



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE  
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

**Saulo Loiola Rêgo**

**UM ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS  
ELÉTRICA E MECÂNICA DE UM GERADOR DE INDUÇÃO  
DUPLAMENTE ALIMENTADO ACOPLADO À REDE  
ELÉTRICA**

**Mossoró/RN**

**2015**

**Saulo Loiola Rêgo**

**UM ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS  
ELÉTRICA E MECÂNICA DE UM GERADOR DE INDUÇÃO  
DUPLAMENTE ALIMENTADO ACOPLADO À REDE  
ELÉTRICA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Sales Barros –  
UFRN/UFERSA

**Mossoró/RN**

**2015**

Catálogo na Fonte

Catálogo de Publicação na Fonte. UFERSA - BIBLIOTECA CENTRAL ORLANDO TEIXEIRA - CAMPUS MOSSORÓ

Rêgo, Saulo Loiola.

Um estudo das características dinâmicas elétrica e mecânica de um gerador de indução duplamente alimentado acoplado à rede elétrica / Saulo Loiola Rêgo. - Mossoró, 2015.

91f. il.

1. Aerogerador. 2. Rede trifásica. 3. Máquina de indução - DFIG. I.  
Título

RN/UFERSA/BOT/716  
621.312136R343e

CDD

**Saulo Loiola Rêgo**

**UM ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS  
ELÉTRICA E MECÂNICA DE UM GERADOR DE INDUÇÃO  
DUPLAMENTE ALIMENTADO ACOPLADO À REDE  
ELÉTRICA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

APROVADA EM: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Luciano Sales Barros – UFRN  
Presidente

---

Prof. Dr. Marcos Antônio Dias de Almeida – UFRN  
Primeiro Membro

---

Prof. Valentim Obac Roda – UFRN  
Segundo Membro

## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento desse trabalho foi feito por diversas etapas que foram marcadas por pessoas distintas. Agradeço a Thais Isabelle, minha esposa, que sempre estava pronta para ouvir e conversar comigo nas horas de dificuldade e de alegria. Agradeço aos meus pais que me apoiaram emocionalmente e financeiramente para conseguir chegar até aonde cheguei. Agradeço aos meus sogros por conversarem comigo quando tive dúvidas. Aos meus irmãos que me fizeram companhia nas horas de solidão e dificuldade. Agradeço ao meu orientador, Luciano Sales Barros, pela paciência e dedicação que teve para passar parte de seus conhecimentos para mim.

## RESUMO

Nesse trabalho é realizado um estudo detalhado do comportamento elétrico e mecânico de uma máquina de indução duplamente alimentada que opera como gerador eólico (DFIG), quando esta se encontra diante de perturbações provenientes tanto da rede elétrica quanto de variações de vento. A análise da dinâmica torna-se mais detalhada com a conexão do aerogerador a uma rede elétrica trifásica que contém diversas barras. O aerogerador possui um sistema clássico de controle, comumente encontrado na literatura, que é a utilização de controladores do tipo PI. A partir da junção do sistema de controle, do modelo da rede elétrica e do modelo do aerogerador, uma série de dados serão analisados, tais como velocidade de rotação, corrente e potências fornecidas pelo DFIG, tensão elétrica nos barramentos, dentre outros. Ao utilizar uma representação trifásica na rede elétrica, qualquer forma de perturbação elétrica é facilmente implementada e analisada. A forma como o sistema foi elaborado viabiliza, de maneira simples, modificações de parâmetros e características dos sistemas, tornando possível realizar simulação de diversos modelos de aerogeradores. Através da representação adotada na rede elétrica, foi possível simular diferentes tipos de perturbações, viabilizando uma análise detalhada da resposta do sistema diante das mesmas.

Palavras-Chave: Aerogerador, DFIG, Controle, Curto-circuito, Rede trifásica.

## **ABSTRACT**

This work is carried out a detailed study of the electrical and mechanical behavior of a doubly fed induction machine that operates as wind generator (DFIG), when it is faced with disturbances from both the grid as wind variations. The dynamic analysis becomes closer to the wind turbine connection to a three-phase electrical network containing several bars. The wind turbine has a classical control system, commonly found in the literature, which is to use PI controllers. From the junction of the control system, the power grid model and the turbine model, serial information will be analyzed. The way the system is designed makes possible, simply, changes of parameters and characteristics of the systems, making it possible to perform simulation of many different wind turbines. By the representation adopted of the electrical grid, it was possible to simulate different types of disturbances, enabling a detailed analysis of the system response in front of the disturbances.

Keywords: Wind turbine, DFIG, Control, Fault, Three phase grid.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: COMPONENTES DE UM AEROGERADOR .....	8
FIGURA 2: COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO DE POTÊNCIA PARA DIFERENTES VALORES DE $\lambda$ E B .....	12
FIGURA 3: CURVA DE POTÊNCIA TÍPICA DE UMA TURBINA EÓLICA .....	13
FIGURA 4: ESQUEMA DO PMSG .....	15
FIGURA 5: ESQUEMA DO DFIG.....	15
FIGURA 6: ESQUEMÁTICA DO SCIG .....	16
FIGURA 7: SISTEMA MECÂNICO DO SISTEMA DFIG .....	18
FIGURA 8: CIRCUITO DO ESTATOR COM SUAS CORRENTES DE FASE, REPRESENTADA POR $I_s$ .....	20
FIGURA 9: CIRCUITO DO FILTRO INSERIDO ENTRE O CONVERSOR E A REDE ELÉTRICA.....	25
FIGURA 10: SISTEMA DE CONVERSORES .....	27
FIGURA 11: MALHA DE CONTROLE SIMPLIFICADA PARA O CONTROLE DE CORRENTE, PARA O EIXO "D" E "Q" .....	32
FIGURA 12: CIRCUITO EQUIVALENTE DE CADA FASE DA MÁQUINA.....	32
FIGURA 13: ESQUEMA DO DFIG COM O FILTRO.....	33
FIGURA 14: ESQUEMA DO FILTRO, REPRESENTANDO APENAS UMA FASE .....	34
FIGURA 15: REPRESENTAÇÃO DE UMA LINHA TRIFÁSICA.....	36
FIGURA 16: REPRESENTAÇÃO DE UMA LINHA TRIFÁSICA COM ATERRAMENTO .....	38
FIGURA 17: ESQUEMA GERAL DA SIMULAÇÃO DESENVOLVIDA .....	41
FIGURA 18: SISTEMA DE DUAS MASSAS .....	43
FIGURA 19: SISTEMA MECÂNICO MONTADO EM SIMULINK .....	44
FIGURA 20: MONTAGEM DO MODELO MATEMÁTICO DO GERADOR .....	46
FIGURA 21: MONTAGEM DO MODELO MATEMÁTICO DO FILTRO RL .....	47
FIGURA 22: MONTAGEM DO MODELO MATEMÁTICO DO CONTROLE DO LADO DO ROTOR.....	49
FIGURA 23: MONTAGEM DO MODELO MATEMÁTICO DA TRANSFORMAÇÃO DQ.....	51
FIGURA 24: MONTAGEM DO MODELO MATEMÁTICO DA TRANSFORMAÇÃO INVERSA DQ .....	51
FIGURA 25: DIAGRAMA DA MONTAGEM DO BLOCO DE CURTO-CIRCUITO .....	53
FIGURA 26: REDE ELÉTRICA UTILIZADA PARA SIMULAÇÃO .....	54
FIGURA 27: VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	56
FIGURA 28: ROTAÇÃO DA TURBINA E DO ROTOR .....	57
FIGURA 29: POTÊNCIA ATIVA E REATIVA FORNECIDA PELO DFIG .....	57
FIGURA 30: TENSÕES NO BARRAMENTO DURANTE A OSCILAÇÃO DO VENTO .....	58
FIGURA 31: ZOOM DAS TENSÕES EM UM DETERMINADO PERÍODO DE TEMPO (ENTRE 20 E 25 SEGUNDOS), REFERENTE A FIGURA 30.....	59
FIGURA 32: CORRENTE FORNECIDA À BARRA EM QUE O SISTEMA ESTÁ CONECTADO (BARRA 07) .....	60



FIGURA 33: VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO AEROGERADOR E ROTOR DO DFIG, PARA O CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 06 .....	61
FIGURA 34: VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO AEROGERADOR E ROTOR DO DFIG PARA O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 06.....	62
FIGURA 35: CORRENTES FORNECIDAS PELO AEROGERADOR, DURANTE E APÓS O CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 06 .....	62
FIGURA 36: CORRENTES FORNECIDAS PELO AEROGERADOR, DURANTE E APÓS O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 06.....	63
FIGURA 37: TENSÕES NOS TERMINAIS DO AEROGERADOR DURANTE O CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 06.....	64
FIGURA 38: TENSÕES NOS TERMINAIS DO AEROGERADOR DURANTE O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 06 .....	65
FIGURA 39: POTÊNCIA FORNECIDA PELO AEROGERADOR COM PRESENÇA E SEM PRESENÇA DE CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 06 .....	66
FIGURA 40: POTÊNCIA FORNECIDA PELO AEROGERADOR COM PRESENÇA E SEM PRESENÇA DE - CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 06.....	67
FIGURA 41: VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DIANTE DE UM CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 07.....	68
FIGURA 42: VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DIANTE DE UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 07.....	69
FIGURA 43: TENSÃO APLICADA AOS TERMINAIS DO AEROGERADOR DURANTE UM CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 07 .....	70
FIGURA 44: TENSÃO APLICADA AOS TERMINAIS DO AEROGERADOR DURANTE UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 07.....	71
FIGURA 45: CORRENTE FORNECIDA PELO AEROGERADOR DURANTE A UM CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 07 .....	72
FIGURA 46: CORRENTE FORNECIDO PELO AEROGERADOR DURANTE O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO BARRA 07.....	72
FIGURA 47: POTÊNCIA FORNECIDA DURANTE O CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA BARRA 07 .	73
FIGURA 48: POTÊNCIA FORNECIDA DURANTE O CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 07 .....	74

**LISTA DE SIGLAS**

$E$ : energia [J]

$M$ : Massa [Kg]

$v$ : Velocidade [m/s]

$\rho$ : Densidade [kg/m<sup>3</sup>]

$A$ : Área [m<sup>2</sup>]

$P$ : Potência [J/s]

$\beta$ : Ângulo das pás [radiano]

$\lambda$ : Razão velocidade de rotação das pás e velocidade do vento [Adimensional]

$w_r$ : Velocidade angular [rad/s]

$R$ : Raio [m]

$J$ : Momento de inércia [Kg.m<sup>2</sup>]

$D$ : Fricção rotacional [N.m.s]

$K$ : Constante de torção [N.m.s<sup>2</sup>]

$V$ : Tensão [Volt]

$r$ : Resistência [Ohm]

$i$ : Corrente [Ampère]

$\varphi$ : Fluxo magnético [Tesla.m<sup>2</sup>]

$L$ : Indutância [Henry]

$\theta$ : Ângulo [radiano]

$z$ : Impedância de um indutor diante de uma tensão [Henry.rad/s]

$t$ : Tempo [s]

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SIGLAS.....	x
SUMÁRIO .....	1
CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO .....	3
1.1 MOTIVAÇÃO .....	5
1.2 OBJETIVOS .....	5
1.3 CONTRIBUIÇÕES .....	6
1.4 METODOLOGIA .....	6
1.5 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL .....	7
CAPÍTULO 02 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1 ESTRUTURA SIMPLIFICADA DE UM AEROGERADOR .....	8
2.2 ESTIMAÇÃO DA POTÊNCIA FORNECIDA PELO VENTO .....	10
2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA .....	14
2.3.1 Permanent magnetic synchronous generator (PMSG).....	14
2.3.2 Doubly fed induction generator (DFIG) .....	15
2.3.3 Squirrel Cage induction generator (SCIG).....	16
2.4 CONCLUSÃO.....	16
CAPÍTULO 03 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE MODELOS DINÂMICOS .....	17
3.1 SISTEMA MECÂNICO.....	17
3.2 SISTEMA ELÉTRICO DO DFIG.....	19
3.2.1 Equações do estator do DFIG .....	19
3.2.2 Equações do rotor do DFIG.....	22
3.2.3 Filtro RL.....	24
3.3 SISTEMA DE CONTROLE.....	25
3.3.1 Sistema de conversores .....	26
3.3.2 Transformação $dq$ .....	27
3.3.3 Controle do lado do rotor .....	29
3.3.4 Controle do <i>link</i> capacitivo .....	33
3.3.5 Controle do lado da rede .....	33

3.4 REPRESENTAÇÃO DA REDE ELÉTRICA .....	35
3.4.1 Modelo matemático da rede elétrica utilizado .....	35
3.5 CONCLUSÃO.....	38
CAPÍTULO 04 – IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA .....	40
4.1 VISÃO GERAL.....	40
4.1.1 Desenvolvimento .....	40
4.1.2 Plataforma de simulação utilizada.....	42
4.2 MODELO DE VENTO .....	42
4.3 MODELO MECÂNICO .....	43
4.4 MODELO DA MÁQUINA ELÉTRICA .....	45
4.6 SISTEMAS DE CONTROLE .....	48
4.6.1 Controle lado do rotor .....	48
4.6.2 Controle lado da rede .....	50
4.7 DEMAIS BLOCOS .....	50
4.7.1 Matriz transformação $dq$ e inversa.....	50
4.7.2 Cálculo do ângulo da rede .....	52
4.8 CURTO-CIRCUITO .....	53
CAPÍTULO 05 – RESULTADOS .....	54
5.1 CASOS ESTUDADOS .....	54
5.2 DFIG SOBRE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DE VENTO .....	55
5.3 ANÁLISE DO SISTEMA DIANTE DE CURTO-CIRCUITO NA BARRA 06 .....	60
5.4 ANÁLISE DO SISTEMA DIANTE DE CURTO-CIRCUITO NA BARRA 07 .....	67
5.5 CONCLUSÃO.....	74
CAPÍTULO 06 – CONCLUSÃO .....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
APÊNDICE A - DADOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.....	80
APÊNDICE B - REDE ELÉTRICA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO .....	81

## CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as fontes de energias renováveis têm sido grande foco de estudo nos países que enfrentam crises energéticas, pois é inviável confiar no fornecimento constante de energia proveniente de hidrocarbonetos, tais como petróleo, carvão, gás, etc. A produção de energia elétrica tende a diminuir com o tempo, uma vez que as reservas destes produtos só diminuem. Dentre as energias renováveis atualmente em estudo por pesquisadores nacionais e estrangeiros, encontra-se a proveniente da força dos ventos, a eólica.

Essa forma de geração em todo o mundo aumentou em 10 vezes nos últimos 10 anos (GWEC, 2012). No Brasil, o crescimento foi de aproximadamente 30 vezes em comparação com a última década (HUBNER, 2009). Estudos mostram um grande potencial de geração eólica no território nacional; estima-se que o Brasil pode produzir em torno de 140 GW, mais da metade deste valor no Nordeste (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001). Entre 2009 e 2013, ocorreu um grande crescimento na instalação de parques eólicos no Nordeste, expansão que se estenderá por mais alguns anos, devido à abundância de ventos fortes na região. A capacidade de produção de energia elétrica por meio dos ventos aumentou em mais de quatro vezes (de 900 MW para 4,4 GW) somente na região nordeste. O estado que mais contribuiu com esse incremento foi o Rio Grande do Norte (Analysis of the regulatory framework for wind power generation in Brazil, Summary Report, 2013).

Para absorver da melhor maneira possível esse potencial energético, faz-se o uso de aerogeradores de alta capacidade. A escolha do tipo do gerador eólico dependerá do meio onde será inserido e da necessidade energética da região (ROCHA, 2013).

Os aerogeradores são divididos em dois tipos: os de velocidade variável e os de velocidade fixa (BARROS, 2006). No primeiro, a velocidade do gerador é controlada por um sistema que usa um conjunto de circuitos eletrônicos para regulá-la. O segundo tipo é caracterizado por ser conectado diretamente à rede elétrica, controlando-o. Há várias razões para utilizar as turbinas de velocidade variável, dentre as quais: reduzir o estresse na estrutura mecânica, redução de ruídos e a possibilidade de controlar a potência ativa e reativa do gerador (BARROS, 2006). Atualmente, a maioria dos aerogeradores fabricados possui capacidade entre 02 e 05MW, produção de cinco a dez vezes maior em relação à de 10 anos atrás (ARCKEMANN et al., 2005).

Dentre os tipos de aerogeradores de velocidade variável, os mais comumente encontrados são: *Doubly fed induction generator* (DFIG), *Permanent magnetic synchronous generator* (PMSG) e o *Squirrel cage induction generator* (SCIG). O primeiro consiste em uma máquina de indução onde o estator e o rotor são alimentados – por isso o nome "duplamente alimentado". O estator é conectado diretamente à rede elétrica e o rotor por meio de um sistema de conversores que irão controlar a tensão a ser imposta ao rotor. Dessa forma é possível controlar a máquina.

O PMSG é um tipo de máquina em que somente o estator é alimentado pela rede elétrica, já que o rotor é constituído por um arranjo de ímãs permanentes. Assim, o estator é conectado à rede a partir de um sistema de conversores, para que ocorra uma transferência mais efetiva de potência. O SCIG é uma máquina cujo estator é conectado à rede elétrica via sistema de conversores. O rotor da máquina, por ser do tipo “gaiola de esquilo”, possui um funcionamento semelhante ao do PMSG. O DFIG é o modelo de turbina mais utilizada dentre as citadas (SAINI, 2013) devido à sua capacidade de converter grandes quantidades de energia e possuir uma relativa facilidade de construção, além do sistema de controle ser amplamente estudado. Apesar dos diferentes tipos de turbinas, todos os aerogeradores possuem um controle de *pitch* em seu sistema, que regula mecanicamente as pás dos aerogeradores.

O sistema de conversores possui a função de controlar o aerogerador, tanto mecanicamente quanto eletricamente, por meio da tensão aplicada à máquina. No caso do DFIG, a tensão controlada é aplicada no rotor da máquina; já no PMSG e no SCIG a tensão é aplicada no estator. Isso busca garantir a máxima transferência de potência possível entre o vento que chega às hélices do aerogerador e a rede elétrica, além de permitir a estabilidade eletromecânica do sistema. O estudo desse sistema é importante para estes geradores, pois durante perturbações mecânicas, ou elétricas, o aerogerador sairá do seu estado de regime permanente e sofrerá oscilações mecânicas que, por sua vez, produzirá oscilações elétricas no sistema em que se encontra conectado. Ao fazer uso de uma representação trifásica do sistema elétrico em simulações, ao invés da representação monofásica – a mais utilizada –, é possível analisar detalhadamente os efeitos de perturbações sobre o sistema de geração e o resultado do uso do sistema de controle diante de distúrbios, incluindo os curtos-circuitos assimétricos.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A implementação da energia eólica no Brasil cresceu exponencialmente na última década. Em alguns países da Europa, a energia elétrica proveniente dos ventos representa uma parcela considerável da matriz energética. Na China existem projetos de construção de parques eólicos que produzirão energia elétrica suficiente para suprir um país do porte equivalente ao do Brasil, um total de 200 GWh até 2020. Atualmente, o território chinês possui uma produção de aproximadamente 100 GWh (GWEC, 2012). Com o uso da energia cinética do vento como meio para obter energia elétrica, veio a necessidade de realizar estudos mais detalhados, envolvendo muitas áreas, uma vez que há diversas variáveis e elementos que participa desse processo, tais como a aerodinâmica, as máquinas elétricas, os sistemas de controles e de proteção, a estabilidade, dentre outras. Apesar do atual cenário petrolífero e hidráulico brasileiro suficientemente bom para atender a demanda atual é conveniente para o país manter suas reservas energéticas sempre em bons níveis para evitar escassez de recursos no futuro, como ocorreu em 2001, quando os níveis das águas das grandes hidrelétricas encontravam-se em níveis críticos de abastecimento. Com o crescimento do número de parques eólicos no Brasil, veio junto o crescimento dos estudos de aerogeradores, com a finalidade de melhorar-lhes a estrutura e seu desempenho.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma plataforma de simulação que mostre em detalhes o comportamento dinâmico de um aerogerador, cuja máquina é um DFIG, e de uma rede elétrica, trifasicamente representada, durante perturbações, sejam estas de natureza mecânica ou elétrica, incluso nesta última perturbação o curto-circuito desbalanceado do tipo monofásico. A estratégia de controle do sistema utilizada consiste no uso de controladores do tipo PI – convencionalmente adotada em estudos deste tipo de aerogerador, (ABAD et al., 2011).

Mais especificadamente, esse trabalho objetiva:

- Desenvolver um sistema DFIG juntamente com a estratégia de controle e modelo de vento no SIMULINK.

- Desenvolver uma rede elétrica representada na sua forma trifásica no SIMULINK.
- Aplicar distúrbios mecânicos ao sistema DFIG a partir da variação da velocidade de vento.
- Aplicar distúrbios elétricos ao sistema DFIG por meio de curtos-circuitos assimétricos e simétricos.
- Avaliar o desempenho do controle clássico diante desses distúrbios.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES

Em se tratando do sistema DFIG, são propostas as seguintes contribuições:

Montagem detalhada do modelo de aerogerador, tornando mais fácil a implementação e modificação de qualquer parâmetro do sistema de geração. É possível simular diversos tipos de turbinas, sendo necessário apenas modificar os parâmetros da máquina elétrica, os quais já são utilizados diretamente para o sistema de controle do DFIG. Em relação ao sistema mecânico, este foi montado separadamente, facilitando possíveis modificações necessárias.

Com relação ao sistema elétrico em que o aerogerador está conectado, as seguintes contribuições são propostas:

Modelagem de uma rede elétrica, contendo sete barras, adotando a representação trifásica, ao invés da usual forma monofásica de sequência positiva. Com esta representação mais detalhada é possível simular cargas desbalanceadas, linhas de transmissão com diferentes parâmetros entre as fases, e em especial a possibilidade de aplicar qualquer tipo de curto-circuito assimétrico em qualquer ponto da rede elétrica, tudo isso sem a necessidade de alterar a estrutura física da rede elétrica, sendo possível simular um curto-circuito simétrico e assimétrico na mesma simulação.

### 1.4 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado adotando a seguinte metodologia:



Estudo dos trabalhos mais relevantes sobre a modelagem do sistema DFIG. Com base nos modelos de redes elétricas e as diversas partes que compõem um aerogerador, um extenso e detalhado sistema foi montado no simulador SIMULINK, disponível no MATLAB®. Este ambiente de simulação foi escolhido devido à familiaridade com este software, além da maleabilidade disponível para realizar mudanças no método numérico utilizado para realizar os cálculos necessários. Na plataforma de simulação foram impostas perturbações ao aerogerador com a finalidade de analisar a dinâmica diante de perturbações para avaliar, em maiores detalhes, o desempenho do sistema de controle adotado.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

A organização textual desta dissertação será da seguinte forma:

Capítulo 02: Teoria sobre os aerogeradores e os tipos existentes.

Capítulo 03: Desenvolvimento teórico e matemático do sistema apresentado, que inclui a rede elétrica, modelo mecânico e elétrico do aerogerador e o sistema de controle.

Capítulo 04: Apresentação do sistema desenvolvido em ambiente de simulação.

Capítulo 05: Demonstração dos resultados obtidos do sistema estudado e desenvolvido em ambiente de simulação. Em conjunto com os resultados, serão expostas as análises e conclusões feitas a partir dos resultados obtidos relativas à metodologia adotada para a elaboração do sistema, verificando se o modelo de rede elétrica adotado gerará a dinâmica esperada, a técnica de controle adotada também é avaliada.

Capítulo 06: Neste último capítulo, são apresentadas as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

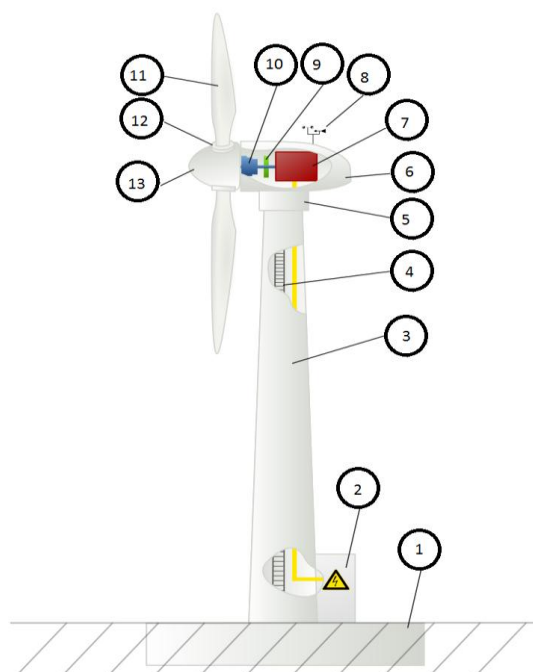
## CAPÍTULO 02 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo aborda a fundamentação teórica envolvida neste trabalho. Dado que o desenvolvimento da pesquisa foi realizado em ambiente de simulação, é necessário um embasamento matemático e teórico dos sistemas estudados para que se tenha credibilidade nos resultados obtidos. Antes de abordar em equações e modelagem, será feita uma breve fundamentação teórica sobre a energia eólica.

### 2.1 ESTRUTURA SIMPLIFICADA DE UM AEROGERADOR

Os aerogeradores possuem uma estrutura mecânica padrão que possibilita um bom funcionamento do sistema. A Figura 1 aponta algumas dos componentes básicos de um aerogerador comumente encontrado nas fazendas de geração de energia eólica.

**Figura 1: Componentes de um aerogerador**



**Fonte:** Arne Nordmann

Com base na Figura 1, têm-se as seguintes partes que compõem um aerogerador, de acordo com a numeração acima indicada (01 a 13):

1 - Fundação: Base que mantém a estrutura do aerogerador firme ao chão. No caso dos aerogeradores que ficam no mar, são utilizados um sistema de cabos e boias para fixar o aerogerador em uma determinada posição.

2 - Conexão com a rede elétrica: Estrutura responsável pela conexão entre sistema de geração do aerogerador e a rede elétrica.

3 - Torre: Estrutura responsável pela sustentação e condução dos cabos.

4 - Escadaria de Acesso: Responsável por fornecer acesso ao interior do sistema para realizar manutenções.

5 - Controle de orientação do vento: Sistema de engrenagens de baixa velocidade que permite o aerogerador girar em torno do eixo (*yaw*).

6 - Nacela: Estrutura que contém o sistema de controle e gerador elétrico protegidos de intempéries do exterior, tais como chuva, vento, poeira etc.

7 - Gerador: Responsável pela geração da energia elétrica.

8 - Anemômetro: Dispositivo que mede a direção e velocidade do vento.

9 - Freio: Utilizado para proteger o sistema de danos em casos de ventania. Também utilizado para manter o sistema parado em casos de manutenção.

10 - Caixa de Câmbio: Sistema responsável pelo aumento da velocidade angular de rotação entre as hélices e gerador.

11 - Pá rotatória: Responsável por captar a energia cinética do vento e transferir para o sistema de geração.

12 - Controle de inclinação da pá: Sistema responsável por realizar o controle de *pitch*.

13 - Cubo rotor: Estrutura mecânica responsável pela fixação das pás.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema que simulará as seguintes estruturas:

- Gerador elétrico.

- Sistema mecânico de acoplamento entre o Cubo rotor e gerador.

- Sistema de controle.

No Capítulo 03 serão mostrados os desenvolvimentos matemáticos necessários para a montagem do simulador do sistema DFIG conectado à rede elétrica.

## 2.2 ESTIMAÇÃO DA POTÊNCIA FORNECIDA PELO VENTO

Os aerogeradores devem possuir um formato aerodinâmico em suas pás que possibilite a extração máxima da potência fornecida pelo vento. Esta potência proveniente do vento pode ser deduzida matematicamente a partir de equações básicas de mecânica dos corpos. Dado um corpo de massa  $M$  movendo-se com velocidade  $V$ , este corpo possui uma energia cinética  $E$ , dada por:

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 \quad (2.1)$$

Ao considerar que a massa  $M$  é o vento que incide sobre uma área  $A$  da turbina, tem-se que:

$$M_d = \rho \cdot A \cdot V \cdot dt \quad (2.2)$$

Em que:

$M_d$ : Massa de ar deslocada;

$\rho$ : Densidade do ar;

$A$ : Área varrida pelas pás do aerogerador;

$V$ : Velocidade de deslocamento da massa de ar;

$dt$ : Diferencial de tempo.

A relação potência e energia são dadas por:

$$P \cdot dt = E \quad (2.3)$$

Em que:

$E$ : Energia cinética da massa de ar em movimento;

$P$ : Potência mecânica do vento.

Todas as unidades citadas neste trabalho de acordo com o SI de medidas.

Ciente da massa e da velocidade do ar é possível calcular sua energia cinética. Nesse sentido:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot v \cdot dt) \cdot V^2 \quad (2.4)$$

Dividindo a Equação (2.4) pelo diferencial de tempo, tem-se:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.5)$$

O valor a ser fornecido pela Equação (2.5) seria o a energia absorvida pelo aerogerador proveniente do vento, caso o aerogerador convertesse 100% da energia cinética do vento em energia elétrica, isto é, aproveitasse o máximo da energia proveniente do vento. Porém, tal situação não existe. Calcula-se que o valor máximo a ser transferido para o aerogerador é, aproximadamente, 59% da energia que o vento fornece – limite de Betz – (MELO et al., 2005). Este total é baseado na relação entre a velocidade do vento que chega às hélices do aerogerador e a velocidade do vento atrás das hélices do aerogerador (MELO, 2005).

Levando em consideração que a taxa máxima de absorção é 59%, cada turbina possui um modelo matemático, determinado empiricamente, que estabelece a quantidade de energia que o aerogerador consegue transmitir do vento para o eixo da turbina (MANYONGE et al., 2012). Para determinar a potência extraída por um aerogerador, adiciona-se o coeficiente  $C_p$  à equação da potência fornecida, dada pela Equação (2.5), pelo vento para as pás da turbina. Assim:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p(\beta, \lambda) \quad (2.6)$$

O coeficiente  $C_p$  possui duas variáveis que determinam o seu valor,  $\lambda$ , que é dada pela Equação (2.7):

$$\lambda = \frac{w_r \cdot R}{V_{vento}} \quad (2.7)$$

Em que:

$w_r$ : Velocidade angular das pás em rad/s;

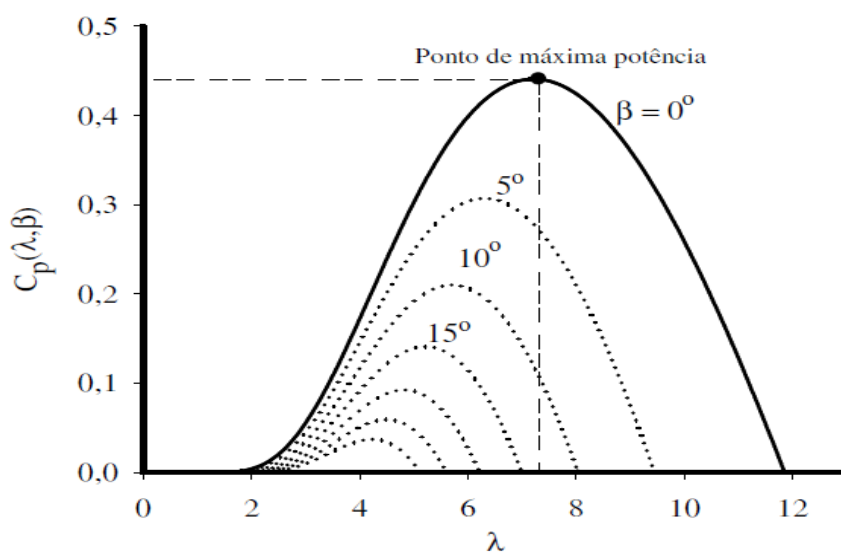
$R$ : Raio das pás em metros;

$V_{vento}$ : Velocidade do vento em m/s;

$\beta$ : ângulo das pás do aerogerador em radiano.

O gráfico de  $C_p$ , que é feito com base na variação de  $\lambda$  e  $\beta$ , deve ser fornecido junto com a turbina pelo fabricante, e o mesmo deve assegurar que estes valores condizem com o que é esperado. O gráfico mostrado na Figura 2 exemplifica uma curva  $C_p$ , em função, de lambda de um aerogerador.

**Figura 2: Coeficiente de aproveitamento de potência para diferentes valores de  $\lambda$  e  $\beta$**



**Fonte:** TAVEIROS, 2014

Nota-se que nas curvas de  $C_p$  não existem valores, seja qual for o  $\beta$ , para lambda, menores que um valor mínimo (abaixo de dois, no caso da Figura 2). Isso ocorre devido ao fato dos aerogeradores possuírem velocidades mínimas de operação, isto é, para que o sistema comece a operar, é necessário que o vento possua uma velocidade mínima. Esta medida é adotada para evitar desgaste do aerogerador, pois não vale a pena deixar o sistema operando

para baixas velocidades de vento. Da mesma forma, também existe uma velocidade máxima de vento em que o aerogerador deve parar de operar para evitar danos físicos. Essa parada é feita com o acionamento dos freios do sistema (SILVA, 2013). Podem-se definir três valores de velocidade de vento para um aerogerador:

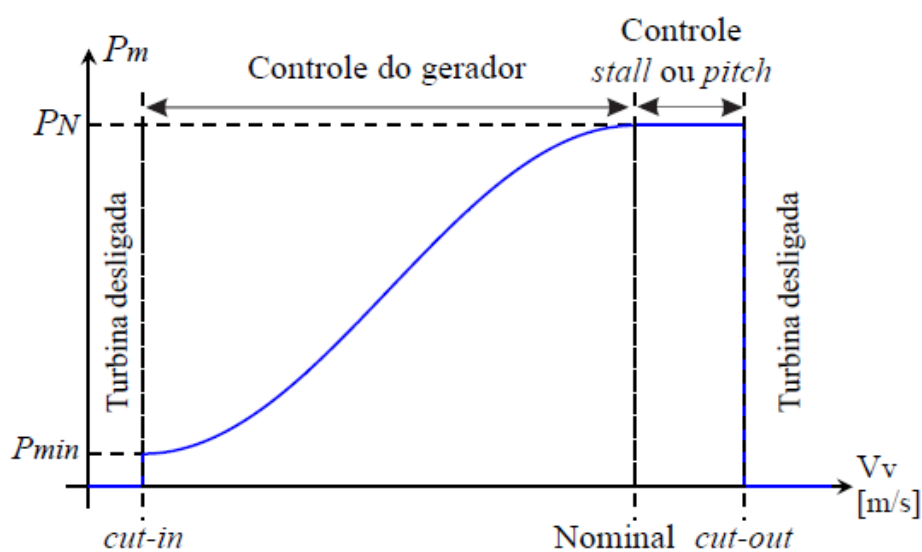
$V_{cut-in}$ : Velocidade que o sistema começa a operar.

$V_{nominal}$ : Velocidade que o aerogerador fornece potência máxima, onde  $C_p$  é máximo.

$V_{cut-off}$ : Velocidade que o sistema para de operar.

O gráfico da Figura 3 exemplifica os limites de velocidade de vento anteriormente citadas:

**Figura 3: Curva de potência típica de uma turbina eólica**



Na Figura 3 é mostrado um comportamento típico da potência que chega ao aerogerador com base na velocidade do vento incidente nas pás da turbina. Nesse trabalho, será adotado um modelo matemático que descreve a curva da Figura 3, cuja equação é dada por (TAVEIROS, et al., 2012):

$$P_r = \begin{cases} \frac{P_N - P_{min}}{2} \left[ 1 - \cos \left( \pi \frac{V_w - V_1}{V_2 - V_1} \right) \right] + P_{min}, & V_1 \leq V_w \leq V_2 \\ P_N, & V_2 < V_w < V_3 \\ 0, & V_1 < V_w \end{cases} \quad (2.8)$$

Em que:

$V_1$ : Velocidade de *cut-in*;

$V_2$ : Velocidade onde a potência é a nominal;

$V_3$ : Velocidade de *cut-off*;

$V_w$ : Velocidade do vento;

$P_r$ : Potência recebida no eixo do aerogerador;

$P_{min}$ : Potência gerada pelo aerogerador quando este começa a funcionar.

## 2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

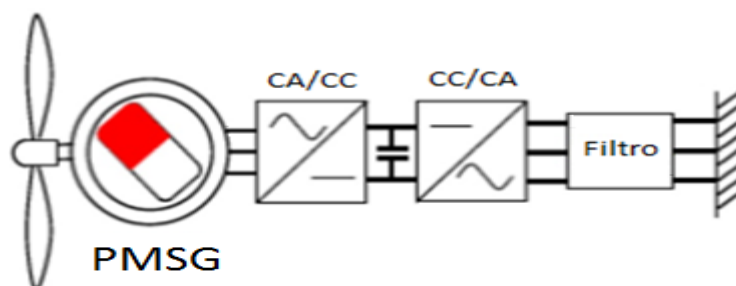
As próximas seções abordarão alguns dos tipos de máquinas elétricas encontradas nos aerogeradores dos parques eólicos. Uma vez que cada máquina possui diferentes características, serão feitos alguns comentários sobre essa questão. Atualmente são encontrados três tipos de máquinas elétricas nos aerogeradores: a) gaiola de esquilo; b) imã permanente; e c) motor de indução duplamente alimentado.

### 2.3.1 Permanent magnetic synchronous generator (PMSG)

Neste tipo de gerador eólico imãs permanentes são utilizados em seu rotor, normalmente com poderosos campos magnéticos. Ao receber o vento nas hélices do aerogerador, os imãs girarão devido ao movimento de rotação das pás, fazendo com que os campos magnéticos cruzem os enrolamentos do estator, induzindo, assim, uma corrente elétrica que fluirá em direção à barra em que este gerador está conectado. Porém, tendo em vista que a velocidade do vento varia com o tempo, o PMSG não é conectado diretamente a rede elétrica, e sim através de um sistema de dois conversores, cuja função é de operar como retificador/inversor. Dessa forma, é possível sincronizar a tensão e a frequência do sistema de geração com a tensão e frequência da rede. A Figura 4 contém o esquema do PMSG.



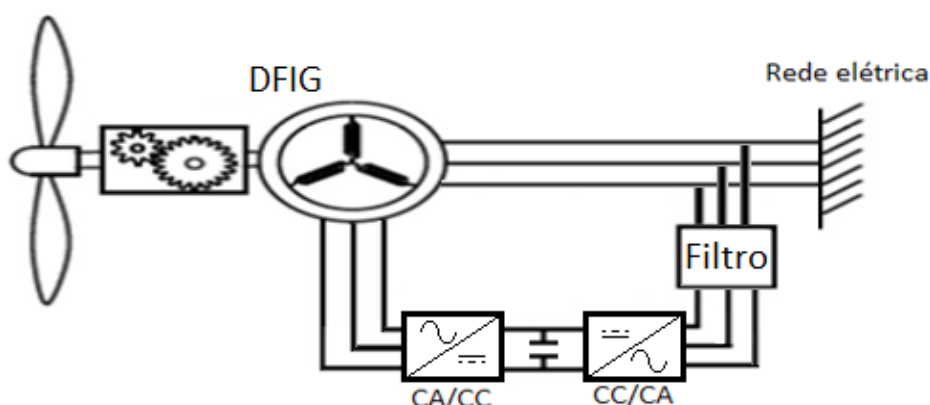
**Figura 4: Esquema do PMSG**



### 2.3.2 Doubly fed induction generator (DFIG)

O DFIG é um gerador elétrico, duplamente alimentado, como o próprio nome já diz. Em outras palavras, ao contrário do PMSG – que possui somente o estator eletricamente alimentado –, o DFIG possui o estator e o rotor alimentados. A principal diferença desse tipo de máquina é o fato de ser possível controlar a tensão aplicada ao rotor da máquina a partir de um sistema de conversores, similar ao encontrado no PMSG. Nesse sentido, é possível estimar e controlar o campo magnético que o rotor irá impor sobre os enrolamentos do estator, algo que não é possível no PMSG, uma vez que este possui ímãs com campos magnéticos praticamente constantes. Com base nos parâmetros elétricos da máquina o controle é realizado por meio da tensão imposta nos terminais do rotor. Na Figura 5 é mostrado como é feita a conexão do sistema DFIG à rede elétrica.

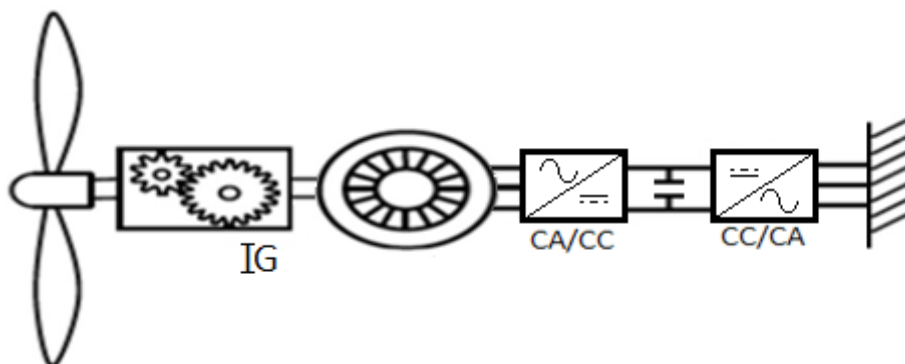
**Figura 5: Esquema do DFIG**



### 2.3.3 Squirrel Cage induction generator (SCIG)

Este tipo de turbina utiliza um gerador com rotor do tipo gaiola de esquilo, que é conectado ao eixo da turbina através de um sistema de engrenagens. O estator da máquina é conectado diretamente à rede elétrica via transformador. Ao contrário dos outros tipos de turbinas previamente citadas, esse gerador pode ou não possuir um sistema de conversores, mostrando-se menos eficiente do que os demais métodos de geração previamente citados (ABDEL-SALAM, et al., 2011). No entanto, esse tipo de turbina necessita de um sistema de regulação de tensão, tais como banco de capacitores e *soft-stater* (TAVEIROS, et al., 2012). Na Figura 6 é mostrado o esquema básico do SCIG.

**Figura 6: Esquemática do SCIG**



## 2.4 CONCLUSÃO

Embora existam diversos modelos de máquinas elétricas para os aerogeradores, o DFIG foi escolhido para realizar um estudo da sua dinâmica devido às vantagens comentadas anteriormente. Em relação ao modelo de vento apresentado neste capítulo, ele é utilizado como fonte de força externa para o sistema de geração. Na próxima seção, será apresentada a matemática relativa aos modelos do sistema mecânico e elétrico do aerogerador, bem como do sistema de controle que atua na parte elétrica.

## **CAPÍTULO 03 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE MODELOS DINÂMICOS**

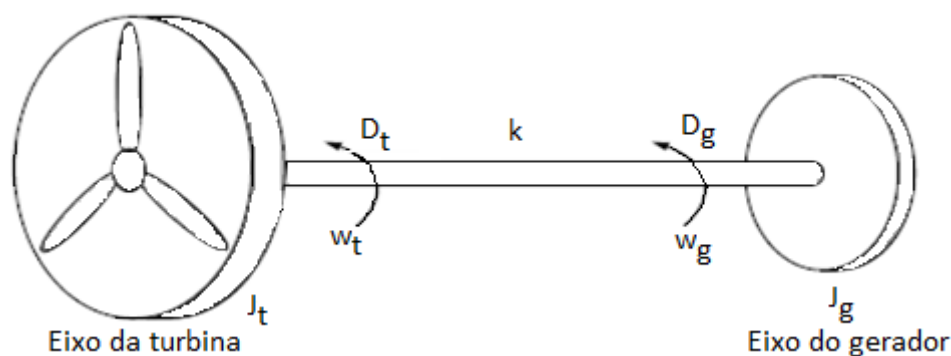
Esse capítulo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento teórico envolvido no sistema DFIG e dos sistemas mecânico do aerogerador, de controle e da rede elétrica. A elaboração de uma plataforma de simulação requer um embasamento matemático e teórico, pois é a partir desse desenvolvimento que será viável programar o sistema no SIMULINK, ferramenta do MATLAB<sup>®</sup>. Com o simulador completamente montado, é possível simular diversas formas de operação da rede elétrica, inclusive as perturbações de natureza elétrica ou mecânica. Esta capacidade de emular um sistema elétrico em ambiente digital possibilita, via construção de modelos de componentes da rede e sistemas de geração com diferentes características, a economia na simulação de projetos, pois não é necessário desenvolver o projeto na sua forma física para realizar simulações.

### **3.1 SISTEMA MECÂNICO**

Um aerogerador, como qualquer outra estrutura física, não é um sistema rígido: o momento das pás não é transferido instantaneamente para o eixo do rotor. Entre o eixo das pás da turbina e o eixo do rotor, há um sistema de engrenagens onde seus eixos também não são rígidos; eles são projetados para sofrerem uma pequena torção durante a operação (ACKERMANN, 2005). A torção é necessária para que o sistema não entre em colapso devido a perturbações com altas amplitudes em curtos intervalos de tempo, semelhante a um capacitor. Tal maleabilidade do eixo permite armazenar energia mecânica e liberá-la posteriormente, como se fosse uma mola.

Entre a força que o vento exerce nas pás até o rotor existe um conjunto de forças atuando no sistema mecânico, como é mostrado na Figura 7:

**Figura 7: Sistema mecânico do sistema DFIG**



Os parâmetros inerentes ao sistema mecânico são:

$J_t$ : Momento de inércia do conjunto de massas da turbina.

$J_g$ : Momento de inércia do conjunto de massas do rotor.

$D_t$ : Perdas rotacionais da turbina.

$D_g$ : Perdas rotacionais do gerador.

$w_g$ : Velocidade angular do rotor do gerador elétrico.

$w_t$ : Velocidade angular da turbina.

$K$ : Constante de torção existente entre eixo da turbina e eixo do gerador.

Os aerogeradores, dentre diversos tipos existentes, utilizam um sistema de engrenagens cuja função é aumentar a velocidade de rotação no eixo do rotor. Devido à representação adotada ser em p.u, a relação de transformação do sistema de engrenagens será de um para um, isto é, as velocidades de rotação  $w_g$  e  $w_t$  serão numericamente iguais, em p.u. A dinâmica do sistema mecânico pode ser descrita pelas Equações (3.1) e (3.2) (PERDANA, 2008):

$$\frac{dw_t}{dt} = \frac{1}{J_t} (T_t - k \int (w_t - w_g) dt - d_t w_t) \quad (3.1)$$

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{1}{J_g} (-T_{em} + k \int (w_t - w_g) dt - d_g w_g) \quad (3.2)$$

As Equações (3.1) e (3.2) são utilizadas para simular matematicamente as velocidades angulares da turbina e do rotor do gerador elétrico do DFIG. O termo  $T_{em}$  representa o torque eletromagnético produzido entre a interação entre estator e rotor da máquina elétrica. Este termo é o único que é diretamente controlável, visto que ele possui uma dependência com a tensão aplicada aos terminais do rotor.

## 3.2 SISTEMA ELÉTRICO DO DFIG

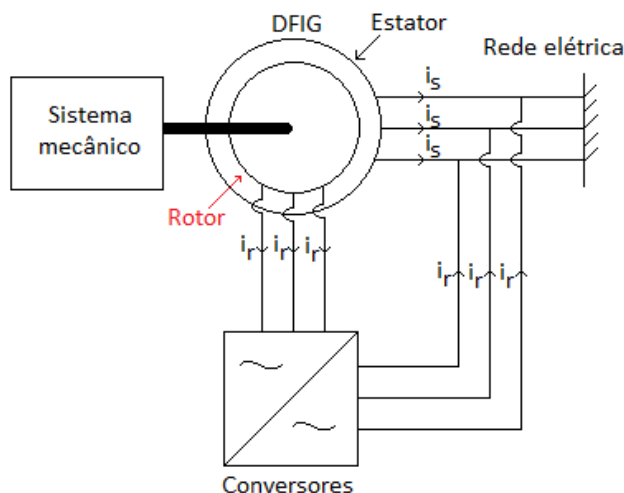
O DFIG, sendo a máquina elétrica do aerogerador, é o responsável pela injeção da corrente elétrica na rede elétrica em que está conectado. A tensão rotórica é que produzirá os valores desejados das correntes que circulam nos enrolamentos do rotor, cujo valor é previamente calculado pelo sistema de controle.

De acordo com Abad et al. (2011), o gerador é representado matematicamente por um sistema de equações dinâmicas. As tensões, que são impostas ao estator e rotor, geram uma corrente nos enrolamentos da máquina, que por sua vez geraram um campo magnético entre o rotor e o estator. Baseado no que foi mostrada na seção 3.1, serão estabelecidas as relações entre o torque eletromagnético, tensão rotórica e o controle.

### 3.2.1 Equações do estator do DFIG

O DFIG, como já mencionado anteriormente, é um gerador elétrico duplamente alimentado. As tensões impostas em seus terminais irão induzir correntes estatóricas e rotóricas. Para estimar esses valores de corrente, é necessário conhecer os parâmetros da máquina elétrica que está em operação. As conexões do estator e rotor da máquina são representadas pelo seguinte circuito:

**Figura 8: Circuito do estator com suas correntes de fase, representada por  $i_s$**



Os parâmetros do estator podem ser fornecidos a partir do sistema matricial dado pela Equação (3.3) (ABAD, 2011):

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\varphi_{sa}/dt \\ d\varphi_{sb}/dt \\ d\varphi_{sc}/dt \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Em que:

$v_{sa}, v_{sb}$  e  $v_{sc}$  : tensões trifásicas aplicadas ao estator da máquina.

$r_s$ : resistência dos enrolamentos do estator.

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}$  e  $\varphi_{sc}$ : fluxo magnético referente a cada fase.

$i_{sa}, i_{sb}$  e  $i_{sc}$ : correntes que fluem pelos enrolamentos do estator para a rede elétrica.

A Equação (3.4) do fluxo magnético do estator, assim como a equação do fluxo magnético do rotor, possui termos referentes a equação do rotor e vice-versa. Isso ocorre devido à interação dos campos magnéticos produzidos pelas correntes rotóricas e estatóricas. Essa interação resultante entre os campos geram algumas dificuldades para impor o controle na máquina; portanto, no Capítulo 04 será abordada a solução para este problema. O fluxo magnético do estator é calculado através da Equação (3.4):

$$\varphi_s = L_s * i_s + L_m * i_r \quad (3.4)$$

Em que:

$L_s$ : indutância por fase do estator, que é dado por:

$$L_s = l_s + L_m \quad (3.5)$$

$L_m$ : indutância do núcleo magnético;

$l_s$ : indutância própria do estator.

A variação do fluxo magnético em função do tempo (sua derivada) é dada pelas Equações (3.6), (3.7) e (3.8):

$$\begin{bmatrix} d\varphi_{sa}/dt \\ d\varphi_{sb}/dt \\ d\varphi_{sc}/dt \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_{sr}[B] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Em que:

$$[A] = \begin{bmatrix} L_s & -1/2 L_m & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & L_s & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & -1/2 L_m & L_s \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_g) & \cos(\theta_g + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g) & \cos(\theta_g + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_g + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$L_{sr}$ : indutância mútua entre rotor e estator.

Com base nas tensões e correntes estatóricas, as potências fornecidas pelo estator da máquina, dadas por (3.9) e (3.10) (ABAD, 2011) são:

$$P_s = 3 * Re\{V_{abcs} * I_{abcs}^*\} \quad (3.9)$$

$$Q_s = 3 * Img\{V_{abcs} * I_{abcs}^*\} \quad (3.10)$$

Em que:

$P_s$ : Potência ativa fornecida pelo estator para a rede elétrica;

$Q_s$ : Potência reativa fornecida ou consumida pelo estator para a rede elétrica;

De acordo com a Equação (3.9), a potência ativa fornecida pelo estator encontra-se diretamente relacionada com a tensão da rede elétrica, cujo valor não é possível controlar pelo sistema de geração do aerogerador, visto que a rede é um barramento infinito, quando

comparado ao aerogerador. Conclui-se que, para injetar a potência desejada na rede elétrica é necessário regular os valores das correntes que fluem dos enrolamentos do estator para a rede. A potência ativa fornecida pelo DFIG é calculada com base na potência fornecida pelo vento, que é calculada a partir do modelo aerodinâmico que é apresentado na Equação (2.8). Já a potência reativa, fornecida ou consumida, é definida pelo operador do sistema; altera-se o valor de acordo com as demandas da rede, caso esta necessite aumentar ou diminuir o fator de potência, o aerogerador pode operar de maneira que contribua com esta alteração.

### 3.2.2 Equações do rotor do DFIG

Semelhantemente ao estator, o rotor do gerador elétrico possui três enrolamentos com tensões aplicadas em seus terminais. Porém, nesse caso, a rotação do rotor é mais um fator que influencia na dinâmica do sistema. As variáveis elétricas do rotor são dadas pela Equação (3.11):

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\varphi_{ra}/dt \\ d\varphi_{rb}/dt \\ d\varphi_{rc}/dt \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Em que:

$v_{ra}, v_{rb}$  e  $v_{rc}$ : tensões trifásicas aplicadas nos terminais do rotor da máquina.

$r_r$ : resistência dos enrolamentos do rotor.

$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}$  e  $\varphi_{rc}$ : fluxo magnético referente a cada fase.

$i_{ra}, i_{rb}$  e  $i_{rc}$ : correntes que fluem pelos enrolamentos do rotor.

Semelhante ao estator, o fluxo magnético do rotor pode é dado por:

$$\begin{bmatrix} d\varphi_{ra}/dt \\ d\varphi_{rb}/dt \\ d\varphi_{rc}/dt \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + L_{rs} * [B] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} L_r & -1/2 L_m & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & L_r & -1/2 L_m \\ -1/2 L_m & -1/2 L_m & L_r \end{bmatrix} \quad (3.13)$$



$$[B] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_g) & \cos(\theta_g + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g) & \cos(\theta_g + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_g + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Em que:

$L_r$ : indutância por fase do rotor, que é dado por:

$$L_r = l_r + L_m \quad (3.15)$$

$L_m$ : indutância do núcleo magnético;

$l_r$ : indutância própria do estator.

$L_{rs}$ : indutância mútua entre rotor e estator.

Como mencionando anteriormente, o rotor é alimentado por um sistema de conversores que estão conectados a rede elétrica também. Segundo Joana Reis (2013), os conversores são utilizados para controlar diversas características do sistema, por meio desse dispositivo, é possível impor tensões que induzirão correntes elétricas no rotor do DFIG, que em seguida irão induzir campos magnéticos que ao induzir correntes no estator, estas irão alterar as potências fornecidas estator.

Com base nas equações de tensões e correntes rotóricas, a potência fornecida pelo rotor da máquina é dada por:

$$P_r = 3 * Re\{V_{abcr} * I_{abcr}^*\} \quad (3.16)$$

No funcionamento do sistema, o rotor pode ser um fornecedor ou um consumidor de potência elétrica (GUERRERO, 2014). Isso ocorre porque o aerogerador pode operar em velocidades distintas, que são: supersíncrona e subsíncrona. Fornecendo energia para a rede na primeira forma de operação e consumindo energia na segunda forma. A relação da transferência de potência entre rotor e a rede com base na forma de operação, é dada por:

$$P_r > 0 \text{ Para } s < 0 ;$$

$$P_r < 0 \text{ Para } s > 0 . ;$$

$$P_r = 0 \text{ Para } s = 0 .$$

Em que:

$$s = 1 - \frac{\omega_s - \omega_g}{\omega_s}$$

Em que:

$s$ : escorregamento da máquina;

$\omega_s$ : frequência angular da rede elétrica;

$\omega_g$ : frequência angular do eixo do rotor.

Normalmente, o sistema é projetado para operar em velocidade supersíncrona. Porém, diante de perturbações externas, a velocidade de rotação do rotor irá oscilar, ocorrendo, por vezes, da velocidade de rotação se tornar subsíncrona durante estas oscilações.

A relação entre a potência do rotor e o escorregamento pode ser dada, segundo Abad et al. (2011), por:

$$P_r = P_g * s \quad (3.17)$$

Em que:

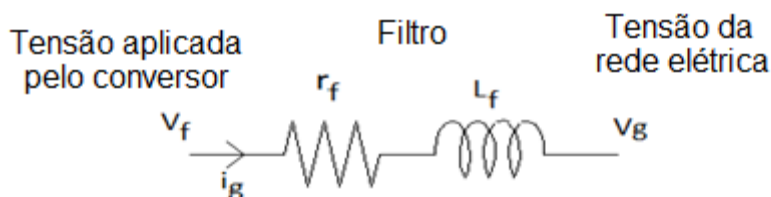
$P_g$ : Potência total gerada pelo gerador elétrico.

Então, com base na Equação (3.17), percebe-se que há uma relação direta entre a velocidade de rotação do gerador e a potência consumida, ou gerada por ele.

### 3.2.3 Filtro RL

O rotor do gerador elétrico é conectado à rede elétrica por meio de um sistema de conversores. Essa conexão é intermediada por um filtro, normalmente composto por três indutâncias, uma por fase (ABAD et al., 2011), tendo em vista que as indutâncias não são ideais, cada uma possui um pequeno valor de resistência inerente, cujo valor também é considerado nas simulações. A finalidade deste filtro é possibilitar a filtragem de correntes elétricas harmônicas durante a operação do sistema. O esquema da Figura 9 apresenta o filtro inserido entre o conversor e a rede.

**Figura 9: Circuito do filtro inserido entre o conversor e a rede elétrica**



A modelagem matemática do filtro é semelhante à do modelo elétrico do DFIG. Ao conhecer os valores das tensões da rede elétrica e dos elementos que constituem o filtro, é possível estimar os valores de tensões a serem impostas pelo conversor, a fim de se obter o valor desejado de corrente que irá fluir entre o sistema de conversores e a rede elétrica.

A relação matemática do circuito é dada por:

$$v_f - v_g = (r_f + L_f * \omega_g) * i_g \quad (3.18)$$

Em que:

$v_f$ : tensão aplicada pelo conversor, por fase.

$v_g$ : tensão da rede elétrica na barra à qual o aerogerador está conectado.

$r_f$ : resistência elétrica do filtro, por fase.

$L_f$ : indutância do filtro, por fase.

$\omega_g$ : frequência da rede elétrica.

$i_g$ : corrente do filtro.

### 3.3 SISTEMA DE CONTROLE

Uma vez que o sistema de geração estudado está sujeito a perturbações causadas pela variação da velocidade do vento incidente nas pás do aerogerador, como também a perturbação proveniente da rede elétrica, faz-se necessário um estudo que tenha como objetivo impor e melhorar estabilidade eletromecânica do sistema. Assim, o foco do sistema

de controle é manter o sistema operando de forma satisfatória, ao passo em que, diante de perturbações no sistema, este retorne ao ponto desejável de operação em um intervalo de tempo suficientemente curto, e com o menor impacto possível ao sistema de geração e a rede elétrica.

Diante de uma perturbação, o sistema sofrerá oscilações, ou transitórios, isto é, antes do sistema retornar ao estado de regime permanente, a máquina apresentará um comportamento normalmente indesejado. Em sistemas eólicos, estas oscilações podem ser divididas em (KUNDUR, 1994):

Curta duração: 0,1 até 2 segundos;

Média duração: 2 até 20 segundos;

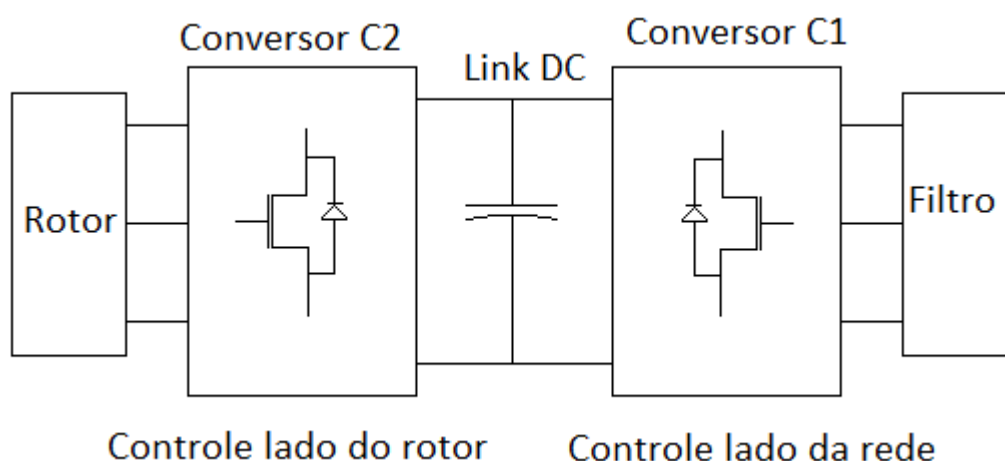
Longa duração: mais que 20 segundos.

Os transitórios de curta duração são aqueles que ocorrem devido a pequenas perturbações, no caso em estudo, pode ser uma pequena carga sendo conectada ou desconectada a uma rede elétrica de grande porte, ou até mesmo curto-circuito de baixa severidade. Transitório de média duração pode ser gerado por meio de um curto-circuito com maior duração ou variações rápidas na velocidade do vento. Os transitórios de longa duração podem ser provocados por um curto-circuito trifásico muito próximo do sistema de geração ou variações normais na velocidade do vento.

### **3.3.1 Sistema de conversores**

Em relação ao cenário em que o DFIG encontra-se inserido, diversos estudos de sistemas de controle são desenvolvidos, tendo um sistema de conversores como meio de efetuar este controle. É a partir deste sistema de conversores que o controle é efetivamente implementado, com relação ao controle, são utilizados controladores do tipo PI (BARROS, 2006). A Figura 10 contém o esquema dos conversores utilizados para realizar o controle do sistema, a forma como os conversores estão arranjados é chamado de *back-to-back*.

**Figura 10: Sistema de conversores**



O conversor C1, na Figura 10, é responsável por controlar a tensão imposta à rede elétrica. Sabe-se que, quando o conversor impuser uma tensão menor do que a tensão da rede, haverá transferência de potência da rede para o rotor do DFIG e existirá transferência de potência do rotor para rede elétrica quando a tensão do conversor for maior do que a tensão da rede. O escorregamento é que define se essa transferência de potência será para o rotor (subsíncrona) ou do rotor (supersíncrona). A potência transferida tem que estar de acordo com a Equação (3.17), ou próximo deste valor quando as perdas elétricas são consideradas. Já o conversor C2 é responsável por controlar a tensão imposta ao rotor do gerador do DFIG. As tensões de C1 e C2 a serem impostas são calculadas por controladores PI's.

Devido à constante mudança de tensão em que esses conversores encontram-se submetidos, um capacitor é colocado entre eles, cuja função é regular a tensão CC (VASIPALLI; PHULAMBRIKAR, 2012).

### 3.3.2 Transformação $dq$

Uma máquina elétrica trifásica possui muitas variáveis envolvidas, cujos valores são modificados com o passar do tempo, e algumas destas variáveis dependem do ângulo que o rotor faz em relação ao estator (indutâncias mútuas entre estator e rotor,  $L_{sr}$  e  $L_{rs}$ , por exemplo) desta forma, seria impraticável implementar um controle que utilize todas as variáveis envolvidas em um sistema tão dinâmico. Com a finalidade de reduzir o tamanho do

sistema e torná-lo mais simples de manipular matematicamente, eliminando as variações e reduzindo as não linearidades, faz-se o uso da transformação  $dq$ . Essa transformação consiste em utilizar uma matriz de transformação  $[T]$  que representará o sistema trifásico em um sistema bifásico de corrente e tensão constante. A matriz de transformação é dada (CONCORDIA, 1944):

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_g) & \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_g - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_g) & -\sin(\theta_g - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_g - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Assim, a representação  $dq$  de um sistema trifásico  $abc$  será dado por:

$$[A_{odq}] = [T][A_{abc}]$$

O termo  $\theta_g$  é o ângulo da rede em um dado momento de tempo. É por meio desse artifício que a matriz de transformação consegue alterar um sistema senoidal num contínuo. Para o rotor, a matriz utilizada na transformação é a mesma, porém existirá um termo  $a$  mais que compensará o ângulo do rotor,  $\theta_r$ , como é mostrado em (3.20):

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_g - \theta_r) & \cos(\theta_g - \frac{2\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\theta_g - \frac{4\pi}{3} - \theta_r) \\ -\sin(\theta_g - \theta_r) & -\sin(\theta_g - \frac{2\pi}{3} - \theta_r) & -\sin(\theta_g - \frac{4\pi}{3} - \theta_r) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Ao aplicar a transformação nas equações do sistema elétrico e isolando os termos derivativos, um sistema matricial é obtido que, por sua vez, é implementado na plataforma de simulação através de funções matemáticas. No entanto, é necessário fazer uma consideração durante essa transformação para viabilizar melhor esta implementação. Nos termos que possuem matrizes que multiplicam um vetor corrente, por exemplo, a matriz de transformação será aplicada por meio dos seguintes passos:

$$[v_{odq}] = [T] * [v_{abc}] = [T] * [Z] * [i_{abc}] \quad (3.21)$$

Sendo:

$$[T]^{-1} * [T] = [T] * [T]^{-1} = [I] \quad (3.22)$$

Tem-se que:

$$[v_{0dq}] = [T] * [v_{abc}] = [T] * [Z] * [T]^{-1} * [T] * [i_{abc}] \quad (3.23)$$

Ao manipular os termos, tem-se:

$$[v_{0dq}] = [T] * [Z] * [T]^{-1} * [i_{0dq}] \quad (3.24)$$

Em que:

[Z]: matriz de impedância do sistema;

[I]: matriz identidade;

[T]: matriz de transformação;

[v<sub>abc</sub>]: vetor de tensão das fases "a", "b" e "c";

[v<sub>0dq</sub>]: vetor de tensão em "0", "d" e "q";

[i<sub>abc</sub>]: vetor de corrente das fases "a", "b" e "c";

[i<sub>0dq</sub>]: vetor corrente em "0", "d" e "q".

Ao fazer essa aplicação para todos os termos das equações matriciais do sistema elétrico, é possível obter um modelo matematicamente mais simples, conforme mostrado nas seções anteriores. As equações simplificadas de tensão serão mostradas nas próximas seções.

### 3.3.3 Controle do lado do rotor

Para realizar o controle do lado do rotor, é adotado o controle vetorial (ABAD et al., 2011). Em conjunto com as técnicas escolhidas, é considerado que a tensão estatórica do eixo "q" após a transformação é alinhada, em fase, com a tensão estatórica, como é observado na Equação (3.29). Para efeito de controle, também é considerado que o fluxo estatórico do eixo "d" ( $\varphi_{ds}$ ) é alinhado com o fluxo estatórico ( $\varphi_s$ ), desta forma tem-se que o fluxo estatórico do eixo "q" ( $\varphi_{qs}$ ) é nulo.

Devido ao baixo valor da resistência do estator, esta é desprezada. Ademais, considera-se que em regime permanente, a variação do fluxo estatórico é nula. Nesse sentido, as equações da máquina elétrica podem ser representadas por um sistema de matriz com um menor número de variáveis, possibilitando uma simplificação na implementação do sistema de controle. Ao aplicar a transformação vista na Seção 3.3.2 nas equações da máquina elétrica, (3.25) e (3.26), tem-se que, em  $dq$ , a expressão da variação de corrente em um intervalo de tempo é dada por (3.30) e (3.31) (ABAD et al., 2011):

$$v_s = r_s * i_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + j * w_s * \varphi_s \quad (3.25)$$

$$v_r = r_r * i_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + j * (w_s - w_m) * \varphi_r \quad (3.26)$$

Diante dessas ponderações referentes ao alinhamento do fluxo magnético, eliminação da resistência do estator, tem-se que as equações do fluxo magnético do estator e do rotor em (3.25) e (3.26), respectivamente, resultarão em (3.27), (3.28), (3.29):

$$\varphi_{ds} = L_s * i_{ds} + L_m * i_{dr} \quad (3.27)$$

$$0 = \varphi_{qs} = L_s * i_{qs} + L_m * i_{qr} \quad (3.28)$$

$$v_{ds} = 0$$

$$v_{qs} = v_s \approx w_s * \varphi_s \quad (3.29)$$

Nesse sentido, e utilizando as equações referentes ao rotor, mencionadas na seção 3.2.2, tem-se que:

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{v_{dr} - r_r * i_{dr} + w_r * L_\delta * i_{qr}}{L_\delta} \quad (3.30)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{v_{qr} - r_r * i_{qr} + w_r * L_\delta * i_{dr} - \frac{w_r * L_m}{L_s * w_s}}{L_\delta} \quad (3.31)$$

Em que:

$$L_\delta = l_s - \frac{L_m^2}{l_r}$$

Assim, tem-se que as potências que o estator fornece são dadas por:

$$P_s = v_s * \frac{L_m}{L_s} * i_{qr} \quad (3.32)$$



$$Q_s = -\frac{v_s^2}{\omega_s * L_s} + v_s * \frac{L_m}{L_s} * i_{dr} \quad (3.33)$$

O torque eletromagnético é dado pela relação entre potência ativa e velocidade angular da rede, como é mostrado em (3.34):

$$T_{em} = \frac{P_s}{\omega_s} = \frac{v_s * \frac{L_m}{L_s} * i_{qr}}{\omega_s} \quad (3.34)$$

Ao substituir (3.29) em (3.34), tem-se que o torque eletromagnético é dado por (3.35):

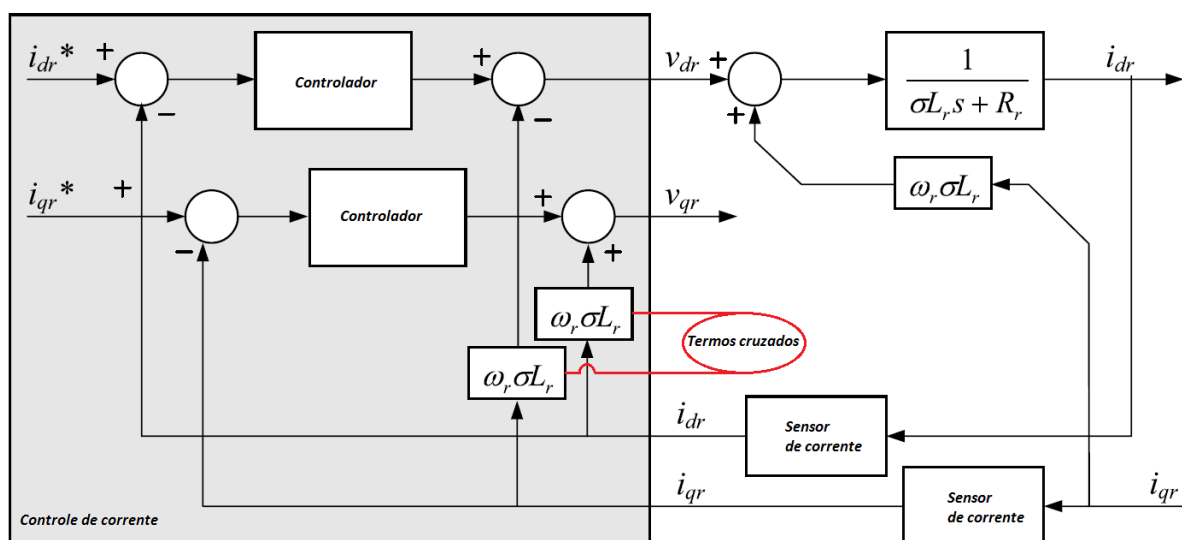
$$T_{em} = \frac{P_s}{\omega_s} = -\varphi_{ds} * \frac{L_m}{L_s} * i_{qr} \quad (3.35)$$

Ao usar a potência ativa estimada que o aerogerador fornece para o eixo do DFIG e a potência reativa que se deseja fornecer ou consumir, é possível prever as correntes que devem ser induzidas nos enrolamentos do rotor e do estator da máquina elétrica. Essa estimativa de corrente é feita utilizando as Equações (3.32) e (3.33). Essas correntes estimadas serão os valores de referência para o sistema de controle, e serão geradas por meio das tensões impostas pelo conversor que se encontra conectado aos terminais do rotor. Em linhas gerais o sistema de controle funciona da seguinte forma: a potência produzida pelo aerogerador é estimada com base na velocidade do vento; então, uma corrente de referência é calculada para um determinado valor de potência ativa e reativa. Em seguida, os valores de referência destas correntes são comparados com os valores reais das correntes que fluem nos enrolamentos máquina. O erro existente entre esses dois valores de corrente são informados ao sistema de controle, o qual calculará a tensão cujo conversor terá que impor nos terminais do rotor, a fim de corrigir esta diferença de valores. Dessa forma, o controle exercerá a função de minimizar o erro na corrente, melhorar o tempo de resposta do sistema e reduzir a amplitude dos transitórios de corrente.

Nota-se que as Equações (3.30) até a (3.35) se relacionam apenas em função da corrente do rotor, e também que as potências ativas e reativas são calculadas pelas correntes do rotor no eixo "q" e "d", respectivamente. Isso permite que o controle dessas potências seja realizado de maneira praticamente independente, sendo necessário apenas regular as tensões do rotor.

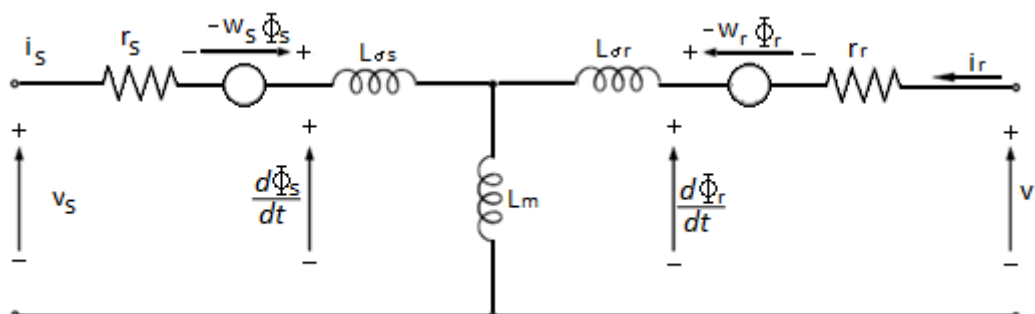
Os parâmetros dos controladores são obtidos a partir do método de cancelamento de polos (OGATA, 2010). Esse método é utilizado pelo fato de ser mais simples e a função de transferência do sistema ser de primeira ordem. A Figura 11 demonstra o esquema do sistema de controle.

**Figura 11: Malha de controle simplificada para o controle de corrente, para o eixo "d" e "q"**



Com base nas equações rotóricas e estáticas, o circuito, de cada fase da máquina elétrica, é mostrado na Figura 12:

**Figura 12: Circuito equivalente de cada fase da máquina**



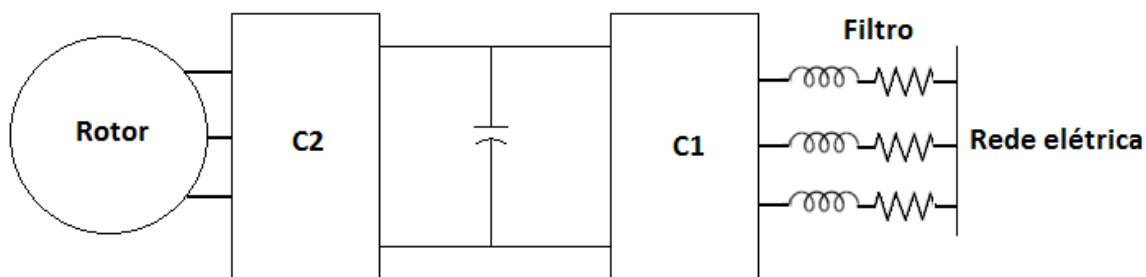
### 3.3.4 Controle do *link* capacitivo

Como os conversores estão sujeitos a variação de tensão, um capacitor é utilizado para minimizar as oscilações que ocorrem, devido ao chaveamento das chaves que compõe os conversores. Um controle simples é utilizado para manter a tensão praticamente constante entre os conversores. Com o controle funcionando de forma eficiente, garantir-se-á que a potência rotórica flua entre os conversores com poucas perdas, com o auxílio do controle do lado da rede, a tensão  $V_{cc}$  ficará em um valor constante.

### 3.3.5 Controle do lado da rede

Esse tipo de controle, que é realizado pelo conversor que está conectado à rede, possui a função de permitir o fluxo de potência entre rotor e a rede elétrica, seja gerando, ou consumindo potência. Na Figura 13 é apresentado onde o filtro é localizado no sistema de geração.

**Figura 13: Esquema do DFIG com o filtro**



Para o controle do lado da rede, foram feitas as seguintes considerações:

$$v_{ds} = v_g$$

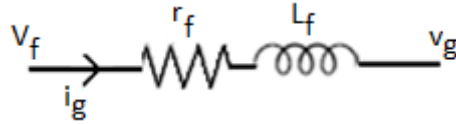
$$v_{qs} = 0$$

Em que:

$v_g$ : tensão da rede elétrica em que o gerador está conectado.

O controle é feito por meio da diferença de tensão entre o conversor C2 e a rede elétrica, cuja diferença produzirá um fluxo de corrente. As equações do fluxo de corrente entre o conversor e a rede são semelhantes às vistas na seção do controle do lado do rotor, visto que os circuitos são similares. Com base na Figura 14, as equações do filtro podem ser deduzidas, já na representação no eixo "d" e "q".

**Figura 14: Esquema do filtro, representando apenas uma fase**



Tem-se assim que:

$$v_{fd} = v_{gd} + L_f * \frac{di_{gd}}{dt} + r_f * i_{gd} - \omega_g * L_f * i_{gq} \quad (3.36)$$

$$v_{fq} = v_{gq} + L_f * \frac{di_{gq}}{dt} + r_f * i_{gq} - \omega_g * L_f * i_{gd} \quad (3.37)$$

Assim, ao manipular (3.36) e (3.37), as equações do filtro, no referencial  $dq$ , são dadas por:

$$\frac{di_{gd}}{dt} = \frac{v_{fd} - v_{gd} - r_f * i_{gd} + \omega_g * L_f * i_{gq}}{L_f} \quad (3.38)$$

$$\frac{di_{gq}}{dt} = \frac{v_{fq} - v_{gq} - r_f * i_{gq} - \omega_g * L_f * i_{gd}}{L_f} \quad (3.39)$$

A potência transferida à rede elétrica pelo rotor é dada, segundo Abad et al. (2011), por:

$$P_r = v_{gd} * i_{gd} \quad (3.40)$$

A potência reativa não é fornecida pelo rotor, uma vez que este fornece somente potência ativa proveniente da potência mecânica da rotação do eixo do gerador.

### 3.4 REPRESENTAÇÃO DA REDE ELÉTRICA

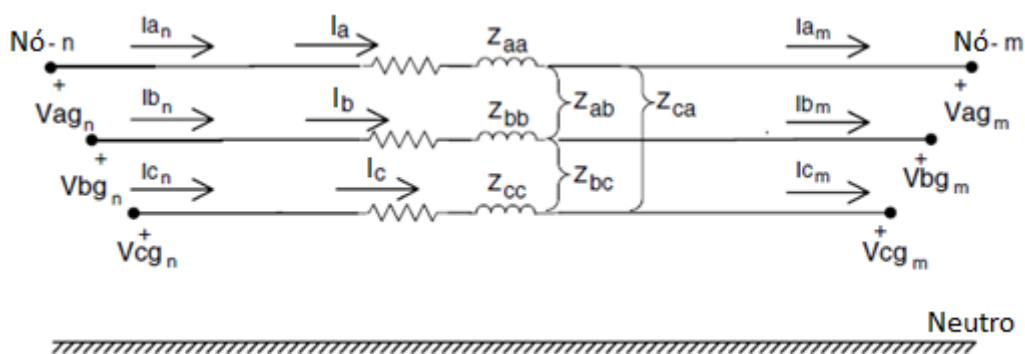
Para que se tenha fidelidade da simulação em comparação a uma rede elétrica real, o aerogerador desenvolvido em ambiente de simulação foi conectado a uma rede elétrica também desenvolvida neste mesmo ambiente. Em simulações de sistemas elétricos que envolvem várias barras, normalmente é utilizada uma representação monofásica de sequência positiva da rede. Esse modelo é utilizado para casos os quais a rede é balanceada e opera em condições de equilíbrio. No entanto, durante a ocorrência de curtos-circuitos assimétricos, a condição de equilíbrio não é verificada, gerando a necessidade de representar um sistema mais condizente com a realidade.

Nesse sentido, diante de um quadro de possível desequilíbrio entre fases, o sistema desenvolvido em plataforma de simulação foi modelado com a representação das três fases. Assim, a simulação possuirá semelhança com o sistema de transmissão elétrico real, além de viabilizar a simulação de curtos-circuitos assimétricos sem a necessidade de modificar a estrutura da rede, pois se sabe que na representação monofásica de sequência positiva, para simular dois curtos-circuitos distintos, é necessário reestruturar toda a rede elétrica.

#### 3.4.1 Modelo matemático da rede elétrica utilizado

Com a finalidade de reduzir a complexidade do modelo da rede elétrica e viabilizar a sua implementação, foi adotada a metodologia apresentada por William Kersting (2002), para linhas de transmissão, abordada a seguir. Essa representação é mostrada na Figura 15:

**Figura 15: Representação de uma linha trifásica**



Em que:

$Z_{aa}$ ,  $Z_{bb}$ ,  $Z_{cc}$ : impedância própria da linha;

$Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$ ,  $Z_{ca}$ : impedância mútua entre as fases da linha;

$I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ : corrente por fase;

$V_{agn}$ ,  $V_{bgn}$ ,  $V_{cgn}$ : tensões por fase no nó "n";

$V_{agm}$ ,  $V_{bgm}$ ,  $V_{cgm}$ : tensões por fase no nó "m".

De acordo com a Figura 15, tem-se que:

$$v_{agn} = z_{aa} * i_a + z_{ab} * i_b + z_{ac} * i_c + v_{agm}$$

$$v_{bgn} = z_{bb} * i_b + z_{ab} * i_a + z_{bc} * i_c + v_{bgm}$$

$$v_{cgn} = z_{cc} * i_c + z_{ac} * i_a + z_{bc} * i_b + v_{cgm}$$

Ao reescrever o sistema de equações extraído da Figura 15 na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_{agn} \\ v_{bgn} \\ v_{cgn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{agm} \\ v_{bgm} \\ v_{cgm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ab} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ac} & z_{bc} & z_{cc} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Sabe-se que:

$$[V_{012}] = [A^{-1}] * [V_{abc}]$$

No qual  $[A^{-1}]$ :

$$[A^{-1}] = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Ao aplicar  $[A^{-1}]$  em (3.41), resulta:

$$[V_{012gn}] = [A^{-1}] * [V_{abc}] + [A^{-1}] * [Z_{abc}][A] * [A^{-1}] * [i_{abc}]$$

Então, se tem que:

$$[Z_{012}] = [A^{-1}] * [Z_{abc}][A] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

Ao considerar que a linha de transmissão é transposta, os termos fora da diagonal principal da matriz  $[Z_{012}]$  são nulos. Então, as relações entre as impedâncias de sequência positiva, zero e as impedâncias própria,  $z_s$ , e mútua,  $z_m$ , são:

$$z_0 = Z_{00} = z_s + 2 * z_m \quad (3.42)$$

$$z_+ = Z_{11} = Z_{22} = z_s - z_m \quad (3.43)$$

Com a substituição das impedâncias pelas respectivas representações de sequência positiva e zero (equações do circuito mostrado na Figura 15) em (3.41), têm-se:

$$\begin{bmatrix} v_{agn} \\ v_{bgn} \\ v_{cgn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{agm} \\ v_{bgm} \\ v_{cgm} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 * z_+ + z_0 & z_+ - z_0 & z_+ - z_0 \\ z_+ - z_0 & 2 * z_+ + z_0 & z_+ - z_0 \\ z_+ - z_0 & z_+ - z_0 & 2 * z_+ + z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Agora, será feita uma manipulação matemática. O termo " $(z_0 - z_+) * i_a$ " será somado e subtraído em cada uma das fases, alterando-se a corrente  $i_a$  por  $i_b$  e  $i_c$  para as suas respectivas fases, isto é, será somado zero a cada equação, porém esta soma permitirá uma manipulação algébrica, como é visto a seguir.

Tem-se, assim, para a fase "a", a equação dada por:

$$v_{agn} = v_{agm} + \frac{1}{3} [(2 * z_+ + z_0)i_a + (z_0 - z_+)(i_b + i_c) + (z_0 - z_+)i_a - (z_0 - z_+)i_a]$$

Ao colocar os termos comuns em evidência, tem-se (3.45):

$$v_{agn} = v_{agm} + z_+ * i_a + \frac{1}{3}(z_0 - z_+)(i_a + i_b + i_c) \quad (3.45)$$

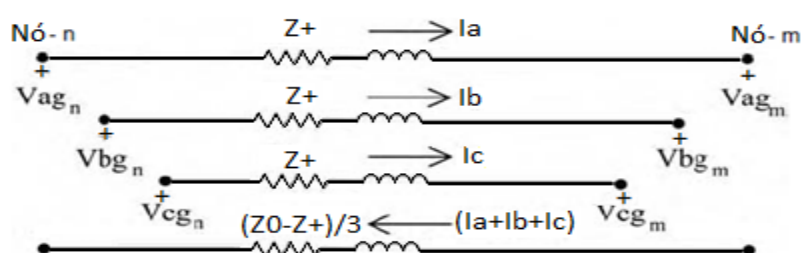
O mesmo aplica-se para as demais fases, resultando (3.46) e (3.47):

$$v_{bgn} = v_{bgm} + z_+ * i_b + \frac{1}{3}(z_0 - z_+)(i_a + i_b + i_c) \quad (3.46)$$

$$v_{cgn} = v_{cgm} + z_+ * i_c + \frac{1}{3}(z_0 - z_+)(i_a + i_b + i_c) \quad (3.47)$$

Com base nas equações, nota-se que a rede elétrica pode ser representada da seguinte forma:

**Figura 16: Representação de uma linha trifásica com aterramento**



**Fonte:** KERSTING et al., 2002

Com esse procedimento, a plataforma de simulação pode ser construída sem a necessidade de inserir indutâncias mútuas, como é observado na Figura 15, entre as linhas de transmissão para representar as impedâncias mútuas. Isso pode ser explicado com base nas Equações (3.45) a (3.47) a quais há uma corrente de neutro, que é representada pela soma das três correntes de cada uma das fases. Assim, pode-se adicionar um quarto condutor que representará todas as impedâncias mútuas entre cada uma das fases da linha de transmissão, como visto na Figura 16.

### 3.5 CONCLUSÃO

O embasamento teórico e matemático é um passo importante para garantir a correta operação da simulação desenvolvida neste trabalho, uma vez que esta plataforma de simulação visa simular um sistema de geração que seja o mais próximo possível do sistema de geração real. Com este modelo de linha de transmissão torna-se possível aplicar qualquer tipo



de curto-circuito, em especial os assimétricos, sem a necessidade de realizar modificações no simulador. Na próxima seção será mostrado o trabalho desenvolvido em ambiente de simulação e como a montagem do sistema foi realizada.

## **CAPÍTULO 04 – IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA**

Nesse capítulo será abordado o desenvolvimento da montagem do sistema que irá simular a rede elétrica juntamente com o aerogerador. O sistema foi dividido em cinco partes:

- Modelo de vento;
- Modelo mecânico;
- Gerador elétrico;
- Sistema de controle;
- Rede elétrica.

Ao utilizar esses modelos, de forma integrada, é possível simular um sistema que corresponda, de forma similar, a um real. Com esse sistema montado, é possível aplicar diversos tipos de perturbações e analisar o desempenho do mesmo durante estas perturbações.

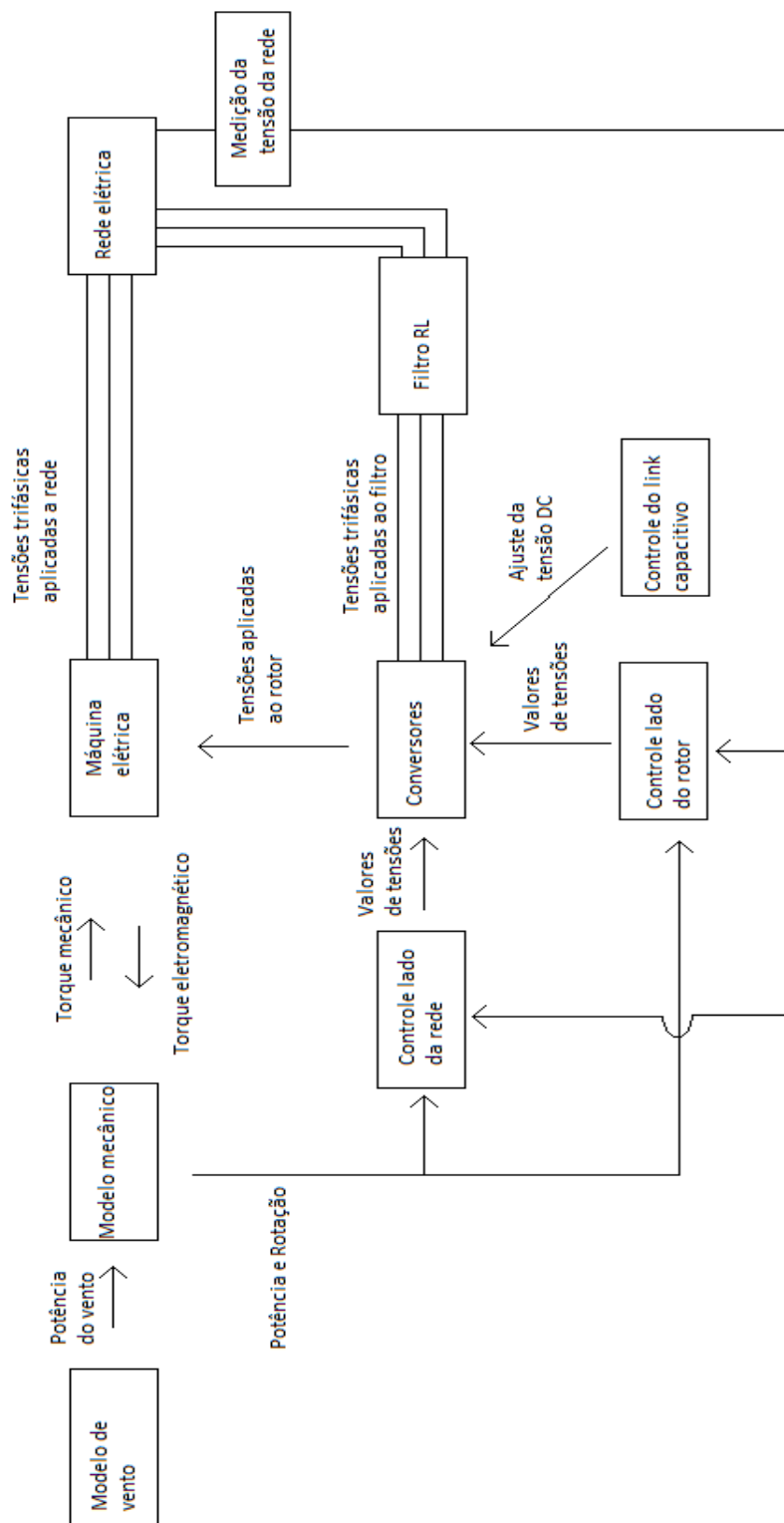
### **4.1 VISÃO GERAL**

Nesta seção será mostrada uma visão geral do sistema. Como já foi mencionado, o software utilizado para fazer as simulações foi o SIMULINK, nas próximas seções serão vistos os blocos desenvolvidos neste ambiente de simulação, além de abordar um pouco o ambiente de simulação escolhido para realizar as montagens.

#### **4.1.1 Desenvolvimento**

Como já citado, a simulação foi separada em cinco partes e divididas em uma unidade ou bloco. Com a adoção desse método de separar cada unidade, é possível detectar melhor os erros de simulação, uma vez que cada bloco é testado separadamente antes de ser inserido no sistema em desenvolvimento, além de possibilitar realizar as alterações desejadas para verificar o seu desempenho diante de novos parâmetros. O diagrama do sistema desenvolvido é mostrado na Figura 17:

**Figura 17: Esquema geral da simulação desenvolvida**



Todos os dados do sistema de geração foram separados e utilizados como dados de entrada nos cálculos durante a montagem da simulação. Ao fazer isso, todo o sistema está preparado para receber mudanças nos valores de parâmetros sem a necessidade de alterar os parâmetros de controle, da máquina elétrica, ou da rede. Isso possibilita simular aerogeradores de diversas capacidades com diferentes tipos de máquinas. Após realizar a construção de cada um dos blocos, mostrados na Figura 17, estes blocos foram inseridos em uma única estrutura que é acoplado à rede elétrica, representando o aerogerador.

#### **4.1.2 Plataforma de simulação utilizada**

A princípio, o PSIM era o simulador que estava sendo utilizado para elaborar este trabalho. No entanto, o PSIM deixava a desejar em alguns pontos, em especial na escolha do método numérico utilizado para desenvolver os cálculos. Então a plataforma de simulação escolhida foi o SIMULINK. O software disponibiliza diversas ferramentas, tais como sistemas elétricos, mecânicos, inteligência artificial, estudos relacionados à aerodinâmica, inclusive o próprio sistema DFIG previamente montado.

Porém, o simulador também apresenta elementos básicos, tais como funções matemáticas básicas, adição, subtração, multiplicação, divisão, integral e derivada. Para evitar conflitos na simulação, não foi usado nenhum componente previamente existente no banco de dados do SIMULINK; todos os blocos foram desenvolvidos a fim de que todas as equações apresentadas neste trabalho estivessem nas simulações de forma clara e visível. Além disso, os blocos previamente existentes não continham todos os parâmetros desejados para as simulações. Por fim, para elaborar o modelo da rede elétrica, foram empregados apenas os componentes mais simples, encontrados em qualquer simulador: a fonte de tensão, a resistência, a indutância e a capacitância.

## **4.2 MODELO DE VENTO**

Um aerogerador, semelhante a um gerador de hidroelétrica, funciona com a passagem de um fluido através de suas pás, mas não é possível controlar a quantidade de fluido que as atravessam. Assim, os aerogeradores estão sujeitos a velocidades de ventos com valores

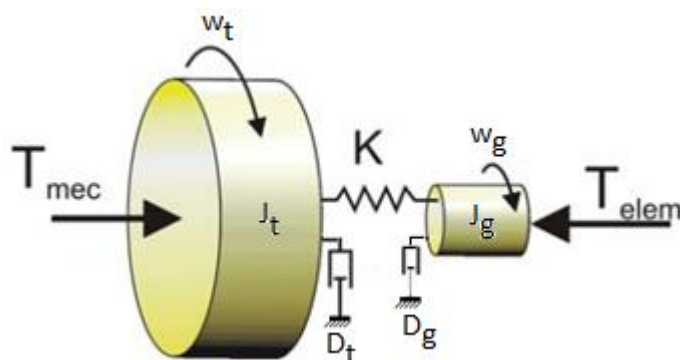
desconhecidos ao longo do tempo. Com a natureza estocástica do vento, é possível estimar sua velocidade com base em dados de períodos passados, mas sempre haverá desvio no valor estimado (LIBERMAN et al., 2002). Uma vez que o foco do trabalho é a análise da dinâmica do aerogerador diante de perturbações, os valores de velocidade de vento utilizado nas simulações são de natureza matemática, e não valores reais medidos. A equação que gerará os valores de velocidade de vento será mostrada na seção de resultados.

Como já citado no Capítulo 02, foi adotado uma curva, conforme demonstrado na Equação (2.8), em que, para cada valor de velocidade de vento, haverá um valor de potência mecânica sendo entregue ao aerogerador. Essa informação de potência é transmitida ao sistema de controle, para que o controle opere corretamente.

### 4.3 MODELO MECÂNICO

O modelo mecânico utilizado divide-se em cinco componentes: inércia da turbina, inércia do rotor, rigidez da conexão entre turbina e gerador, atrito viscoso da turbina e atrito viscoso do rotor. Esses elementos são mostrados na Figura 18.

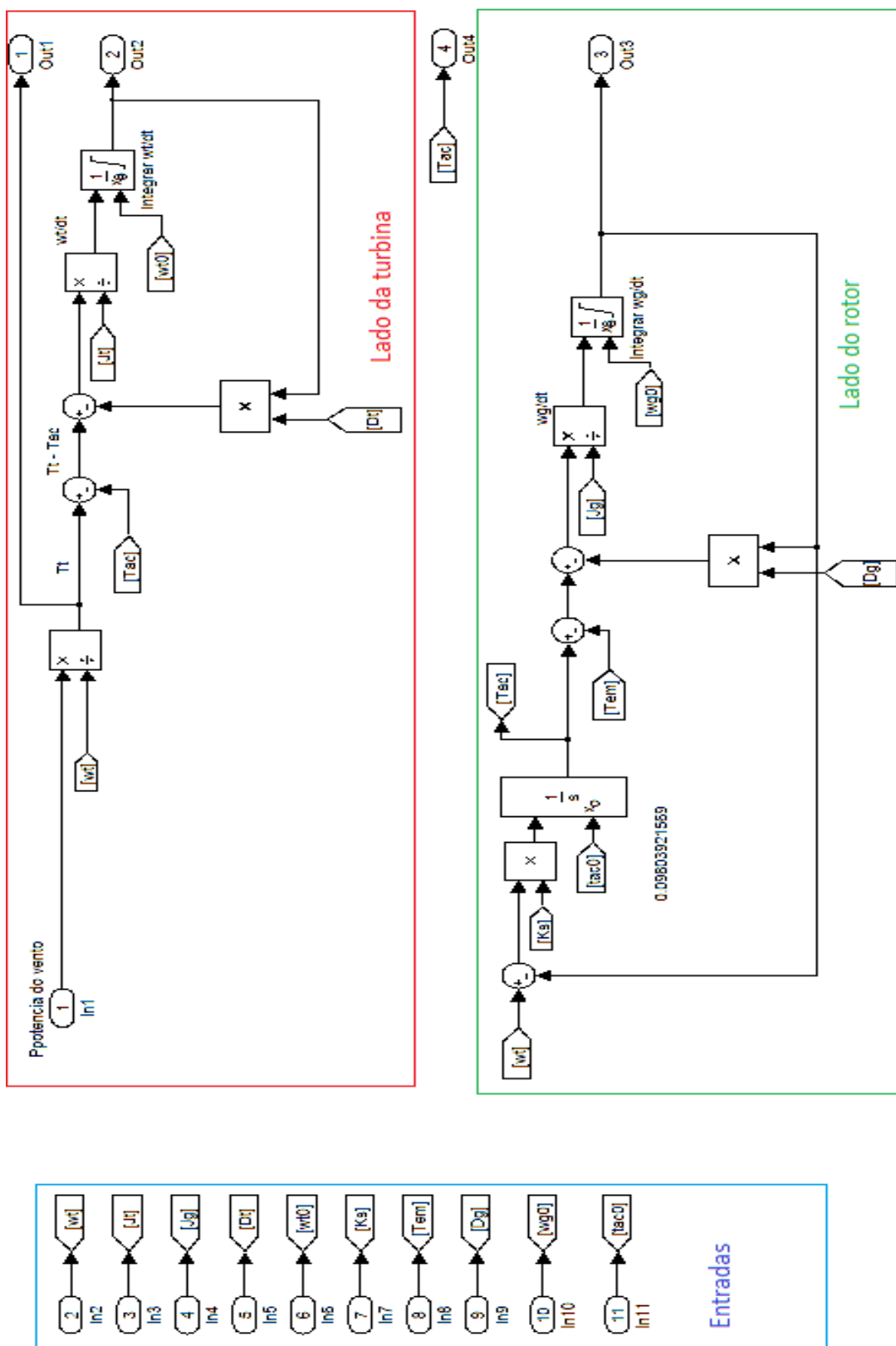
**Figura 18: Sistema de duas massas**



**Fonte:** PAVINATTO, 2005

Como mostrado na Figura 18, o sistema adotado é o sistema de duas massas. Na simulação implementada, todos os cinco parâmetros são ajustáveis. Na Figura 19 é mostrado o sistema montado em SIMULINK. Neste bloco existem 11 entradas e 04 saídas.

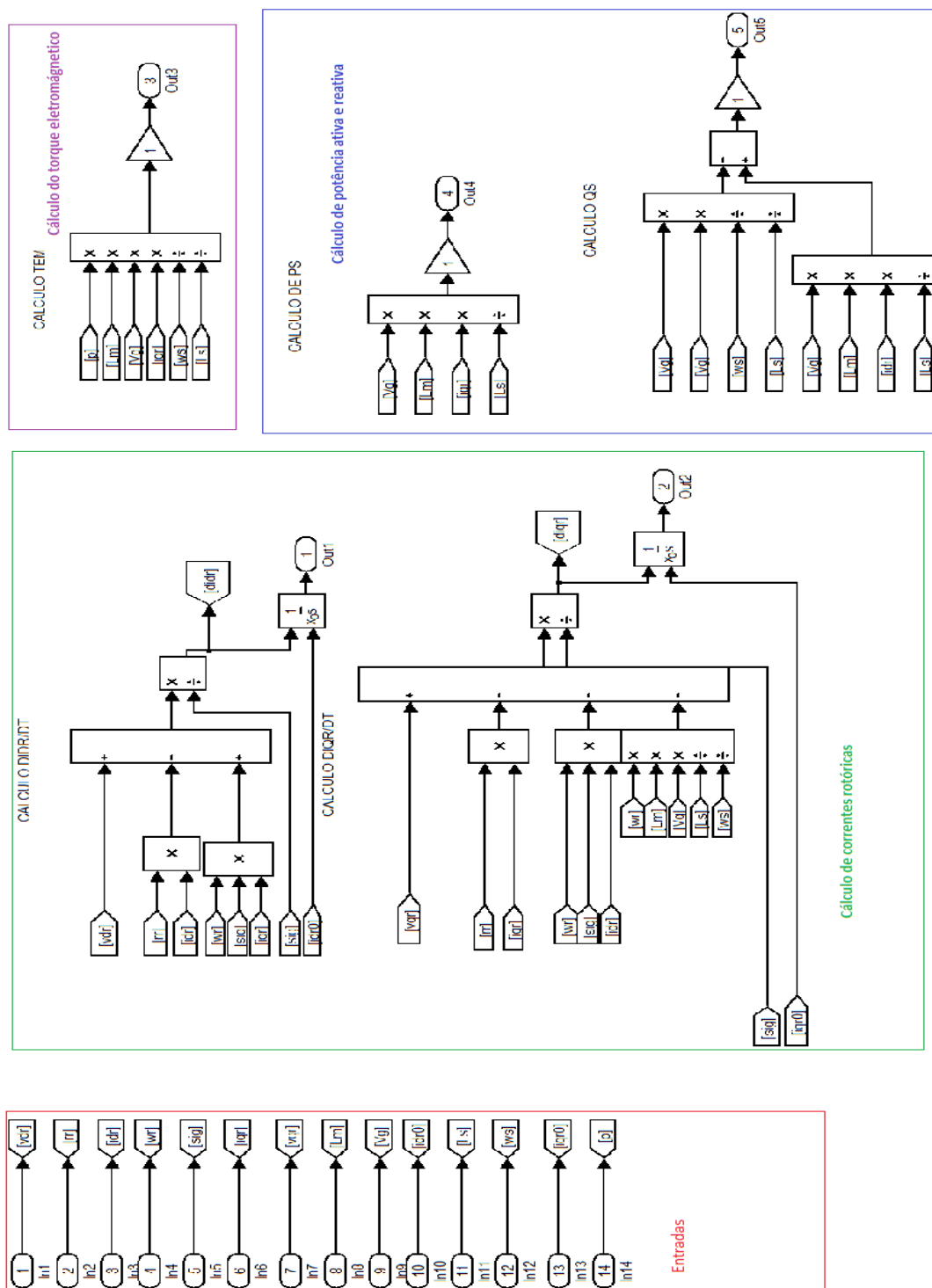
Figura 19: Sistema mecânico montado em SIMULINK



#### 4.4 MODELO DA MÁQUINA ELÉTRICA

O modelo matemático adotado na elaboração do sistema da máquina elétrica foi o modelo com as devidas transformações  $dq$  e considerações mencionadas no capítulo anterior. A partir do emprego desse método, o número de cálculos matemáticos é diminuído, tendo em vista que a matriz reduz em uma ordem. Nesse bloco são calculadas as correntes de eixo "d" e "q" do rotor, torque eletromagnético, potência ativa e reativa do estator. As variáveis fornecidas neste bloco são usadas no controle e no sistema mecânico. Isso gerará uma comunicação entre os sistemas, como foi visto na Figura 17. A Figura 20 contém o diagrama de blocos matemáticos responsáveis por simular o gerador, cuja construção do modelo contém, neste bloco, 14 entradas e 05 saídas.

**Figura 20: Montagem do modelo matemático do gerador**

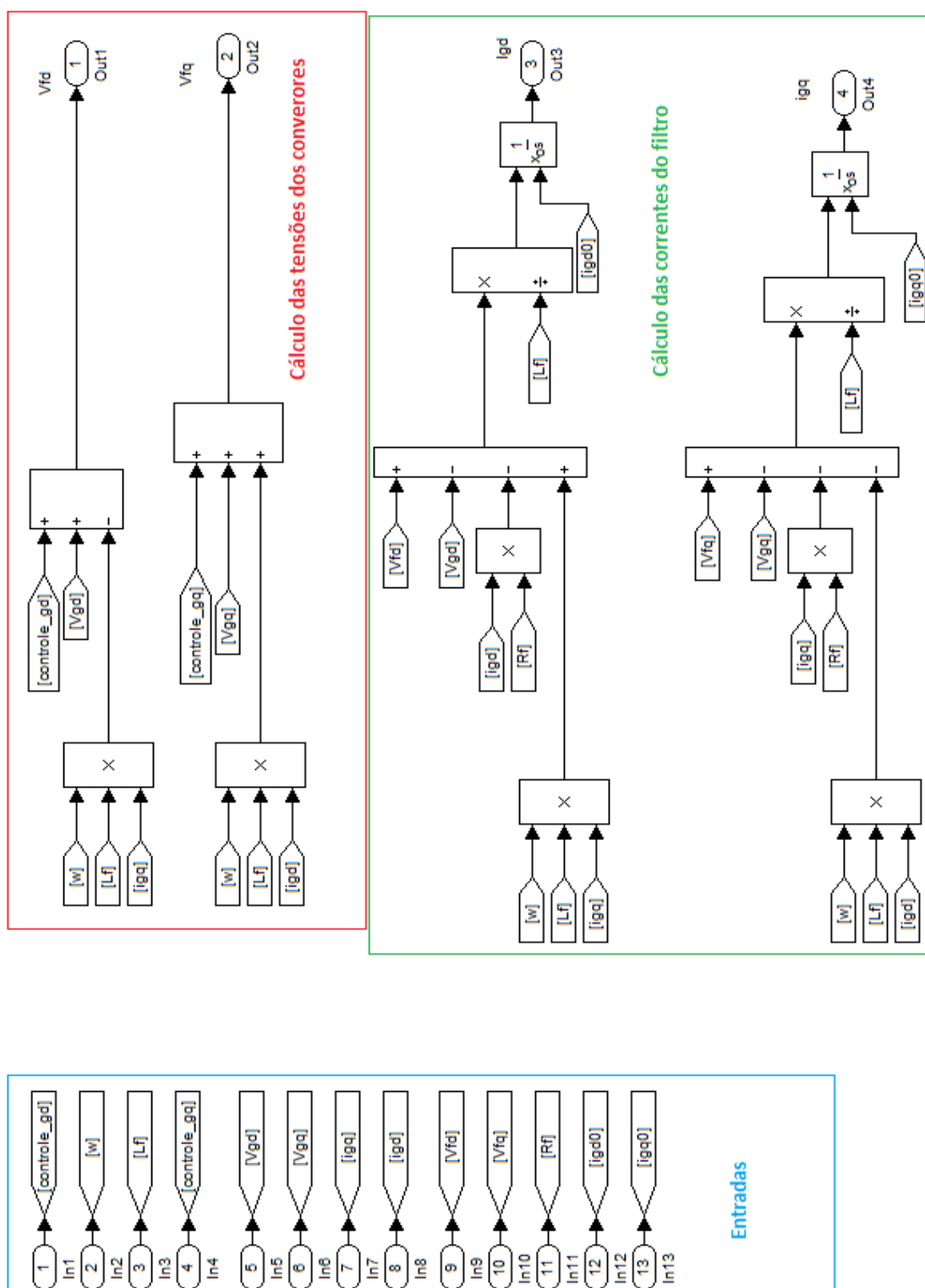


#### 4.5 FILTRO RL

A dinâmica elétrica do filtro é dada pelas Equações (3.38) e (3.39). A representação matemática do filtro na simulação é mostrada em diagrama de blocos, conforme Figura 21.



**Figura 21: Montagem do modelo matemático do filtro RL**



Como foi mencionado anteriormente, a função do filtro é permitir a ocorrência do fluxo de potência entre rotor e rede elétrica, além de eliminar harmônicos. Nesse bloco são calculadas as tensões a serem impostas no barramento pelo sistema de conversores, para que os valores desejados das correntes sejam obtidos.

## 4.6 SISTEMAS DE CONTROLE

Como mencionado em seções anteriores, os sistemas de controle são divididos em duas partes. Um para o lado do rotor e outro para o lado da rede. Na simulação feita, esses dois controles foram implementados em blocos distintos para facilitar modificações e localização de erros, além de viabilizar uma possível aplicação de técnicas distintas de controle em cada uma das partes.

### 4.6.1 Controle lado do rotor

Para realizar o controle do lado do rotor foram usados dois controladores do tipo PI. A malha de controle a ser controlada é dada por:

$$H(s) = \frac{1}{s * L_{\delta} + r_s} \quad (4.1)$$

A função de transferência, (4.1), é utilizada tanto para o eixo "d" como para o eixo "q", uma vez que os parâmetros da máquina são iguais nas três fases. Conforme demonstrado no capítulo anterior, a equação do diferencial de corrente do rotor, as Equações (3.30) e (3.31) foram utilizadas para obter a função de transferência e necessárias para elaborar o sistema de controle e simular a máquina elétrica. No entanto, existem dois termos de acoplamento cruzados no cálculo das correntes do rotor, isto é, para calcular  $i_{dr}$  é necessário obter  $i_{qr}$  e vice-versa. Com essa interação entre as duas equações, não seria simples encontrar a função de transferência do gerador. Então, para contornar esta situação, os mencionados termos de acoplamento são removidos e, após o cálculo do sinal de controle, são reinseridos (ABAD et al., 2011; FILIPE, 2014), isto equivale a uma compensação na tensão obtida.

Com a obtenção dos valores de corrente do rotor, a potência ativa é determinada com base na curva de potência, visto na Equação (2.8). Já a potência reativa é determinada pelo operador do sistema, ao ser fornecido o valor de  $Q_s$ . Com os valores das potências de referência, o controlador irá calcular diferentes valores de tensão para  $v_{dr}$  e  $v_{qr}$ , após obter estes valores é feita a transformação  $dq$  inversa dessas tensões, obtendo-se assim as tensões internas da máquina em sua forma  $abc$ , entre estas tensões e as tensões da rede elétrica existe uma diferença de ângulo. Essa diferença de fase é que resultará na injeção de diferentes



#### 4.6.2 Controle lado da rede

Semelhante ao controle do rotor, este tem a função de regular o fluxo de potência, porém desta vez é entre rotor e rede. Sua função é calcular qual valor de tensão deve ser imposta pelo conversor conectado à rede, para que a potência ativa atrelada ao rotor seja transferida para a rede ou da rede. A função de transferência do filtro é semelhante a da máquina, isto é, uma função de primeira ordem, com uma resistência e uma indutância. Esta função é dada por (4.2):

$$H(s) = \frac{1}{s * L_f + r_f} \quad (4.2)$$

Da mesma forma que a máquina elétrica, o filtro também possui termos cruzados de acoplamento que são inseridos novamente após os cálculos dos sinais de controle.

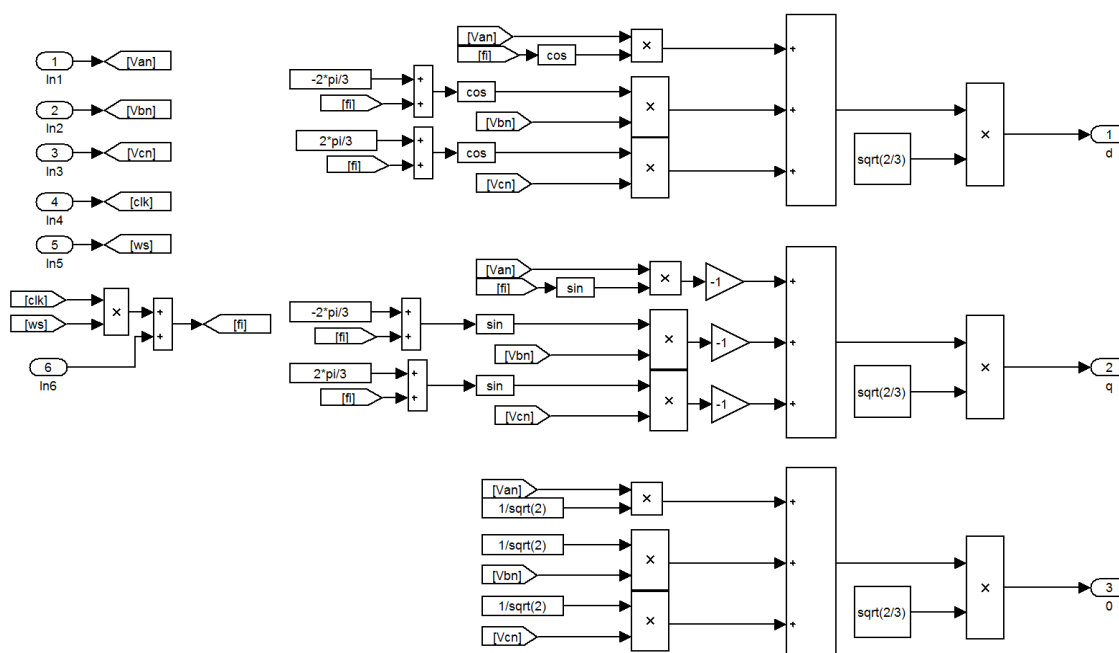
#### 4.7 DEMAIS BLOCOS

O SIMULINK possui diversas ferramentas prontas que possibilitam realizar operações comumente utilizadas pelos usuários, no entanto, possuem limitações tal como a possibilidade de fazer modificações de parâmetros, ou as ferramentas não possuem algumas particularidades desejadas. Para contornar este problema, blocos matemáticos foram elaborados para realizarem todas as operações matemáticas necessárias para a simulação.

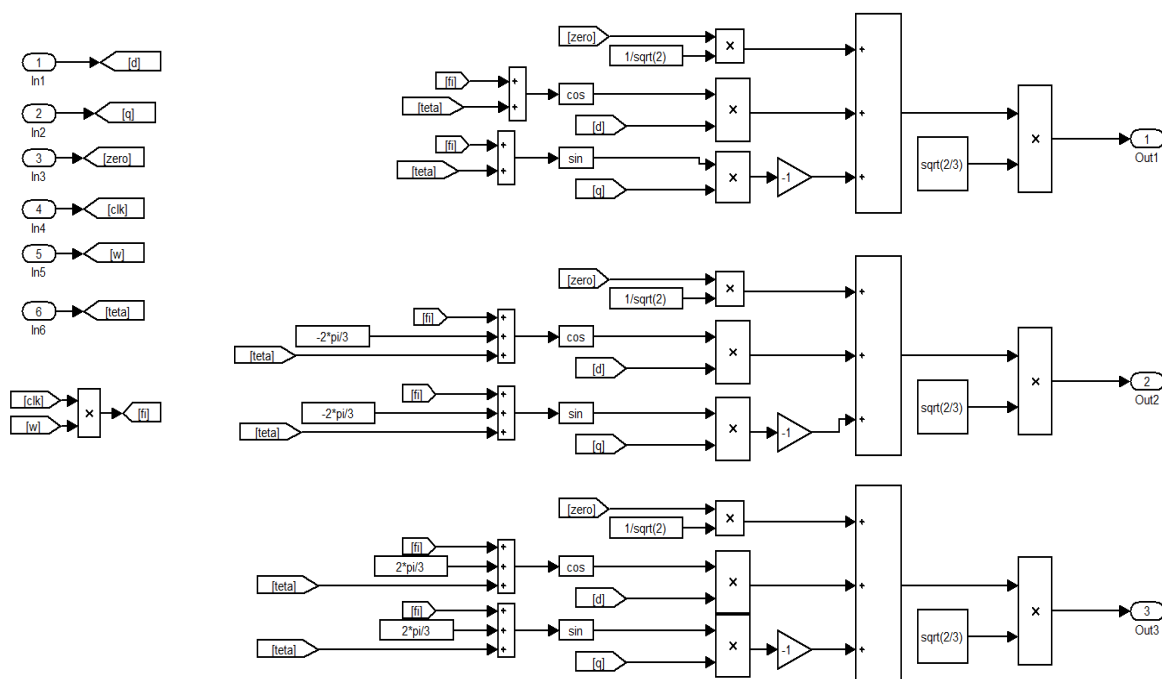
##### 4.7.1 Matriz transformação $dq$ e inversa

Como a matriz de transformação utilizada possui algumas características próprias, foi elaborado um bloco que realizasse a transformação  $dq$  e a inversa da mesma, a montagem é mostrada nas Figura 23 e Figura 24.

**Figura 23: Montagem do modelo matemático da transformação dq**



**Figura 24: Montagem do modelo matemático da transformação inversa dq**



A transformação inversa é utilizada para calcular quais os valores de tensão o conversor deve impor à rede com base nas tensões fornecidas pelos controladores. Ao fornecer os valores na forma de  $v_d$  e  $v_q$ , a transformação inversa é realizada. Deve-se levar em conta o ângulo da rede elétrica no ponto em que o aerogerador está conectado para que o

sistema esteja sincronizado com a rede elétrica. Por fim, os valores de tensões, na sua forma trifásica  $v_{abc}$  são obtidos, sendo estes os valores que o conversor deve impor na rede elétrica.

#### 4.7.2 Cálculo do ângulo da rede

Em Thiago de Paula Machado Bazzo (2007) o ângulo da rede elétrica onde o sistema de geração está conectado, é calculado utilizando a transformação de Clarke como é mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

As tensões  $v_\alpha$  e  $v_\beta$  são ortogonais entre si, no qual o ângulo da rede é refletido no módulo dessas tensões. Logo, o ângulo da rede elétrica,  $\theta_g$ , é dado por (4.3):

$$\theta_g = \tan^{-1} \left( \frac{v_\alpha}{v_\beta} \right) \quad (4.3)$$

No entanto, através de uma análise das tensões no eixo "d" e "q" percebeu-se que o ângulo da rede elétrica pode ser obtido com base nas tensões  $v_d$  e  $v_q$ , por meio da relação (4.4):

$$\theta_g = \sin^{-1} \left( \frac{v_d}{\sqrt{v_d^2 + v_q^2}} \right) \quad (4.4)$$

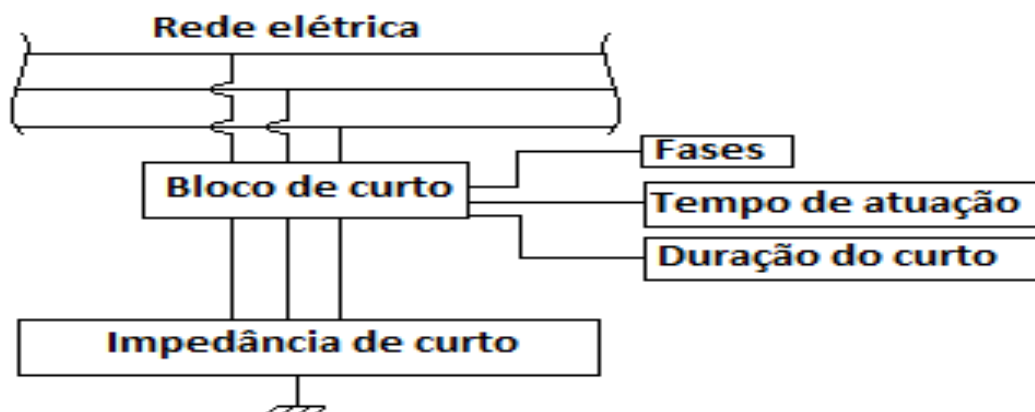
Para encontrar o valor de  $\theta_g$ , poderia ser utilizada a mesma relação dada em (4.3), mas foi empregada a relação dada em (4.4). A fazer uso desse artifício, as ocorrências de divisões por zero são evitadas, o que pode ocorrer em (4.3). A partir do ângulo calculado, é possível sincronizar o gerador com a rede elétrica por meio das tensões impostas pelo conversor conectado à rede. Sem a sincronia, o sistema de geração não forneceria os valores desejados de potência. Isso causaria uma mudança no fator de potência, além da possibilidade de desestabilizar o sistema, pois este iria constantemente alterar o fator de potência no ponto em que está conectado que, por sua vez, seria medido novamente pelo sistema, uma nova tensão

seria calculada. Esse *loop* de medir um erro e inserir outro erro continuaria até o sistema parar de funcionar e, possivelmente, entrar em colapso.

#### 4.8 CURTO-CIRCUITO

Uma vez que o trabalho desenvolvido visa também analisar a dinâmica do sistema diante de curtos-circuitos, fez-se necessário construir um bloco que implemente curtos-circuitos no sistema. Para tal, foi desenvolvido um bloco (Figura 25), com as ferramentas disponíveis no SIMULINK, que simplificaria a aplicação de curtos-circuitos em qualquer ponto da rede. Com este bloco, é possível escolher o número desejado de fases e o tempo em que o curto-circuito é aplicado com sua respectiva duração. Este bloco foi feito utilizando tiristores ideais, pois através destes dispositivos é possível aplicar um curto-circuito sem que haja influência das impedâncias inerentes dos tiristores. O curto-circuito pode ser com ou sem impedância entre a linha e a terra. Ao chavear apenas uma fase, duas ou as três, o curto-circuito pode ser monofásico, bifásico ou trifásico.

**Figura 25: Diagrama da montagem do bloco de curto-circuito**



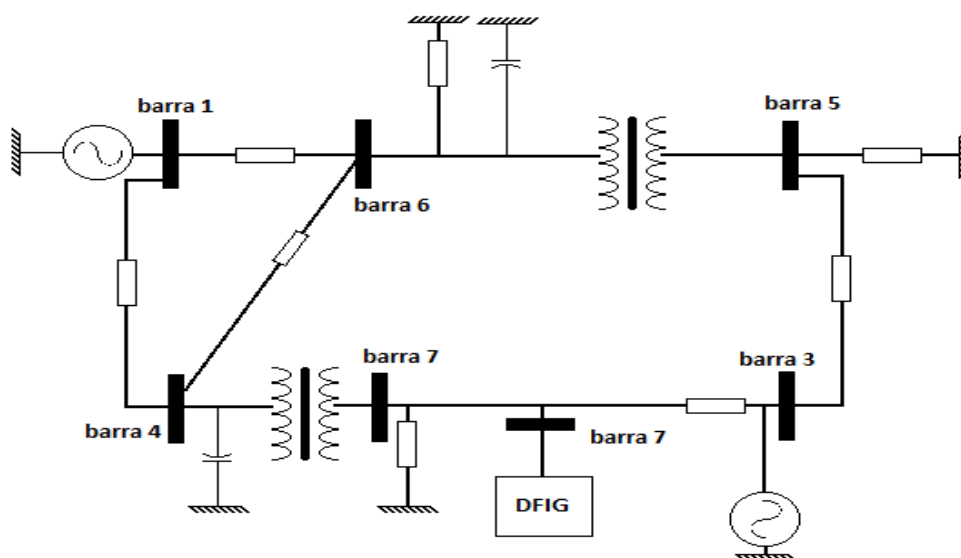
## CAPÍTULO 05 – RESULTADOS

Nesse capítulo, são mostrados os resultados das simulações de sistemas de potência, contendo o gerador eólico do tipo DFIG. Nessas simulações são analisados os resultados para diferentes tipos de situações em que o sistema elétrico está exposto.

### 5.1 CASOS ESTUDADOS

A rede elétrica adotada na simulação é um sistema de sete barras, como mostra a Figura 26, composta de cargas trifásicas, sistema de geração e banco de capacitores. A rede contém cinco linhas de transmissão, cada uma com suas respectivas indutâncias e resistências. Conta-se também com três cargas trifásicas, cada uma consumindo diferentes valores de potências ativa e reativa, dois bancos de capacitores e dois transformadores, cada um com características distintas de impedância. Essa rede elétrica foi escolhida por ter componentes ativos e reativos, além de possuir mais de uma fonte de geração, defasadas entre si (BARROS, 2006).

**Figura 26: Rede elétrica utilizada para simulação**



A representação da rede elétrica mostrada na Figura 26 está representada somente por uma única fase. No entanto, a rede elétrica foi modelada com as três fases, mais o quarto condutor que representará as impedâncias mútuas entre as linhas.



Para efeito de estudo foram simulados três possíveis casos. No primeiro, foi aplicada uma variação de velocidade do vento, cujo sistema de controle terá de atuar para que a potência transferida à rede elétrica acompanhe a potência imposta pela massa de ar que incide sobre as pás do aerogerador. No segundo caso, o aerogerador está operando sobre velocidade de vento constante e em dois instantes de tempo distintos dois curtos-circuitos são aplicados na barra 06, sendo um curto-circuito monofásico e outro trifásico. No terceiro caso, um curto-circuito monofásico e um trifásico são aplicados na barra em que o aerogerador está conectado, a barra 07. Este último cenário é o mais severo para o DFIG, pois está exposto a uma grande variação de carga em seus terminais.

## 5.2 DFIG SOBRE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DE VENTO

Na simulação desenvolvida, foram aplicadas variações na velocidade de vento ao aerogerador que se encontra conectado à barra 07. A barra 01 é um barramento infinito, conseqüentemente é considerado como a de referência do sistema. De acordo com Stephen J. Chapman (2013), um barramento infinito é uma fonte com frequência e tensão invariável, tanto em módulo quanto em fase. Esse barramento pode ser equiparado com o sistema hidroelétrico do Brasil, que possui boa estabilidade e grande inércia contra perturbações externas.

O modelo matemático adotado que reproduzirá os valores de velocidade de vento ao longo da simulação é o modelo dado a seguir, pela Equação (5.1) (KARINIOTAKIS, STAVRAKAKIS, 1995).

$$V_w = V_c + V_{sin} + V_r + V_n$$

$$V_r = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \frac{t - T_{r0}}{T_r} \right) \right], & \text{se } T_{r0} \leq t \leq T_{r0} + T_r \\ 0, & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad (5.1)$$

No qual:

$V_w$ : velocidade do vento;

$V_c$ : valor constante de velocidade de vento;

$V_{sin}$ : valor de oscilação presente no vento;

$V_r$ : valor de pico da rajada de vento;

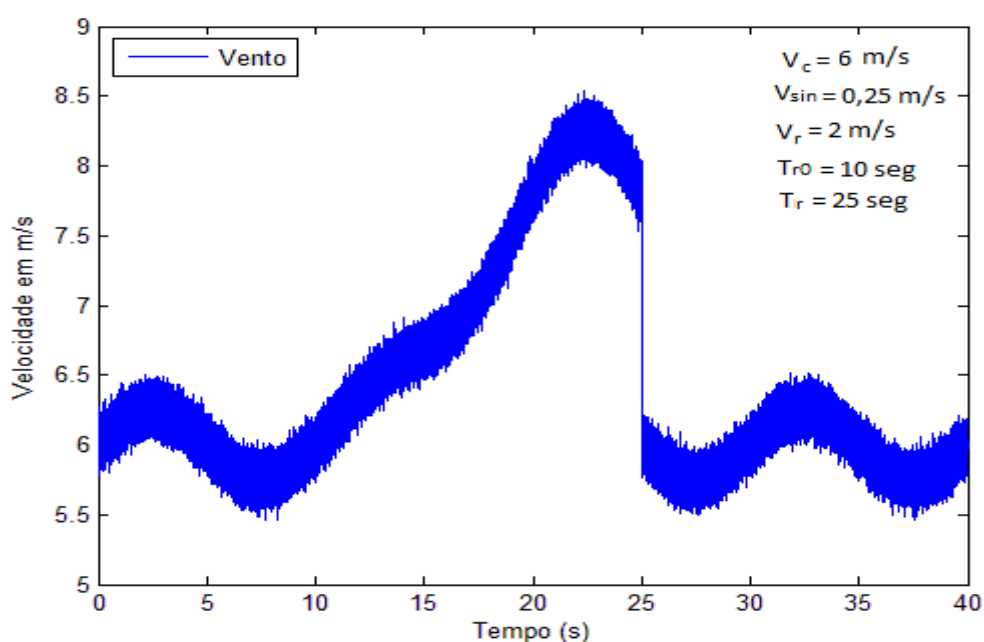
$V_n$ : valor de pequenas oscilações presente no vento, de caráter aleatório;

$T_{r0}$ : instante de tempo em que a rajada de vento inicia;

$T_r$ : instante de tempo em que a rajada de vento cessa.

Ao introduzir esse modelo de equação no SIMULINK, obteve-se o gráfico de velocidade de vento, mostrado na Figura 27.

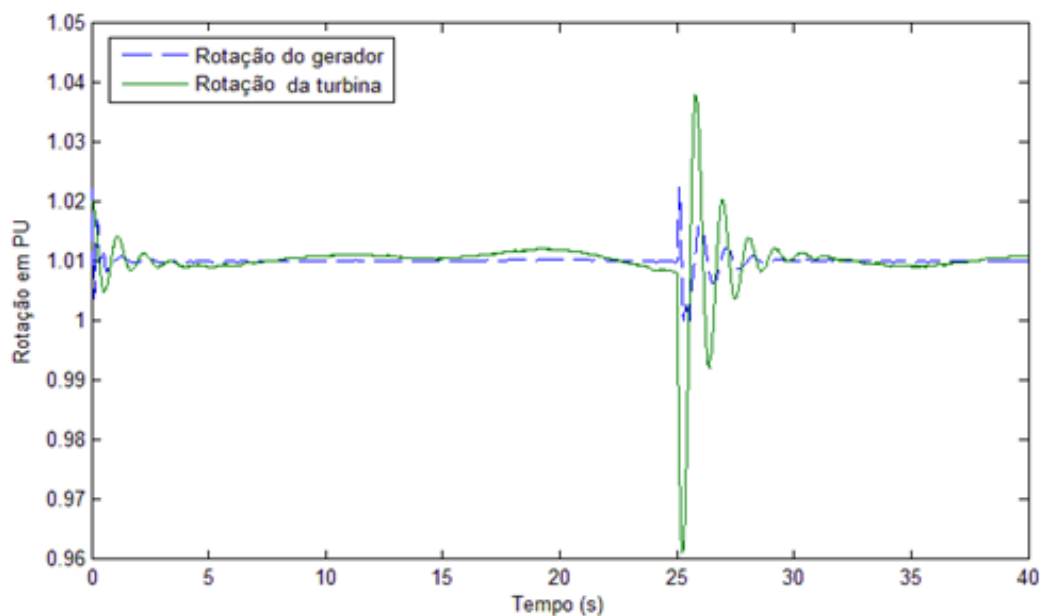
**Figura 27: Velocidade do vento em função do tempo**



Na simulação, foi adotada a velocidade *cut-in* em 1 m/s e a velocidade de *cut-off* em 15m/s. Também foi definido que o aerogerador operaria com a uma potência reativa de -0.011 p.u. e ativa máxima fornecida pelo aerogerador de 0.0346 p.u., sendo esta potência alcançada quando o aerogerador está operando com uma velocidade de vento de 15m/s. Para todo o sistema, a potência base adotada foi de 100MVA e tensão base de 480V.

Diante da velocidade de vento mostrada na Figura 27, a rotação do sistema tem o comportamento mostrado na Figura 28.

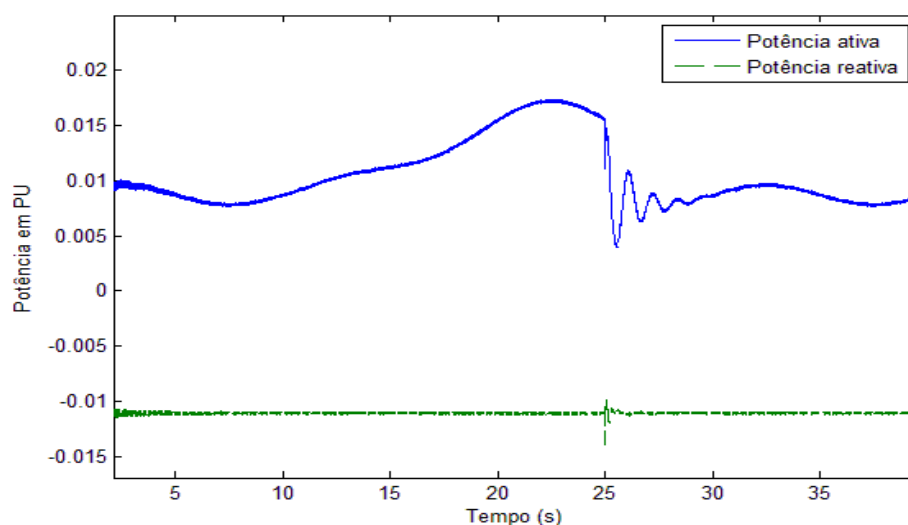
**Figura 28: Rotação da turbina e do rotor**



Nota-se que, diante de perturbações suaves, o eixo da turbina irá oscilar junto com a variação da velocidade de vento. No entanto, devido à torção mecânica entre o eixo da turbina e o rotor, esta oscilação não é transferida imediatamente para o rotor, permitindo que opere com menos oscilações. O sistema de controle atua de forma a diminuir as oscilações.

A potência fornecida pelo DFIG (Figura 29) se assemelha a curva descrita na Figura 27.

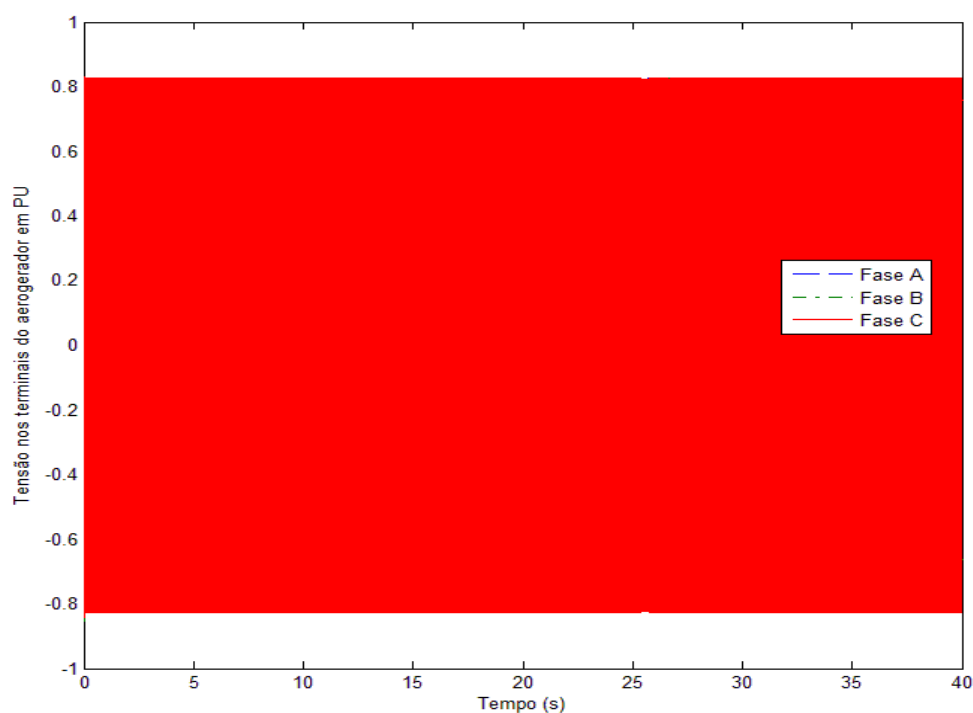
**Figura 29: Potência ativa e reativa fornecida pelo DFIG**



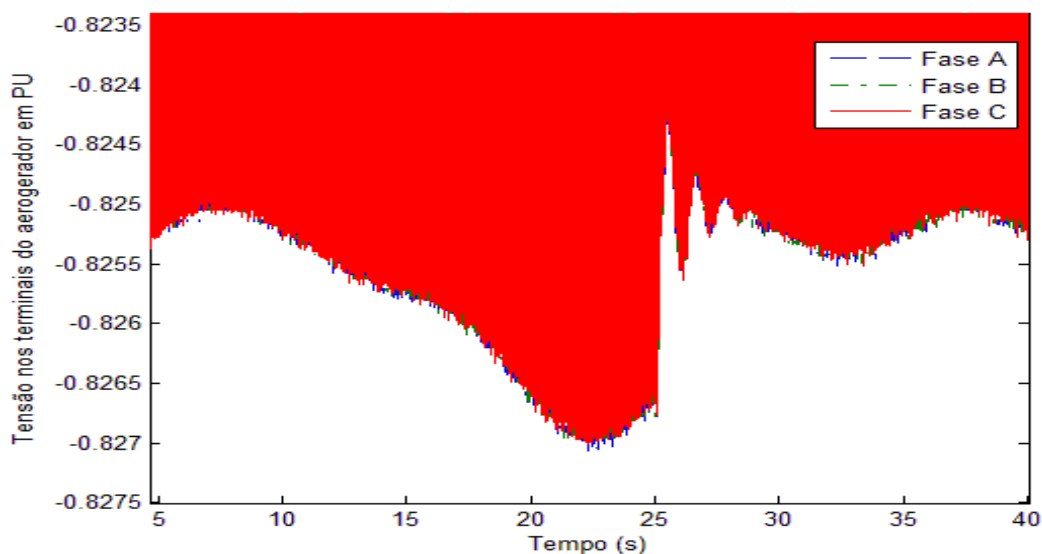
Nota-se, na Figura 29, que a potência reativa, apesar de ser ajustada para um valor constante de operação, sofre oscilações durante a oscilação de velocidade de vento. Isso ocorre devido aos termos cruzados, mencionados anteriormente. Todavia, em decorrência dos pequenos valores das componentes presentes nesses termos cruzados, as perturbações geradas são mínimas, não apresentando problema no fluxo de potência reativa.

Durante a operação de um sistema de geração, este não deve impor alterações de tensão e frequência à rede elétrica em que está conectado. No entanto, o sistema impõe pequenas oscilações no barramento, como é observado na Figura 30 e Figura 31, em que a Figura 31 apresenta um *zoom* da Figura 30, nas tensões entre intervalo de tempo de 20 a 25 segundos.

**Figura 30: Tensões no barramento durante a oscilação do vento**



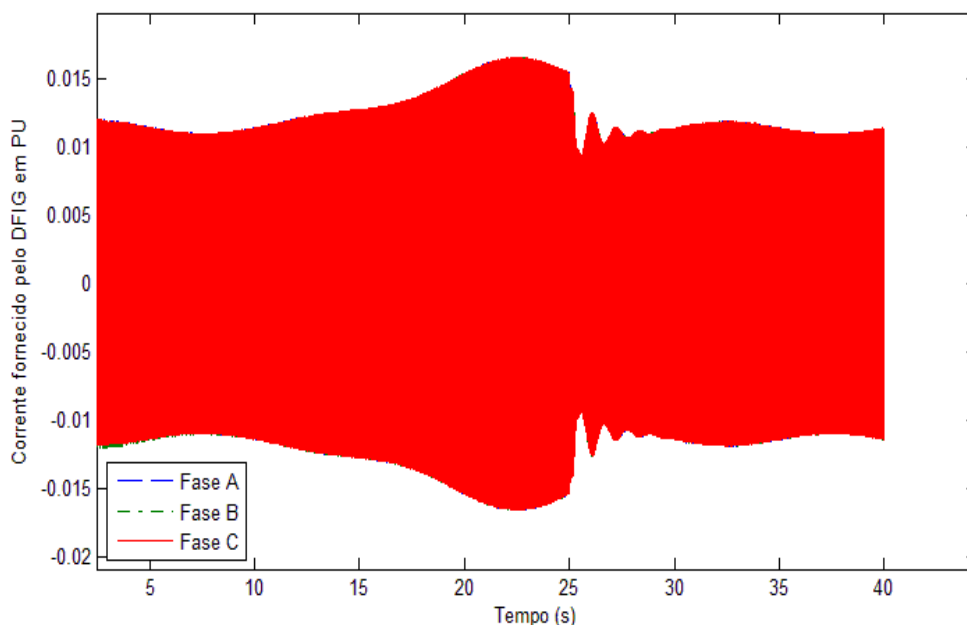
**Figura 31: Zoom das tensões em um determinado período de tempo (entre 20 e 25 segundos), referente à Figura 30**



Apesar das oscilações das tensões observadas na Figura 31, estas estão dentro do estabelecido pela ANEEL que estabelece que a tensão fornecida não deva oscilar 0,05 p.u., para mais ou para menos (MEIRA et al., 2013). No caso estudado, a oscilação foi de aproximadamente 0,005 p.u., durante a variação da velocidade de vento, como é mostrado na Figura 30 e Figura 31, desta forma, não ocorreu flutuação significativa na tensão durante toda a variação de velocidade do vento.

Diante do quadro de que a tensão oscilará pouco durante a variação de vento, a corrente que o aerogerador injeta na rede irá oscilar durante a variação da velocidade de vento, para que assim a potência fornecida à rede elétrica seja a desejada. Conclui-se que a tensão pode ser considerada constante e a corrente variável, como era esperado, visto que o sistema de controle visa regular a corrente do DFIG. Diante destas oscilações a frequência de operação se manteve constante em 60 Hz. A Figura 32 mostra essa variação de corrente elétrica durante a variação da velocidade de vento. Nota-se que os picos de corrente tangenciam a curva de potência do vento (Figura 29).

**Figura 32: Corrente fornecida à barra em que o sistema está conectado (barra 07)**



### 5.3 ANÁLISE DO SISTEMA DIANTE DE CURTO-CIRCUITO NA BARRA 06

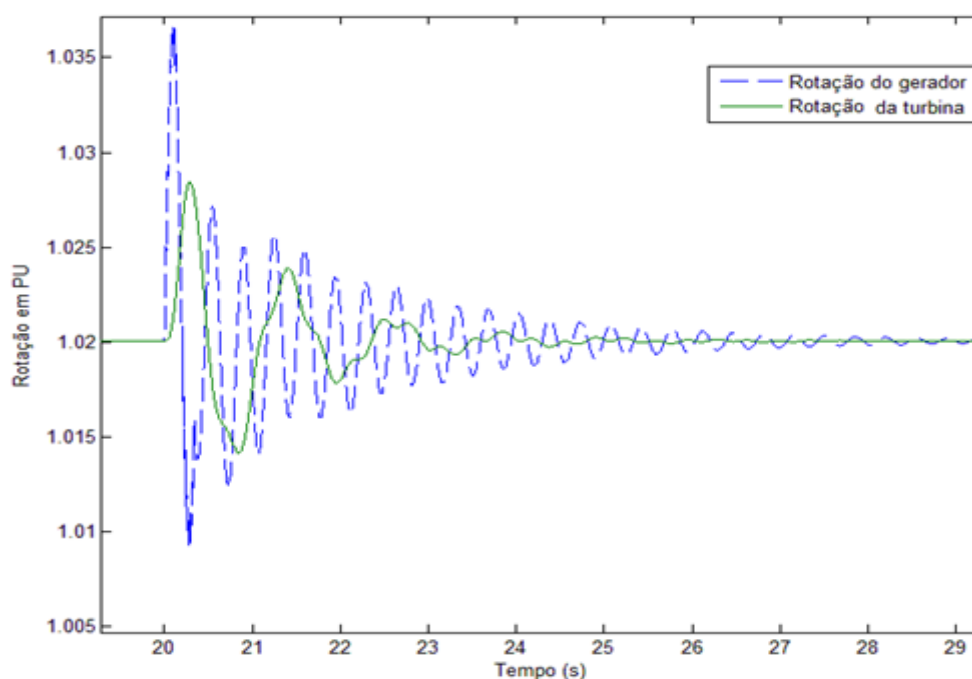
O sistema elétrico está sempre sujeito a sofrer falhas as quais a mais violenta é o curto-circuito. Nessa seção serão estudados os casos de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos, que irão ocorrer em uma barra relativamente distante da barra em que o DFIG está conectado, no caso, barra 06. O objetivo desse estudo é analisar com detalhes a influência que esses curtos-circuitos irão impor ao aerogerador. Como o sistema montado na simulação está com as três fases representadas, a análise e a aplicação do curto-circuito tornam-se mais fáceis de serem realizadas.

Em instantes de tempo distintos foram aplicados dois tipos de curtos-circuitos, um monofásico a terra e um trifásico a terra, ambos na barra 06. O valor da impedância do curto-circuito utilizado foi aproximadamente dez vezes menor do que o valor de impedância da linha de transmissão mais próxima da barra; isto seria o equivalente a uma seção da linha de transmissão cair ao solo. Os curtos-circuitos aplicados tiveram uma duração de aproximadamente 5 a 20 ciclos da frequência da rede. Esse valor de duração foi escolhido por ser o tempo levado para a proteção atuar, aproximadamente. O tempo de atuação pode ser

maior ou menor, e irá depender do sistema de proteção adotado e da corrente de curto-circuito (CARDOSO, 2009).

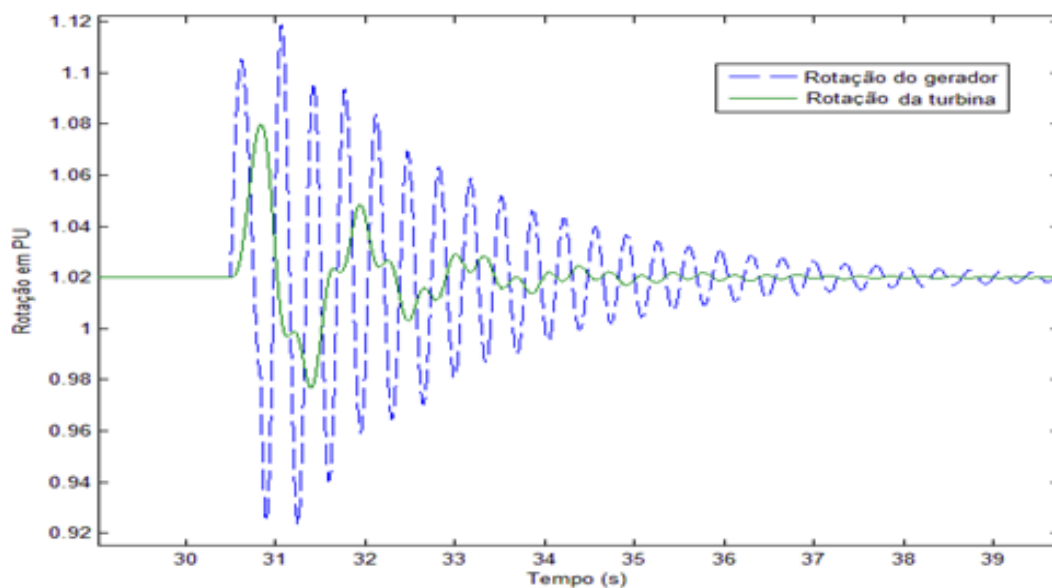
Os resultados a seguir são referentes ao curto-circuito monofásico a terra, com duração de aproximadamente 0,34 segundos (20 ciclos da rede elétrica). Durante o curto-circuito, o aerogerador continuou operando, sem que houvesse qualquer desacoplamento entre máquina e rede elétrica, além de não haver alteração na velocidade de vento. Ao analisar a velocidade de rotação, oscilações bruscas são observadas, conforme mostrado na Figura 33.

**Figura 33: Velocidade de rotação do aerogerador e rotor do DFIG, para o curto-circuito monofásico na barra 06**



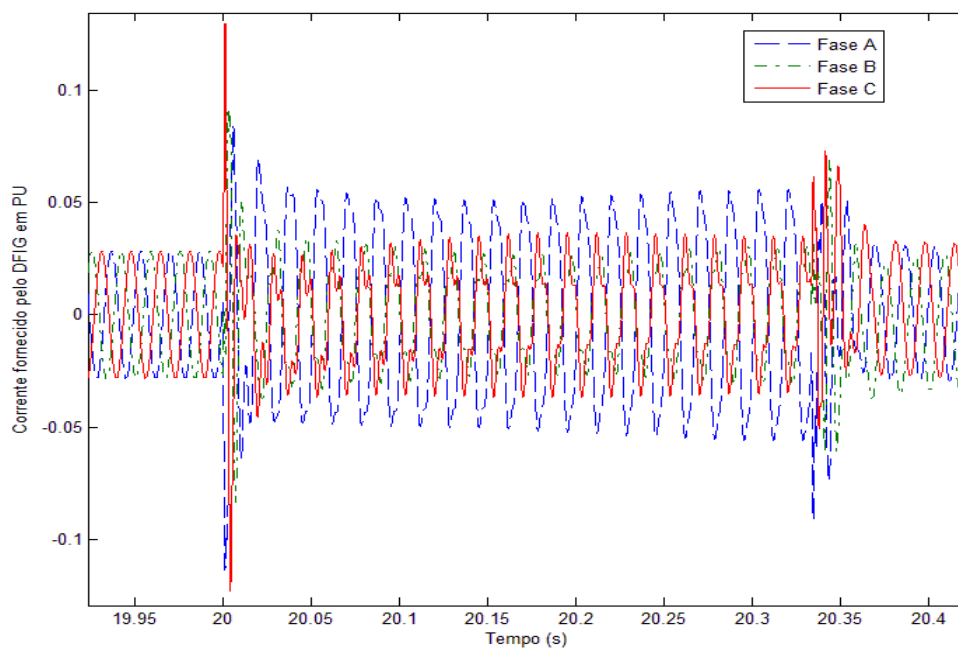
De acordo com a Figura 33, durante o curto-circuito, a potência fornecida pelo DFIG cai devido à queda de tensão. Logo, a velocidade de rotação da máquina irá aumentar, o mesmo ocorre para o curto-circuito trifásico. Diante do curto-circuito trifásico, as oscilações do sistema são mais críticas, em razão da severidade do curto-circuito também ser maior, conforme pode ser visto na Figura 34.

**Figura 34: Velocidade de rotação do aerogerador e rotor do DFIG para o curto-circuito trifásico na barra 06**



Devido à conexão existente entre as fases, o curto-circuito monofásico gera desbalanceamento de corrente entre as fases, claramente visto na Figura 35, como era esperado de um curto-circuito assimétrico. Isso mostra que o modelo de rede elétrica adotado está funcionando como o esperado.

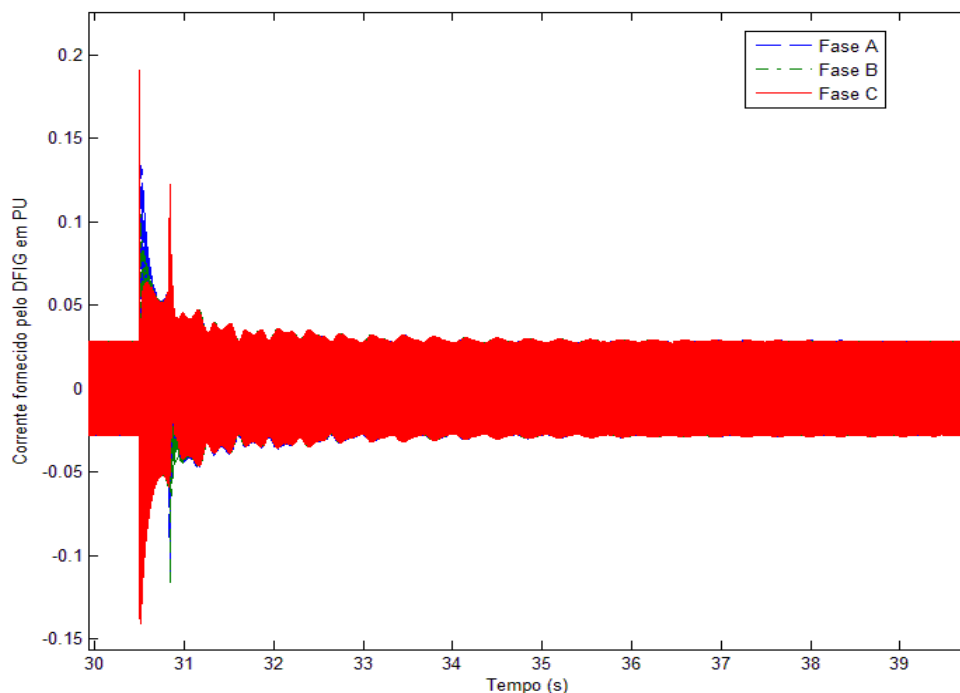
**Figura 35: Correntes fornecidas pelo aerogerador, durante e após o curto-circuito monofásico na barra 06**





Na Figura 36, são mostradas as correntes antes e depois de um curto-circuito trifásico.

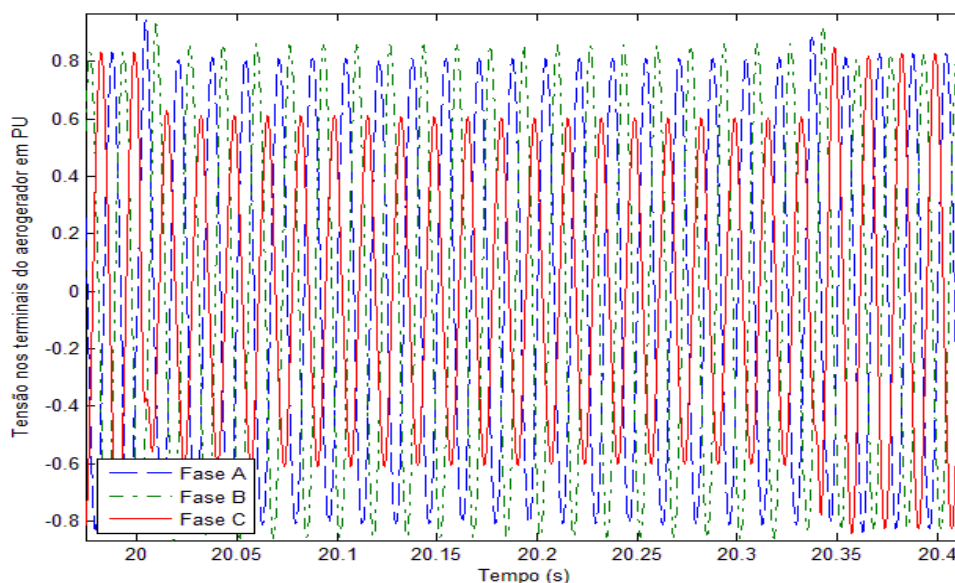
**Figura 36: Correntes fornecidas pelo aerogerador, durante e após o curto-circuito trifásico na barra 06**



Em comparação ao curto-circuito monofásico, o curto-circuito trifásico, depois de encerrado, leva mais tempo para que ocorra a estabilização do sistema, uma vez que a severidade é maior, causando um distúrbio maior aos dispositivos conectados à rede.

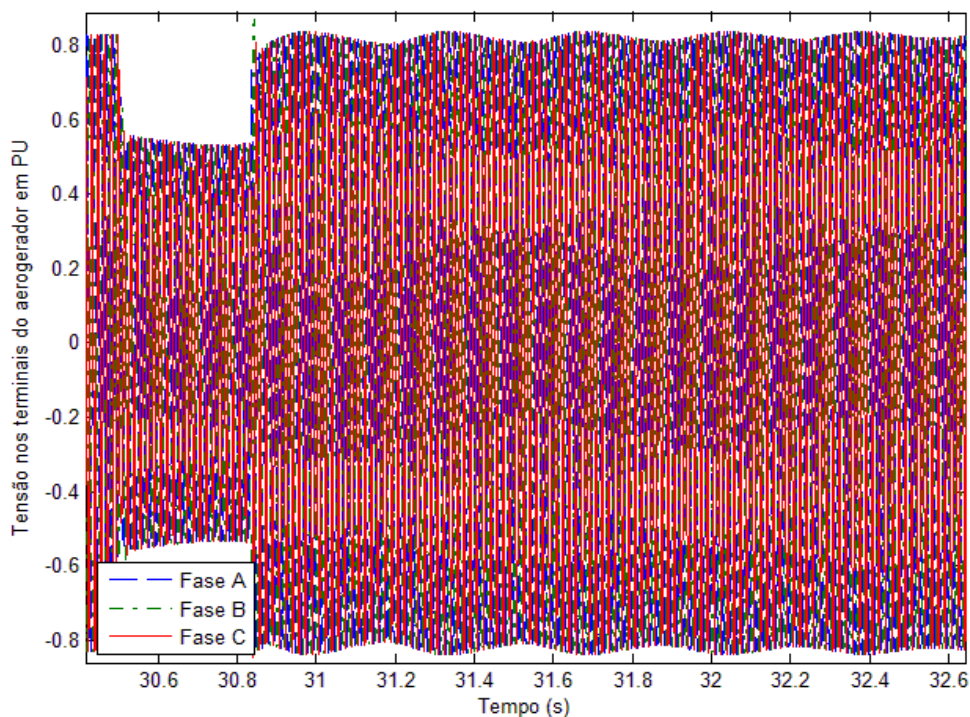
Na Figura 37, são demonstradas as tensões trifásicas no barramento de interligação (barra 07). Como o curto-circuito foi aplicado em uma única fase, nota-se que a fase a qual se encontra sob o defeito, possui um afundamento na tensão, influenciando as demais fases e gerando um desbalanceamento no sistema elétrico. Como o curto-circuito monofásico foi aplicado em uma barra distante do DFIG (barra 06) e com a atuação do sistema de controle, as tensões rapidamente voltam ao estado de operação ideal. Novamente, através da representação adotada na rede elétrica é possível observar o desbalanceamento.

**Figura 37: Tensões nos terminais do aerogerador durante o curto-circuito monofásico na barra 06**



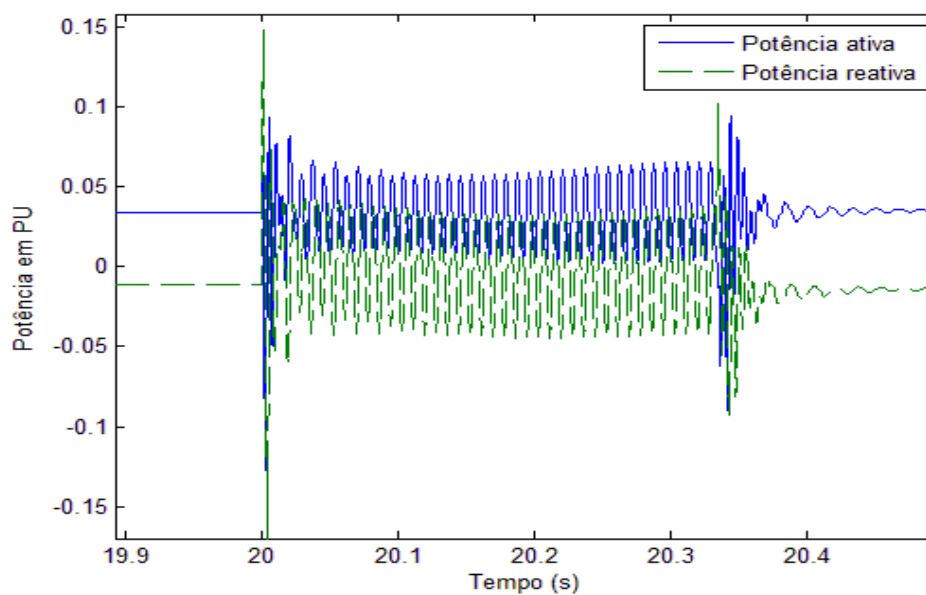
Na Figura 38, observa-se as tensões nos terminais do gerador, cujas três fases sofrem decaimento em suas tensões, mas não ocorrendo desbalanceamento da rede elétrica. Porém, a tensão cai para valores bem mais baixos quando comparado com o curto-circuito monofásico, causando maiores oscilações eletromecânicas no aerogerador – isto é observado melhor após o fim do defeito. Nota-se que as três tensões continuam a oscilar por um período de tempo relativamente mais longo do que no curto-circuito monofásico, observado na Figura 37, cuja tensão na barra do DFIG volta ao valor de regime quase que imediatamente, após a finalização do curto-circuito.

**Figura 38: Tensões nos terminais do aerogerador durante o curto-circuito trifásico na barra 06**



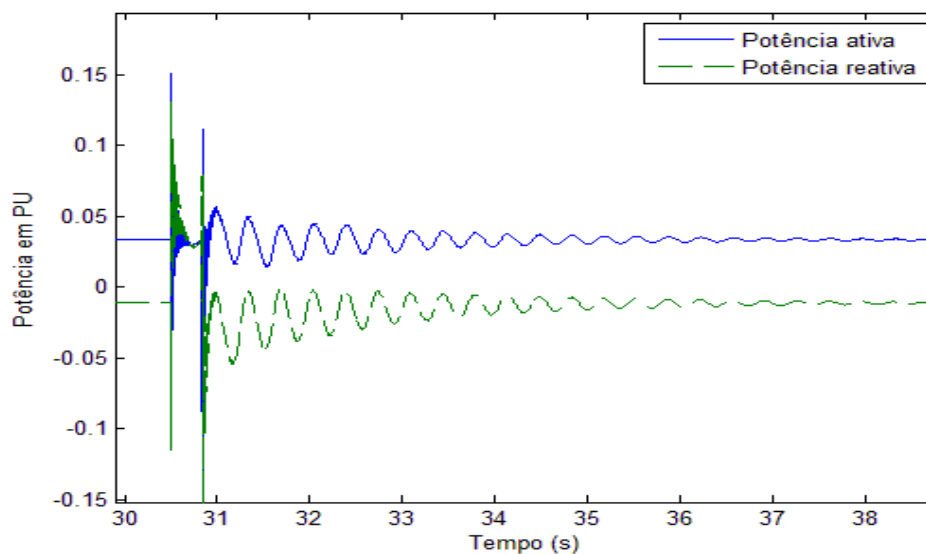
A potência instantânea, que flui entre uma máquina elétrica e a rede elétrica durante o curto-circuito monofásico, possui uma frequência de oscilação igual a duas vezes a frequência fundamental do sistema, valor que seria aproximadamente 120 Hz (WATANABE; STEPHAN, 1991). Nesse sentido, como é observado na Figura 39, entre o intervalo de 20,1 e 20,3 segundos, a frequência de oscilação da potência é de aproximadamente 120 Hz. Apesar deste cenário não ser o desejado, este resultado reforça que o modelo de rede adotado cumpre o esperado durante a execução de um curto-circuito assimétrico (monofásico).

**Figura 39: Potência fornecida pelo aerogerador com presença e sem presença de curto-circuito monofásico na barra 06**



Na Figura 40, é perceptível que a potência fornecida pelo aerogerador sofre oscilações durante o curto-circuito e que o comportamento do gráfico, após o curto-circuito, é semelhante ao de velocidade de rotação da máquina, dado na Figura 34. Devido à severidade do distúrbio, o sistema leva mais tempo para retornar ao ponto ótimo de operação.

**Figura 40: Potência fornecida pelo aerogerador com presença e sem presença de curto-circuito trifásico na barra 06**

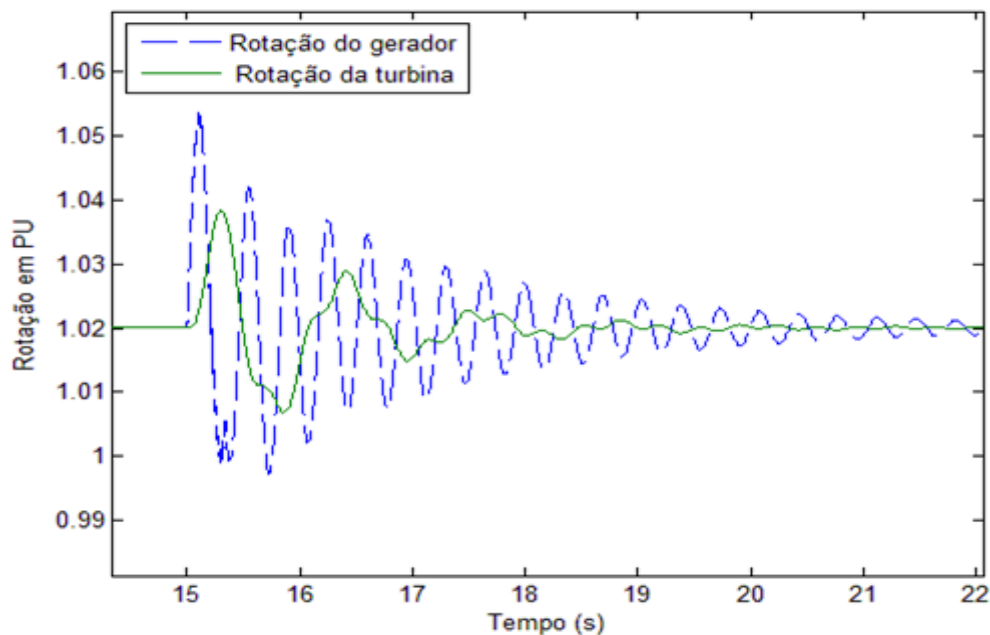


#### 5.4 ANÁLISE DO SISTEMA DIANTE DE CURTO-CIRCUITO NA BARRA 07

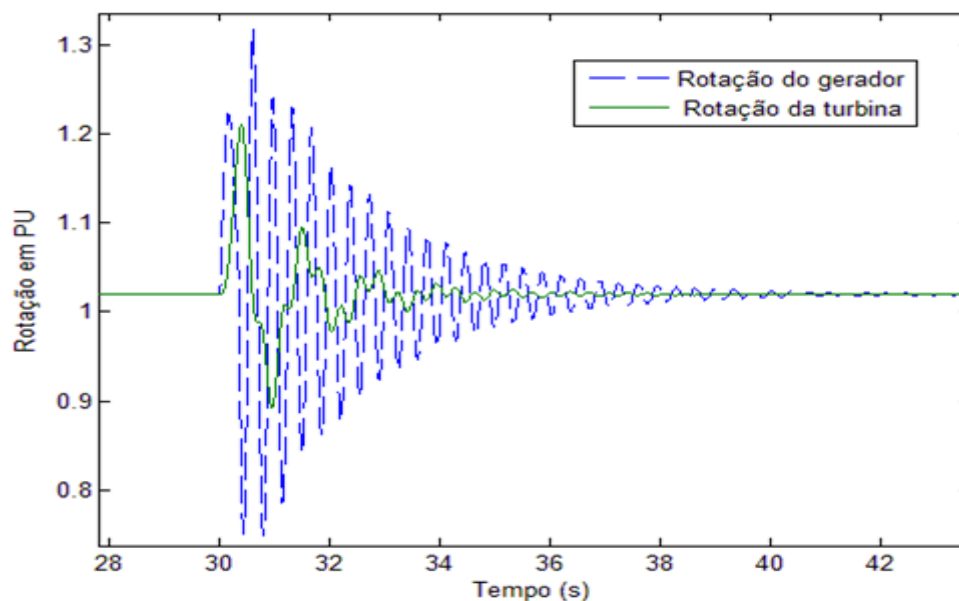
Nessa seção, serão analisados os resultados obtidos durante a aplicação de curtos-circuitos monofásico e trifásico na mesma barra em que o DFIG está conectado (barra 07). A finalidade deste estudo é analisar o comportamento do sistema diante do caso mais severo, dentre os estudados até então.

Esse estudo é importante para analisar se o sistema de controle é capaz de manter o aerogerador operando continuamente, mesmo diante de uma perturbação grave. Assim, não é necessário que o sistema de frenagem mecânica atue para realizar a parada do aerogerador, evitando gasto de material e possivelmente envio de uma equipe para verificar o motivo do acionamento do sistema de parada de emergência.

A seguir são mostrados os resultados obtidos para o curto-circuito monofásico e trifásico na barra em que o DFIG está conectado (barra 07).

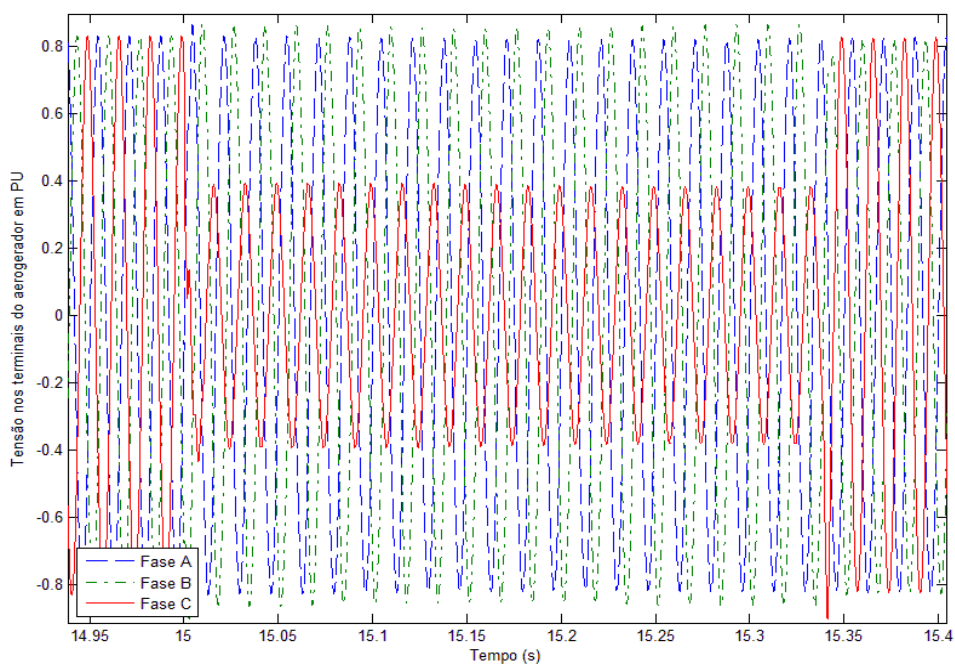
**Figura 41: Velocidade de rotação diante de um curto-circuito monofásico na barra 07**

De acordo com o que foi visto anteriormente, a máquina elétrica sofre oscilações devido ao desbalanceamento entre geração e carga. No entanto, devido à proximidade do gerador com o curto-circuito, a severidade aumenta, gerando oscilações com maiores amplitudes. A Figura 41 mostra que, durante o pico, o gerador possui uma rotação, aproximadamente, 3,4% mais veloz que o desejado. Comparando com o curto-circuito ocorrendo longe da barra do DFIG (barra 06), o valor de pico aumentou em três vezes.

**Figura 42: Velocidade de rotação diante de um curto-circuito trifásico na barra 07**

A Figura 42 apresenta velocidade de rotação do gerador e da turbina. A severidade do curto-circuito, por ser maior, gera picos de valores maiores do que o visto na Figura 41. O valor mais alto de rotação chega a exceder 25% do valor desejado de trabalho da máquina, e o mesmo só volta a ter valores aceitáveis de rotação (menor que 5%) após quatro segundos da finalização do curto-circuito (OGATA, 2010). Esse tempo de amortecimento pode ser reduzido com o aumento dos parâmetros de controle do controlador, porém isso implicaria em tensões de controle maiores nos terminais do rotor. Outro problema consiste nas rápidas variações de velocidade, que comprometeria a integridade física da máquina.

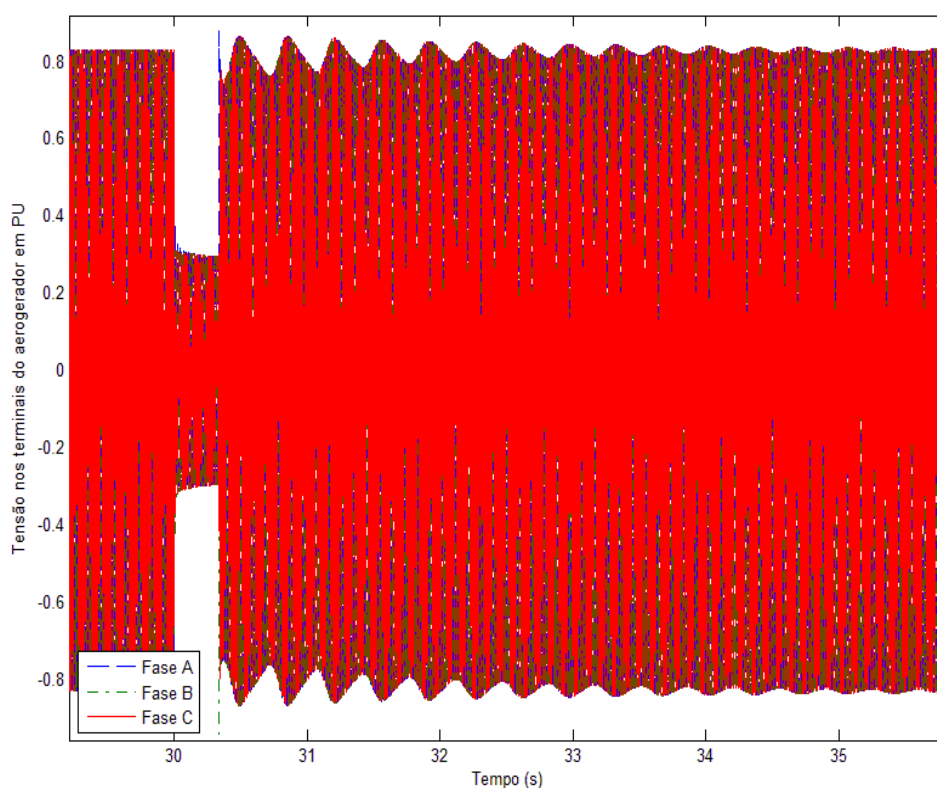
**Figura 43: Tensão aplicada aos terminais do aerogerador durante um curto-circuito monofásico na barra 07**



Durante um curto-circuito, a queda na tensão da barra está diretamente relacionada com o a impedância do curto-circuito. Portanto, para um curto-circuito franco (impedância nula) a tensão de cada uma das fases em curto-circuito tenderia a zero. No entanto, um curto-circuito de tal severidade seria perigoso para qualquer sistema de geração, no caso visto na Figura 43, o curto-circuito gera uma queda de tensão para metade do valor de regime, devido ao valor escolhido para as impedâncias de curto-circuito.



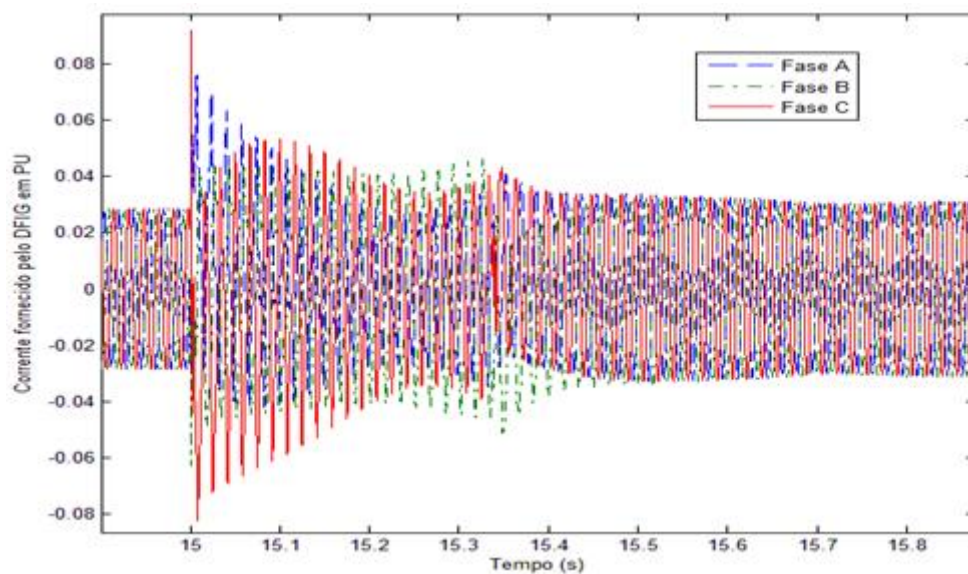
**Figura 44: Tensão aplicada aos terminais do aerogerador durante um curto-circuito trifásico na barra 07**



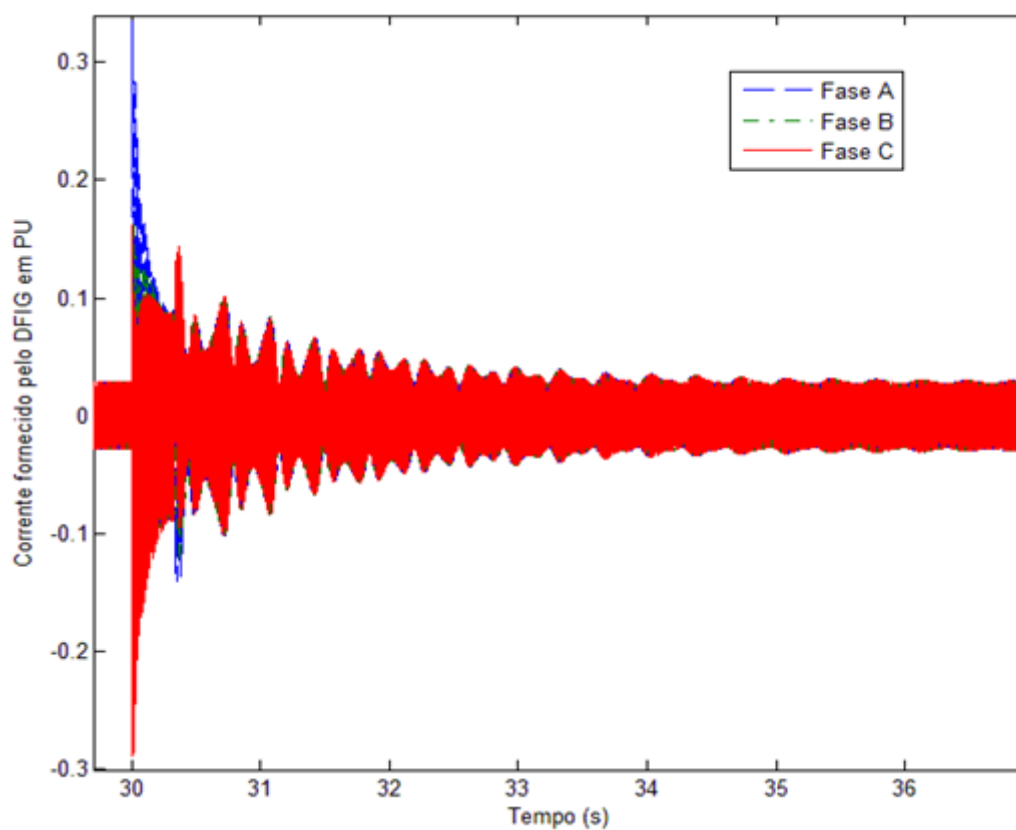
O curto-circuito trifásico é normalmente o mais severo, como mostrado na Figura 44. Além da queda de tensão ser maior, as três fases sofrem queda de tensão, o que resulta numa perturbação mais brusca ao sistema mecânico do aerogerador, como foi observado na Figura 42. A oscilação de velocidade gerada devido a este problema fará com que o DFIG oscile e insira harmônicos na rede (flutuações de tensão e corrente).

Durante o curto-circuito monofásico, a corrente fornecida pelo sistema não sofre grandes oscilações (Figura 45). Isso condiz com o que é observado na tensão nos terminais do aerogerador. Após o defeito ter cessado, o sistema retorna ao estado de regime em pouco tempo, diferentemente do curto-circuito trifásico mostrado na Figura 46.

**Figura 45: Corrente fornecida pelo aerogerador durante a um curto-circuito monofásico na barra 07**



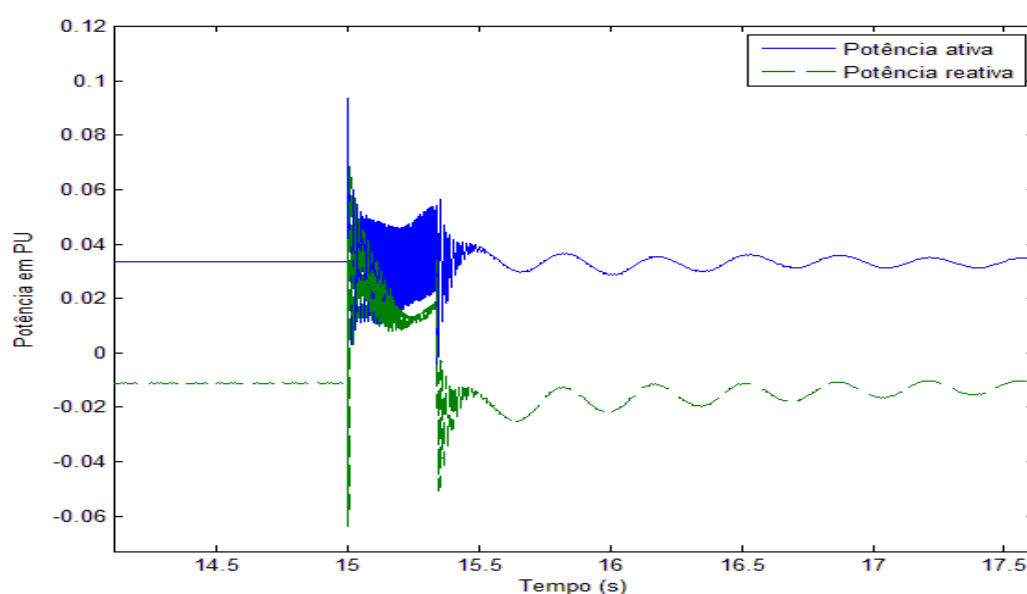
**Figura 46: Corrente fornecido pelo aerogerador durante o curto-circuito trifásico barra 07**



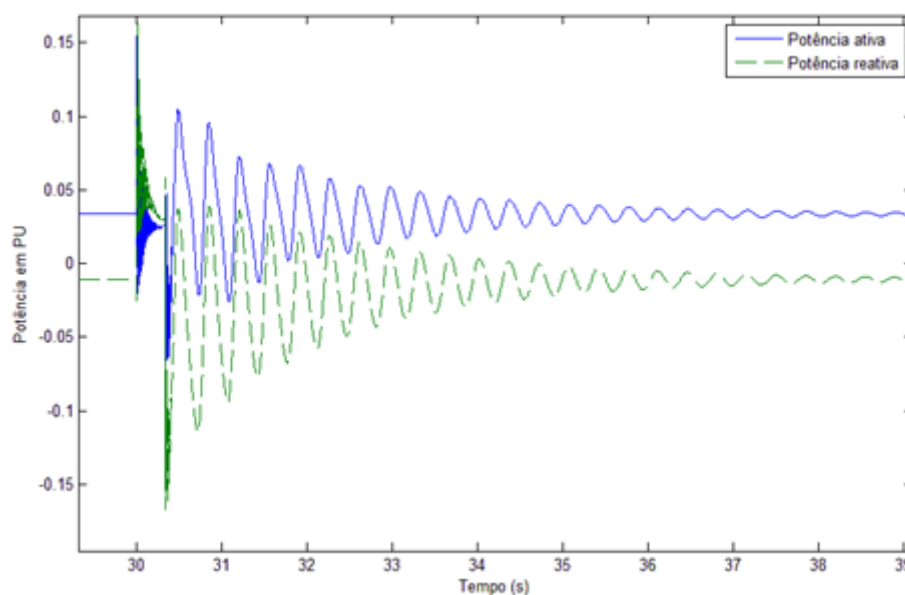
Diante do curto-circuito trifásico, a corrente fornecida pelo DFIG oscila de forma mais severa. O valor de pico chega a dez vezes o valor de regime, como é observado na Figura 46. Esse valor pode ser mais que suficiente para fazer com que o sistema de proteção atue, ou até mesmo queimar algum componente do gerador, caso a proteção não atue como esperado.

A Figura 47 e Figura 48, demonstram os comportamentos das potências em decorrências de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos na barra 07.

**Figura 47: Potência fornecida durante o curto-circuito monofásico na barra 07**



Semelhante a Figura 39, durante o curto-circuito monofásico, ocorre uma oscilação da potência instantânea fornecida pelo gerador, com uma frequência com valor equivalente ao dobro da frequência fundamental da rede. A potência que flui entre a rede elétrica e o DFIG sofre grandes oscilações diante deste tipo de perturbação, chegando a alguns momentos a funcionar como um motor, ao invés de gerador. Isso implica que durante certos intervalos de tempo, o DFIG passa a consumir energia da rede elétrica. Este fenômeno é bem observado na Figura 48, observa-se que em determinados instantes, a potência ativa cruza o eixo das abscissas.

**Figura 48: Potência fornecida durante o curto-circuito trifásico na barra 07**

## 5.5 CONCLUSÃO

Ao adotar a representação trifásica com a adição de um quarto condutor, foi possível estudar, com maiores detalhes, as variáveis presentes no sistema de geração (tensão e corrente em cada fase, rotação etc.). Verifica-se que o controle clássico utilizado não solucionou o problema da oscilação da potência fornecida pelo aerogerador à rede elétrica durante um curto-circuito, tanto no monofásico como no trifásico. No próximo capítulo serão feitas as conclusões desse trabalho para os casos estudados juntamente com possíveis proposições para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 06 – CONCLUSÃO

O estudo de aerogeradores vem crescendo bastante nos últimos anos, visando obter maiores rendimentos destas máquinas quando inseridas em ambientes favoráveis ao seu funcionamento. No entanto, este sistema de geração está mais sujeito a influências de perturbações externas do que as demais fontes de geração de energia elétrica, seja por meio de variações bruscas de velocidade de vento ou de curto-circuito na rede elétrica.

O DFIG estudado mostrou-se uma máquina eficiente quando utilizada como gerador elétrico de uma turbina eólica devido a sua maleabilidade no controle. A partir do controle das tensões no rotor, foi possível controlar a dinâmica do sistema, tanto a elétrica quanto a mecânica. Isso foi obtido por meio da utilização de alguns controladores do tipo PI, cujos parâmetros podem ser ajustados de forma rápida e simples, devido à metodologia adotada na elaboração do simulador. A técnica de controle adotada mostra-se eficiente para realizar o controle independente das potências ativas e reativas.

Utilizar uma plataforma de simulação para analisar o possível comportamento de um aerogerador mostrou-se uma forma prática e eficiente, salientando que quando o sistema é montado em blocos separados melhorou a possibilidade de manipular os parâmetros do sistema de geração, sejam os parâmetros mecânicos ou elétricos. Separando cada componente que constitui o sistema de geração, é possível realizar alterações na característica do aerogerador como, por exemplo, modificar o tipo de turbina utilizada, os parâmetros do gerador (resistências, indutâncias, número de polos etc.), aumentar as proporções do sistema de geração, implementar um novo método de controle, implementar sistema de conversores, dentre outras possibilidades. Para as modificações citadas, não se faz necessário reestruturar toda a simulação para adequar as novas mudanças, sendo apenas necessária uma modificação no bloco que receberá as mudanças.

Em relação ao modelo adotado à rede elétrica para realizar o estudo dos casos, ele mostrou-se prático para aplicar curtos-circuitos assimétricos, pois foi possível simular o curto-circuito trifásico e monofásico em uma mesma simulação, sem haver necessidade de alterar a estrutura do sistema durante a simulação. Apesar de terem sido utilizados dois tipos de curtos-circuitos (fase terra e trifásico terra) nas simulações, não seria necessário alterar a estrutura da rede elétrica para simular outros tipos de defeitos que uma rede elétrica está sujeita, bem como outros curtos-circuitos assimétricos (curto-circuito bifásico, por exemplo). Além

disso, a análise da dinâmica da rede elétrica torna-se mais detalhada, visto que é possível observar os parâmetros de cada fase individualmente ou em conjunto. Também é possível utilizar diferentes tipos de cargas, tais como indutivas, capacitivas, resistivas, cargas desbalanceadas, dentre outras possibilidades. Por fim, ainda em relação ao modelo de rede elétrica, a adição de um quarto condutor, que represente as impedâncias mútuas, mostrou-se útil para a construção da rede elétrica, já que não se fez necessário utilizar nenhuma ferramenta específica do SIMULINK para inserir as impedâncias mútuas existentes entre as linhas de transmissão, logo, o modelo utilizado pode ser implementado em simuladores mais básicos, possibilitando emulações mais complexas que necessitem de maior poder computacional.

Ao empregar um projeto que se aproxima de um sistema real é possível simular diversos modelos de redes, mais simples ou mais complexas. Juntamente com a facilidade de fazer alterações na plataforma de simulação, o trabalho desenvolvido mostrou que simulações computacionais podem ser utilizadas para emular sistemas complexos sem que haja a necessidade de construir qualquer modelo real em miniatura. Dessa forma, é possível representar um sistema com diversas características diferentes, antes de comprar qualquer material para construir o sistema real, o que dará uma ampla visão do que deve ser elaborado e quais cuidados devem ser tomados antes de realizar a construção de um modelo.

Em trabalhos futuros, sugerem-se simulações com a inclusão de outros modelos de conversores, visando analisar o desempenho dos mesmos diante perturbações no sistema. Além da grande variedade de máquinas elétricas inseridas nos aerogeradores, outros estudos podem ser feitos utilizando tipos de máquinas diferentes, como por exemplo, PMSG e SCIG. Também, poderão ser efetuadas novas simulações para verificação do desempenho do sistema diante de outras técnicas de controle, visto que a técnica clássica adotada nesse trabalho não conseguiu resolver o problema da oscilação da potência durante os curtos-circuitos. Por fim, o modelo de rede elétrica adotado pode ser aplicado para elaborar um sistema de maior porte e mais complexo, que simule, por exemplo, os grandes parques eólicos localizados no estado do Rio Grande do Norte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, Gonzalo et al. *Doubly fed induction machine modeling and control for wind energy generation applications*. Oxford: IEEE Press series on power engineering, Wiley-Blackwell Pub., 2011.

ABDEL-SALAM, Mazen; AHMED, Abdel; MAHROUS, Mahmoud. Transient analysis of grid-connected wind-driven PMSG, DFIG and SCIG at fixed and variable speeds. *Innovative Systems Design and Engineering*, v.2, n.3, 2011. Disponível em: <<http://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/222/108>>. Acesso em: 14 Out 2014.

ACKERMANN, Thomas. (*Wind power in power systems*. 2<sup>a</sup> ed., Wiley: West Sussex, 2012, N.J., p. 534 - 537.

TAVEIROS, Filipe Emanuel Vieira; BARROS, Luciano Sales; COSTA, Flavio Bezerra, Wind turbine torque-speed feature emulator using a DC motor. In POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 2013, *Anais eletrônicos*. Gramado: IEEE, 2012, p. 480 - 486.

BARROS, Luciano Sales *Uma Estratégia de Controle para o Melhoramento do Comportamento Dinâmico de Máquinas de Indução Duplamente Alimentadas Operando como Geradores*. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

BAZZO, Thiago de Paula Machado, Implementação de Controle Vetorial em Geradores Assíncronos, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Natal, 2007.

CARDOSO, Abilio José da Rocha, *Ensaio das funções de sobrecorrente e distância utilizando relé digital de proteção e aplicação de sinais com caixa de teste*. 2009, Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009, UFRJ, p. 37 - 44.

CONCORDIA, Charles. Steady-state stability of synchronous machines as affected by voltage-regulator characteristics, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 63, n.5, p. 215 - 220, 1944.

DANIEL, Luciano de Oliveira. *Modelagem, Análise e Controle de um Elo de Tensão Contínua com Conversores VSC Conectados em BACK-TO-BACK*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

FERREIRA, Paulo Augusto Valente. *Introdução aos Sistemas de Controle*. Campinas: UNICAMP, 2014.

FIESTAS, Ramón; PERRELLI, Pedro, Analysis of the regulatory framework for wind power generation in Brazil, Summary Report, 2013, GWEC.

GLOBAL WIND ENERGY CONCIL. *Global Wind Report*. Annual market update 2012. Bruxelas: GWEC, 2013. Disponível em:

<[http://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2012/06/Annual\\_report\\_2012\\_LowRes.pdf](http://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf)>. Acesso em: 27 Jun 2013, p. 13 - 17.

GUERRERO, Gabriel Andrés Valencia. *Análise de Regime Permanente de Parques Eólicos com Máquinas SCIG e DFIG*. 2014, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014, UFRS, p. 50 - 55.

HUBNER, Nelson, Brazil's Wind Power Auction Spurs More Clean Energy Development, 2009, Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/articles/2009/12/brazils-wind-power-auction-spurs-more-clean-energy-development.html>>. Acesso em: 29 Mar 2014.

JACOBINA, Cursino Brandão. *Sistemas de Acionamento Estático de Máquina Elétrica*. Campina Grande: [s.n.], 2005, p. 27 - 43.

JACOBINA, Cursino Brandão; LIMA, Antônio Marcus Nogueira. Estratégias de controle para sistemas de acionamento com máquina assíncrona. *SBA Controle & Automação*, v.7, n.1, p. 15 - 28, fev./mar./abr. 1996. Disponível em: <<http://www.sba.org.br/revista/volumes/v7n1/v7n1a04.pdf>>. Acesso em: 13 Out 2013.

KARINIOTAKIS, G. N. & G. S. Stavrakakis (1995), 'A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diesel-wind turbines systems interaction. part ii: Implementation of the algorithm and case-studies with induction generators', *IEEE Transactions on Energy Conversion* 10(3), p. 584 - 590.

KERSTING, William, *Distribution System Modeling and Analysis*. Flórida: CRC press, 2002. p. 125 - 144.

KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. Califórnia: McGraw Hill, p. 17 - 36, 45 - 76, 1994.

MANYONGE, Alfred W. et al., Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis. *Applied Mathematical Sciences*, v. 6, n. 91, p. 4527 - 4536, 2012. Disponível em: <<http://www.m-hikari.com/ams/ams-2012/ams-89-92-2012/manyongeAMS89-92-2012.pdf>>. Acesso em: 20 Nov 2013.

MEIRA, Andrey Glayverson Pegado, et al., Análise e Diagnostico da Conformidade do Nível de Tensão em Regime Permanente no Sistema de Distribuição. *Revista Engenharia Elétrica*, v.1, p. 1 - 6, 2013. Disponível em:

<[http://www3.iesampa.edu.br/ojs/index.php/eng\\_eletrica/article/viewFile/1181/824](http://www3.iesampa.edu.br/ojs/index.php/eng_eletrica/article/viewFile/1181/824)>. Acesso em: 30 Abr 2014.

MELO, Marcelo Silva de Matos. *Energia eólica: aspectos técnicos e econômicos*, 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

OGATA, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 2010, p. 164 - 170, 288 - 290.

AMARANTE, Odilon A. Camargo; ZACK, Michael Brower John; ANTÔNIO Leite de Sá, *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*, BRASÍLIA, 2001.

Papalkar, P., Phulambrikar, S. P., Speed Control of DC Motor using Capture/Compare/Pulse Width Modulation Module of PIC Microcontroller, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* v. 3, 2014.

PERDANA, Abram. *Dynamic Models of Wind Turbines: A Contribution towards the Establishment of Standardized Models of Wind Turbines for Power System Stability Studies*. 2008 Thesis (PHD in Electric Power Engineering) – Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Sweden, 2008, p. 29 - 33.



REIS, Joana Magda Vaz da Silva. *Comportamento dos Geradores Eólicos Síncronos com Conversores Diante de Curtos-circuitos no Sistema*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

ROCHA, Luana Pereira, *Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência na Presença de Aerogeradores do Tipo A*, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia elétrica), Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2013.

SAINI, Shilpi. Review of Doubly Fed Induction Generator Used in Wind Power Generation, *International Journal of Environmental Science: Development and Monitoring*, v.4, n.3, p. 53 - 56, 2013, Disponível em: <[http://www.ripublication.com/ijesdmspl/ijesdmv4n3\\_12.pdf](http://www.ripublication.com/ijesdmspl/ijesdmv4n3_12.pdf)>. Acesso em: 08 Jan 2015.

SILVA, Evely, *Análise de um projeto mecânico de um freio aplicado em geradores eólicos de pequeno porte*. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em 2013) – Departamento de Ciências Exatas Tecnológicas e Humana, Universidade Federal do Semi-árido, UFERSA, 2013, p. 38 - 41.

Srinath Vanukuru & Sateesh Sukhavasi, Active & Reactive Power Control Of A Doubly Fed Induction, *International Journal of Power System Operation and Energy Management*, p. 2231 - 4407, v. 1, 2011.

STEPHEN J. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, 5ª Ed., 2013, editora Bookman, p. 233.

WATANABE, Edson; STEPHAN, Ricard. Potência ativa e reativa instantâneas em sistemas elétricos com fontes e cargas genéricas, *SBA: Controle & Automação*, v.3, n.1, p. 253 - 263. Disponível em: <<http://www.sba.org.br/revista/volumes/v3n1/v3n1a02.pdf>>. Acesso em: 25 Ago 2014.

TAVEIROS, Filipe Emanuel Vieira. *Sistema de conversão de energia eólica baseado no gerador de indução duplamente alimentado: análise e contribuição ao controle da máquina*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação) – Programa de Pós-Graduação e Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2014.

## APÊNDICE A - DADOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

### Parâmetros base utilizados nas análises.

Parâmetro	Valor
$S^{\text{base}}$ : potência base	100 MVA
$V^{\text{base}}$ : tensão base	480 V
$f^{\text{base}}$ : frequência base	60 Hz

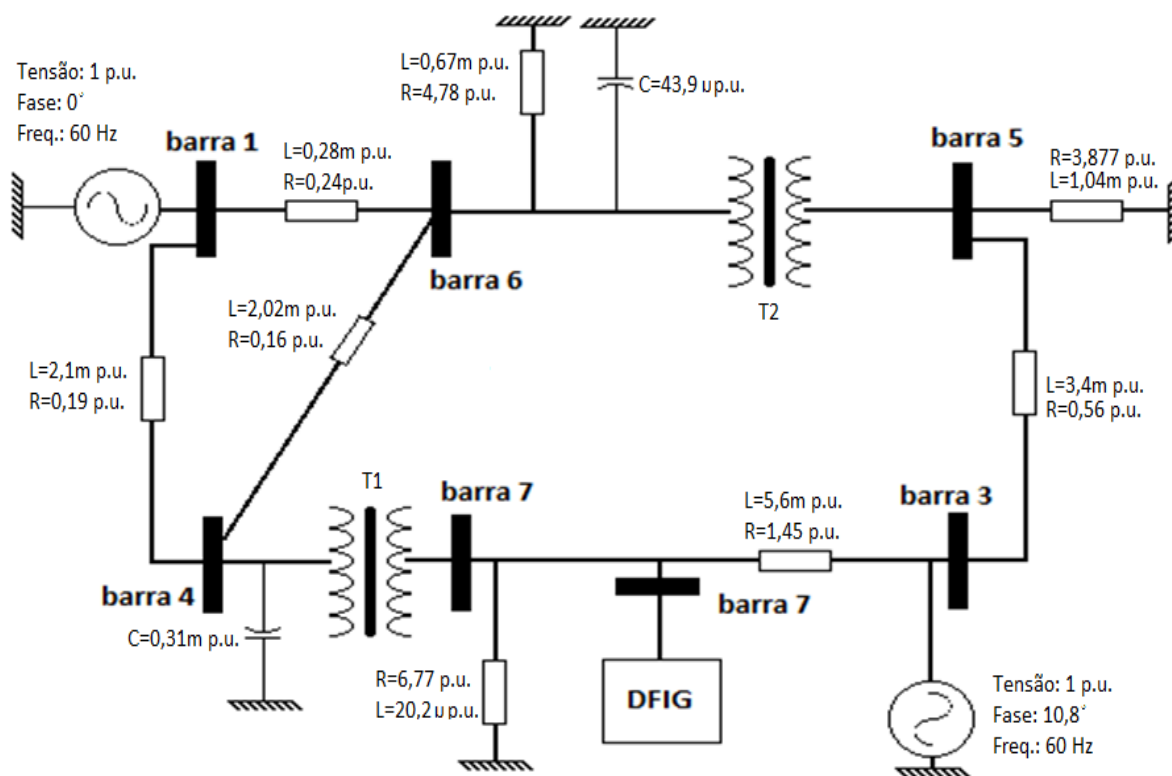
### Parâmetros do gerador equivalente.

Parâmetro	Valor
$R_s$ : resistência do estator	0,02 p.u.
$R_r$ : resistência do rotor	0,0198 p.u.
$L_m$ : indutância de magnetização	3,81 p.u.
$l_s$ : indutância do estator	0,2 p.u.
$l_r$ : indutância do rotor	0,22 p.u.

### Parâmetros do sistema mecânico.

Parâmetro	Valor
$D_g$ : coeficiente de amortecimento do gerador	0 p.u.
$D_t$ : coeficiente de amortecimento da turbina	0 p.u.
$H_g$ : inércia do gerador	0,01s
$H_t$ : inércia da turbina	0,023s
$k_r$ : coeficiente de rigidez do acoplamento mecânico	0,7

## APÊNDICE B - REDE ELÉTRICA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO



Parâmetros do transformador 1 (T1)

Parâmetro	Valor
R: resistências dos enrolamentos	0 p.u.
$L_m$ : indutância de magnetização	0,2625 p.u.
L: indutância dos enrolamentos	7,6m p.u.
$N_1/N_2$ : relação de transformação	1

Parâmetros do transformador 2 (T2)

Parâmetro	Valor
R: resistências dos enrolamentos	0 p.u.
$L_m$ : indutância de magnetização	0,500 p.u.
L: indutância dos enrolamentos	1,6m p.u.
$N_1/N_2$ : relação de transformação	1