de ser pouco utilizado hoje em dia esse sistema é importante por causa de sua simplicidade e baixo custo. No entanto, para aplicações com velocidades variáveis, esses sistemas são complexos e exigem conversores estáticos de potência.

Na literatura, duas máquinas são utilizadas para esse tipo de geração, o gerador síncrono e o de indução. Alguns fabricantes utilizam o gerador síncrono com um número grande de polos e acoplado diretamente a turbina eólica. A grande vantagem deste sistema é não utilizar o multiplicador de velocidade, no entanto a sua maior desvantagem está no dimensionamento do conversor que possuirá a potência nominal do gerador tornando-o muito oneroso.

Com o objetivo de reduzir o custo do conversor, foi utilizada a máquina de indução de rotor bobinado conhecida na literatura internacional como DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*). A grande vantagem está na baixa potência do conversor empregado que fica na ordem de 30% da potência nominal do gerador.

1.2 Objetivos

Este trabalho de conclusão de curso propõe a análise de um sistema de geração de energia eólica utilizando o gerador de indução de rotor bobinado (DFIG). Esta configuração utiliza um conversor estático CA-CC-CA. Este sistema é conhecido na literatura por *Back-to-Back*, por ter um conversor do lado da rede (conversor G) que faz a conexão com o estator da máquina e um conversor do lado do rotor (conversor R). A função do conversor G é garantir a tensão constante e regulada no barramento CC e também garantir a corrente da rede trifásica e com alto fator de potência. Enquanto que

o conversor R é responsável pelo controle do gerador de indução de rotor bobinado, regulando a velocidade e a potência reativa, e assim a máquina pode operar com tensões em frequências constantes com velocidade variável. Na Figura 1 é apresentada uma ilustração do DFIG descrito. Serão desenvolvidas estratégias de controle PWM (*Pulse Width Modulation*), assim garantindo:

- Tensões trifásicas simétricas e com frequência constante nos terminais da carga;
- Corrente na carga senoidal e com elevado fator de potência;
- Regulação das potências ativa e reativa nos terminais do gerador de indução de rotor bobinado.

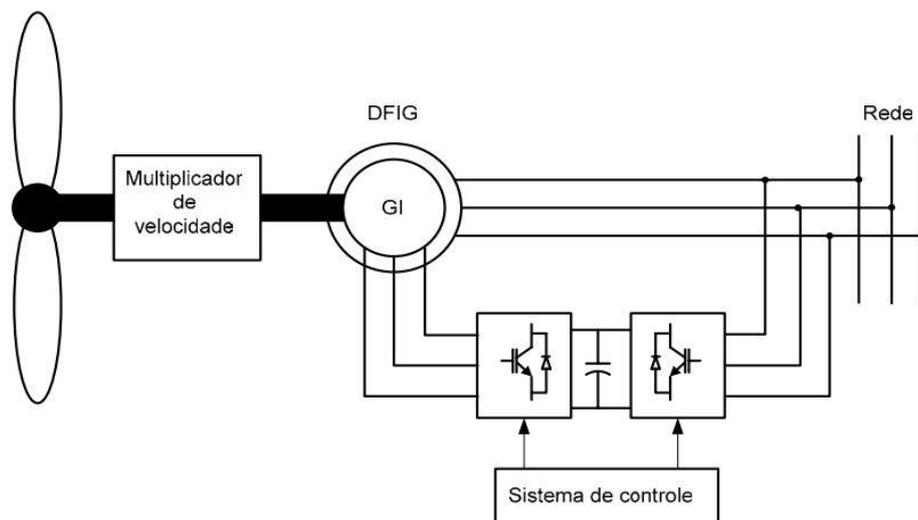


Figura 1- Sistema de geração eólica com máquina de indução de rotor bobinado [2].

1.3 Organização do Documento

Este trabalho é organizado em seis capítulos e referências bibliográficas. Os capítulos um e seis são referentes à introdução e conclusão, respectivamente.

No segundo capítulo trata-se da máquina de indução assíncrona de rotor bobinado.

O terceiro capítulo se refere a geração eólica no Brasil e no mundo para três modelos de aerogeradores, mostrando suas vantagens e desvantagens.

O quarto capítulo se refere a caracterização do sistema teste proposto.

No quinto capítulo são apresentadas as simulações do sistema de geração proposto.

2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO ASSÍNCRONA

As máquinas elétricas de indução foram desenvolvidas pelo cientista e inventor Nikola Tesla no ano de 1883 na França. Até os dias atuais elas são utilizadas em diversas aplicações, tais como: pequenos eletrodomésticos e até as grandes máquinas com potências de megawatts.

As máquinas de indução ou máquinas assíncronas são normalmente compostas de duas partes distintas: uma parte estacionária denominada de estator da máquina e uma parte móvel denominada de rotor girante, Figura 2.

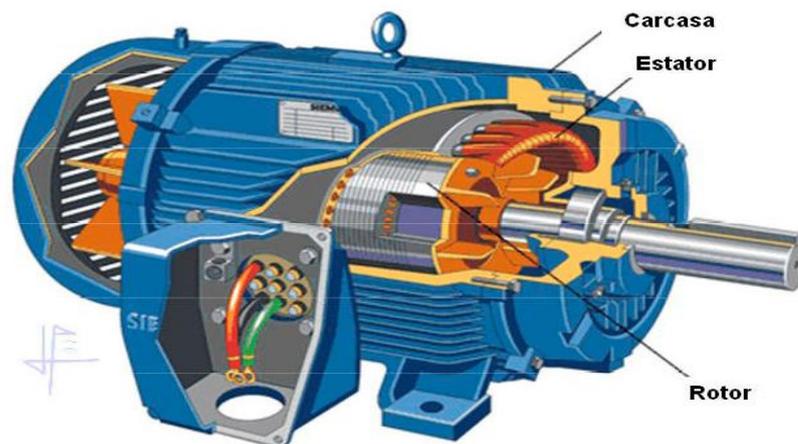


Figura 2- Motor de indução de rotor bobinado [5].

O estator como mencionado anteriormente constitui a parte fixa da máquina onde é montado um conjunto de enrolamentos formando as bobinas de campo, geralmente o número de bobinas é equivalente ao número de fases da máquina, por exemplo, uma máquina trifásica possui um conjunto de três bobinas dispostas de 120° entre si. O rotor da máquina possui formato cilíndrico, disposto no interior do estator e apresenta duas classificações padrão quanto ao seu tipo de construção: a) rotor de gaiola de esquilo, onde os enrolamentos são formados por chapas metálicas encaixadas em ranhuras no ferro do rotor e são curto-circuitadas em cada extremidade por um anel condutor; b) enquanto que o rotor bobinado, Figura 3, é constituído por conjuntos de enrolamentos de material condutor colocados em cavas isoladas formando suas bobinas, com características semelhantes ao estator, tais como resistência elétrica e mesmo

número de polos, geralmente são conectados em estrela ou em triângulo. Faz-se a ligação elétrica através de anéis deslizantes e escovas coletoras de carvão, onde os mesmos passam a ser uma desvantagem, pois implica em manutenção constante.

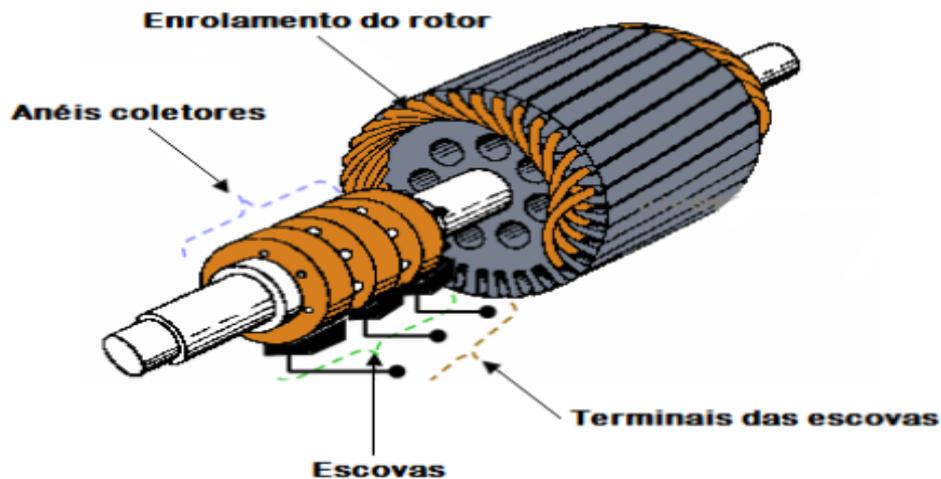


Figura 3- Rotor bobinado [5].

Na literatura são classificados três modelos de operação para uma máquina de indução, são eles: máquina operando como motor, operando como gerador e também pode operar como freio eletromagnético [6] e [7].

2.1 Máquina de Indução de Rotor Bobinado

Uma das principais características que diferencia a máquina de indução de rotor bobinado das demais é o fato de possuir excitação única. Em condições normais de funcionamento, as correntes que percorrem os enrolamentos do rotor, pois são induzidos pelo campo girante do estator. Este tipo de máquina é caracterizado como assíncrona por produzir torque a qualquer velocidade abaixo da velocidade síncrona [8].

Uma das grandes vantagens dessa máquina, se não a principal, é o fato de ela poder operar tanto em regime motor como em regime gerador para uma maior faixa de velocidade.

2.1.1 Campo Magnético Girante

Quando o estator da máquina de indução é alimentado por um sistema trifásico equilibrado é criado um campo magnético girante, onde o mesmo induz na bobina do rotor uma força eletromotriz que conseqüentemente faz o eixo do rotor girar.

2.1.2 Escorregamento da Máquina de Indução de Rotor Bobinado

Quando o estator é alimentado com correntes de frequência ω , é criado um campo magnético que gira a uma velocidade ω_s em relação ao próprio estator, onde $\omega_s = \omega$. Já o rotor gira a uma velocidade ω_r , no mesmo sentido do campo girante do estator. A velocidade relativa entre o campo girante estático e do rotor ($\omega_s - \omega_r$) é a causa da indução de forças eletromotrizes no rotor [9]. Sendo assim, o rotor passa a ser alimentado por correntes de frequência $\omega_r' = (\omega_s - \omega_r)$, criando conseqüentemente um campo girante com velocidade ω_r' . Como o rotor gira a uma velocidade ω_r em relação ao estator, logo, a velocidade do campo rotórico em relação ao estator é $\omega_r + \omega_r' = \omega$, ou seja, os campos estático e rotórico giram em sincronismo.

Dessa forma, como o campo do rotor não é fixo em relação ao próprio rotor, e este último não gira na velocidade de sincronismo, os dois campos “escorregam” sobre ele, tornando essa máquina conhecida como “máquina assíncrona” [10].

2.1.3 Modelo Matemático de uma Máquina de Indução de Rotor Bobinado

O modelo matemático da máquina de indução de rotor bobinado adotado neste trabalho foi compartilhado de Jacobina [4]. Obedecendo as seguintes considerações:

- Máquina simétrica trifásica composta por três fases idênticas no estator e por três fases idênticas no rotor;
- Bobinas do estator e do rotor são defasadas por radianos elétricos;
- Distribuição senoidal do fluxo magnético;
- Máquina com um par de polos, $P=1$;
- Entreferro constante e máquina de polos lisos;
- Máquina não saturada, co-energia igual à energia.

Na Figura 4 é apresentada a configuração da máquina de indução de rotor bobinado adotada para desenvolvimento das equações.

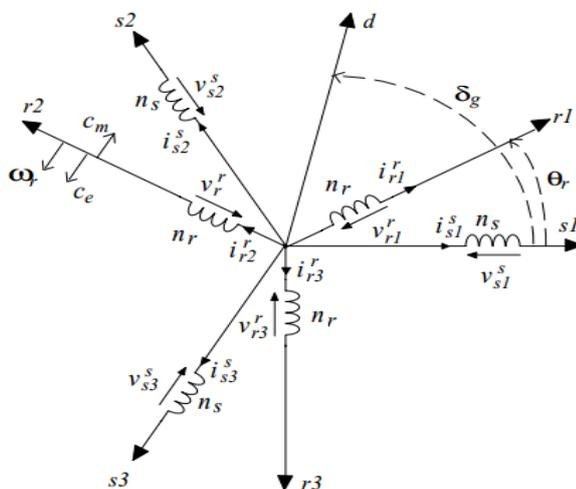


Figura 4- Máquina trifásica simétrica [4].

O sentido da corrente, da tensão e do fluxo em uma bobina, utilizado para desenvolver as equações da máquina adotada neste trabalho são ilustrados na Figura 5.

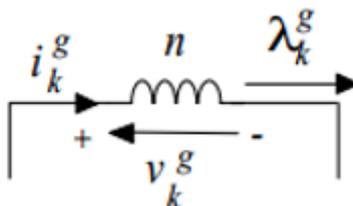


Figura 5-Convenções adotadas para as grandezas em uma bobina [4].

$$v_k^g = r_k i_k^g + \frac{d}{dt} \lambda_k^g \quad (3.0)$$

Onde: λ_k^g está escrito em função das correntes e indutância.

O desenvolvimento do modelo adota-se as seguintes notações:

- Utiliza-se s para o referencial do estator; v_s^s , i_s^s e λ_s^s ;
- Utiliza-se r para o referencial do rotor; v_r^r , i_r^r e λ_r^r .
- A indutância própria do estator é definida por L_s , para a máquina simétrica,

$$L_{s1} = L_{s2} = L_{s3} = L_s ;$$

- A indutância própria do rotor é definida por L_r , para a máquina simétrica,
 $L_{r1} = L_{r2} = L_{r3} = L_r$;
- A indutância mútua do estator é definida por M_s , para uma máquina simétrica, $M_{s12} = M_{s23} = M_{s31} = M_s$;
- A indutância mútua do rotor é definida por M_r , para uma máquina simétrica, $M_{r12} = M_{r23} = M_{r31} = M_r$;
- A indutância mútua entre uma bobina do estator e uma bobina do rotor, separadas por um ângulo teta é definida por $M_{sr} \cos(\theta)$;
- A resistência de uma bobina do estator é definida por R_s , para uma máquina simétrica, $R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_s$;
- A resistência de uma bobina do rotor é definida por R_r , para uma máquina simétrica, $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = R_r$.

Considerando uma máquina não saturada, podem-se somar os fluxos parciais para obter o fluxo total em uma bobina, assim escrevendo os fluxos em formato matricial tem-se:

$$\lambda_{s123}^s = \bar{L}_{ss} \mathbf{i}_{s123}^s + \bar{L}_{sr} \mathbf{i}_{r123}^r \quad (3.1)$$

$$\lambda_{r123}^r = \bar{L}_{rs} \mathbf{i}_{s123}^s + \bar{L}_{rr} \mathbf{i}_{r123}^r \quad (3.2)$$

Onde:

$$\mathbf{i}_{s123}^s = \begin{bmatrix} i_{s1}^s \\ i_{s2}^s \\ i_{s3}^s \end{bmatrix} \quad \mathbf{i}_{r123}^r = \begin{bmatrix} i_{r1}^r \\ i_{r2}^r \\ i_{r3}^r \end{bmatrix} \quad \lambda_{s123}^s = \begin{bmatrix} \lambda_{s1}^s \\ \lambda_{s2}^s \\ \lambda_{s3}^s \end{bmatrix} \quad \lambda_{r123}^r = \begin{bmatrix} \lambda_{r1}^r \\ \lambda_{r2}^r \\ \lambda_{r3}^r \end{bmatrix}$$

$$\bar{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \bar{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$\bar{L}_{sr} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$\bar{L}_{rs} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 4\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

Importante ressaltar que as matrizes de indutâncias possuem as seguintes propriedades:

- \bar{L}_{ss} e \bar{L}_{rr} são simétricas;
- \bar{L}_{sr} e \bar{L}_{rs} não são simétricas, mas são circulares, $x_{ij} = x_{i+1, j+1}$;
- $\bar{L}_{sr} = \bar{L}_{rs}^{-T}$, ou seja, são matrizes transpostas uma da outra.

Analisando a Figura 4, pode-se escrever as equações de tensões da máquina trifásica como sendo uma queda resistiva mais uma tensão induzida provocada pela taxa de variação da corrente no tempo, assim tem-se:

$$v = Ri + v_i \quad (3.3)$$

$$\text{Onde: } v_i = \frac{d\lambda}{dt}$$

Logo para uma máquina trifásica de rotor bobinado pode-se escrever as seguintes equações de tensões:

$$v_{s123}^s = R_s i_{s123}^s + \frac{d\lambda_{s123}^s}{dt} \quad (3.4)$$

$$v_{r123}^r = R_r i_{r123}^r + \frac{d\lambda_{r123}^r}{dt} \quad (3.5)$$

Utilizando a equação matricial dos fluxos pode-se escrever a equação matricial das tensões da máquina:

$$v_{s123}^s = R_s i_{s123}^s + \bar{L}_{ss} \frac{di_{s123}^s}{dt} + \bar{L}_{sr} \frac{di_{r123}^r}{dt} + \omega_r \left[\frac{d\bar{L}_{sr}}{d\theta_r} \right] i_{r123}^r \quad (3.6)$$

$$v_{r123}^r = R_r i_{r123}^r + \bar{L}_{rr} \frac{di_{r123}^r}{dt} + \bar{L}_{rs} \frac{di_{s123}^s}{dt} + \omega_r \left[\frac{d\bar{L}_{sr}}{d\theta_r} \right] i_{s23}^s \quad (3.7)$$

Onde a velocidade do rotor é dada em radianos elétricos por segundo, e pode ser expresso por: $\omega_r = d\theta_r / dt$.

O conjugado eletromagnético da máquina de indução trifásica é dado pela seguinte expressão:

$$T_g = P i_{s123}^{-T} \left[\frac{d}{dt} \bar{L}_{sr} \right] i_{r123} = P i_{r123}^{-T} \left[\frac{d}{dt} \bar{L}_{rs} \right] i_{s123} \quad (3.8)$$

2.1.4 Representação odq da Máquina de Indução de Rotor Bobinado

As máquinas elétricas são formadas por circuitos acoplados magneticamente com coeficientes que variam em função do tempo, este tipo de circuito é caracterizado pela sua complexidade em solução analítica, assim faz-se o uso de transformações de variáveis para obter variáveis mais simples e assim ser tornar possível o uso dessa máquina no sistema de geração eólica com alto desempenho.

Como mencionado no tópico anterior, a solução de equações analíticas de máquinas de indução é praticamente inviável, para resolver tal problema adota-se o artifício de transformadas como as de Clarke [4] e Park [4]. A transformação é realizada utilizando uma matriz específica com a finalidade de obter novas variáveis com a mesma funcionalidade das anteriores, porém de fácil manipulação.

Uma transformação de variável é representada pela seguinte operação:

$$x_{123} = \bar{P} x_{odq} \quad (3.8)$$

Onde:

- x_{123} é a variável a ser transformada;
- x_{odq} é a variável nova;
- \bar{P} é a matriz de transformação, deve ser regular.

Usa-se uma matriz de transformação para o estator e outra para o rotor como mostram as Equações (3.9) e (3.10). O expoente g é utilizado para indicar um referencial genérico dos eixos dq. Normalmente utiliza-se:

- $g = s$, para referencial em relação ao estator;
- $g = r$, para referencial em relação ao rotor;
- $g = e$, para referencial em relação ao campo girante.

$$\bar{p}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \cos(\delta_g) & -\text{sen}(\delta_g) \\ 1/\sqrt{2} \cos(\delta_g - 2\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} \cos(\delta_g - 4\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\bar{p}_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \cos(\delta_g - \theta_r) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r) \\ 1/\sqrt{2} \cos(\delta_g - \theta_r - 2\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} \cos(\delta_g - \theta_r - 4\pi/3) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Observa-se que $\bar{p}_s = P_s^{-1}$ e $\bar{p}_r = P_r^{-1}$, ou seja, as matrizes de transformações são ortogonais.

2.1.4.1 Expressões dos fluxos em odq

Utilizando Equação (3.1) e a matriz de transformação referente ao estator (3.9) pode-se escrever o fluxo em odq:

$$\lambda_{sodq}^g = \bar{L}_{ssodq} i_{sodq}^g + \bar{L}_{srodq} i_{rodq}^g \quad (3.11)$$

Onde:

$$\bar{L}_{ssodq} = \begin{bmatrix} L_{so} & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \quad \bar{L}_{srodq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix}$$

Após a transformação percebe-se que as matrizes de indutância ficaram diagonais e independentes dos ângulos θ_r e δ_g . E com: $l_{so} = L_s + 2M_s$, $l_s = L_s - M_s$ e

De forma análoga utilizando a Equação (3.2) e a matriz de transformação do rotor (3.10) pode-se escrever o fluxo em odq:

$$\lambda_{rodq}^g = \bar{L}_{rrodq} i_{rodq}^g + \bar{L}_{rsodq} i_{sodq}^g \quad (3.12)$$

Onde:

$$\bar{L}_{rrodq} = \begin{bmatrix} L_{ro} & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad \bar{L}_{rsodq} = \bar{L}_{srodq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix}$$

Os elementos da diagonal principal: $l_{ro} = L_r + 2M_r$ e $l_r = L_r - M_r$.

2.1.4.2 Expressões das tensões em odq

De posse da Equação das tensões (3.4) e utilizando a matriz de transformação estatóricas (3.9), podem-se escrever as tensões estatóricas em odq:

$$v_{sodq}^g = R_s i_{sodq}^g + \frac{d\lambda_{sodq}^g}{dt} + \omega_g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \lambda_{sodq}^g \quad (3.13)$$

Onde $\omega_g = d\delta_g / dt$.

De maneira análoga, utilizando a Equação (3.5) e a matriz de transformação rotórica obtém-se:

$$v_{rodq}^g = R_r i_{rodq}^g + \frac{d\lambda_{rodq}^g}{dt} + (\omega_g - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_{rodq}^g \quad (3.14)$$

2.1.4.3 Expressão do conjugado em odq

Utilizando a expressão do conjugado (3.8) e as matrizes de transformações (3.9) e (3.10), obtém-se:

$$T_g = Pl_m (i_{sq}^g i_{rd}^g - i_{sd}^g i_{rq}^g) \quad (3.15)$$

2.1.4.4 Expressão da potência em odq

A potência da máquina é dada pela soma de suas potências; potência estatóricas mais potência rotórica, assim:

$$P_{odq} = P_{sodq} + P_{rodq} = i_{sodq}^{gT} v_{sodq}^g + i_{rodq}^{gT} v_{rodq}^g \quad (3.16)$$

É importante ressaltar que as variáveis x_0^g (índice zero), apresentadas neste capítulo representam as componentes homopolares das transformações. Logo para o caso de uma máquina trifásica simétrica operando de forma equilibrada essa componente é nula, pois $x_0^g = (1/\sqrt{3})(x_1 + x_2 + x_3)$. Essa condição também é válida quando a armadura da máquina estiver ligada na configuração “delta” ou “estrela isolada”. A somatória das correntes é nula, tornando zero a componente homopolar da transformação odq.

2.2 Gerador de Indução de Rotor Bobinado

O gerador de indução de rotor bobinado é uma das grandes soluções na geração eólica, devido seu modo de operação em velocidade de rotação variável através do conversor *back-to-back*, onde o mesmo alimenta o rotor. Essa topologia utilizada reduz o custo do conversor eletrônico empregado, pois se utiliza apenas 30 % da potência nominal da máquina [11]. Isso acontece devido ao fato do conversor controlar apenas a potência de escorregamento do rotor, ou seja, a potência do conversor depende diretamente da faixa de variação da velocidade do rotor relativamente à velocidade síncrona do gerador e da potência reativa necessária para magnetizar o gerador [12].

Os principais fabricantes de turbinas eólicas com GIDA são a Vestas, DeWind, GE Wind Energy, Fuhrländer, Nordex AG, Pflaiderer, Repower e NEG Micon. Em geral para potências acima de 1.5 MW [13].

3 A GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO

Com a diminuição das reservas de combustíveis fósseis e conseqüentemente o aumento do preço destes, como também o surgimento das preocupações que a queima desses combustíveis podem ocasionar no efeito estufa, provocou um estopim na exploração das energias renováveis.

No decorrer da última década, a exploração da energia eólica teve um crescimento anual entre 20 a 40% [14]. É considerada a tecnologia mais avançada entre os diversos tipos de energias renováveis existentes [15]. Na Europa ou até mesmo em nível mundial, esse tipo de energia se tornou fundamental [16]. A União europeia vem investindo fortemente nas principais tecnologias que estão inseridas nesse tipo de geração, como: aperfeiçoamento das pás da turbina, a máquina elétrica, acoplamentos mecânicos e estratégias de controle. Como consequência, os parques eólicos veem ganhando território de forma notável, e decrescendo cada vez mais os seus custos. [17].

Se comparada com outras fontes renováveis no Brasil, a eólica é a que mais vem ganhando nome e valor, no que desrespeita ao custo na produção do KWh. Isso está acontecendo devido principalmente aos incentivos governamentais e ao alto grau de desenvolvimento e confiabilidade dessa tecnologia.

3.1 Vantagens e Desvantagens

Existem diversas vantagens em utilizar-se do sistema de geração eólica de energia elétrica, a seguir são listadas algumas dessas:

- Inesgotável;
- Não emite gases poluentes, não gera resíduo;
- Manutenção escassa (semestral);
- Geração de empregos e de investimentos em zonas desfavorecidas;
- Boa rentabilidade do investimento;
- Fonte barata de energia podendo competir em termos de rentabilidade com as fontes tradicionais.

Como qualquer fonte de energia renovável, a eólica também possui suas desvantagens, tais como:

- Intermitência, isto é, nem sempre o vento sopra quando se precisa gerar energia, dificultando a integração no programa de exploração;
- Elevado custo desta energia dificulta a implementação alternativa.

3.2 Aerogeradores

Os aerogeradores são máquinas capazes de transformar energia mecânica presente nos ventos, energia cinética, em energia elétrica, na grande maioria dos casos essa energia é entregue a rede da concessionária ou ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Os aerogeradores são encontrados no mercado em duas topologias: o aerogerador de eixo vertical, Figura 6, ou de eixo horizontal, Figura 7. O primeiro tipo é utilizado em pequenas aplicações residenciais, enquanto que o segundo tipo é bastante utilizado em parques eólicos de geração elétrica.

Os aerogeradores também podem ser classificados quanto a sua potência elétrica, assim têm-se três classificações:

- Gerador de pequeno porte, com potência abaixo de 500 kW;
- Gerador de porte médio, com potência elétrica entre 500 e 1000 kW;
- Gerador de grande porte, com potência elétrica superior a 1 MW



Figura 6- Aerogerador de eixo vertical [18].



Figura 7- Aerogerador de eixo horizontal [18].

3.2.1 Aerogeradores Assíncronos de Velocidade Fixa

O gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo é empregado exclusivamente neste tipo de sistema de geração, onde a velocidade de rotação do rotor é determinada pela frequência da rede elétrica e do número de polos do estator da máquina. Esta configuração requer um multiplicador de velocidades para igualar a velocidade da turbina com a velocidade requerida pela máquina. Esta configuração também necessita de um soft starter para limitar as altas correntes quando o sistema é inicializado e também a necessidade de um banco de capacitores para compensar a energia reativa absorvida pela máquina [20]. A topologia descrita é mostrada na Figura 8.

Vantagens desta topologia: simplicidade, por não utilizar conversores eletrônicos; baixos custos de produção e manutenção de operação confiável. Todo sistema de geração também apresenta suas desvantagens, tais como: potência fornecida à rede varia com a velocidade do vento, causando perturbações no sistema elétrico.

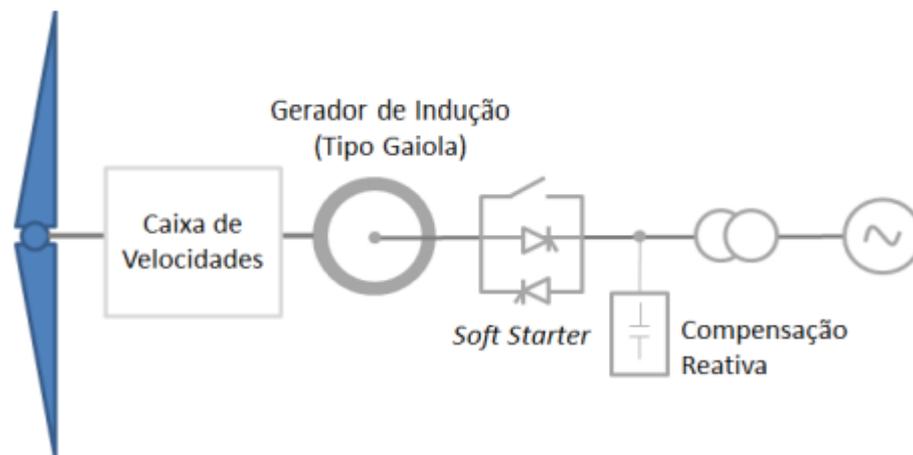


Figura 8 - Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo [19].

3.2.2 Aerogeradores Síncronos de Velocidade Variável

Nesta topologia emprega-se um conversor CA-CC-CA para fazer a conexão do gerador com a rede elétrica. Esta configuração permite-se trabalhar com velocidade variável, onde o conversor garante a compensação reativa e uma partida suave para a máquina, Figura 9.

Esta configuração é utilizada em máquinas de indução com rotor em gaiola de esquilo, em máquinas síncronas com rotor bobinado e em máquinas síncronas a imã permanente. A principal vantagem desta topologia é poder funcionar sem multiplicadores de velocidades, diminuindo o custo do sistema, no entanto um gerador síncrono com um grande número de polos deve ser utilizado para compensar a baixa velocidade de rotação da turbina eólica que está conectada diretamente ao eixo do gerador, produzindo um baixo custo de manutenção por não possuir multiplicadores de velocidades. Como todo sistema de geração apresenta-se suas desvantagens: Por ter um grande número de polos, o diâmetro da máquina aumenta bastante, podendo levar a altos custos para implementação e instalação do gerador; O conversor utilizado é dimensionado no valor de potência nominal da máquina tornando o sistema com um custo muito elevado.

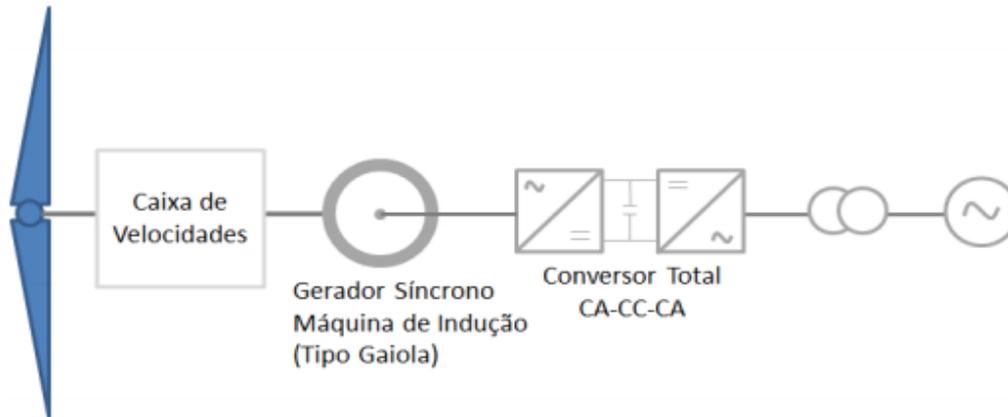


Figura 9 - Gerador com velocidade variável com conversor de potência nominal [19].

3.2.3 Aerogeradores Assíncronos de Velocidade Variável

O conversor empregado, Figura 10, controla as correntes nos enrolamentos do rotor permitindo realizar controle de potência ativa e reativa da máquina que será entregue a rede elétrica. Uma das maiores vantagens desta topologia se caracteriza por permitir um maior grau de liberdade na variação de velocidade de rotação do rotor em 30% acima ou abaixo da velocidade nominal da máquina que são caracterizados como supersíncrona e subsíncrona respectivamente.

Outra vantagem apresentada por essa topologia está no baixo custo do conversor eletrônico uma vez que o mesmo é dimensionado para apenas 30 % da potência nominal da máquina [21].

“A melhor configuração a ser usada em uma central eólica moderna, econômica e de grande porte, sem dúvida, é o Gerador de Indução Duplamente Alimentado, conhecido na literatura como DFIG, [22]”.

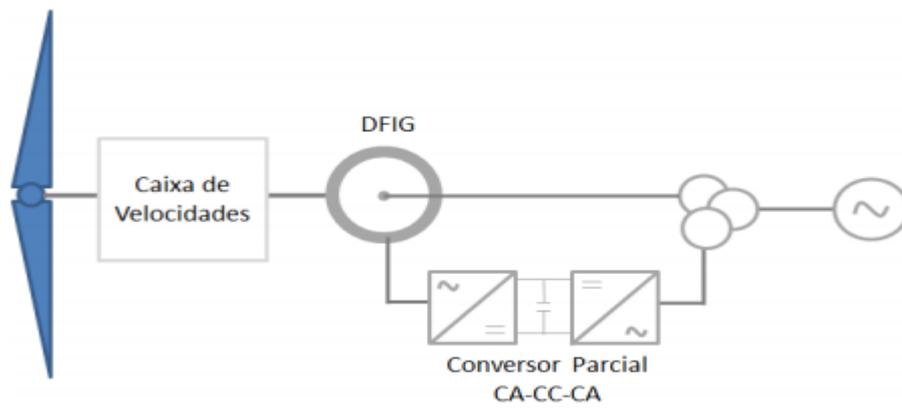


Figura 10- Gerador com velocidade variável com conversor de potência parcial [19].

Como apresentado neste capítulo o gerador assíncrono de indução de rotor bobinado apresenta grandes vantagens comparados com os demais. A topologia apresentada é o foco principal deste trabalho e no próximo capítulo serão descritos os modelos de conversores propostos na literatura, e também a filosofia e estratégias de controles empregadas.

4 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TESTE

Neste capítulo é dada ênfase ao conversor *back-to-back* apresentando suas principais características, modelagem matemática e a filosofia de controle empregada. Na Figura 11, é mostrada a topologia que será desenvolvida no decorrer deste capítulo. É possível observar o multiplicador de velocidade, máquina de indução de rotor bobinado (DFIG), o barramento CC e o conversor *back-to-back* fazendo a conexão com a rede elétrica.

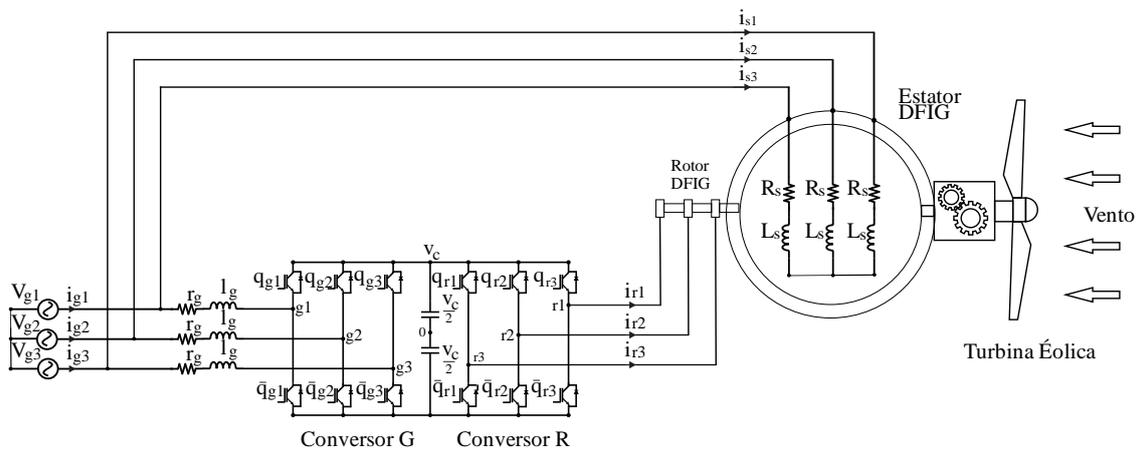


Figura 11-Topologia de geração eólica utilizando DFIG e conversores de potência.

4.1 Conversor *Back-To-Back*

O conversor *back-to-back* apresenta dois conversores de fonte tensão e são conectados por meio de um barramento CC. Esta configuração proporciona um fluxo bidirecional de potência tanto do rotor da máquina para a rede, como da rede para a máquina. Esta topologia proporciona a liberdade do conversor trabalhar nos quatro quadrantes, assim aumentando sua capacidade de desempenho e de potência junto ao sistema elétrico [24] -[25]- [26].

Os dispositivos físicos utilizados são IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Por funcionar de maneira independente cada conversor necessita de um controlador independente, tendo como ponto comum o barramento CC. O fluxo de potência fornecido pelo conversor depende da velocidade de operação do gerador. Na operação subsíncrona o sistema fornece potência ao rotor (fluxo no sentido rede-rotor) e velocidade supersíncrona o rotor fornece potência (fluxo de potência rotor-rede).

Como mencionando anteriormente a topologia adotada neste trabalho possui dois conversores de potência conectados por um barramento CC, o conversor do lado da rede (denominado conversor G), e o conversor do lado do rotor (denominado conversor R).

4.1.1 Modelo do Conversor do Lado da Rede

O conversor do lado da rede, leva este nome pois está diretamente conectado com a rede elétrica, como mostrado na Figura 11, ou através de um transformador elevador de tensão. O principal objetivo deste dispositivo é controlar o barramento CC.

O modelo matemático do conversor R, representado na Figura 11 é descrito por:

$$v_{g1} = r_g i_{g1} + l_g \frac{d}{dt} i_{g1} + v_{g10} - v_{g0} \quad (4.1)$$

$$v_{g2} = r_g i_{g2} + l_g \frac{d}{dt} i_{g2} + v_{g20} - v_{g0} \quad (4.2)$$

$$v_{g3} = r_g i_{g3} + l_g \frac{d}{dt} i_{g3} + v_{g30} - v_{g0} \quad (4.3)$$

Onde:

- v_{g1}, v_{g2}, v_{g3} representam as tensões do conversor G;
- $v_{g10}, v_{g20}, v_{g30}$ representam as tensões de polo do conversor G;
- v_{g0} representa a tensão entre o barramento CC e o neutro da rede;
- r_g representa a resistência da linha;
- l_g representa a indutância da linha.

4.1.2 Modelo do Conversor do Lado do Rotor

O conversor do lado do rotor tem a finalidade de produzir correntes e tensões com amplitude, frequência e fase variáveis através das técnicas de controle escalar.

A principal função deste conversor é controlar a potência ativa e reativa fornecida pelo gerador ao sistema elétrico. Onde é realizado a partir do controle de corrente com orientação de campo no qual a corrente direta é responsável pelo controle

da velocidade e a componente em quadratura é responsável pelo controle da potência reativa.

O modelo matemático do conversor R, mostrado na Figura 11 é descrito por:

$$v_{r1} = v_{r10} - v_{r0} \quad (4.4)$$

$$v_{r2} = v_{r20} - v_{r0} \quad (4.5)$$

$$v_{r3} = v_{r30} - v_{r0} \quad (4.6)$$

Onde:

- v_{r1}, v_{r2}, v_{r3} representam as tensões do rotor do gerador de indução;
- $v_{r10}, v_{r20}, v_{r30}$ representam as tensões de polo do conversor R;
- v_{r0} representa a tensão entre o barramento CC e o neutro do rotor do gerador.

Considerando a máquina simétrica e equilibrada, aplicando tensões trifásicas equilibradas no rotor do gerador, tem -se:

$$v_{r1} + v_{r2} + v_{r3} = 0, \text{ logo:}$$

$$v_{r0} = \frac{1}{3}(v_{r10} + v_{r20} + v_{r30}) \quad (4.7)$$

4.2 Topologia de Controle Adotada

As chaves dos conversores G e R são comutadas através da estratégia de modulação por largura de pulso, do inglês: *Pulse Width Modulation* (PWM). Atualmente existem várias estratégias PWM, mas devido à simplicidade da modulação escalar, a mesma foi adotada neste trabalho [27].

As chaves dos conversores, tanto para o conversor R ($q_{r1}, \bar{q}_{r1}, q_{r2}, \bar{q}_{r2}, q_{r3}, \bar{q}_{r3}$) quanto para o conversor G ($q_{g1}, \bar{q}_{g1}, q_{g2}, \bar{q}_{g2}, q_{g3}, \bar{q}_{g3}$) são definidas binariamente, ou seja, zero ou um. Assim as chaves q e \bar{q} são complementares entre si com o objetivo de evitar um curto-circuito no barramento CC. Portanto uma vez definido as chaves como binárias, quando a chave q estiver fechada a chave \bar{q} obrigatoriamente estará aberta.

4.2.1 Estratégia de Controle do Conversor G

A estratégia de controle PWM empregada no conversor G depende dos estados de comutação das chaves, assim:

$$v_{g10} = (2q_{g1} - 1) \frac{V_c}{2} \quad (4.8)$$

$$v_{g20} = (2q_{g2} - 1) \frac{V_c}{2} \quad (4.9)$$

$$v_{g30} = (2q_{g3} - 1) \frac{V_c}{2} \quad (4.10)$$

O controle precisa fornecer tensões simétricas e equilibradas e uma tensão auxiliar v_{hg}^* para a obtenção das tensões homopolares de referência, assim de acordo com [29], têm-se:

$$v_{g10}^* = v_{g1}^* + v_{hg}^* \quad (4.11)$$

$$v_{g20}^* = v_{g2}^* + v_{hg}^* \quad (4.12)$$

$$v_{g30}^* = v_{g3}^* + v_{hg}^* \quad (4.13)$$

Onde:

$$v_{g3}^* = -(v_{g1}^* + v_{g2}^*) \quad (4.14)$$

As tensões de v_{hg}^* são determinadas de modo independente com o intuito de evitar saturação durante a modulação e os valores são limitados em: $\frac{V_c}{2}$ e $-\frac{V_c}{2}$. Logo se tem:

$$v_{hg \max}^* = \frac{V_c}{2} - v_{hg \max} \quad (4.15)$$

$$v_{hg \min}^* = \frac{V_c}{2} - v_{hg \min} \quad (4.16)$$

Onde:

$$v_{hg \max} = \max\{v_{g1}^*, v_{g2}^*, v_{g3}^*\} \quad \text{e} \quad v_{hg \min} = \min\{v_{g1}^*, v_{g2}^*, v_{g3}^*\}. \text{ A tensão auxiliar é}$$

dada em função do índice de modulação, μ , para um determinado intervalo $[0,1]$, logo:

$$v_{hg}^* = \mu v_{hg \max}^* + (1 - \mu) \mu v_{hg \min}^* \quad (4.17)$$

Para determinar as tensões de polo de referência, as chaves são fechadas num intervalo de tempo $(\tau_{g1}, \tau_{g2}, \tau_{g3})$ e são abertas no restante do período, $(T - \tau)$, logo 3se pode concluir a seguinte relação:

$$v_{g10}^* = \frac{1}{T} \left[\frac{v_c}{2} \tau_{g1} - \frac{v_c}{2} (T - \tau_{g1}) \right] \quad (4.18)$$

$$v_{g20}^* = \frac{1}{T} \left[\frac{v_c}{2} \tau_{g2} - \frac{v_c}{2} (T - \tau_{g2}) \right] \quad (4.19)$$

$$v_{g30}^* = \frac{1}{T} \left[\frac{v_c}{2} \tau_{g3} - \frac{v_c}{2} (T - \tau_{g3}) \right] \quad (4.20)$$

Manipulando as equações (4.14), (4.15) e (4.16), obtém-se as às larguras de pulso em funções das tensões de polo como:

$$\tau_{g1} = \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{g10}^*}{v_c} \right) T \quad (4.21)$$

$$\tau_{g2} = \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{g20}^*}{v_c} \right) T \quad (4.22)$$

$$\tau_{g3} = \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{g30}^*}{v_c} \right) T \quad (4.23)$$

Na Figura 12 é mostrada a estratégia de controle do conversor R apresentada neste trabalho. A tensão V_c é ajustada para seguir a referência V_c^* por meio de um controlador PI (Proporcional + Integral) clássico. A amplitude e fase das correntes da rede i_{g1}, i_{g2} são ajustadas por intermédio de um PI ressonante [29], Assim gerando as tensões de referências para modulação PWM, no qual determina o modo de condução chaves q_{g1}, q_{g2} e q_{g3} .

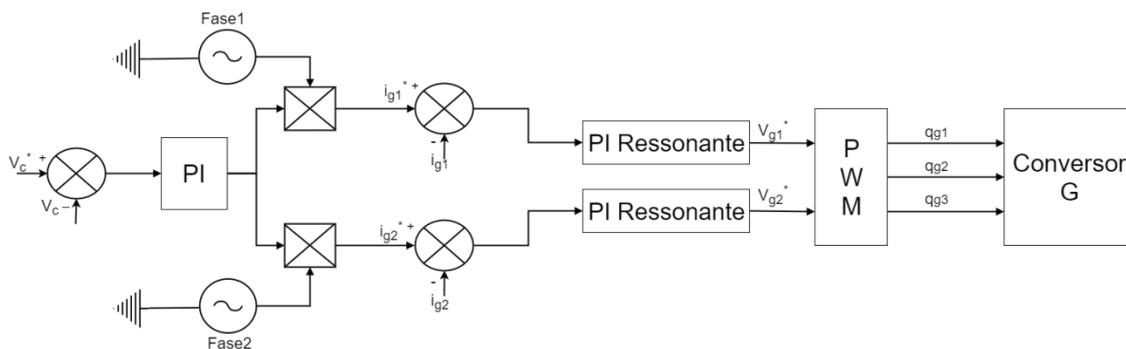


Figura 12- Estratégia de controle do conversor G.

O controlador PI [30] é bastante utilizado em sistemas de controles com o objetivo de anular o erro de um sinal em regime permanente. A função de transferência do controlador é dada pela Equação (4.24).

$$G_{PI} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (4.24)$$

Onde: k_p representa o ganho proporcional e k_i o ganho integrativo do controlador.

O PI modificado foi adotado neste trabalho, pois este controlador é capaz de anular o erro em regime permanente para sinais senoidais enquanto que o PI clássico garante erro nulo em regime permanente apenas para sinais constantes. Assim deve-se modificar o controlador com o objetivo de obter-se ganho infinito na frequência de operação $2\pi f$. A função de transferência do PI modificado é dada pela Equação (4.23).

$$G_{PI\text{ modificado}} = \frac{K_a s^2 + K_b s + K_c}{s^2 + \omega^2} \quad (4.25)$$

Onde:

K_a , K_b e K_c são os ganhos do controlador.

4.2.2 Estratégia de Controle do Conversor R

A estratégia de controle PWM empregada no conversor R depende dos estados de comutação das chaves, assim:

$$v_{r10} = (2q_{r1} - 1) \frac{V_c}{2} \quad (4.26)$$

$$v_{r20} = (2q_{r2} - 1) \frac{V_c}{2} \quad (4.27)$$

$$v_{r30} = (2q_{r3} - 1) \frac{V_c}{2} \quad (4.28)$$

O controle precisa fornecer tensões simétricas e equilibradas e uma tensão auxiliar v_{yr}^* para a obtenção das tensões homopolares de referência, assim de acordo com [28], têm-se:

$$v_{r10}^* = v_{r1}^* + v_{yr}^* \quad (4.29)$$

$$v_{r20}^* = v_{r2}^* + v_{yr}^* \quad (4.30)$$

$$v_{r30}^* = v_{r3}^* + v_{yr}^* \quad (4.31)$$

Onde:

$$v_{r3}^* = -(v_{r1}^* + v_{r2}^*) \quad (4.32)$$

As tensões de v_{yr}^* são determinadas de modo independente com o intuito de evitar saturação durante a modulação e os valores são limitados em: $\frac{V_c}{2}$ e $-\frac{V_c}{2}$. Logo se tem:

$$v_{yr \max}^* = \frac{V_c}{2} - v_{yr \max} \quad (4.33)$$

$$v_{yr \min}^* = \frac{V_c}{2} - v_{yr \min} \quad (4.34)$$

Onde

$v_{yr \max} = \max\{v_{r1}^*, v_{r2}^*, v_{r3}^*\}$ e $v_{yr \min} = \min\{v_{r1}^*, v_{r2}^*, v_{r3}^*\}$. A tensão auxiliar é dada em função do índice de modulação, μ , para um determinado intervalo $[0,1]$, logo:

$$v_{yr}^* = \mu v_{yr \max}^* + (1 - \mu) v_{yr \min}^* \quad (4.35)$$

Para determinar as tensões de polo de referência, as chaves são fechadas num intervalo de tempo $(\tau_{r1}, \tau_{r2}, \tau_{r3})$ e são abertas no restante do período, T , logo se pode concluir a seguinte relação:

$$v_{r10}^* = \frac{1}{T} \left[\frac{v_c}{2} \tau_{r1} - \frac{v_c}{2} (T - \tau_{r1}) \right] \quad (4.36)$$

$$v_{r20}^* = \frac{1}{T} \left[\frac{v_c}{2} \tau_{r2} - \frac{v_c}{2} (T - \tau_{r2}) \right] \quad (4.37)$$

$$v_{r30}^* = \frac{1}{T} \left[\frac{v_c}{2} \tau_{r3} - \frac{v_c}{2} (T - \tau_{r3}) \right] \quad (4.38)$$

Trabalhando as equações (4.14), (4.15) e (4.16), obtém-se as larguras de pulso em funções das tensões de polo como:

$$\tau_{k1} = \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{k10}^*}{v_c} \right) T \quad (4.39)$$

$$k = g \text{ ou } k = r$$

$$\tau_{r2} = \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{r20}^*}{v_c} \right) T \quad (4.40)$$

$$\tau_{r3} = \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{r30}^*}{v_c} \right) T \quad (4.41)$$

Na Figura 13 é mostrada a estratégia de controle do conversor R apresentada neste trabalho. Utiliza-se um controlador PI clássico para ajustar a potencia reativa do gerador em função de sua referência Q^* , fornecendo a corrente de referencia i_{rq}^* . Onde é comparada com a corrente i_{rq} oriunda da transformação de variáveis realizadas nas correntes rotóricas da máquina, assim gerando a tensão v_{rq} .

Enquanto que a corrente de referencia i_{rd}^* é obtida através do controle de velocidade ω_r^* . Esta corrente é comparada com a corrente i_{rd} oriunda da transformação de variáveis, assim obtém-se a tensão v_{rd} . De posse das tensões v_{rd} v_{rq} utiliza-se uma transformação de variáveis gerando as tensões de referências para modulação PWM, no qual determina o modo de condução chaves q_{r1} , q_{r2} e q_{r3} .

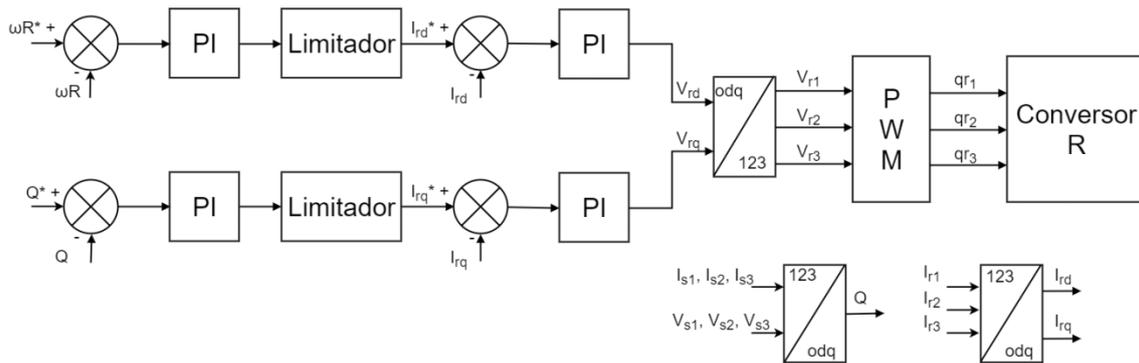


Figura 14- Estratégia de controle do conversor R.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados das simulações computacionais para o sistema teste apresentado neste trabalho. Onde se tem uma carga puramente resistiva, trifásica e equilibrada conectada ao estator do gerador de indução dupla de alimentação.

Os parâmetros do gerador de indução utilizados na simulação deste trabalho são descritos na Tabela 2.

Tabela 2- Parâmetros do gerador de indução de rotor bobinado.

Parâmetros do DFIG	Notação	Valor
Tensão imposta no estator bobina 1	V_{s1}	$220\sqrt{2} \sin(\omega t)$ V
Tensão imposta no estator bobina 2	V_{s2}	$220\sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ)$ V
Tensão imposta no estator bobina 3	V_{s3}	$220\sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ)$ V
Resistência do Estator	R_s	3 Ω
Resistência do Rotor	R_r	2,9876 Ω
Indutância do Estator	L_{is}	584,3mH
Indutância do Rotor	L_{ir}	584,3mH
Indutância de Magnetização	L_m	599,2 mH
Par de Polos	P	1
Momento de Inércia	J	0,001 kg.m ²

Os parâmetros utilizados no *software* computacional para realizar as simulações do sistema teste são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor
Tempo de Simulação	2 s
Tensão da Rede Fase 1	$220\sqrt{2} \sin(\omega t)$ V
Tensão da Rede Fase 2	$220\sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ)$ V
Tensão da Rede Fase 3	$220\sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ)$ V
Tensão do Barramento CC	600 V
Capacitância do Barramento CC	2200 μF
Frequência de Chaveamento	20 kHz
Carga Trifásica Resistiva Equilibrada	100 Ω
Resistencia de r_g	0,1 Ω
Indutância de l_g	1 mH

O esquemático completo do sistema de geração eólica a base da máquina de indução de rotor bobinado é apresentado no Anexo A. Para simular a turbina eólica, utiliza-se uma fonte controlada por corrente para fornecer o torque mecânico ao gerador.

Na Figura 14 são mostradas as formas de onda do torque mecânico aplicado ao gerador e também o torque elétrico do gerador, obtidos via simulação.

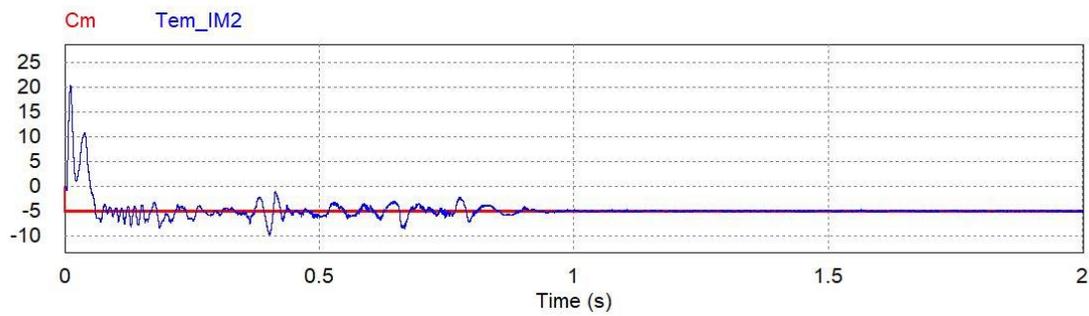


Figura 15 - Formas de onda do conjugado mecânico e conjugado elétrico do gerador.

Na Tabela 4 são apresentados os valores do conjugado mecânico e elétrico do gerador de indução de rotor bobinado.

Tabela 4 - Valores do conjugado mecânico e conjugado elétrico do gerador

Tempo inicial	1,002 s
Tempo final	1,780 s
Cm	-4,99 N.m
Tem_IM2	-5,00 N.m

A forma de onda da tensão no barramento CC do conversor *back-to-back* do lado da rede é ilustrada na Figura 15. Este conversor é responsável por regular a tensão do barramento.

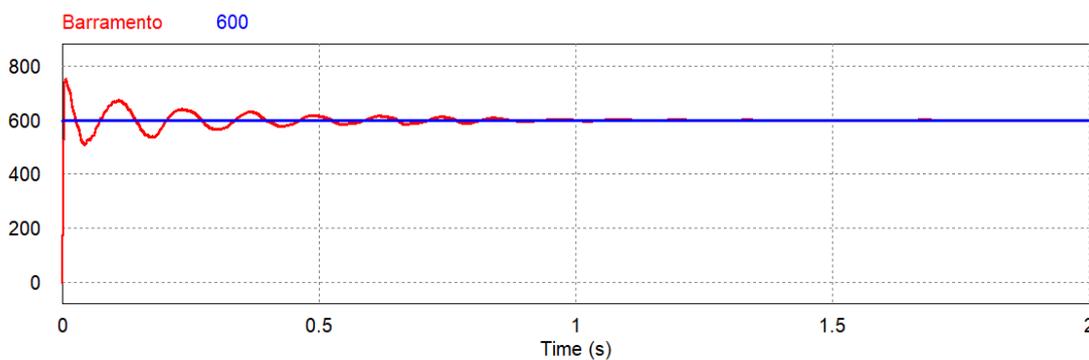


Figura 16- Formas de onda da tensão e da referência de tensão no barramento CC.

Os valores da tensão no barramento CC e o valor da tensão de referência após o transitório são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores da tensão de referência e da tensão do barramento CC.

Tempo inicial	0,0 s
Tempo final	1,99 s
Tensão de Barramento	600 V
Referência de tensão	600 V

Na Figura 16 é mostrado o comportamento da corrente rotórica referente à componente direta i_{rd} . Esta corrente está diretamente relacionada com a velocidade da máquina. Observa-se no início do transitório possui um limitador em 20 A para evitar a instabilidade do sistema de controle ocasionando a saturação da máquina.

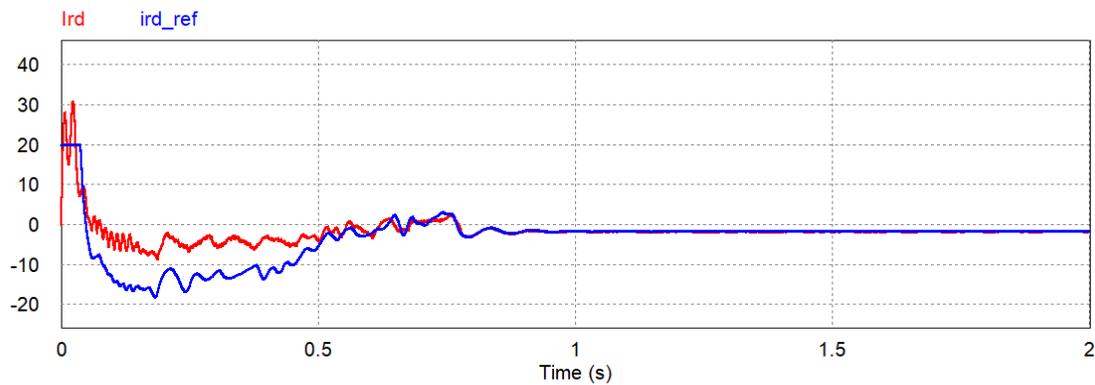


Figura 17- Formas de onda da corrente rotórica referente à componente i_{rd} e sua referência.

Na Tabela 6 são mostrados os valores da componente rotórica referente a corrente direta e também mostra a corrente de referência gerada pelo sistema de controle em regime permanente.

Tabela 6 - Valores da componente de corrente d e sua respectiva referência.

Tempo inicial	1,23 s
Tempo final	1,98 s
i_{rd}	-1,67 A
i_{rd_ref}	-1,64 A

Na Figura 17 é ilustrado o comportamento da velocidade do rotor do gerador de indução seguindo uma referência imposta pelo controle de velocidade para $\omega_r = 380$ rad/s.

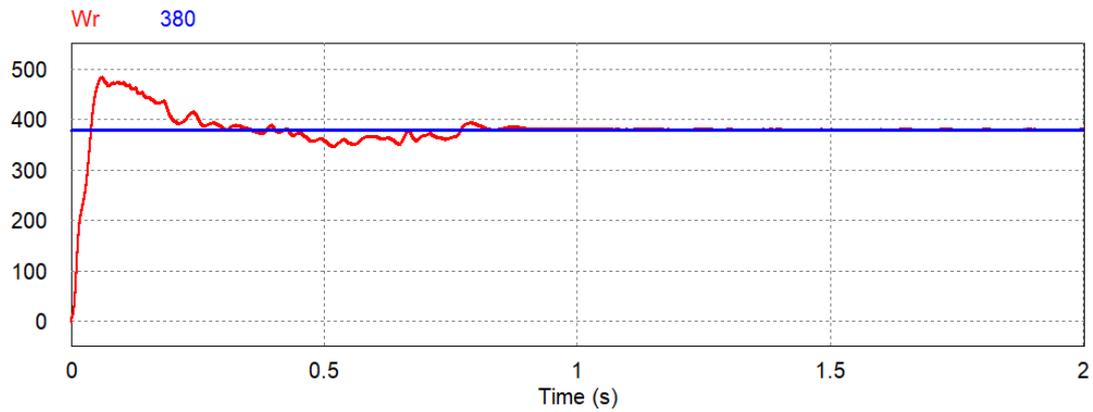


Figura 18- Formas de onda da velocidade do rotor da máquina e de sua respectiva referência.

Na Tabela 7 são mostrados os valores da velocidade do rotor da máquina e a velocidade de referência imposta pelos controles.

Tabela 7 - Valores da velocidade do rotor da máquina e da referência de velocidade.

Tempo inicial	1 s
Tempo final	2 s
w_r	380,1 rad/s
Referência de velocidade	380 rad/s

Na Figura 18 é apresentada a corrente rotórica referente à componente em quadratura, i_{rq} , esta corrente está diretamente correlacionada com a potência reativa do gerador de indução.

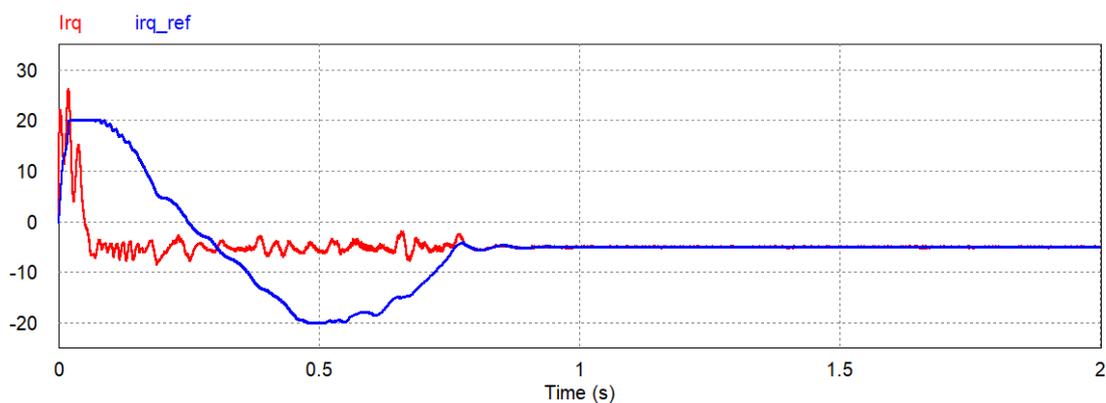


Figura 19- Formas de onda da corrente rotórica referente à componente i_{rq} e sua referência.

Na Tabela 8 são apresentados os valores da componente rotórica referente a corrente em quadratura e também mostra a corrente de referência gerada pelo sistema de controle.

Tabela 8 - Valores da componente de corrente q e sua respectiva referência.

Tempo inicial	1 s
Tempo final	1,99 s
i_{rq}	-4,92 A
i_{rq_ref}	-4,96 A

Na Figura 19 são ilustrados os gráficos da potência ativa e da potência reativa gerada pela máquina. A potência ativa é proporcional ao torque da turbina eólica, enquanto que a potência reativa é nula por convenção do sistema de controle.

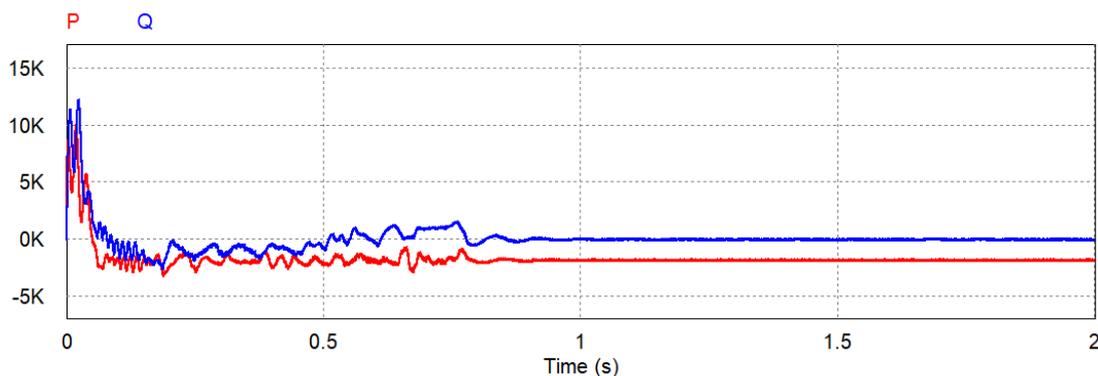


Figura 20 - Formas de ondas da potência ativa e reativa do gerador.

Na Tabela 9 são apresentados os valores da potência ativa e reativa produzidas pela máquina. Nota-se que a potência reativa é quase nula, comprovando a eficiência do sistema de controle.

Tabela 9 - Valores da potência ativa e reativa produzidas pela máquina.

Tempo inicial	1 s
Tempo final	1,99 s
P	-1,82 kW
Q	0,021 kvar

Na Figura 20, podem-se visualizar formas de onda das tensões de fase na carga trifásica puramente resistiva conectada em estrela. Essas formas de ondas estão senoidais, pois foi utilizado um filtro LC passa baixa antes da carga.

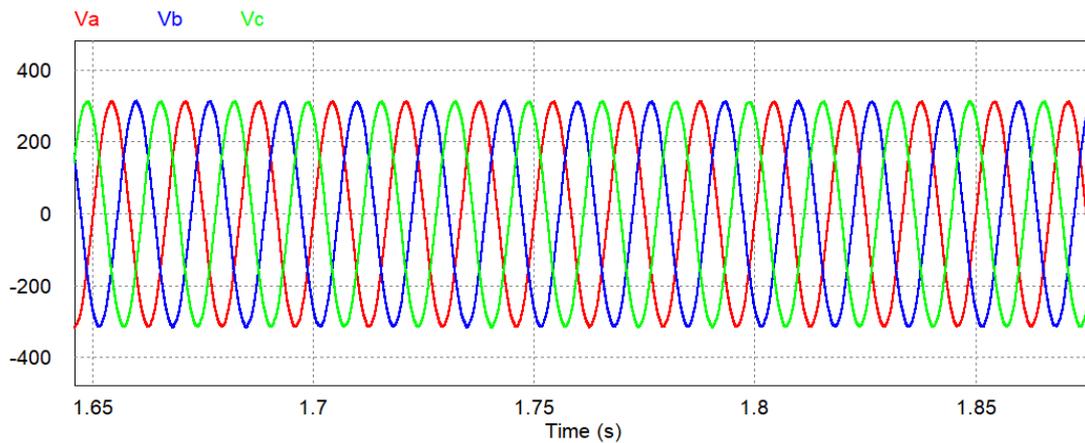


Figura 21- Formas de onda das tensões de fase na carga.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de tensões eficazes por fase na carga após passar por um filtro LC.

Tabela 10 - Valores eficazes das tensões de fase na carga.

Tempo inicial	1 s
Tempo final	1,99 s
V_a	220,98 V
V_b	220,71 V
V_c	220,52 V

Na Figura 21 são mostradas as formas de onda das correntes na carga. Como a carga utilizada na simulação é puramente resistiva, é natural que as formas de onda das tensões sejam similares.

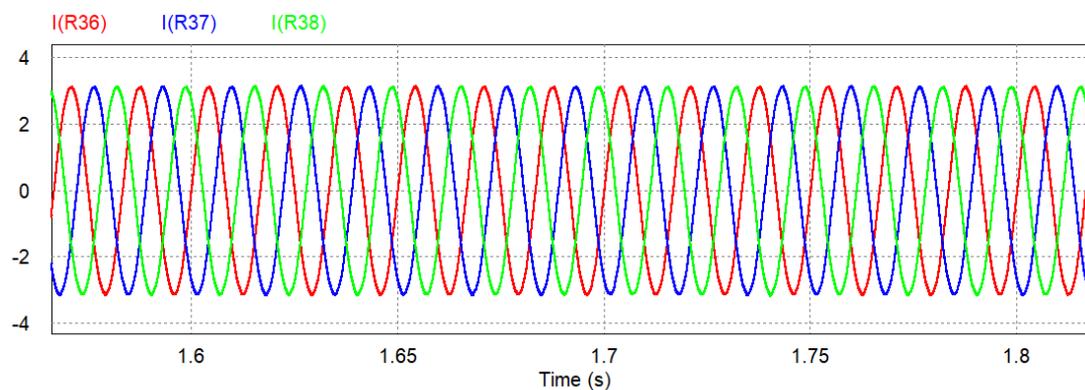


Figura 22- Formas de onda das correntes eficazes na carga.

Na Tabela 11 são apresentados os valores eficazes das correntes da carga puramente resistiva após o filtro LC.

Tabela 11 - Valores das correntes eficazes na carga.

Tempo inicial	1 s
Tempo final	1,99 s
<i>I_a</i>	2,199 A
<i>I_b</i>	2,218 A
<i>I_c</i>	2,205 A

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o modelo de geração de energia eólica utilizando o gerador de indução de rotor bobinado, DFIG, conectado a rede elétrica. O DFIG se destaca em relação aos outros geradores apresentados por trabalhar com amplitude de tensão e frequência constantes nos terminais do estator mesmo em condições de velocidade rotórica variável.

Neste trabalho também foram apresentados controladores e as simulações computacionais com o intuito de validar a qualidade da modulação PWM empregada.

Como proposta para trabalhos futuros, realização da montagem deste trabalho em bancada no laboratório de eficiência energética com objetivo de validar os resultados obtidos via simulação computacional.

Outra proposta seria estudar a influência da aplicação da geração de energia solar fotovoltaica fornecendo potência ao barramento CC do sistema.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mundo Educação. <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/energia-impa.htm>. Acessado em: 04-11-2017.
- [2] VOLTOLINI, Helio *et al.* Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos. 2007.
- [3] Governo do Brasil, desenvolvimento sustentável <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura>. Acessado em: 04-11-2017.
- [4] C.B Jacobina. Sistemas de acionamento estático de máquina elétrica. Apostila, UFPB, Campina Grande-PB, 2005.
- [5] FRANCISCO A. M. S., 2006, “*Motores de Indução Trifásicos*”, editora: ETEP – Edições Técnicas e Profissionais, 2º edição.
- [6] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr, and S.D. Umans. Máquinas Elétricas com Introdução a Eletrônica de Potência. Bookman, 6 edition, 2006.
- [7] P.C. Sem. Principles of Electric Machines and Power Electronics, IEEE, 2 edition, 1997.
- [8] ROSA, Diogo Martins; BOLSON, Marco Antônio; MORAES, Luiz André Motta de. Comportamento dos geradores de indução duplamente alimentados em turbinas eólicas de 1, 5MW. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [9] Neves, M.V. Máquina de Indução (Máquina Assíncrona). Apontamentos da cadeira de Electrotecnia Teórica da Licenciatura em Engenharia Electrotécnica. Universidade Nova de Lisboa : Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2007.
- [10] FERREIRA, Jorge Filipe da Silva Barros. Controlo de geradores de indução duplamente alimentados em turbinas eólicas. 2009. Tese de Doutorado. FCT-UNL.
- [11] MULLER, S.; DEICKE, M; DONCKER, R. Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbine. IEEE Industry Application Magazine. 2002.
- [12] Niiranen, J. Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar. Nordic Wind Power Conference, March 2004.
- [13] MARQUES, Jeferson. Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Santa Maria: UFSM, 2004.
- [14] J. L. Rueda, and I. Erlich, “Impacts of large scale integration of wind power on power system small-signal stability”, in 4th International Conference on Electric Utility

Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, pp. 673-681, July 2011.

[15] X. Lie, and W. Yi, "Dynamic Modeling and Control of DFIG-Based Wind Turbines Under Unbalanced Network Conditions", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no 1, pp. 314-323, Feb. 2007.

[16] J. O. G. Tande, K. Uhlen, and T. Gjengedal, "Options for large scale integration of wind power", in IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, pp. 1-4, June 2005.

[17] D. Skrlec, I. Kuzle, M. Delimar, D. Bosnjak, T. Capuder, and H. Pandzic, "Large scale wind power plants integration into the Croatian power system", in 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Ohrid, pp. 138-142, Sept. 2010.

[18] DUTRA, R. "Princípios e Tecnologia". Tutorial de Energia Eólica. CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito) – 2008.

[19] Wu, Bin; Lang, Youngqiang; Zargari, Navid and Kouro, Samir. 2011. "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems." IEEE Press.

[20] DA SILVA REIS, Joana Magda Vaz. COMPORTAMENTO DOS GERADORES EÓLICOS SÍNCRONOS COM CONVERSORES DIANTE DE CURTO-CIRCUITOS NO SISTEMA. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[21] PAVINATTO, E. F. "Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica". Dissertação de Mestrado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro – RJ. Brasil, 2005.

[22] SANSON, D. M. "Projeto Básico de um Sistema Aerogerador". Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES. Agosto de 2006.

[23] CHEN, Zhe; GUERRERO, Josep M.; BLAABJERG, Frede. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. IEEE Transactions on power electronics, v. 24, n. 8, p. 1859-1875, 2009.

[24] BARBI, I. Eletrônica de Potência. 6. ed. [S.l.]: Florianópolis: Edição do Autor, 2006.

[25] RASHID, M. H. Power Electronics Handbook. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2006.

[26] CARLSSON, A. The Back-to-back converter: control and design. Tese (Doutorado) — Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, Sweden, 1998.

- [27] BRADASCHIA, Fabrício. Estratégia de modulação escalar generalizada para conversores matriciais. 2008.
- [28] DE MENEZES, Ely Cavalcanti. Sistema de Geração de Energia Eólica com Conexão à Rede Monofásico Utilizando Gerador de Indução de Rotor Bobinado.
- [29] R. M. Santos Filho, P. F. Seixas, P. C. Cortizo, L. A. B. Torres, and A. F. Souza. Comparison of three single-phase pll algorithms for ups applications. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 55(8):2923–2932, Aug 2008.
- [30] NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 6. ed. LTC, 2012.

ANEXO A – SISTEMA TESTE

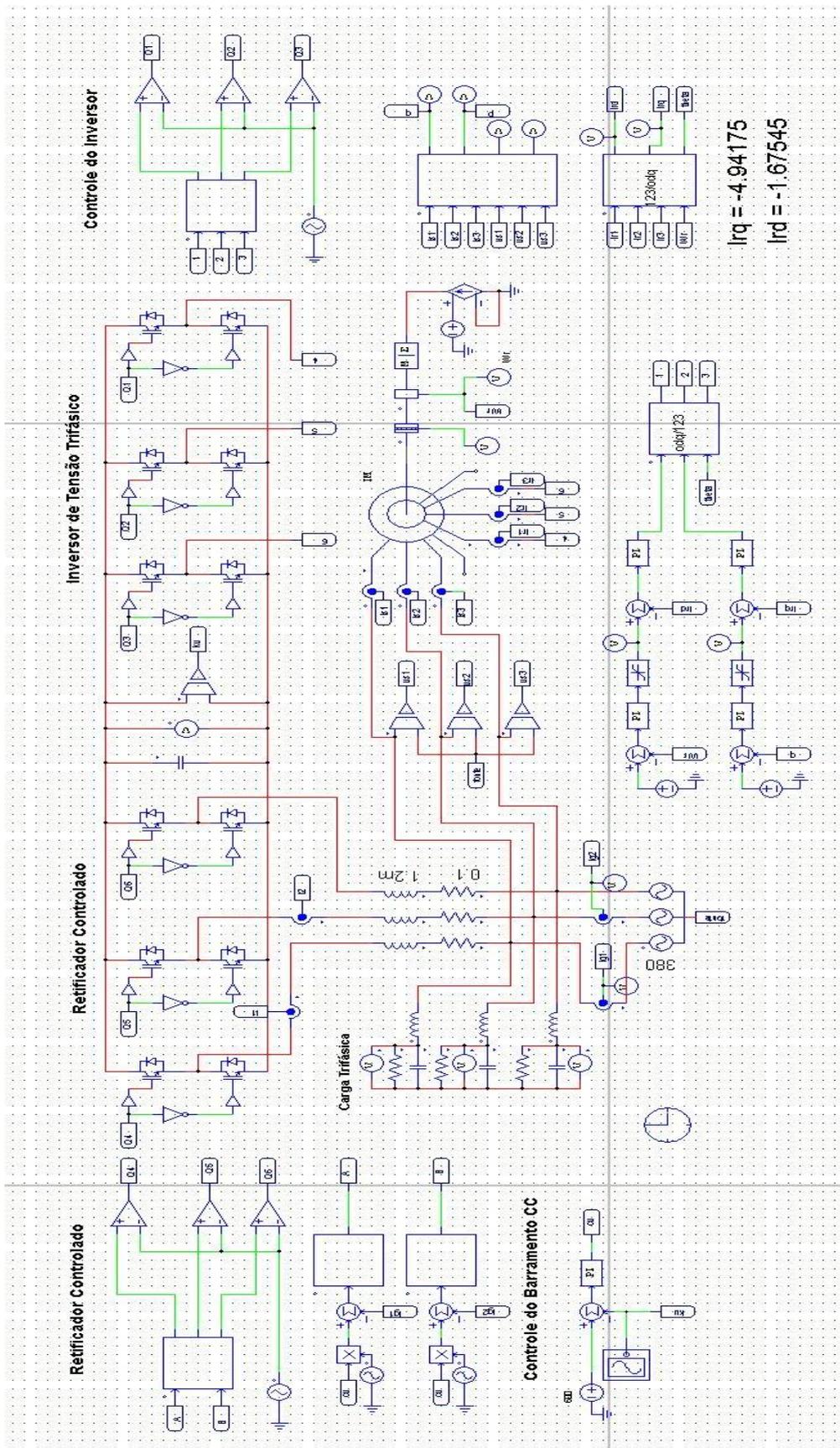


Figura A.1 - Esquema completo do sistema geração eólico simulado.