

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração

**Implementação de Estratégias Passivas para Aumento da Suportabilidade  
de Aerogeradores DFIG**

Márcio Mateus Gonçalves

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do *Certificado de Especialista em Fontes Renováveis*.

Orientador: Prof. Victor Flores Mendes

Belo Horizonte - MG

Novembro de 2019

G635i	<p>Gonçalves, Márcio Mateus.  Implementação de estratégias passivas para aumento da suportabilidade de aerogeradores DFIG [recurso eletrônico] / Márcio Mateus Gonçalves. – 2019.  1 recurso online (54 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Victor Flores Mendes.</p> <p>“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Fontes Renováveis da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”</p> <p>Bibliografia: f.53-54.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia Elétrica. 2. Força eólica. 3. Potência reativa (Engenharia Elétrica). I. Mendes, Victor Flores. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 621.3



## ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO MÁRCIO MATEUS GONÇALVES


Realizou-se, no dia 06 de dezembro de 2019, às 14:40 horas, Sala 2305 - 2o. andar - bloco 1 - Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Implementação de Estratégias Passivas para aumento da Suportabilidade de Aerogeradores DFIG*, apresentada por MÁRCIO MATEUS GONÇALVES, número de registro 2018704952, graduado no curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Victor Flores Mendes - Orientador (Departamento de Eng. Elétrica-UFMG), Prof(a). Sidelmo Magalhaes Silva (Universiadde Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.  
Belo Horizonte, 06 de dezembro de 2019.

  
Prof(a). Victor Flores Mendes (Doutor)

  
Prof(a). Sidelmo Magalhaes Silva (Doutor)

## **AGRADECIMENTOS**

Os meus sinceros agradecimentos aos meus amigos que contribuíram para a construção desse trabalho. Aos meus amigos da UFMG, obrigado por repassarem todas as suas experiências profissionais.

Victor Flores Mendes, obrigado pela orientação. Durante todo o desenvolvimento desse trabalho esteve sempre presente, propondo avanços para além da zona de conforto e exigindo sempre o melhor entendimento sobre cada detalhe contido neste estudo.

Obrigado aos professores do curso por contribuírem para a minha formação, viabilizando a construção deste trabalho.

## RESUMO

Com o crescimento do país, investimentos na expansão do sistema elétrico estão se tornando cada vez mais necessários. O modelo de geração mais utilizado no Brasil está baseado nas usinas hidrelétricas, que a despeito de serem uma fonte que não lança poluentes na atmosfera, geram um grande impacto socio-ambiental na ocasião da sua construção, devido ao alagamento de áreas imensas e desmobilização de comunidades inteiras. Diante dessa perspectiva estão sendo realizados muitos investimentos na área da geração em usinas térmicas, solares e eólicas. A geração eólica, por ser renovável, enquadra-se perfeitamente no modelo de sustentabilidade tão discutido atualmente em nossa sociedade. Avanços tecnológicos nessa área estão contribuindo para tornar a implantação desse tipo de empreendimento mais atrativa do ponto de vista técnico e financeiro, pois além de causar um impacto ambiental menor, os aerogeradores modernos são capazes de realizar um controle otimizado do fluxo de potência reativa e contribuição para suportabilidade da rede no ponto de conexão. O desenvolvimento dessas máquinas foi obtido a partir dos avanços na eletrônica de potência, uma vez que tornou possível controlar variáveis como potência ativa e reativa em casos críticos, como, por exemplo, ventos com baixa intensidade. Nesse aspecto, é fundamental que essas máquinas contribuam para a estabilidade do sistema, realizando um controle da frequência através do despacho de potência ativa ou mantendo níveis de tensões adequados por meio da potência reativa inserida, por exemplo. Neste trabalho será discutido o comportamento do aerogerador durante o afundamento de tensão, com o objetivo principal de validar o atendimento aos requisitos de conexão da rede. A topologia do aerogerador utilizada será o DFIG, na qual o circuito do estator está conectado diretamente à rede e o rotor conectado a um conversor *back-to-back*, responsável pelo controle das variáveis. Será exemplificada a utilização do circuito *chopper* para proteção do barramento CC e *crowbar* para proteção do circuito rotórico durante os afundamentos de tensão. O estudo é realizado através de resultados simulados de um modelo representativo de um sistema de 2MW implementado no software MATLAB/Simulink.

**Palavras-chave:** Aerogerador; Turbina Eólica; Controle Potência Reativa; Afundamento de Tensão; Suportabilidade.

## ABSTRACT

The growth of the country, investments in the expansion of the electrical system are becoming increasingly necessary. The generation model most used in Brazil is based on hydroelectric power plants, despite being a source that does not release pollutants into the atmosphere, generate a large environmental impact at the time of its construction. Faced with the prospect many investments are being made in the area of generation by thermal power plants, solar and wind. The wind generation, to be renewed, fits perfectly in the sustainable model, so recently discussed in our society. Technological advances in this area are contributing to make deployment of this type of development more technique/financial attractive, as well as causing less environmental impact; modern wind turbines currently developed are able to perform optimal control of reactive power and contribution to network supportability at the point of connection. The development of these machines is due to advances in power electronics since it was possible to control variables such as active and reactive power in critical cases such as low-intensity winds. In this respect it is essential that these machines contribute to the stability of the system. For example, could be done with rate control system through the order of active power and voltage levels while maintaining adequate control of reactive power entered into the system. This work will be discussed the turbine's behavior during the voltage sag. The main objective is to validate the service to the network connection requirements. The most commonly used wind generator topology is DFIG, where the stator circuit is directly connected to the grid and the rotor connected to a back-to-back converter responsible for controlling the variables. The use of the chopper circuit for protection of the DC bus and Crowbar for protection of the rotor circuit will be exemplified. The study is performed through simulated results of a representative model of a 2MW system implemented in MATLAB / Simulink software.

**Keywords:** Wind Generator; Wind Turbine; Control of Reactive Power; Voltage Sag; Ride-through fault capability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de suportabilidade a afundamento de tensão.....	15
Figura 2 - Faixa de geração/absorção de potência ativa.....	16
Figura 3 - Geradores conectados diretamente na rede.....	21
Figura 4 - Geradores utilizando chave estática do tipo partida suave.....	21
Figura 5 – Sistema com gerador a ímã permanente.....	23
Figura 6 - Uso de retificadores para regulação da tensão.....	24
Figura 7 - Aerogerador de indução em gaiola com conversor pleno.....	25
Figura 8 - Bloco conversor na configuração CA-CC-CA entre o rotor da máquina e a rede elétrica.....	26
Figura 9 - Curto-circuito do rotor – <i>Crowbar</i> .....	27
Figura 10 Choper no barramento CC.....	27
Figura 11 - Tecnologia de aerogeradores DFIG.....	28
Figura 12 - Simulação completa modelamento sistema.....	30
Figura 13 - Modelamento DFIG.....	31
Figura 14 - Modelamento turbina.....	32
Figura 15 - Modelamento conversor RSC e GSC.....	33
Figura 16 - Modelamento rede trifásica equilibrada.....	34
Figura 17 - Exemplo aplicação <i>crowbar</i> .....	36
Figura 18 - Velocidade do vento.....	38
Figura 19 - Torque mecânico.....	38
Figura 20 - Velocidade em rpm do Gerador.....	39
Figura 21 - Potências do sistema.....	39
Figura 22 - Tensão de saída do estator do gerador.....	40
Figura 23 - Corrente de saída estator do gerador.....	40
Figura 24 - Tensão do barramento CC.....	41
Figura 25 - Saída de corrente do conversor – GSC.....	41
Figura 26 - Potências do sistema – AMT 0.85 pu.....	42
Figura 27 - Velocidade gerador – AMT – 0.85 pu.....	42
Figura 28 - Tensão no barramento CC – AMT 0.85 pu.....	43
Figura 29 - Corrente no rotor – AMT 0.85 pu.....	44
Figura 30 - Corrente de saída do GSC – AMT 0.85 pu.....	44

Figura 31 - Potências do sistema – AMT 0.20 pu.....	45
Figura 32 - Velocidade gerador – AMT – 0.20 pu.....	46
Figura 33 - Tensão no barramento CC – AMT – 0.20 pu.....	46
Figura 34 - Corrente de saída do GSC – AMT – 0.20 pu.....	47
Figura 35 - Corrente no rotor – AMT – 0.20 pu.....	47
Figura 36 - Potências do sistema – AMT 0.20 pu.....	48
Figura 37 - rpm gerador – AMT – 0.20 pu.....	48
Figura 38 - Tensão no barramento CC.....	49
Figura 39- Corrente de saída do GSC.....	49
Figura 40 - Corrente no rotor.....	50
Figura 41 - Potência reativa estator.....	51



## LISTA DE ABREVIações

AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
EWEA	<i>European Wind Energy Association</i>
GSC	<i>Grid Side Converter</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MSC	<i>Mains Side Converter</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
PI	<i>Proportional Integral</i>
PLL	<i>Phase-Locked-Loop</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RSC	<i>Rotor Side Converter</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	10
1.2	ENERGIA EÓLICA.....	10
1.3	INTERLIGAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS.....	13
1.3.1	Limites de frequência e tensão no Brasil.....	14
1.3.2	Estabilidade durante faltas na rede.....	15
1.3.3	Requisitos de geração / absorção de potência reativa.....	15
1.4	OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	16
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	17
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE INSTALAÇÃO.....</b>	<b>18</b>
2.1	POTÊNCIA DE UMA TURBINA EÓLICA.....	19
2.2	TECNOLOGIAS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	20
2.2.1	Aerogeradores com geradores de indução convencionais.....	21
2.2.2	Aerogeradores síncronos a ímã permanente.....	22
2.2.3	Aerogeradores síncronos com rotor bobinado.....	24
2.2.4	Aerogeradores de indução em gaiola e conversor pleno .....	24
2.3	TECNOLOGIA AEROGERADORES DUPLAMENTE ALIMENTADOS.....	25
2.4	ESTRUTURAS DE CONTROLE DO DFIG.....	28
<b>3</b>	<b>MODELO DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>29</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
3.1.1	Parâmetros do sistema (turbina e Gerador) .....	29
3.2	SIMULAÇÃO SIMULINK.....	30
3.3	SIMULAÇÃO DO GERADOR.....	31
3.4	SIMULAÇÃO TURBINA EÓLICA.....	32
3.5	SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES.....	32
3.6	SIMULAÇÃO REDE TRIFÁSICA.....	34
3.7	PROJETO <i>CHOPPER</i> DO BARRAMENTO CC.....	34

3.8	PROJETO <i>CROWBAR</i> .....	35
<u>4</u>	<u>RESULTADOS SIMULADOS</u> .....	38
4.1	REGIME NOMINAL.....	38
4.2	AFUNDAMENTO PARA 0.85 pu SEM PROTEÇÕES.....	42
4.3	AFUNDAMENTO PARA 0.20 pu – <i>CHOPPER</i> .....	45
4.4	AFUNDAMENTO PARA 0.20 pu – <i>CHOPPER E CROWBAR</i> .....	48
<u>5</u>	<u>CONCLUSÕES</u> .....	52
	<u>REFERÊNCIAS</u> .....	53

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A utilização de fontes renováveis de energia é fundamental para a diversificação da matriz energética do sistema elétrico nacional. Diante desse fato, neste capítulo são apresentados os conceitos básicos da energia eólica e seu processo de conversão eletromecânica de energia, bem como uma breve discussão sobre as tecnologias recentemente utilizadas e o panorama dessa fonte de energia no Brasil e no mundo. O gerador duplamente alimentado está sendo amplamente utilizado devido às características específicas para controle de injeção de potência ativa, reativa e suportabilidade frente a afundamentos de tensão. Por fim, têm-se os objetivos do trabalho.

## 1.2 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a energia cinética contida em uma massa de ar em movimento, sendo que, para ser utilizada, faz-se necessário que ocorra uma conversão da energia cinética de translação para energia cinética de rotação. Esse tipo de conversão de energia ocorre nas turbinas eólicas (aerogeradores) para a produção de energia elétrica ou mecânica, dependendo da aplicação (ANEEL, 2008).

É uma forma de geração elétrica que se diferencia das fontes convencionais devido a fatores importantes, como a característica estocástica da fonte de energia, no caso o vento. A tecnologia utilizada nas turbinas eólicas vem evoluindo de forma consistente para aumentar a eficiência no processo de conversão eletromecânica de energia.

Para a geração de eletricidade a partir da energia eólica, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970) é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial (ANEEL, 2008).

O ano de 2018 foi caracterizado principalmente por uma nova dinâmica: enquanto os mercados eólicos europeus estavam em estagnação, com a

maioria dos países europeus mostrando um desenvolvimento fraco, incluindo Alemanha, Espanha, França e Itália, verificou-se um crescimento robusto em países como China, Índia, Brasil e em muitos outros mercados asiáticos, bem como em alguns países africanos (WWEA, 2019).

O maior mercado de energia eólica, a China, instalou uma capacidade adicional de 21 Gigawatt e se tornou o primeiro país com uma capacidade instalada de energia eólica de mais de 200 Gigawatt. O país retomou o caminho do crescimento após um ano de relativa estagnação (2017), quando foram instalados 19 Gigawatt comparativamente modestos. O gigante asiático continua sua posição indiscutível como líder mundial em energia eólica, com uma capacidade eólica acumulada de 217 Gigawatt (WWEA, 2019).

A capacidade de geração do parque eólico mundial aumenta consideravelmente, graças aos avanços tecnológicos estimulados principalmente por questões ambientais. No Brasil estão em operação 601 parques eólicos com 7 mil aerogeradores e capacidade instalada de 15 GW (ABEEÓLICA, 2019).

Devido à modernização e ampliação do sistema elétrico, máquinas estão sendo projetadas de forma a manter a geração de energia elétrica com altos índices de confiabilidade e disponibilidade (ANEEL, 2008).

A busca por fontes alternativas de energia permite a diversificação da matriz energética brasileira, seja qual for a fonte primária, térmica, solar, marés, biomassa ou eólica, sendo que a última vem crescendo consideravelmente por todo o planeta (ABEEÓLICA, 2019).

A produção de energia eólica no Brasil está em plena expansão, principalmente no nordeste brasileiro, onde está concentrada a maior parte dos investimentos. A grande inserção dessas máquinas (aerogeradores) no sistema provoca alguns fenômenos indesejáveis, como por exemplo a baixa suportabilidade dos aerogeradores frente a afundamentos de tensão.

Diante desses fatos, o ONS (Operador Nacional do Sistema) elaborou o submódulo 3.6, com última revisão em 2019, “Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão”, que estabelece algumas diretrizes sobre o comportamento das unidades de geração durante afundamentos de tensão, provocados por curto-circuito ou sobrecargas, a fim de garantir uma confiabilidade do sistema em situações críticas de operação.

Nessa nova perspectiva de geração de energia elétrica, o controle de parâmetros e suportabilidade são fundamentais para uma operação segura do sistema em regimes críticos de operação. Para tanto, as máquinas de indução duplamente alimentadas, juntamente com o conversor estático *back-to-back* e circuitos de proteção, podem contribuir para a melhoria da qualidade de energia frente a afundamentos momentâneos de tensão (FERREIRA, 2009).

É importante o estudo do comportamento da máquina diante de algum fenômeno inesperado do processo de geração de energia através de aerogeradores, como a falta ou excesso de vento, afundamentos de tensão provocados por curto-circuito na rede e instabilidade de tensão.

Diversas topologias são usadas atualmente em plantas de geração eólica, são elas: gerador de indução em rotor em gaiola, gerador de indução duplamente alimentado, gerador síncrono a imã permanente e gerador síncrono de rotor bobinado.

Este trabalho contribuirá para esclarecer algumas características das topologias utilizadas em plantas de geração eólica, e o comportamento dos aerogeradores de indução duplamente alimentados (DFIG) frente a afundamentos de tensão.

O modelo (DFIG) trouxe grande benefícios para a geração da energia eólica, pois em outras topologias utilizava-se o conjunto para retificação e inversão entre o estator e a rede, o que limitava bastante a potência da máquina devido ao fato dos componentes eletrônicos possuírem limitações bem superiores em relação ao circuito proposto no DFIG. Ou seja, a conexão do rotor diretamente a um conversor que está conectado na rede elétrica viabiliza o aumento da potência gerada em um aerogerador.

### 1.3 INTERLIGAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS

Antigamente, onde o sistema eólico possuía uma baixa capacidade de geração, as máquinas eram conectadas diretamente à rede de distribuição. Essa inserção trazia apenas benefícios localizados ao sistema, já que atendia a demanda de apenas um alimentador de distribuição. Nos dias de hoje, sistemas eólicos com grande capacidade de geração têm sido conectados diretamente às redes de transmissão (ONS, 2019).

Cada tipo de rede, seja de distribuição ou de transmissão, possui normas para a integração de parques eólicos. A geração de energia eólica requer um controle adequado, pois a potência mecânica no eixo da máquina proveniente dos ventos varia constantemente, sendo que tal variação de potência para o SEP não é adequada (MENDES, 2009).

Diante do crescimento dos parques eólicos, o ONS formulou os procedimentos de rede a serem utilizados pelas unidades geradoras baseando-se nas orientações da EWEA. A ideia principal é que essas máquinas contribuam para a estabilidade do sistema elétrico, em casos de afundamentos de tensão e despacho de energia reativa (ONS, 2019).

Em seguida, alguns critérios de conexão de turbinas eólicas conforme a EWEA:

- a) Controle de potência ativa: alguns códigos de interligação requerem controle de potência ativa no parque eólico para garantir uma frequência estável no sistema e para prevenir sobrecarga em linhas;
- b) Controle de frequência: manutenção da frequência no sistema elétrico de potência em níveis aceitáveis, a fim de manter a segurança no fornecimento, tanto no que diz respeito à qualidade de energia elétrica como para evitar sobrecarga nos equipamentos;
- c) Faixas de tensão e Frequência: estipulam os níveis de tensão e frequência que os aerogeradores podem suportar quando o sistema elétrico está em dificuldades, com desvios de frequência e tensão fora dos valores nominais;
- d) Controle de tensão: trata-se do controle de potência reativa no sistema, tanto em regime permanente como transitório;

- e) Qualidade de Energia (harmônicos, *flickers*, etc.): vários critérios devem ser atendidos pelos aerogeradores no que diz respeito à qualidade de energia;
- f) Proteção: um sistema de relés deve ser proposto para proteger os aerogeradores, durante curtos-circuitos, sobretensões e subtensões. Isto deve garantir que o parque eólico trabalhe dentro das faixas de operações do sistema em situação normal e em situações adversas, sem a ocorrência de danos;
- g) Modelagem e simulação: alguns códigos de interligação solicitam dos fabricantes modelos e dados para realizar simulações de interação entre o sistema e o parque eólico a ser implantado. Também solicitam a instalação de equipamentos de monitoramento para verificar o comportamento atual do sistema eólico durante faltas para a validação dos modelos;
- h) Comunicação e controle externo: os parques eólicos devem fornecer sinais correspondentes às variáveis de interesse ao operador do sistema, a fim de proporcionar a operação segura do sistema de potência.

### 1.3.1 Limites de frequência e tensão no Brasil

De acordo com o submódulo 3.6 do ONS (2019), as principais exigências com relação aos valores de tensão são: operação entre 0,90 e 1,10 p.u da tensão nominal sem atuação dos relés de subtensão e sobretensão temporizados, e operação entre 0,85 e 0,90 p.u da tensão nominal por até 5 segundos. No caso da frequência, os limites são:

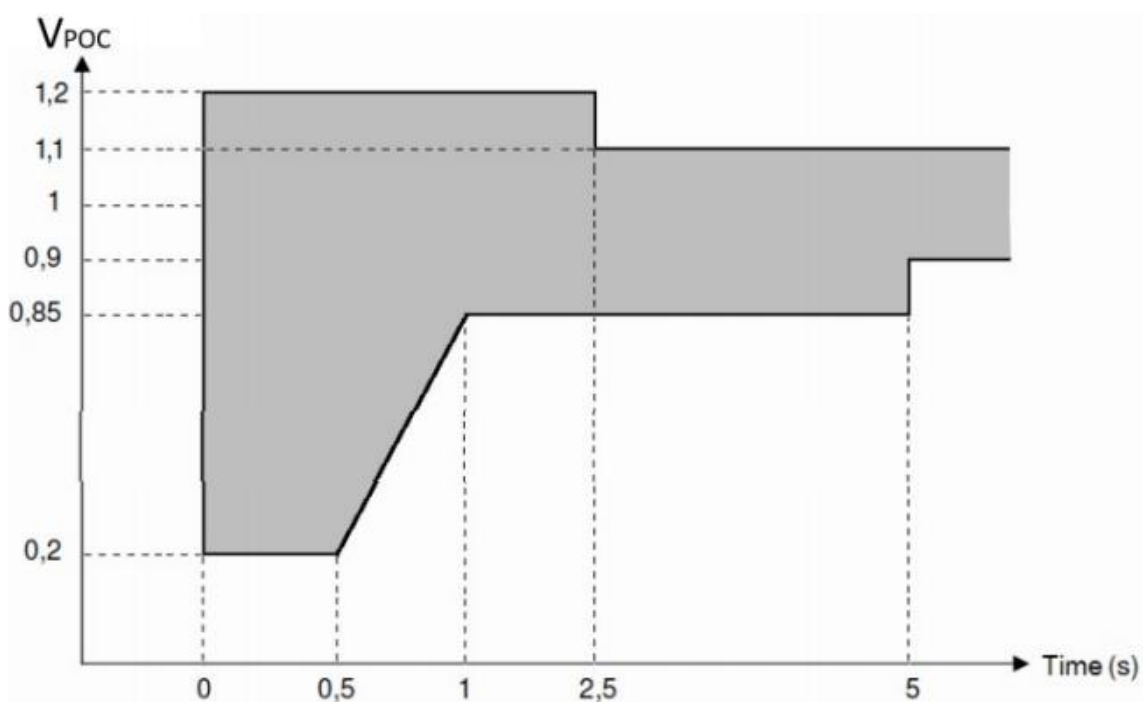
- a) operação entre 56,5 e 63 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência instantâneos;
- b) operação abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos;
- c) operação entre 58,5 e 61,5 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência temporizados e operação acima de 61,5 Hz por até 10 segundos.



### 1.3.2 Estabilidade durante faltas na rede

Caso haja afundamento de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão na rede básica da central de geração eólica, a central deve continuar operando se a tensão nos seus terminais permanecer acima da curva indicada na Figura 1.

Figura 1 - Curva de suportabilidade a afundamento de tensão



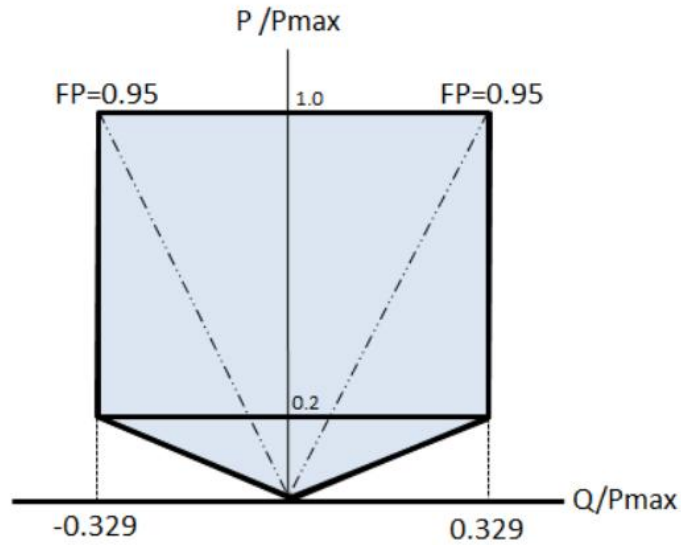
Fonte: ONS (2019).

### 1.3.3 Requisitos de geração / absorção de potência reativa

Na conexão da central geradora às instalações sob responsabilidade da transmissora, a central geradora deve propiciar os recursos necessários para, em regime permanente, operar com fator de potência indutivo ou capacitivo em qualquer ponto da área indicada na Figura 2 (ONS, 2019).

Nas condições em que os geradores não estejam produzindo potência ativa, a central de geração eólica ou fotovoltaica deverá ter recursos de controle para disponibilizar ao SIN sua capacidade de geração/absorção de potência reativa, observando o requisito mínimo de propiciar injeção/absorção nula no ponto de conexão (ONS, 2019).

Figura 2 – Faixa de geração/absorção de potência reativa



Fonte: ONS (2019).

#### 1.4 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Este trabalho utilizou um modelo de simulação obtido por meio do software MATLAB/Simulink em um sistema de 2MW com um aerogerador DFIG desenvolvido pelo laboratório de Conversão e Controle de Energia (LCCE) da UFMG. Nos referidos estudos, será analisado o processo para calcular o valor da resistência de proteção utilizada no circuito do *chopper* e do *crowbar* para proteção do rotor do DFIG durante o afundamento de tensão.

Malhas de controle serão utilizadas para observar o comportamento da máquina diante de algumas situações críticas como, por exemplo, afundamentos de tensão provocados por curto-circuito na rede elétrica em que a máquina se encontra conectada.

Através de gráficos serão analisados os parâmetros da máquina, tais como: tensão no barramento CC, corrente do rotor, corrente do GSC diante dos afundamentos de tensão.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos. O primeiro irá abordar a introdução e motivação, apresentando também as principais questões de uma turbina eólica e as fórmulas que descrevem o processo de conversão eletromecânica de energia. Os tipos de tecnologias utilizadas e os requisitos estabelecidos pelo ONS frente a afundamentos de tensão também são objetos desse capítulo.

No segundo capítulo serão apresentados os aerogeradores duplamente alimentados DFIG. Esse tipo de topologia, que está sendo frequentemente utilizada em parques eólicos, bem como suas vantagens e desvantagens, também são abordados no referido capítulo.

No terceiro capítulo é abordada a modelagem da simulação, utilizando o software Simulink/ Matlab. O arquivo inicial da simulação, elaborado pelo laboratório da UFMG, bem como as implementações das proteções do barramento CC e do circuito do rotor para verificar a suportabilidade do DFIG, propostas neste trabalho, também serão expostos nesse capítulo.

O quarto capítulo é destinado às considerações dos resultados simulados. Inicialmente, utilizou-se o regime nominal e, em seguida, aplicou-se os afundamentos de tensão seguindo os requisitos do NOS, referentes a afundamentos momentâneos de tensão.

Por fim, no quinto capítulo, explana-se a conclusão deste trabalho e as principais considerações para a continuação dos estudos de suportabilidade de aerogeradores DFIG frente a afundamentos de tensão, utilizando crowbar como proteção adicional.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE INSTALAÇÃO CENTRAL EÓLICA

O local de instalação da central eólica deve ser caracterizado por diversos parâmetros, os quais são fundamentais para a adequada implementação do projeto da central eólica e a integração desta à rede elétrica local. Os principais dados a serem obtidos para a determinação do local podem ser classificados em: caracterização do recurso eólico e caracterização da rede elétrica de conexão. O mapeamento do recurso eólico permite a elaboração do projeto elétrico adequado dos equipamentos para operarem nas condições exigidas.

A caracterização da rede elétrica, por sua vez, é fundamental para a definição dos parâmetros elétricos e na otimização da capacidade da central eólica. A rede elétrica local onde será conectada a central eólica (rede receptora) pode ser caracterizada, basicamente, pelas seguintes grandezas:

- a) Potência de curto-circuito;
- b) Ângulo de impedância de curto-circuito;
- c) Nível e regulação da tensão no ponto de conexão;
- d) Características dos transformadores da subestação de interligação;
- e) Parâmetros característicos das linhas/cabos de transmissão;
- f) Distância do ponto de conexão à central eólica;

Para o projeto elétrico básico da central eólica são necessárias as informações sobre o nível de tensão de conexão, a distância entre a central eólica e o ponto de conexão, bem como a potência de curto-circuito da subestação principal de interligação da central eólica ou do seu ramal. Para avaliar o impacto na operação da rede e na qualidade de energia elétrica local são necessários todos os parâmetros citados. Normalmente, relaciona-se a potência da central eólica instalada (ou a ser instalada) com a potência de curto-circuito no local, sendo esta chamada de relação de curto-circuito.

## 2.1 POTÊNCIA DE UMA TURBINA EÓLICA

Somente uma parcela da energia cinética do vento que atinge a área das pás da turbina é convertida em energia rotacional do rotor. Essa conversão de parte da energia cinética dos ventos causa uma redução da sua velocidade logo após sua passagem pelas pás do aerogerador. Caso houvesse o interesse de se extrair toda a energia cinética do vento incidente, o ar iria possuir velocidade zero após a passagem pelas pás, ou seja, o ar não poderia sair da turbina. Nesse caso, não teríamos como extrair energia, uma vez que, obviamente, todo o ar também seria impedido de entrar no aerogerador. No outro caso extremo, a velocidade do vento após a passagem pelas pás se manteria igual à velocidade antes da passagem, com isso, também não haveria a extração da energia do vento (CEPEL, 2011).

É possível supor que deve haver alguma forma de redução da velocidade do vento que está entre esses dois extremos e é a situação mais eficiente para converter a energia cinética dos ventos em energia rotacional no rotor. A resposta dessa questão é a redução da velocidade do vento na saída da turbina para 2/3 de sua velocidade original (CEPEL, 2011).

Este ponto de operação ideal é conhecido como Lei de Betz, cujo principal resultado diz que a máxima parcela da energia cinética do vento que pode ser convertida em energia mecânica por uma turbina eólica é teoricamente de 59%.

A potência total disponível em uma massa de ar em movimento, quando interceptada por uma turbina eólica, é dada pela equação (AKHMATOV, 2003):

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (01)$$

Onde:

P: Potência do Vento (W);

$\rho$ : Massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

A: Área de seção transversal [m<sup>2</sup>];

V: Velocidade do vento (m/s).

Conseqüentemente, a potência que pode ser convertida pela turbina é (AKHMATOV, 2003):

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{VENTO}^3 \cdot C_P(\lambda, \beta) \quad (02)$$

$$\lambda = \frac{\omega_T \cdot R}{V_{VENTO}} \quad (03)$$

$C_p$ : Coeficiente de potência da turbina, sua eficiência.

$\lambda$ : Razão entre a velocidade tangencial na ponta da pá e a velocidade do vento;

$\omega$ : Velocidade angular do rotor (rad/s);

$R$ : Raio do rotor (m);

$A$ : Área varrida pelo rotor (m<sup>2</sup>).

## 2.2 TECNOLOGIAS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

A utilização da energia eólica está em pleno crescimento, propiciada, inclusive, por avanços tecnológicos em diversas áreas de conhecimento, como por exemplo a eletrônica de potência.

A inserção de grandes parques eólicos no sistema está ficando cada vez mais frequente, com isso é importante garantir que essas máquinas contribuam para o aumento da qualidade de energia e suportabilidade em regimes críticos de operação, atendendo aos requisitos de suportabilidade exigidos pelo ONS.

Neste trabalho, serão analisadas as principais tecnologias utilizadas na conversão eletromecânica de energia, ou seja, energia mecânica do eixo da turbina, para energia elétrica injetada na rede elétrica.

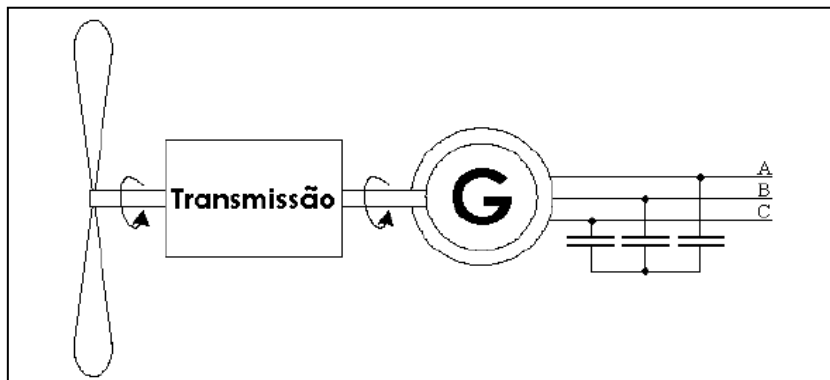
### 2.2.1 Aerogeradores com geradores de indução convencionais

As máquinas de indução são interligadas às turbinas eólicas indiretamente através de caixas de engrenagem (multiplicadores de velocidade).

Os geradores podem ser conectados à rede elétrica diretamente como mostrado na Figura 2 ou podem utilizar uma chave estática do tipo partida suave (*soft starter*), mostrada na Figura 3, entre o estator da máquina e a rede (FERREIRA, 2009).

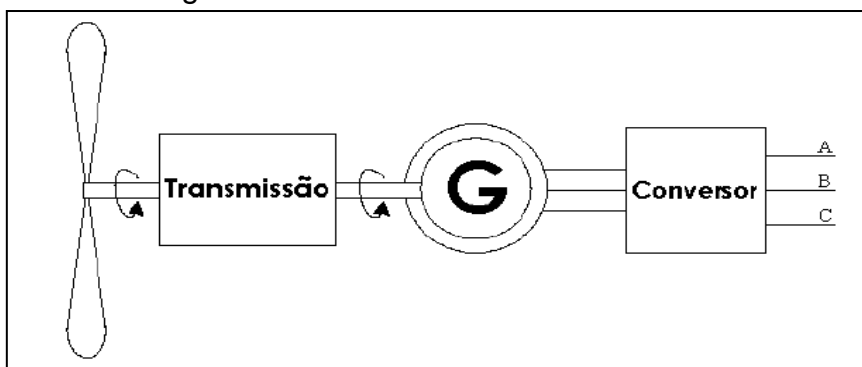
A *soft-starter* é introduzida para suavizar a partida do conjunto. A corrente de magnetização é a que gera fluxo no interior da máquina, sendo sua magnitude bastante elevada na partida. Com a utilização desse recurso é possível ajustar a proteção de forma mais segura, além de preservar a integridade dos enrolamentos da máquina.

Figura 3 - Geradores conectados diretamente na rede



Fonte: Oliveira (2009)

Figura 4 - Geradores utilizando conversor



Fonte: Oliveira (2009).

Outra modificação importante no arranjo de interligação da máquina eólica é a inserção de banco de capacitores próximos aos terminais da máquina, para correção do fator de potência local, reduzindo o consumo de reativos deste tipo de tecnologia e melhorando os níveis de tensão em regime permanente. Isto ocorre principalmente em redes fracas, já que em redes com alto valor de potência de curto-circuito a inserção de capacitores pouco interfere.

Os aerogeradores de indução convencionais são simples, robustos e apresentam um baixo custo de investimento, porém oferecem um controle limitado de parâmetros da máquina, como potência ativa e reativa.

A necessidade de fornecimento de energia reativa pelo sistema elétrico para este tipo de máquina na condição de falta, após o defeito, é preocupante, pois o banco de capacitores existente não é capaz de fornecer o elevado consumo de potência reativa, devido à redução da tensão nos terminais do gerador.

Com a redução de potência ativa injetada por esta máquina no sistema elétrico, em virtude da condição de falta, aparecerá um desbalanceamento entre os torques elétricos e mecânicos, sendo, momentaneamente, a máquina acelerada, o que pode provocar a atuação da proteção de sobrevelocidade da turbina (MENDES, 2009).

Observa-se, em condição de falta e pós-falta, uma pequena variação na frequência da máquina. Isso se deve ao fato de ocorrer uma variação brusca da potência ativa e reativa no momento da falta.

### 2.2.2 Aerogeradores síncronos a ímã permanente

Turbinas eólicas de velocidade variável possuem ampla utilização em sistemas eólicos instalados no mar (*offshore*). Uma das premissas de utilização de aerogeradores nestes locais é que a máquina possui pouca intervenção de manutenção. A vantagem de utilizar a máquina com velocidade variável é a grande flexibilidade de operação do aerogerador com alto desempenho dinâmico. (LCCE, 2013).



O rotor do gerador elétrico possui excitação com ímãs permanentes que operam em velocidade variável. A energia captada é transferida para o conversor pleno da máquina, o qual utiliza a configuração CA-CC-CA, conforme apresentado na Figura 5. Através do barramento CC, o conversor ligado à rede elétrica trabalha como um inversor do tipo fonte de tensão (*Voltage Source Converter - VSC*), utilizando chaves eletrônicas do tipo IGBT, fixando a frequência elétrica de saída do aerogerador de acordo com a frequência da rede, ou seja, no Brasil é fixada a 60 Hz.

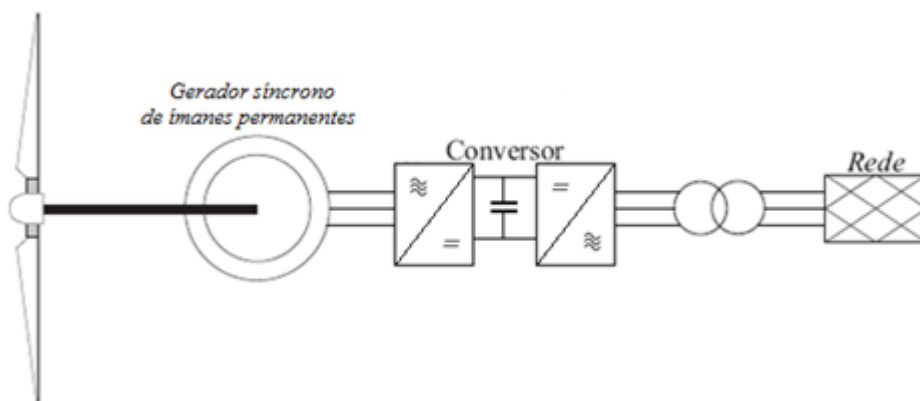


Figura 5 – Sistema com gerador a ímã permanente

Fonte: Moraes (2017).

Como principais desvantagens deste tipo de tecnologia destacam-se o elevado diâmetro do rotor das máquinas, devido ao seu grande número de polos, e a necessidade de utilização de conversores com potência nominal igual ou superior à máxima potência a ser gerada.

Uma das principais vantagens consiste no desacoplamento entre o aerogerador e a rede elétrica, como resultado da presença dos conversores eletrônicos. Na ocorrência de uma rajada de vento, os conversores continuam a entregar potência constante à rede, apesar da súbita variação de velocidade do rotor eólico.

É importante observar também que o gerador síncrono não pode fornecer potência reativa à rede devido a este desacoplamento. Através do barramento CC, apenas a transferência de potência ativa é possível. Conseqüentemente, o controle de potência reativa e de tensão neste tipo de turbina é executado pelo conversor interligado à rede.

Durante um curto-circuito na rede elétrica, uma subtensão aparecerá nos terminais deste conversor e, devido à capacidade limitada dos dispositivos eletrônicos empregados no mesmo, a potência elétrica injetada na rede é reduzida enquanto a potência fornecida pela turbina não se altera. Com isso, ocorrerá um desbalanceamento de potência no barramento CC, aumentando a tensão no capacitor. Para evitar danos ao conversor, normalmente é empregado um dispositivo *chopper* de frenagem para limitar a tensão do barramento (COTA, 2016).

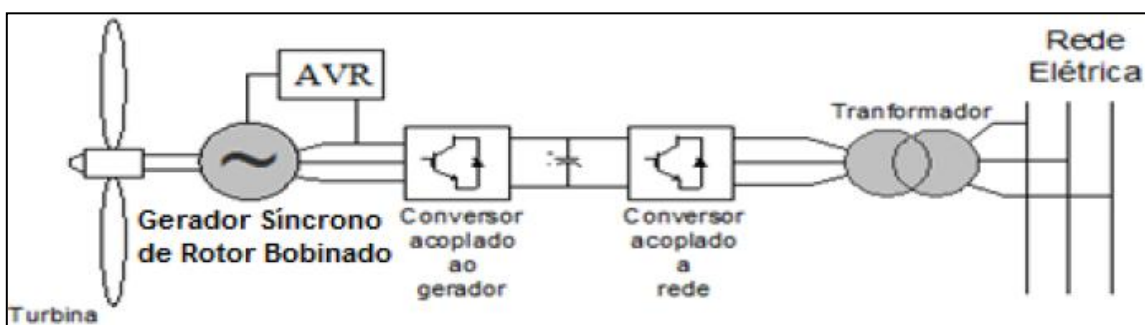
### 2.2.3 Aerogeradores síncronos com rotor bobinado

Os geradores síncronos de rotor bobinado para aplicações em sistemas eólicos normalmente apresentam a configuração de rotor de polos salientes com grande número de polos e baixa velocidade de rotação, o que propicia o acoplamento direto do gerador com a turbina eólica, assim como o aerogerador síncrono a ímãs permanentes.

A máquina síncrona de rotor bobinado apresenta uma realimentação no enrolamento de campo do rotor a partir da rede elétrica com o uso de retificadores, o que propicia a regulação da tensão, conforme a Figura 6.

Assim como para as máquinas a ímã permanente, a desvantagem desse sistema encontra-se na necessidade de utilização de um conversor estático de mesma potência do gerador elétrico para o processamento da energia proveniente do estator, seu comportamento diante da rede é similar ao da tecnologia com gerador síncrono a ímãs permanentes.

Figura 6 - Uso de retificadores para regulação da tensão



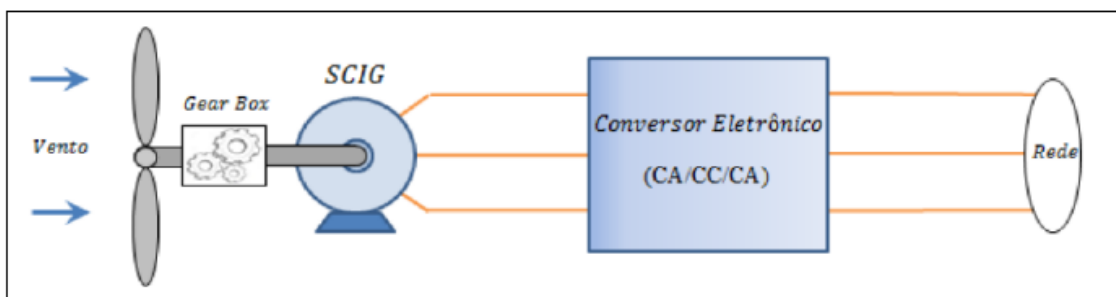
Fonte: Ferreira (2009).

#### 2.2.4 Aerogeradores de indução em gaiola e conversor pleno

A tecnologia que emprega o gerador de indução em gaiola é um exemplo de aerogerador que opera com velocidade constante. A configuração construtiva mais empregada compõe-se de um gerador de indução com o rotor em gaiola, conectado ao eixo de uma turbina por meio de uma caixa de transmissão mecânica (LCCE, 2013).

O gerador de indução trabalha em uma faixa de operação de velocidade ligeiramente supersíncrona, estabelecendo um escorregamento negativo. A ausência de elementos armazenadores de energia em sua estrutura permite que todos os distúrbios inerentes às variações de potência existentes no vento sejam diretamente transferidos à rede elétrica, ocasionando diversos problemas de qualidade de energia para o consumidor final (LCCE, 2013).

Figura 7 – Aerogerador de indução em gaiola com conversor pleno



Fonte: Moraes (2017).

### 2.3 TECNOLOGIA AEROGERADORES DUPLAMENTE ALIMENTADOS

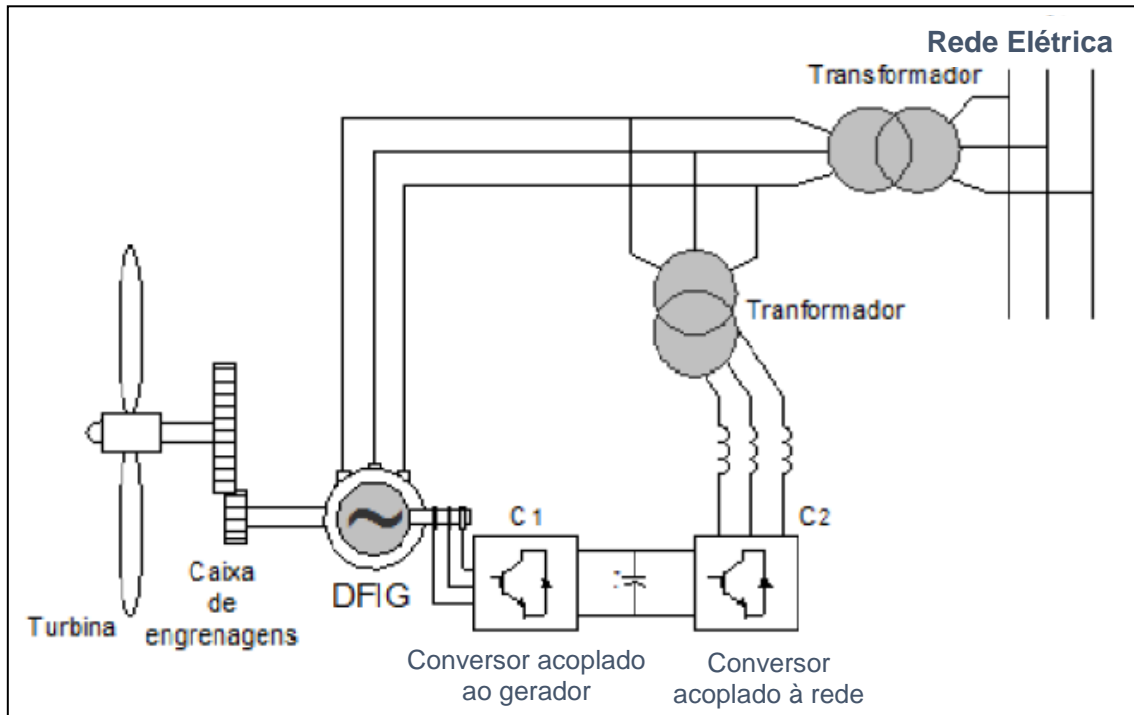
Neste tipo de tecnologia utiliza-se um bloco conversor na configuração CA-CC-CA entre o rotor da máquina e a rede elétrica, conforme Figura 8.

Os conversores estáticos utilizados são constituídos por IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) que possibilitam a troca de fluxo bidirecional de potência ativa entre o rotor e a rede elétrica, através de controle vetorial. A parte do conversor ligada diretamente à rede elétrica opera com a frequência do sistema elétrico, controlando a tensão do barramento CC.

O conversor ligado ao rotor opera com diferentes frequências de acordo com a velocidade do aerogerador, injetando tensões ou correntes controladas

no rotor da máquina elétrica a partir de estratégias de controle de potências ativa e reativa.

Figura 8 - Bloco conversor na configuração CA-CC-CA entre o rotor da máquina e a rede elétrica



Fonte: Ferreira (2009).

Comparado às turbinas que utilizam conversor pleno conectado ao estator, o DFIG possui várias vantagens como:

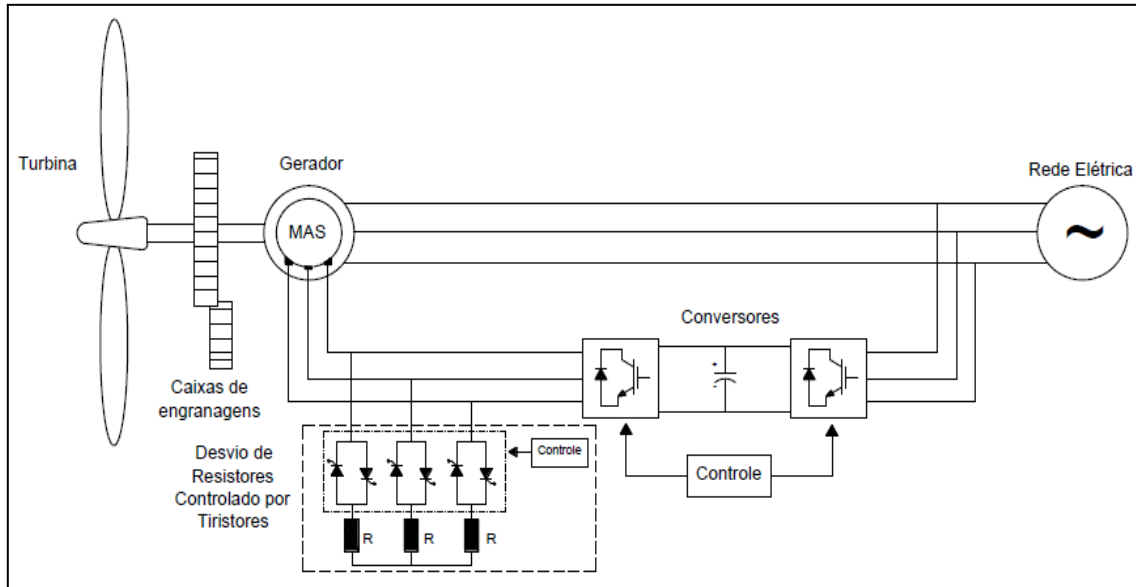
- a) O conversor tem menor custo, uma vez que o conversor do rotor possui potência de apenas 25% a 30% da capacidade nominal da máquina;
- b) De forma análoga, os filtros utilizados nos conversores de tensão também são menores e mais baratos;
- c) Controle o fator de potência no ponto de conexão do aerogerador.

A principal desvantagem desse modelo de aerogerador é sua operação limitada durante faltas no sistema elétrico. Essas faltas, mesmo distantes dos pontos de localização das turbinas eólicas, podem causar um afundamento de tensão nos terminais do ponto de conexão.

O afundamento provocará um aumento na corrente nas bobinas do estator do DFIG. Uma possível solução, que algumas vezes é adotada para

preservar os conversores, é, durante a falta no sistema elétrico, curto-circuitar o rotor da máquina a partir do *crowbar*, mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Curto-circuito do Rotor - *Crowbar*

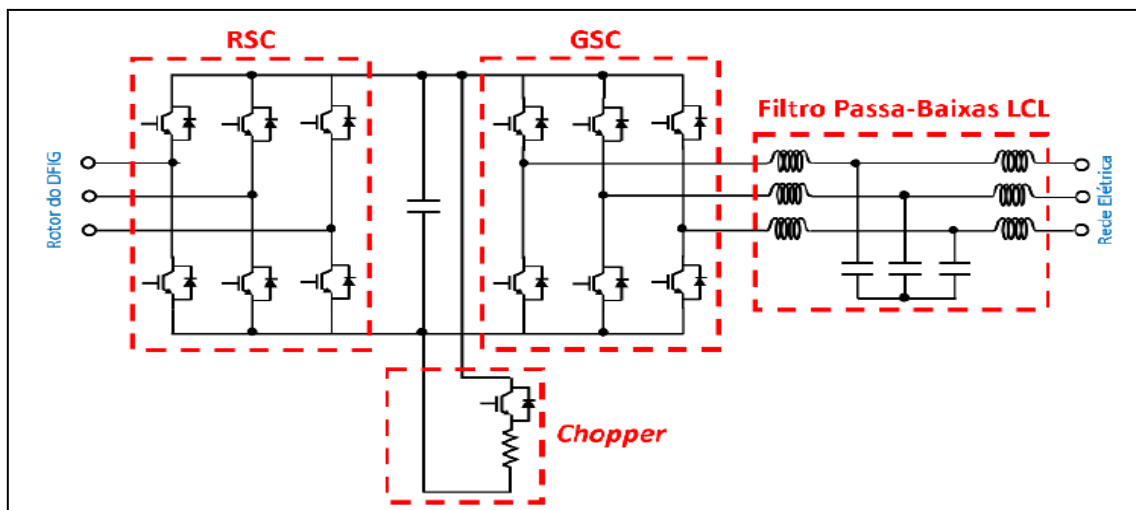


Fonte: Cota (2016).

A operação deste dispositivo faz com que a elevada corrente induzida no rotor passe por resistores de dissipação, conforme mostra a Figura 8, evitando a sobrecarga nos conversores do rotor (MENDES, 2009).

Outro dispositivo utilizado é o circuito *chopper*, o qual é apresentado na Figura 10 por meio do seu diagrama de conexão. O *chopper* é inserido no barramento CC para proteger contra elevações de tensão no momento do afundamento de tensão. O circuito descarrega a energia em excesso através de uma resistência externa que é chaveada através de um IGBT.

Figura 10 – Chopper no barramento CC

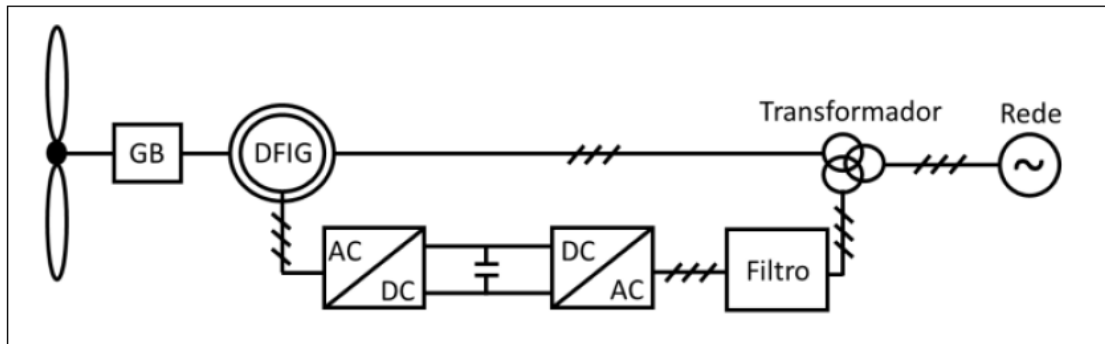


Fonte: Cota (2016).

## 2.4 ESTRUTURAS DE CONTROLE DO DFIG

Para maior clareza no que concerne aos aerogeradores DFIG, tal tecnologia é novamente representada abaixo, na Figura 11.

Figura 11 – Tecnologia de aerogeradores DFIG



Fonte: Cota (2016).

Como se observa, o DFIG utiliza para seu controle dois conversores na configuração *back-to-back*. O conversor do lado do rotor (RSC) é responsável por controlar a potência ativa e reativa no estator do gerador ( $P_s$  e  $Q_s$ ). Para isso, internamente às malhas de  $P_s$  e  $Q_s$ , devem ser implementados circuitos que controlem as correntes de rotor. (MENDES, 2009)

O conversor conectado à rede (GSC) tem a função de controlar a tensão no barramento CC, bem como o fluxo de potência reativa. No próximo capítulo será descrito o modelo computacional representativo da tecnologia DFIG utilizado para os estudos desenvolvidos nesse trabalho.

### 3 MODELO DE SIMULAÇÃO

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A simulação consiste na modelagem de uma turbina eólica de 2 MW interligada mecanicamente ao aerogerador DFIG. O trabalho inicial (simulação) nasceu da dissertação de mestrado “*Estudo de um Restaurador Dinâmico de Tensão Aplicado a Sistemas de Conversão de Energia Eólica com Gerador de Indução Duplamente Alimentado*” (COTA, 2016).

Esse trabalho visa realizar uma análise inicial do comportamento do sistema, composto pelo DFIG, conversores e rede, em regime nominal e em regimes transitórios, de modo a validar a curva de suportabilidade da máquina. A ideia é observar o funcionamento frente a afundamentos de tensão nas regiões de 0.85 pu e 0.20 pu.

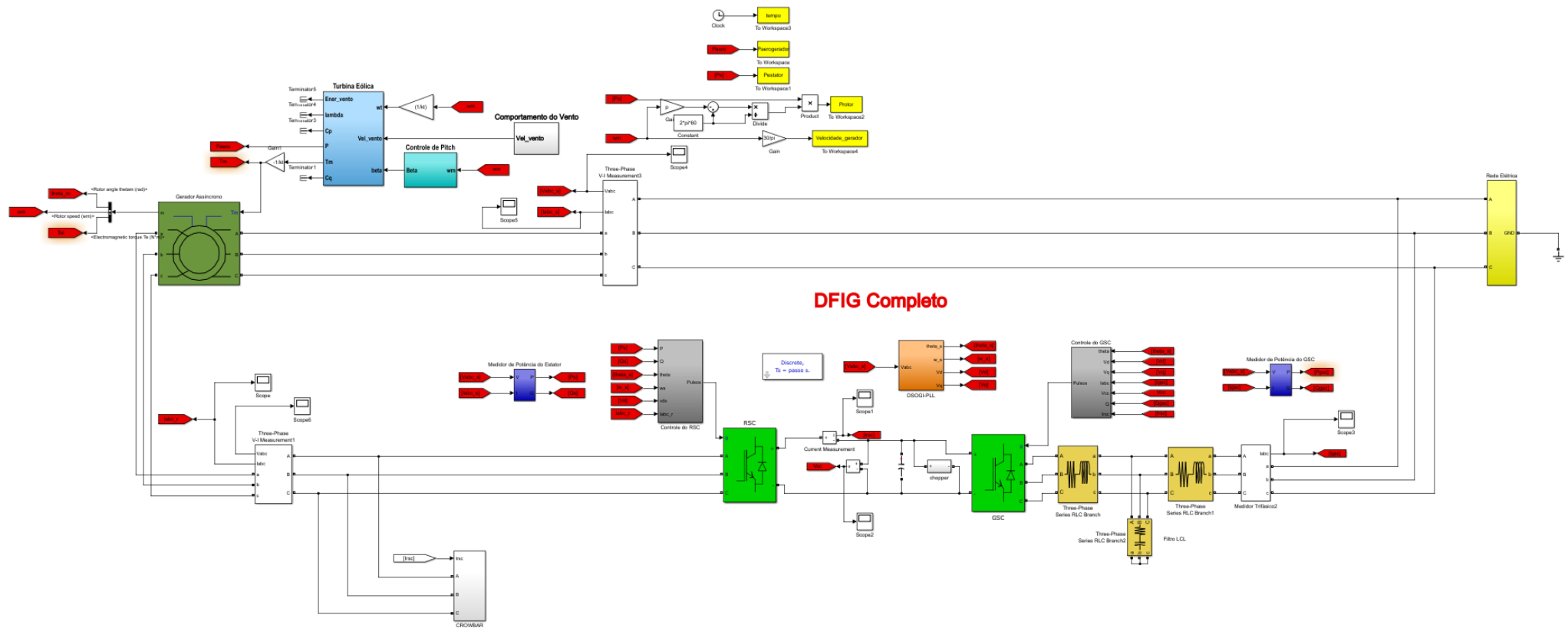
As grandezas observadas foram corrente e tensão do barramento CC, corrente de saída do GSC e corrente do circuito rotórico. Após essa etapa, foi projetado o circuito de proteção *chopper* que visa atuar em determinados momentos em que a tensão do barramento CC ultrapassa 1540 Vcc. O dispositivo *crowbar* foi inserido para limitar a corrente do rotor.

##### 3.1.1 Parâmetros do sistema (turbina e gerador)

PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO		
Velocidade nominal do gerador	2340	<b>rpm</b>
Raio das pás	37.049	<b>m</b>
Área varrida pelas pás	4310	<b>m<sup>2</sup></b>
Densidade do ar	1,225	
Ângulo inicial da pá	0	<b>°</b>
Resistência do estator	0,002381	<b>Ω</b>
Indutância de dispersão do estator	0,07579	<b>mH</b>
Resistência do rotor	0,002381	<b>Ω</b>
Indutância de dispersão do rotor	0,060481	<b>mH</b>
Indutância de magnetização	0,0023	<b>H</b>
Momento de inércia do gerador	4,4	<b>kg.m<sup>2</sup></b>
Fator de fricção	0,007	
Número de par pólos	2	<b>pólos</b>

### 3.2 SIMULAÇÃO SIMULINK

Figura 12 – Simulação completa modelamento sistema



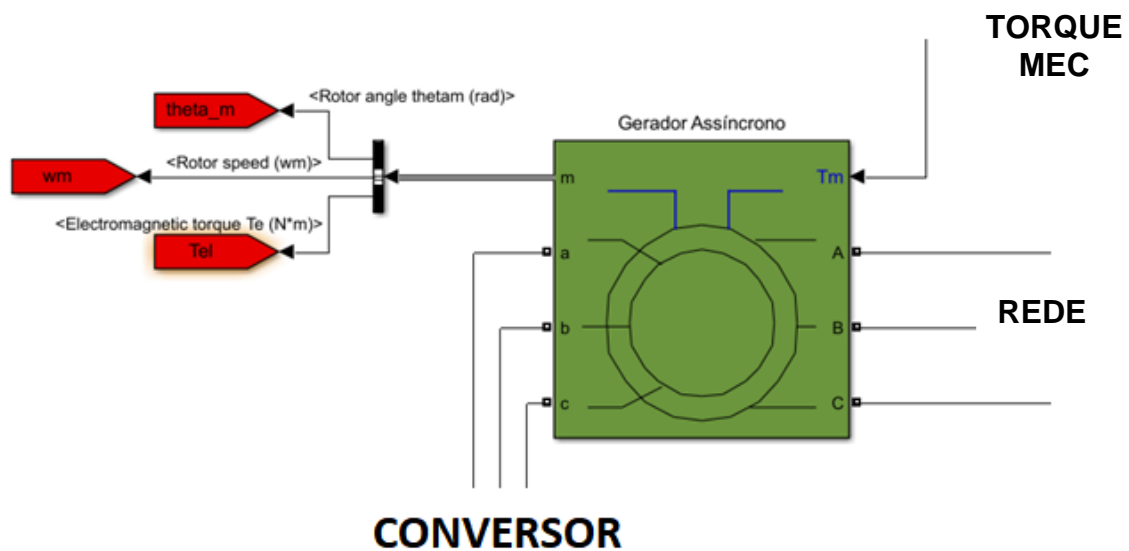


O sistema é composto por blocos que tem o objetivo de simular cada componente um sistema de geração eólica com aerogerador DFIG: turbina, conversor *back-to-back*, controles e rede trifásica.

### 3.3 SIMULAÇÃO DO GERADOR

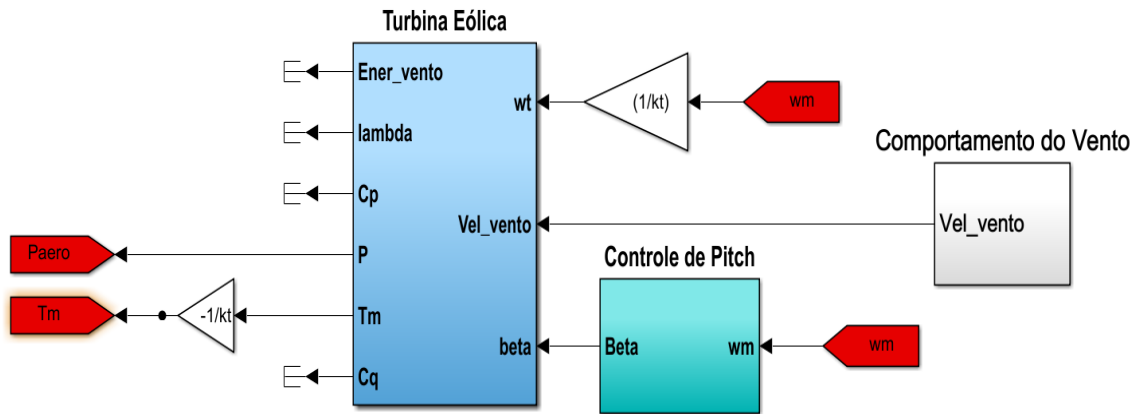
Na figura 13, a seguir, o aerogerador está conectado diretamente à rede elétrica pela parte estatórica, sendo utilizado um modelo pronto do Matlab da máquina de indução. A parte rotórica do aerogerador (também alimentada) está conectada a um conversor do tipo *back-to-back*.

Figura 13 – Modelamento DFIG



### 3.4 SIMULAÇÃO TURBINA EÓLICA

Figura 14 – Modelamento turbina

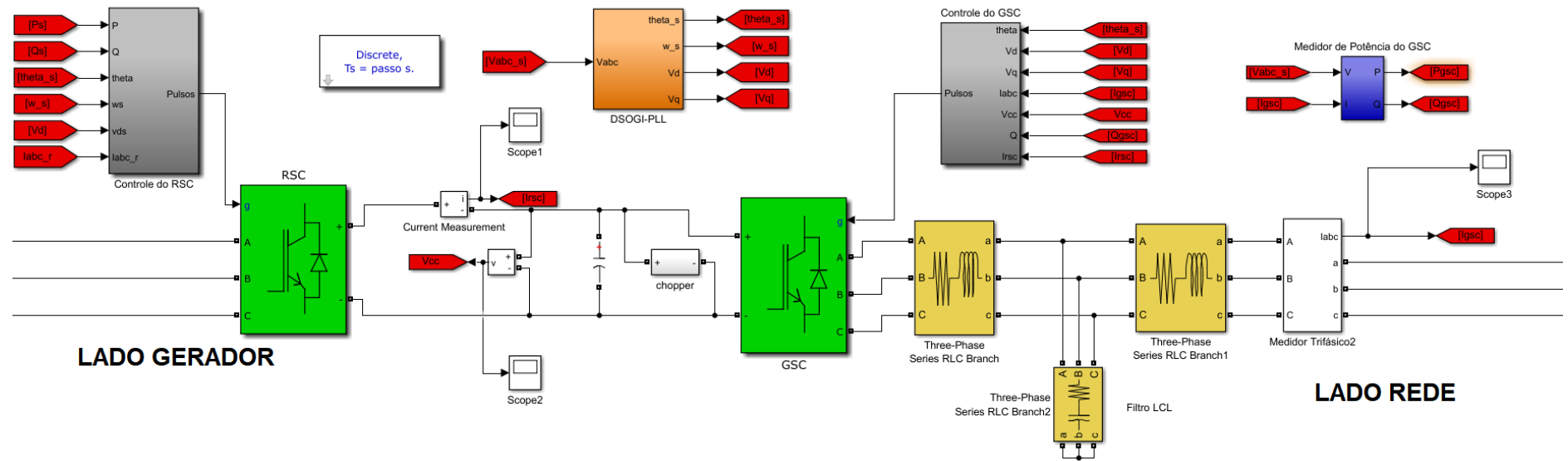


A turbina eólica fornece potência mecânica ao eixo do aerogerador DFIG conforme visto na equação [1]. O coeficiente de eficiência da turbina  $C_p$  [2] foi implementado para simular o funcionamento real da turbina eólica. O torque eletromecânico é fornecido com valor negativo devido ao referencial utilizado no bloco “gerador assíncrono” do Simulink. Nessa etapa da simulação são realizadas mudanças do perfil do vento com o objetivo de observar vários estágios de operação. O controle de ângulo *Pitch* tem objetivo de limitar a potência do sistema caso ela se eleve do valor nominal de 2MW.

### 3.5 SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES

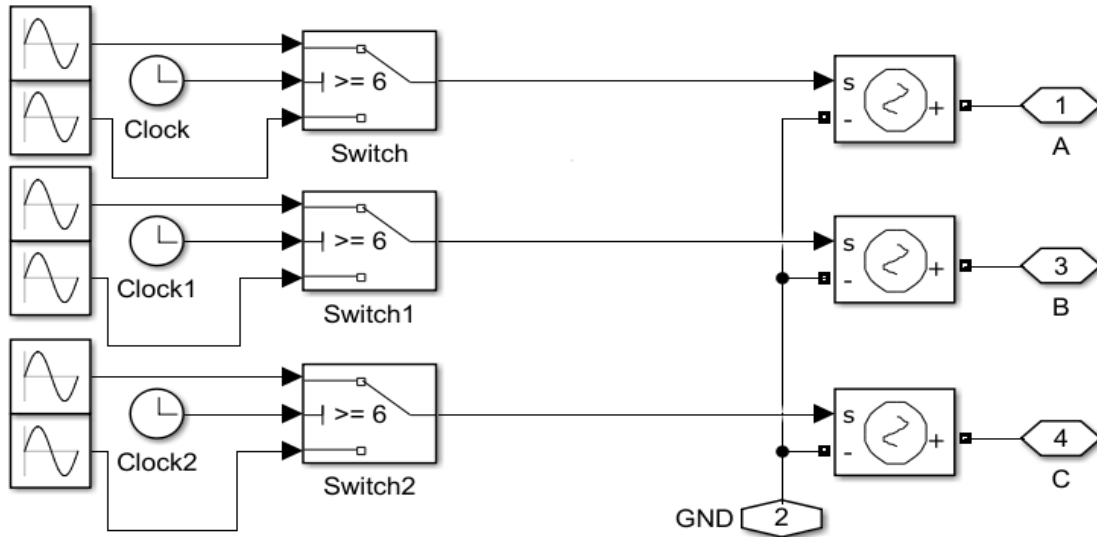
O lado do conversor conectado ao rotor é chamado de RSC (Rotor Side Converter) e o do lado da rede de GSC (Grid Side Converter). Esses importantes dispositivos atuam no controle da máquina, despachando potência ativa e reativa e controlando a tensão no barramento CC. Maiores detalhes sobre o controle e projeto dos controladores podem ser encontrados na dissertação “*Estudo de um Restaurador Dinâmico de Tensão Aplicado a Sistemas de Conversão de Energia Eólica com Gerador de Indução Duplamente Alimentado*” (COTA, 2016).

Figura 15 – Modelamento conversor RSC e GSC



### 3.6 SIMULAÇÃO REDE TRIFÁSICA

Figura 16 – Modelamento rede trifásica equilibrada



Essa etapa da simulação é responsável por alterar o perfil de tensão em um tempo pré-determinado, ou seja, a partir de 6 segundos da simulação é decrementado para 0.85 pu o perfil da tensão e, em um próximo passo, para 0.2 pu. Simulou-se uma rede ideal já que o objetivo é analisar o impacto do afundamento no DFIG sem se preocupar com a dinâmica intrínseca da rede.

### 3.7 PROJETO *CHOPPER* DO BARRAMENTO CC

Na presença de um AMT (Afundamento Momentâneo de Tensão), a tensão no barramento CC pode elevar-se, provocando altas correntes. Tensões podem ser induzidas no rotor do gerador, fazendo com que o fluxo de energia pelo conversor RSC seja maior.

Devido ao afundamento, a corrente no GSC deve aumentar para manter a tensão do barramento CC constante. Contudo, o controle de corrente pode saturar, devido aos limites físicos do conversor.

Logo, é necessário instalar um *chopper* de proteção no barramento CC para que o mesmo drene a energia acumulada no mesmo e impeça a elevação de tensão. Para as simulações neste trabalho, o *chopper* é chaveado para

tensões 1,2 vezes o valor nominal da tensão do barramento CC ( $v_{ccnom}$ ), o valor é 1540 V. A resistência é dada pela seguinte equação (COTA, 2016):

$$R_{chopper}^{DFIG} = \frac{1,2v_{cc}^{nom}}{P_{nom}^{RSC,GSC}}, \quad (04)$$

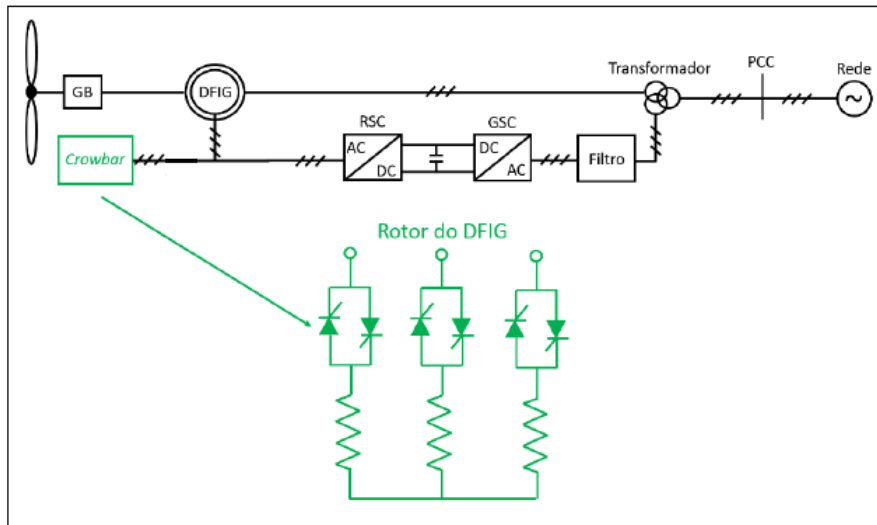
Em que  $P_{nomRSC,GSC}$  é a potência nominal dos conversores.

### 3.8 PROJETO CROWBAR

Uma das primeiras propostas para melhorar a suportabilidade de aerogeradores DFIG durante um AMT é a inserção de um dispositivo *crowbar* em derivação no circuito de rotor da máquina, sendo que esse dispositivo se baseia numa resistência externa chaveada por um conjunto de tiristores. Assim, na presença de um AMT, pelo qual as correntes e tensões elevadas são induzidas no rotor, o *crowbar* é ativado para drenar toda a corrente do circuito rotórico. Para melhorar o tempo de resposta da inserção do *crowbar*, faz-se necessário a desconexão do conversor RSC, no entanto, para implementar o seccionamento, há a necessidade de instalação de dispositivos adicionais para essa função. Uma saída simples é bloquear os pulsos do conversor RSC, conforme visto (MENDES, 2009) e, dessa forma, o controle deve parar de atuar, de modo a proteger o conversor, transformando o DFIG em um simples gerador de indução. Ao final da falta, o RSC é novamente reativado através dos pulsos de controle e o *crowbar* é desconectado como exemplifica a Figura 16.

Para um melhor entendimento do funcionamento do conjunto é exemplificada uma “chave” que conecta e desconecta o circuito rotórico da resistência do *crowbar*. Em sistemas de proteção do circuito rotórico são utilizados tiristores que são controlados por pulso, criando um barramento CC de referência para o *crowbar*.

Figura 17 – Exemplo aplicação *crowbar*



Fonte: Cota (2016).

Determinar o valor ótimo dessa resistência apresenta certa dificuldade, uma vez que resistências de valores baixos podem fazer com que as correntes do rotor sejam elevadas, enquanto resistências com valores mais altos podem ocasionar grandes tensões no circuito de rotor. MENDES (2019) apresenta a fórmula do cálculo da resistência do *crowbar*, de forma que a queda de tensão na resistência calculada não ultrapasse a tensão do barramento CC. Desse modo, permite que a corrente flua por esse circuito e não pelo conversor RSC.

$$R_{crow} < \frac{V_{dc}R_r}{V_{rotor} - V_{dc}}, \quad (5)$$

V<sub>dc</sub> - Tensão do barramento CC;  
 R<sub>r</sub> - Resistência rotórica;  
 V<sub>rotor</sub> - Tensão do rotor;  
 R<sub>crow</sub> - Resistência Crowbar

No momento do afundamento de tensão a corrente do circuito do rotor aumenta consideravelmente. O *crowbar* é acionado por um valor de 10 % acima da corrente nominal, por volta de 2200 A. Nesse mesmo instante são bloqueados os pulsos para o conversor RSC, permitindo que o conversor GSC controle a tensão do barramento CC. Após o período transitório do afundamento de tensão e enquadramento da corrente do circuito rotórico, o *crowbar* pode ser desativado e o conversor RSC pode ser novamente sincronizado.

## 4 RESULTADOS SIMULADOS

Serão apresentados a seguir os resultados simulados, que consistem na avaliação do sistema no regime nominal, ou seja, observando-se o comportamento do circuito sem o afundamento de tensão. Nessa primeira etapa ocorre apenas a variação da velocidade do vento.

No segundo momento o sistema será simulado para um afundamento de tensão 0.85 pu sem nenhuma proteção (*crowbar* + *chopper*).

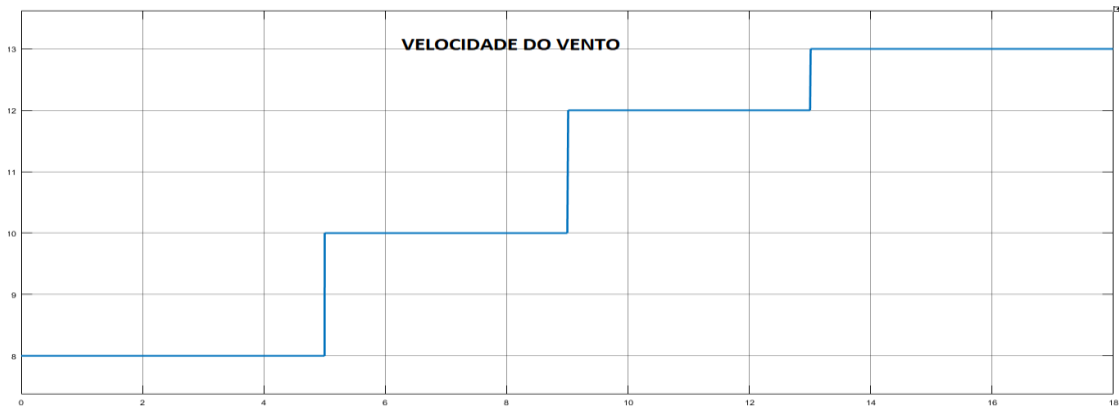
Por fim serão apresentados os resultados para o cenário mais crítico exigido pelo procedimento de rede, provocando-se um afundamento de tensão trifásico para 0.2 pu. Nessa mesma região de funcionamento será inserido o circuito *chopper* para observar o comportamento do conversor e do *crowbar*, bem como as grandezas do circuito rotórico.

### 4.1 REGIME NOMINAL

Um perfil variável na velocidade do vento é inserido (Figura 17) com vistas à observação do comportamento do DFIG em vários estágios de funcionamento. O objetivo é avaliar os valores de potência despachada pelo conjunto e grandezas elétricas do sistema.

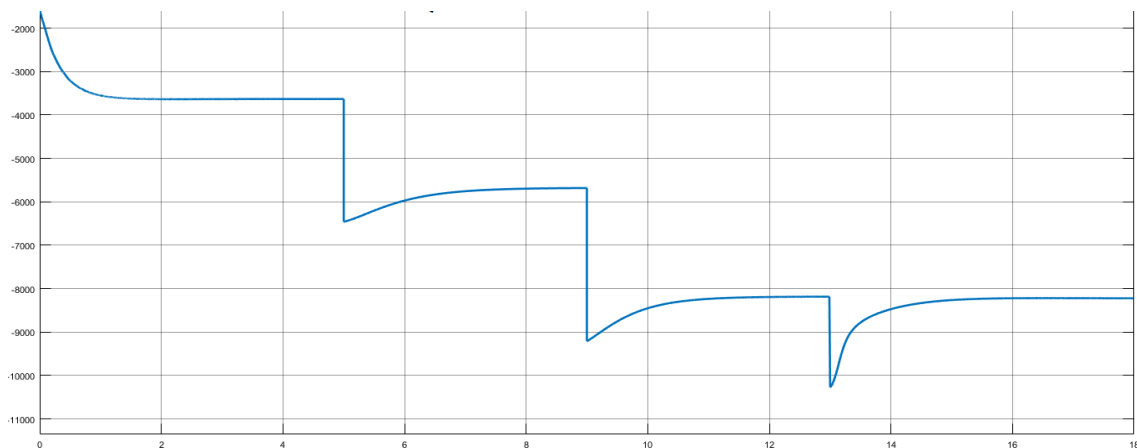
Na simulação apresentada, observa-se o comportamento da máquina desde sua partida até uma região de estabilização. No início da simulação até o tempo de 3 segundos, algumas grandezas aparecem com oscilações não adequadas, como por exemplo a tensão do barramento CC.

Figura 18 – Velocidade do vento



O valor negativo do torque mecânico (Figura 18) é uma característica referencial para o Simulink, ou seja, para a implementação funcionar como gerador é necessário que tal componente seja negativa, para então simular o funcionamento do sistema.

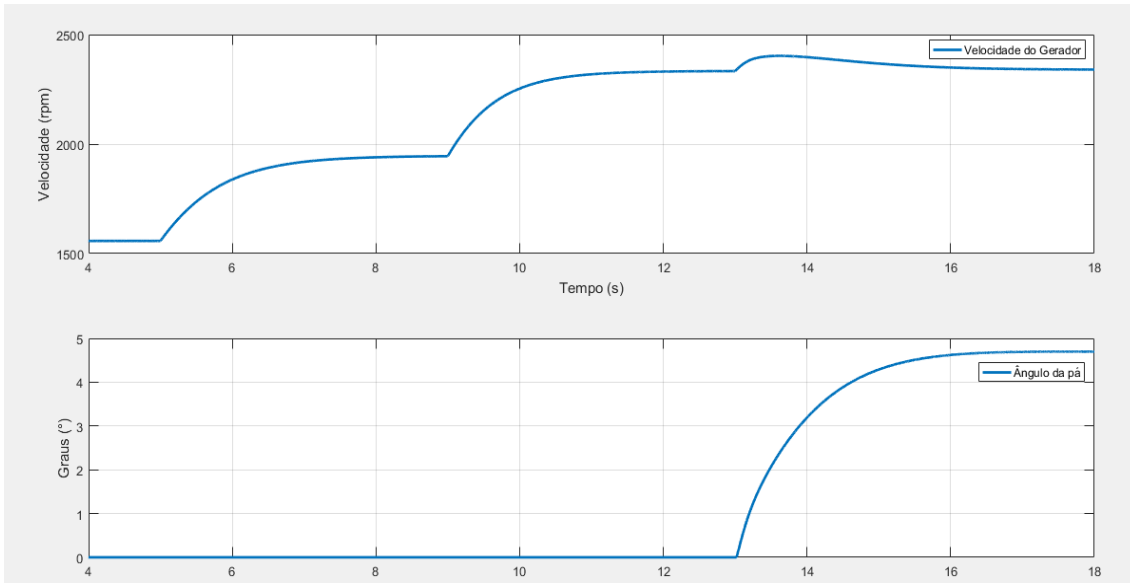
Figura 19 – Torque mecânico



É possível observar a variação da velocidade (Figura 19) do aerogerador em rpm e a partir de um determinado ponto o controle de ângulo *pitch* é acionado, estabilizando a velocidade do conjunto. A malha de controle atuou, pois existente uma velocidade de referência do conjunto. Nessa simulação a velocidade do gerador em rpm foi utilizada para atuar no controle de ângulo *pitch*.

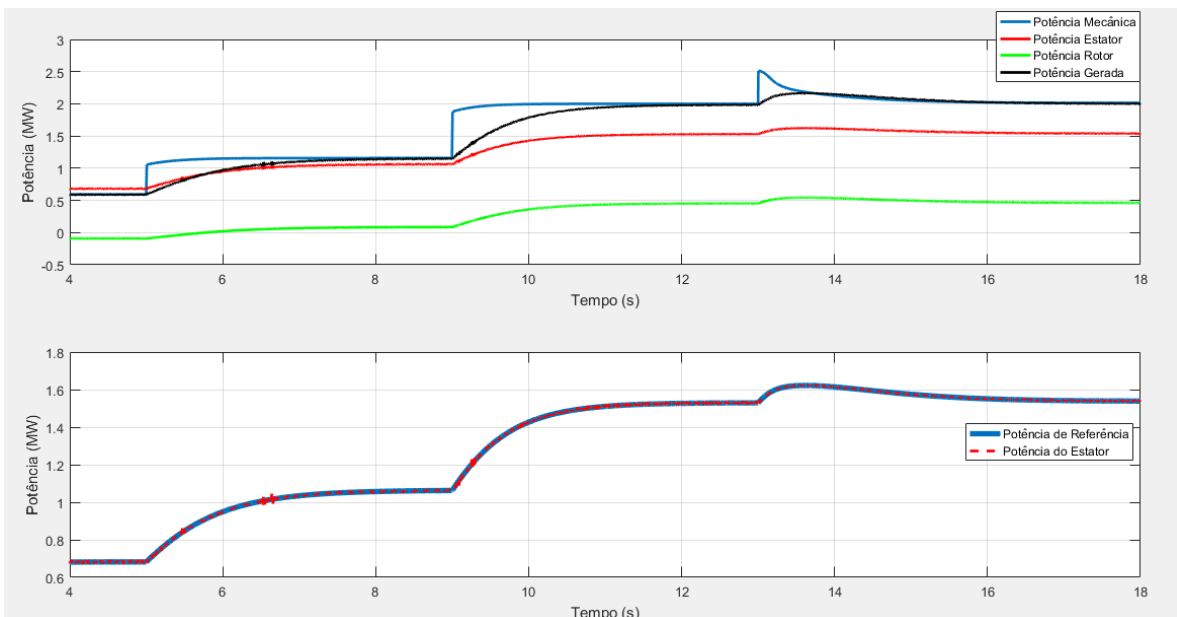


Figura 20 – Velocidade em rpm do Gerador



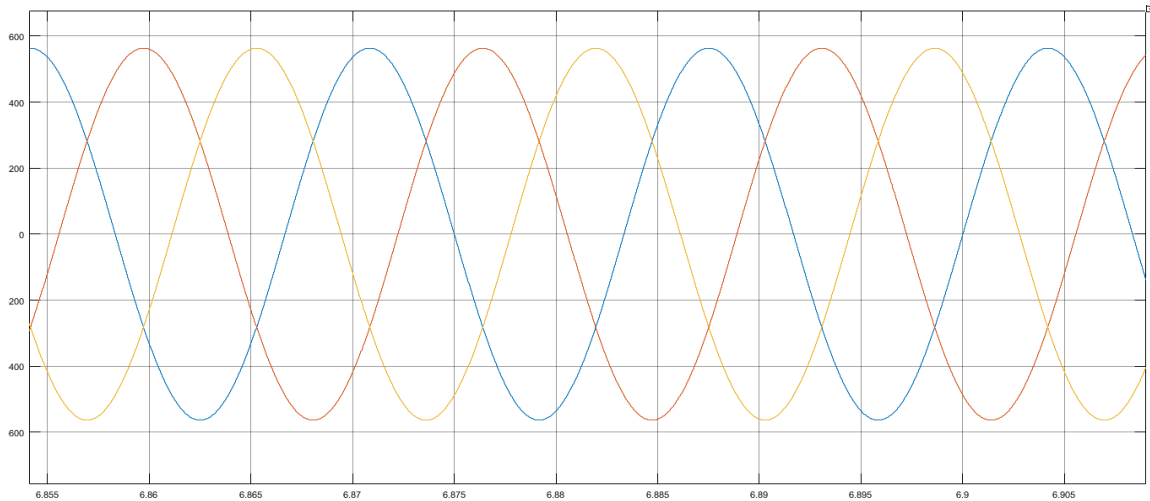
O resultado das potências é bastante interessante, uma vez que possibilita a validação das teorias do DFIG relacionadas ao comportamento da máquina em velocidades acima e abaixo da velocidade síncrona. O despacho de potência ativa pelo circuito do rotor está positivo em velocidades supersíncronas e negativo na região subsíncrona, na Figura 21 é possível observar o despacho positivo de potência ativa após 5 segundos de simulação.

Figura 21 – Potências do sistema



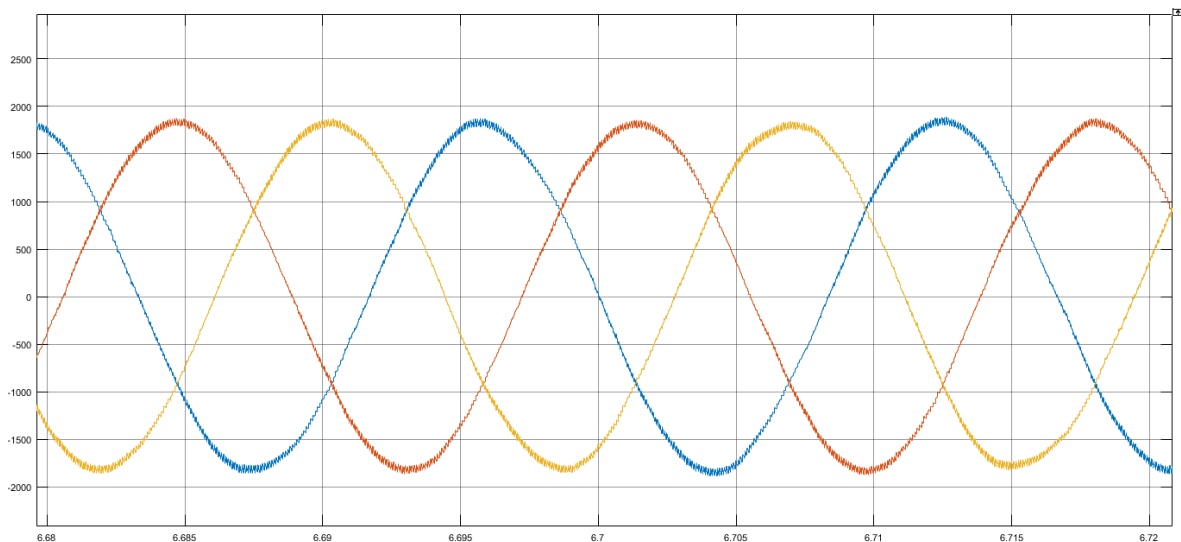
A tensão de saída do gerador (Figura 22), com perfil trifásico, é senoidal e equilibrada.

Figura 22 – Tensão de saída do estator do gerador



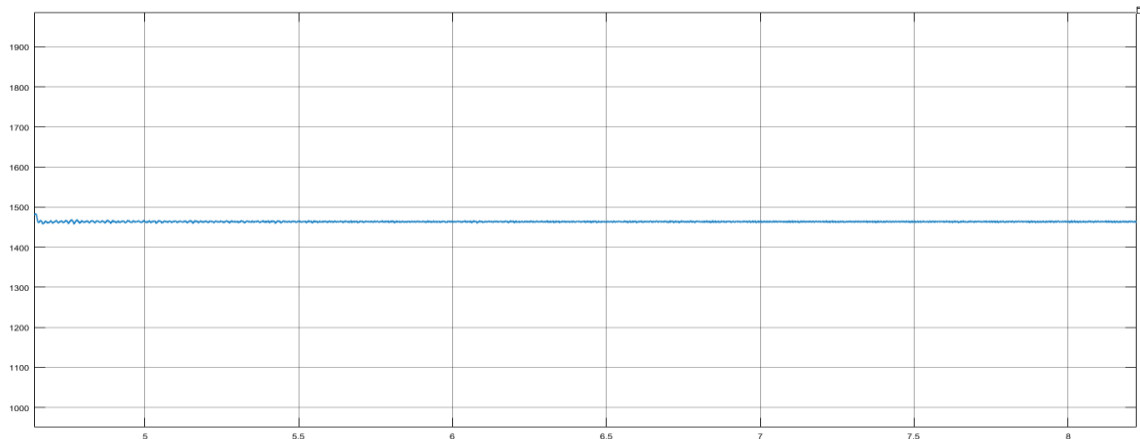
A corrente de saída trifásica é senoidal e equilibrada (Figura 23). Trata-se da corrente no ponto de conexão do conjunto.

Figura 23 – Corrente de saída estator do gerador



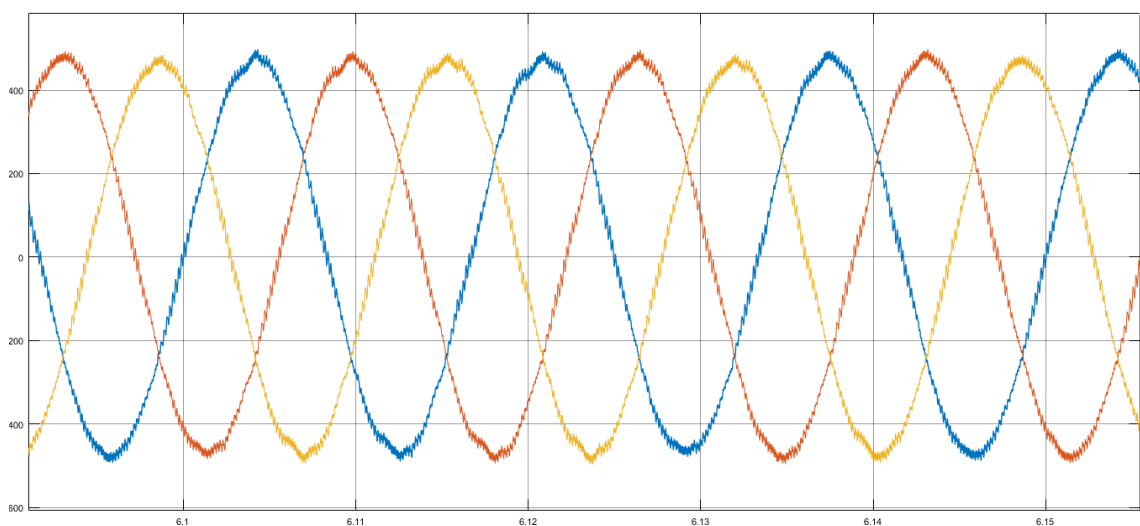
A tensão do barramento CC (figura 24) é uma componente fundamental para avaliar a estabilidade e resposta do sistema. Nesse caso, como não houve afundamento de tensão, o valor tende a ser constante. As oscilações iniciais são devidas à partida e aos ajustes das malhas de controles.

Figura 24 – Tensão do barramento CC



Para a corrente que flui no barramento CC, os resultados na saída do GSG apresentam oscilações em virtude das medições e harmônicos provocados pelo chaveamento dos conversores PWM, os quais ocorrem no conversor *back-to-back*. Também é possível observar uma corrente de saída do conversor trifásica e equilibrada (figura 25).

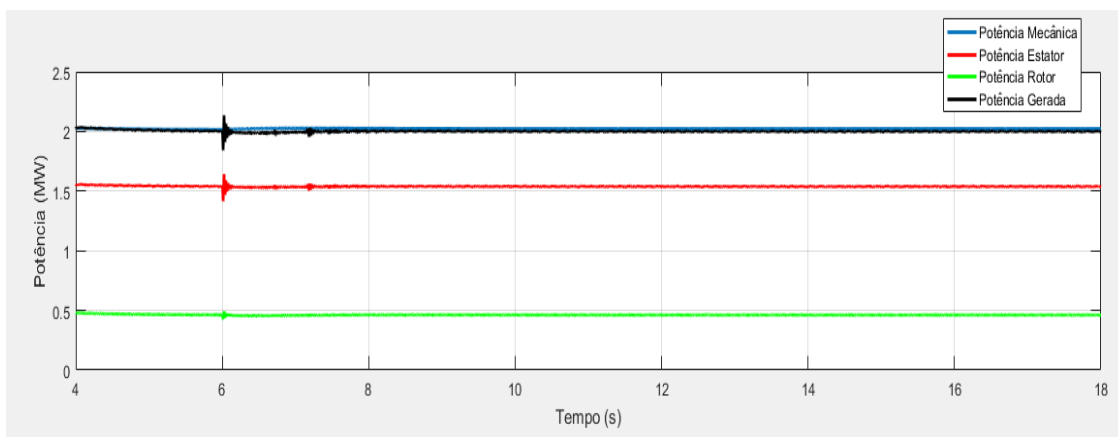
Figura 25 – Saída de corrente do conversor - GSC



## 4.2 AFUNDAMENTO PARA 0.85 pu SEM PROTEÇÕES

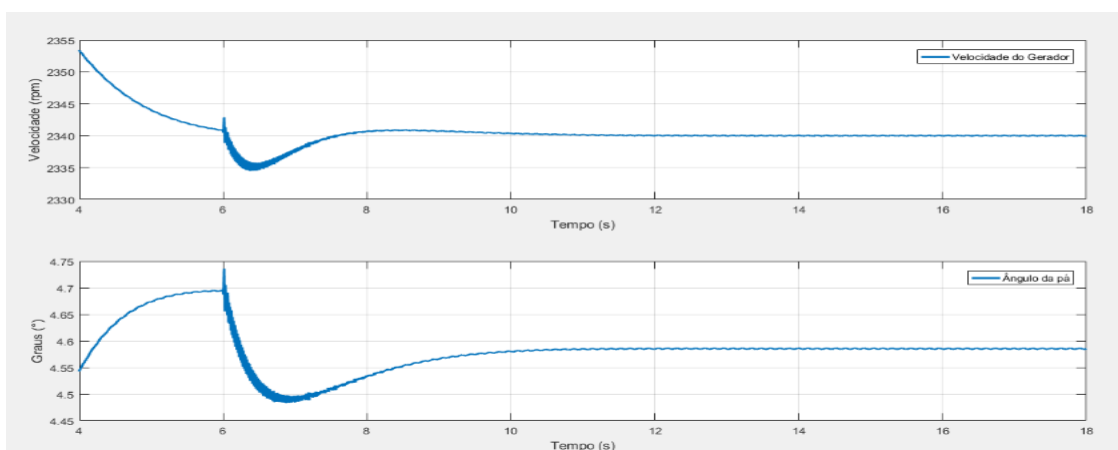
O afundamento é provocado no instante de 6 segundos. Nesse instante as potências (Figura 26) sofrem uma pequena oscilação quando do afundamento, mas rapidamente voltam à estabilidade.

Figura 26 – Potências do sistema – AMT 0.85 pu



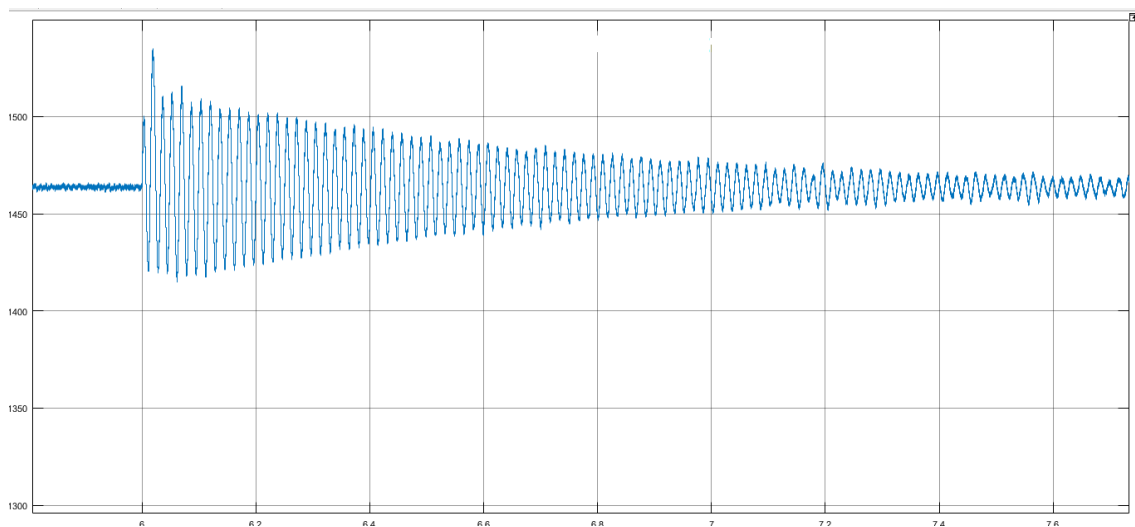
No momento do afundamento de tensão, a velocidade do gerador (Figura 27) é diminuída, no entanto, essa variação é muito pequena e não causa impactos significativos no comportamento do sistema. Como o controle de ângulo *pitch* utiliza a velocidade como referência, é possível observar apenas no ambiente simulado a mudança de perfil do ângulos das pás, tratando-se de uma variação pequena.

Figura 27 – Velocidade gerador – AMT – 0.85 pu



Ocorre uma oscilação de tensão no barramento CC (Figura 28), sendo os níveis em questão passíveis de promover danos ao conversor. Para o afundamento de 0.85 pu o circuito de proteção *chopper* não foi ativado, realizando-se a referida simulação nesse ponto apenas para observar o comportamento da máquina. A tensão do barramento CC atingiu valores próximos ao máximo permitido, ressaltando a importância de proteção para essa condição (aproximadamente  $V_{cc} = 1550 V_{cc}$ ).

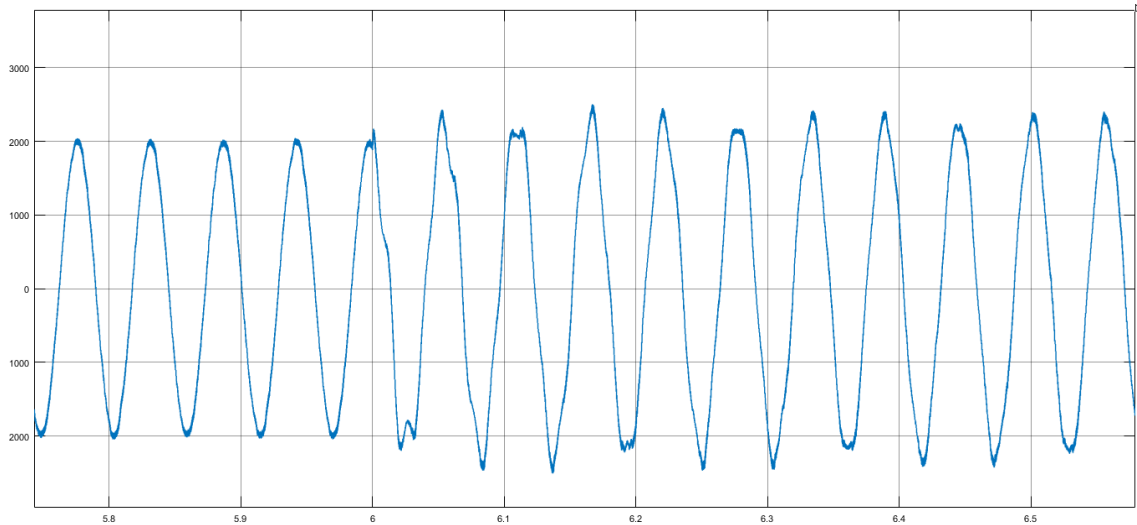
Figura 28 – Tensão no barramento CC – AMT 0.85 pu



O ponto de afundamento para 0.85 pu foi utilizado para validar o comportamento da máquina nessa região em atendimento à curva de suportabilidade requerida pelo ONS. Para um afundamento desse nível, mesmo estando em condições nominais, o sistema não apresenta respostas significativamente negativas. A corrente do barramento CC também foi afetada e no pico máximo atingiu valores próximos a  $I_c = 2800 A$  (esses valores exigem muito dos conversores RSC e GSC).

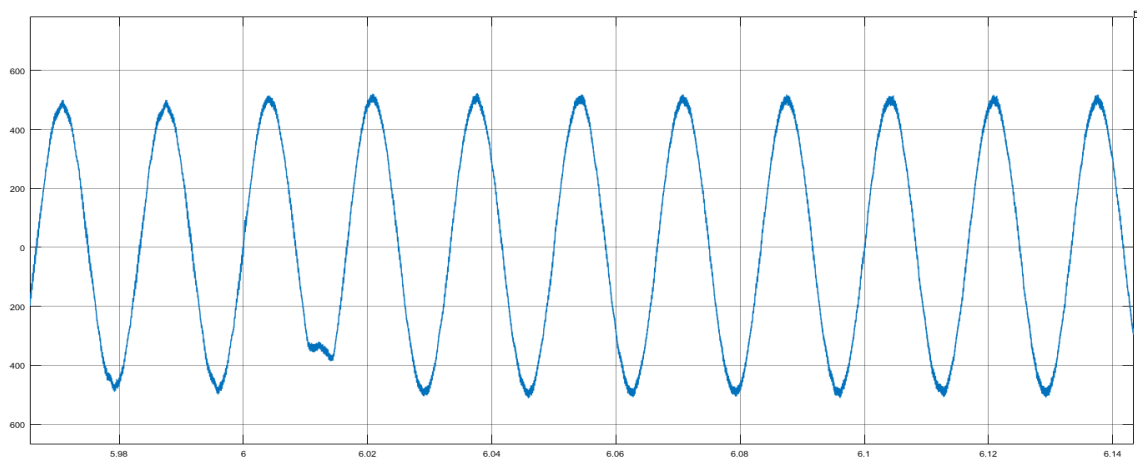
Na seção 4.3 em diante é apresentado e observado o sistema frente a um afundamento mais severo (afundamento para 0.2 pu com a utilização de circuitos adicionais de proteção, o *chopper* no barramento CC e crowbar no circuito rotórico).

Figura 29 – Corrente no rotor – AMT 0.85 pu



No afundamento de tensão para 0.85 pu, observa-se boa resposta da máquina nos regimes transitório e permanente. Essa simulação foi realizada sem as proteções do barramento CC (circuito *chopper*), no entanto, a saturação do GSC (Figura 30) estava implementada para todos os níveis de afundamento de tensão. Cabe destacar o atendimento à curva de suportabilidade do ONS mesmo após 5 segundos.

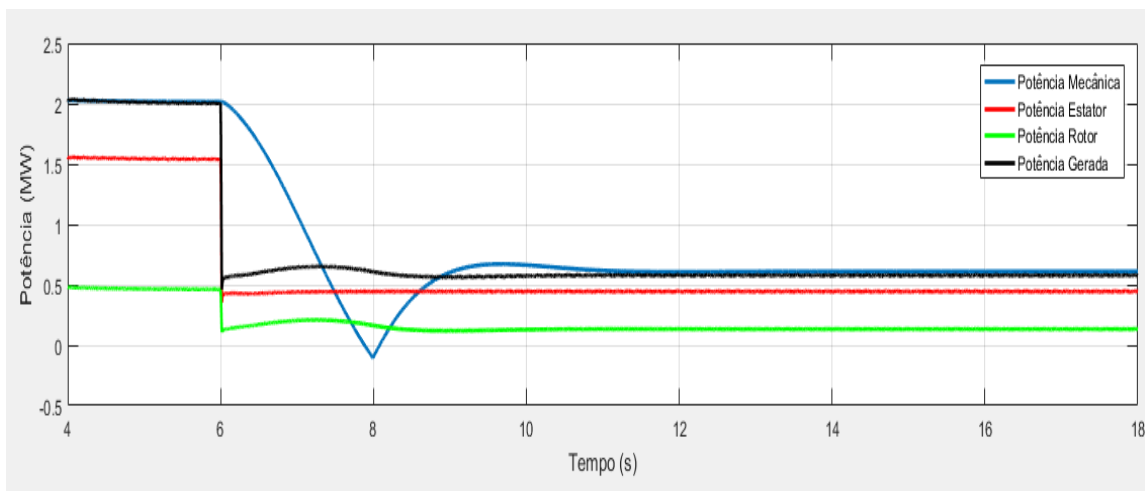
Figura 30 – Corrente de saída do GSC – AMT 0.85 pu



### 4.3 AFUNDAMENTO PARA 0.20 pu - *CHOPPER*

O afundamento para o valor de 0.2 pu na rede foi provocado no instante de 6 segundos. Observar-se a severidade dessa região de operação da máquina, uma vez que as potências caem instantaneamente (Figura 31). Verifica-se que a potência mecânica do conjunto sofre alteração devido ao controle do ângulo *pitch*, o qual utiliza como referência a velocidade do gerador.

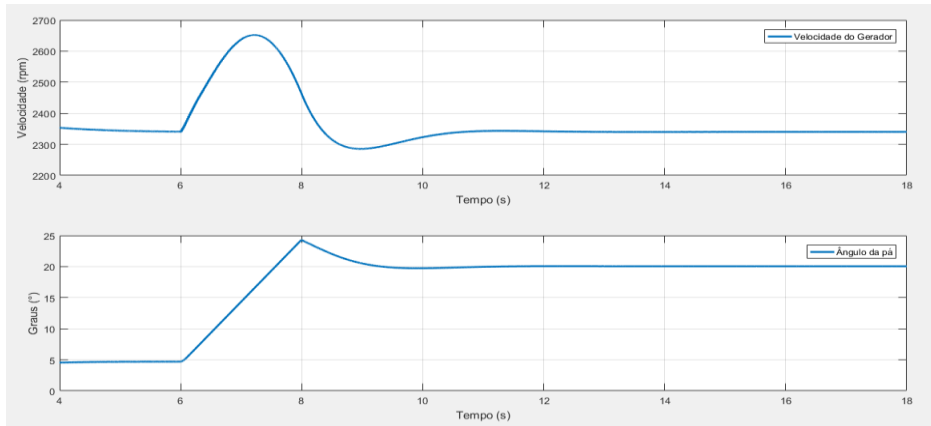
Figura 31 – Potências do sistema – AMT 0.20 pu



Para um afundamento mais severo de tensão, a velocidade (Figura 32) sofre grande oscilação devido à diminuição do torque eletromagnético do DFIG. Dessa forma, a velocidade tende a aumentar e, com esse incremento da velocidade, a malha de controle do ângulo *pitch* é acionada para atingir o *set point* de velocidade.

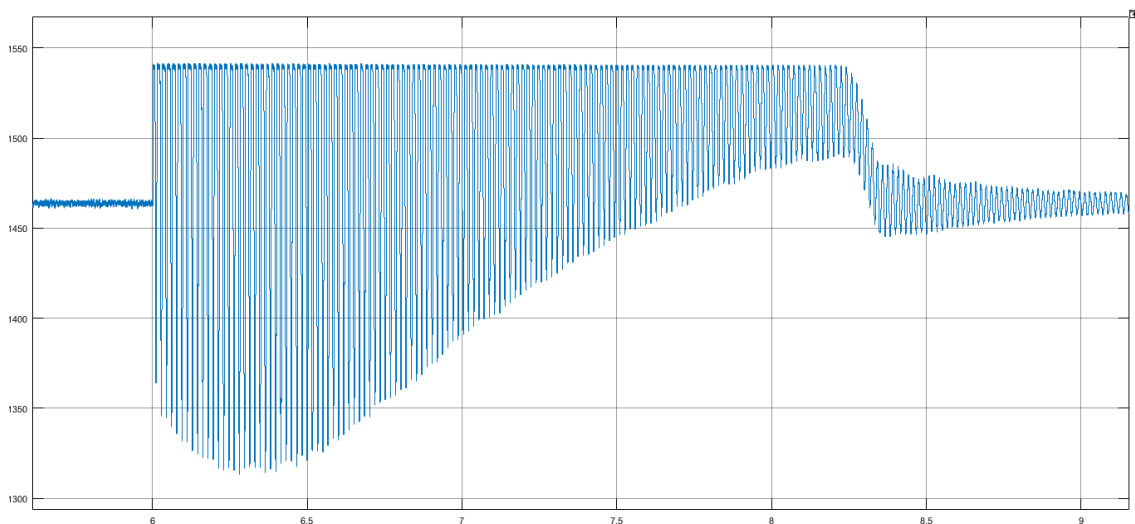
Efetua-se a retirada do controle do ângulo *pitch* no momento do afundamento, no entanto, foi observado o aumento de velocidade do DFIG, já que, no momento do afundamento de tensão, o torque eletromagnético diminuiu. Isso significa que para o mesmo bloco de potência ( $P$  vento), a máquina tende a acelerar. Dessa forma, o controle foi religado e novamente simulado, verificando-se a desvantagem da ocorrência de queda da potência mecânica.

Figura 32 – Velocidade gerador – AMT – 0.20 pu



É possível observar o circuito de proteção *chopper* (Figura 33) em funcionamento, ou seja, configurado para manter a tensão do barramento CC dentro de um nível máximo de tensão 1540 V. Esse importante dispositivo após acionado permite que as correntes em excesso fluam em seu circuito, mantendo os níveis de tensão do barramento CC dentro de uma região “suportável” para os componente (conversores e capacitor).

Figura 33 – Tensão no barramento CC – AMT – 0.20 pu

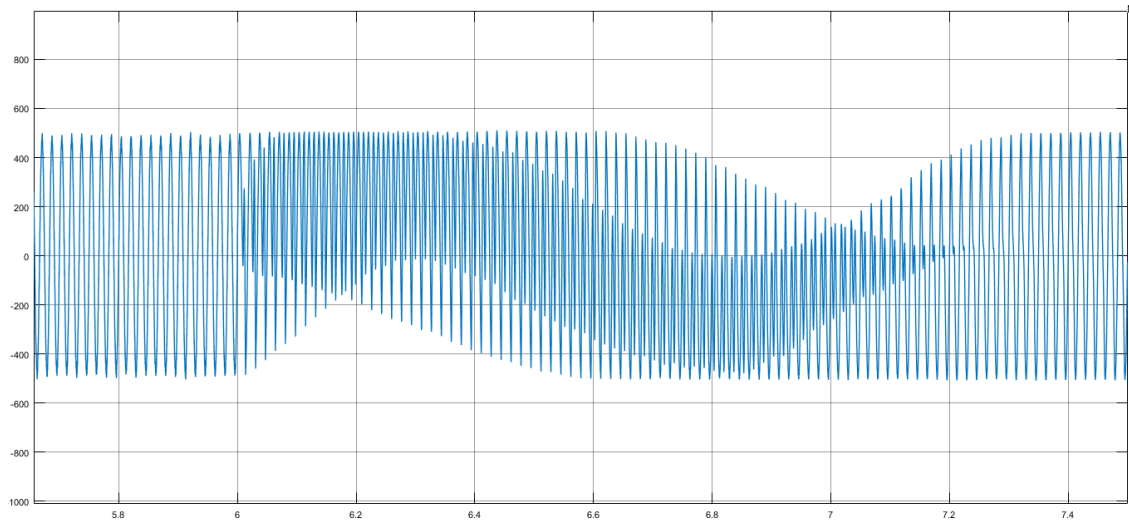


A corrente de 500 A - saturação do GSC (Figura 34), visa garantir que a corrente máxima do conversor não seja atingida. Isso faz com que a potência entregue à rede caia com a diminuição de tensão da rede e, conseqüentemente, a tensão do barramento CC eleve-se, como mostrado anteriormente.



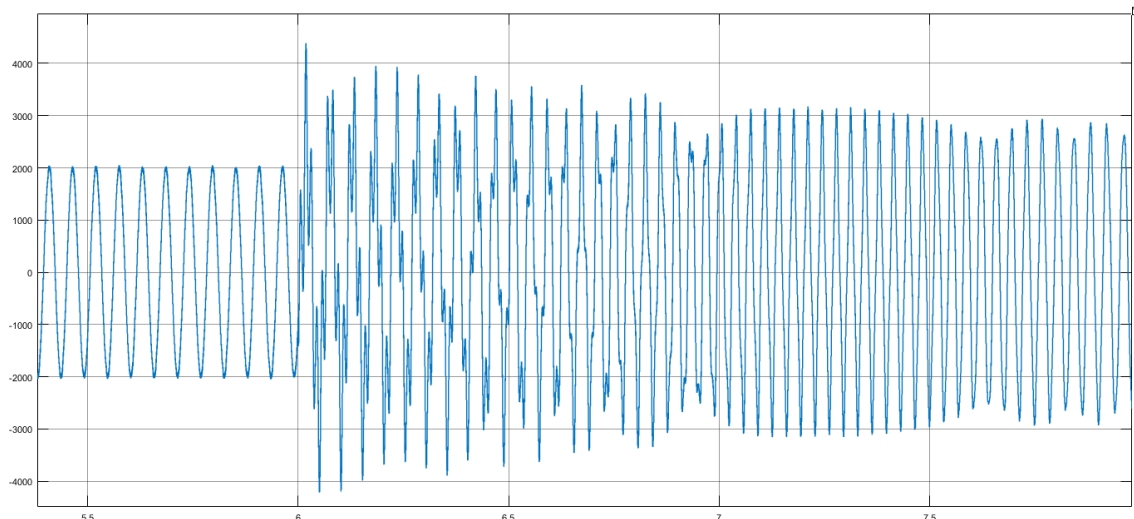
O valor teórico da resistência não contribuiu de maneira positiva para a estabilidade do sistema, ou seja, o valor de tensão superava 1540 V. Dessa forma, ajustou-se em torno de 10 vezes menor. Após o cálculo da resistência do circuito *chopper*, observou-se uma melhora na estabilidade de tensão no barramento CC.

Figura 34 – Corrente de saída do GSC – AMT – 0.20 pu



No instante do afundamento de tensão ocorreu uma elevação abrupta de corrente no circuito rotórico (Figura 35), sendo que tal incremento de corrente pode ser danoso para o conversor e rotor do DFIG. É possível observar que estratégias para minimizar os efeitos do afundamento de tensão são necessárias com o objetivo de permitir o aumento da suportabilidade do DFIG durante o afundamento de tensão.

Figura 35 – Corrente no rotor – AMT – 0.20 pu



#### 4.4 AFUNDAMENTO PARA 0.20 pu – CHOPPER E CROWBAR

O afundamento foi provocado no instante de 6 segundos. Nessa etapa da simulação, introduziu-se um componente de proteção do circuito rotórico. O *crowbar* será ativado no momento do afundamento de tensão com o objetivo de minimizar os efeitos da sobrecorrente no rotor. Verifica-se grande oscilação da potência mecânica (Figura 36) devido ao ajuste de controle do ângulo *pitch* alterar o perfil de velocidade do conjunto, ajustando o ângulo das pás.

Foi possível observar o comportamento das potências de estator e rotor para o afundamento crítico de tensão onde a mesma chegou ao nível de 0,20 pu. É possível observar a queda da potência mecânica, o que acontece devido ao controle do ângulo de passo ter atuado.

Figura 36 – Potências do sistema – AMT 0.20 pu

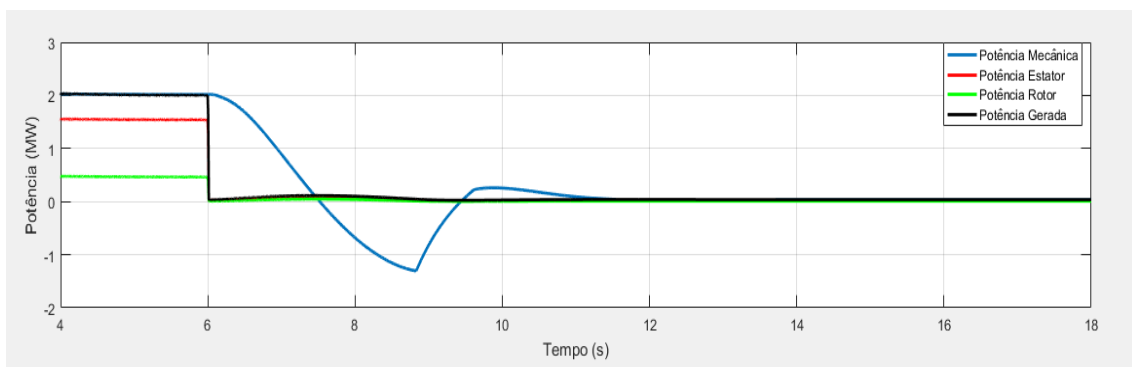
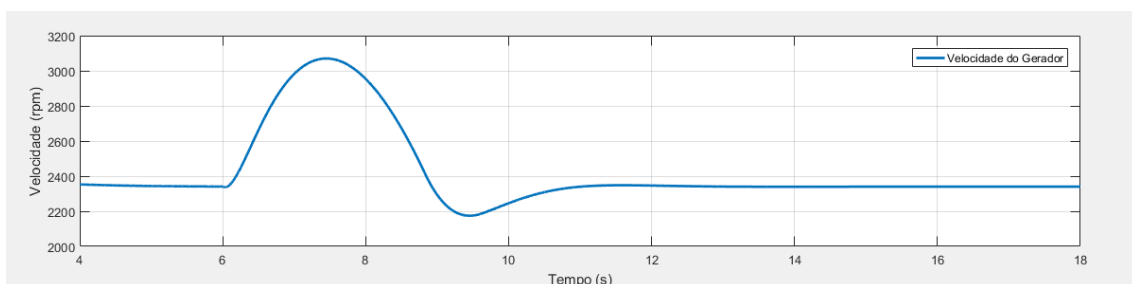
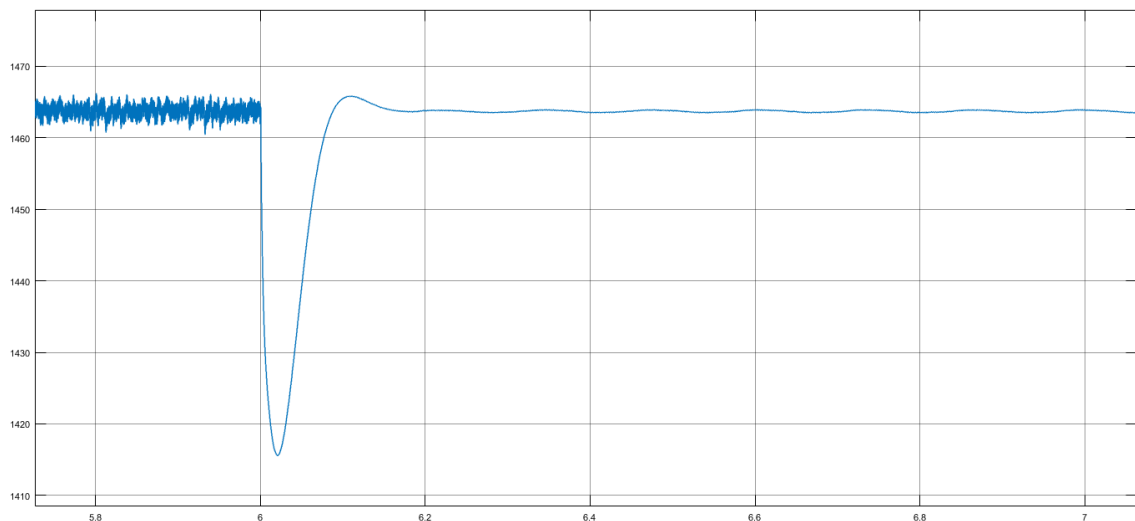


Figura 37 – rpm gerador – AMT – 0.20 pu



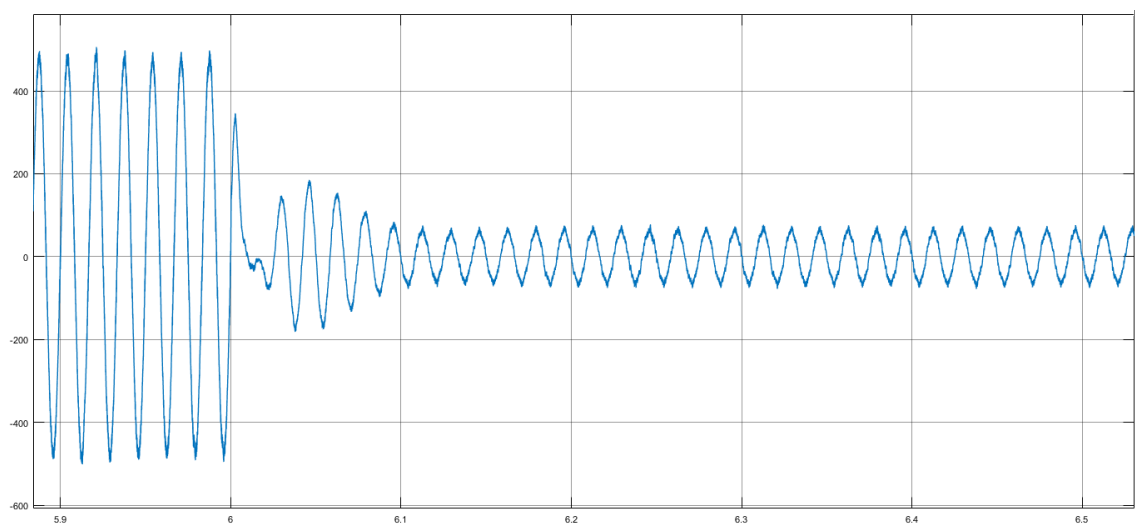
No momento do afundamento de tensão, o barramento CC (Figura 38) sofre uma queda transitória devido ao bloqueio dos pulsos do conversor RSC. A partir desse momento a tensão do barramento é controlada apenas pelo GSC, enquanto o circuito do *crowbar* permanecer ativado.

Figura 38 – Tensão no barramento CC



Contudo, a aplicação do *crowbar* apresenta certas desvantagens, pois apesar de conseguir proteger o conversor RSC, o gerador pode ainda apresentar oscilações elevadas no torque eletromagnético e na potência gerada, principalmente, no início e fim do afundamento, o que pode causar danos mecânicos (CHENG; NIAN, 2012).

Figura 39 – Corrente de saída do GSC



No momento do afundamento de tensão, o conversor GSC atua apenas no controle da tensão do barramento CC, após o bloqueio dos pulsos do conversor RSC. Na Figura 39, é possível observar que a corrente fluindo

através deste é diminuída, mantendo-se apenas para suprir a demanda dos componentes do conversor GSC e capacitor.

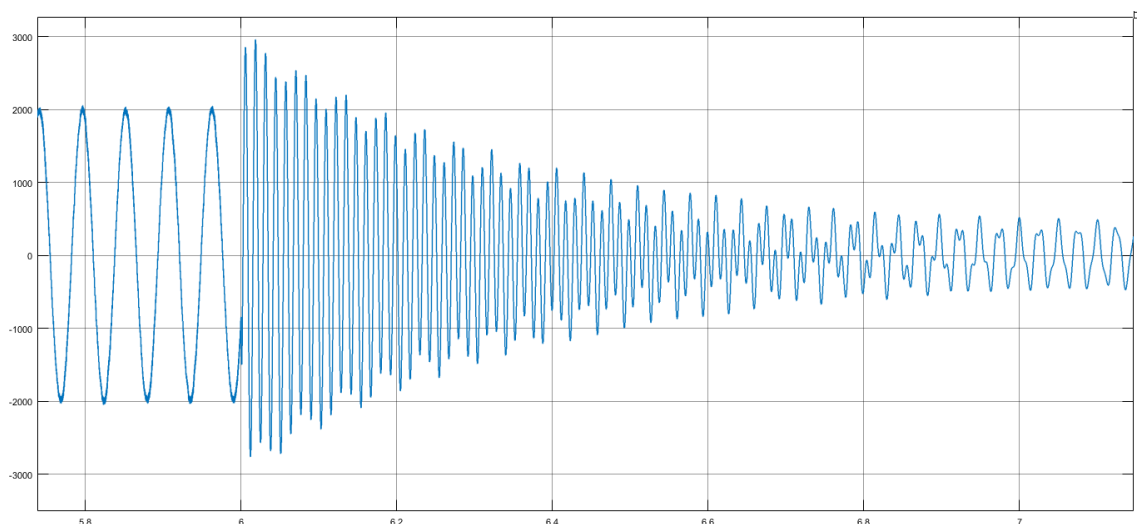
Após a implementação do dispositivo *crowbar* é notório a melhora da suportabilidade do DFIG (corrente do rotor, tensão do barramento CC, corrente de saída do GSC) frente a um afundamento de tensão para 0.2 pu, comparado as outras simulações (0.2 e 0.85 pu) sem a utilização do dispositivo.

Na Figura 40 é possível observar o comportamento da corrente no rotor após ativação do dispositivo *crowbar*, o qual é, basicamente, um componente que protege o conversor RSC de correntes elevadas que fluem pelo circuito rotórico do DFIG em casos de afundamentos de tensão. A resistência foi dimensionada para manter a corrente, mesmo no regime transitório, próxima de 3000 A, o que representa um valor adicional de 50%, aceitável em um período curto de tempo 200 ms.

O *crowbar* deve permanecer ativo durante o afundamento de tensão e enquanto a corrente do rotor for elevada. Após o período transitório o dispositivo pode ser desligado e resincronizado o conversor RSC. Nesse momento ocorrerá novo transitório para sincronizar todo o sistema.

Uma desvantagem de utilização do *crowbar* é o consumo de potência reativa no momento do afundamento de tensão no estator do DFIG (Figura 40). O resultado apresentado tem como objetivo avaliar a importância de implementação do dispositivo *crowbar* e perceber, pelo decréscimo rápido da corrente do circuito rotórico, que após 200 ms aproximadamente, o dispositivo pode ser desativado.

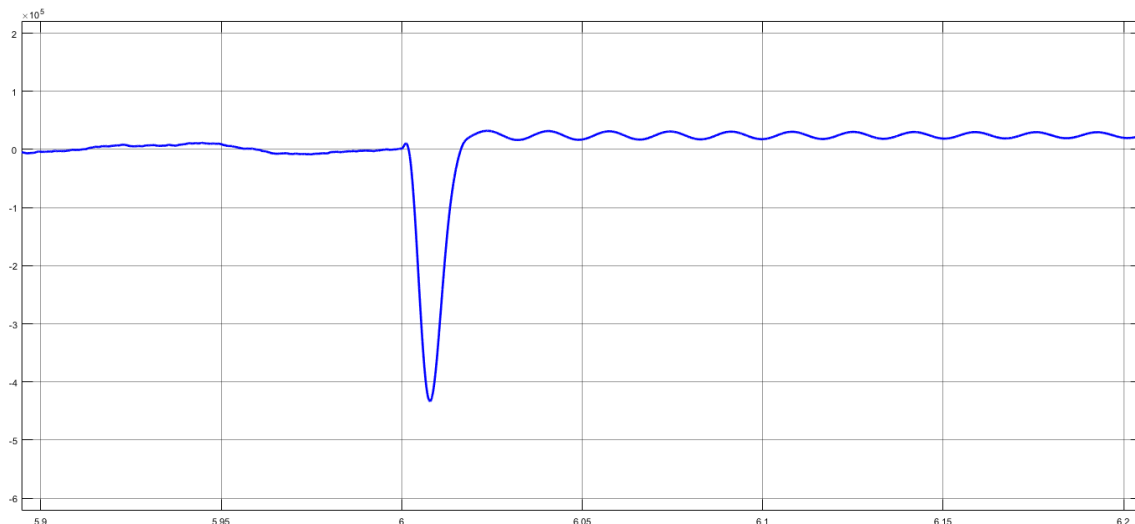
Figura 40 – Corrente no rotor



Na Figura 40 verificamos o consumo de potência reativa no estator do DFIG, normalmente com a ativação do *crowbar* não é possível impedir que a máquina absorva potência reativa da rede (COTA, 2016), isso não é adequado segundo os procedimentos de rede.

No início da simulação (Figura 41) ocorre um pico de potência reativa devido à desmagnetização do DFIG durante o afundamento de tensão. Dessa forma há um aumento momentâneo da potência reativa no DFIG. Estratégias e ajustes no controle devem ser implementadas para garantir o atendimento do procedimento para o despacho de potência reativa no momento do afundamento de tensão.

Figura 41 – Potência reativa estator



## 5 CONCLUSÕES

A busca por fontes alternativas de energia permite o desenvolvimento e diversificação da matriz energética, seja qual for a fonte primária, térmica, solar, marés, biomassa ou eólica, sendo que esta última vem crescendo consideravelmente por todo o planeta.

Foram apresentados os principais tipos de tecnologias de aerogeradores, destacando-se os aspectos relevantes de cada topologia e métodos de utilização. Devido à grande inserção dessas máquinas (aerogeradores) no sistema, alguns fenômenos indesejáveis podem ser observados, como instabilidade no sistema elétrico de potência e afundamentos de tensão que podem proporcionar riscos para todo o sistema elétrico.

Foi analisado o aerogerador DFIG nos pontos indicados pelo procedimento de rede do ONS, de modo verificar sua suportabilidade. No ponto de 0.85 pu o DFIG não apresenta grandes oscilações e atende aos requisitos estabelecidos, cabe destacar que nessa região de operação o dispositivo *chopper* e *crowbar* não foram acionados.

O ponto de 0.2 pu também foi analisado, sendo que nessa região de operação o DFIG sem nenhuma proteção (*chopper* e *crowbar*) não atende aos requisitos do ONS, devido ao elevado nível de tensão do barramento CC e altas correntes fluindo pelo circuito rotórico. Isso demonstra a necessidade de implementar estratégias para aumentar a suportabilidade do DFIG frente aos afundamentos de tensão.

O principal objetivo após a implementação do *chopper* é observar um valor adequado de tensão no barramento CC, sendo que os resultados foram satisfatórios. Em seguida validou-se a utilização do dispositivo *crowbar*, uma vez que a diminuição da corrente fluindo pelo rotor no momento do afundamento de tensão foi percebida. Alguns ajustes no conversor RSC foram necessários para não permitir o fluxo de corrente no barramento CC. Dessa forma, a implementação desses dispositivos são fundamentais para melhoria do tempo de resposta e controle das grandezas elétricas do DFIG (tensão do barramento CC e corrente do circuito rotórico) no momento do afundamento de tensão.

## REFERÊNCIAS

- Akhmatov, V. (2003). *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with large Amount of Wind Power*. Technical University of Denmark. (Tese de Doutorado).
- ANEEL (2019). *Matriz Energética do Brasil*. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>.
- ANEEL (2008). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Capítulo 5.2 Energia Eólica
- Beniugã, R. (2017). *Crowbar protection impact on wind farm behaviour during grid disturbance*. Electrical Engineering Faculty. MPS
- CEPEL (2011). *Energia Eólica – Princípios e Tecnologia*. Ebook Cresesb.
- Cheng, P.; Nian, H. (2012). *An Improved Control Strategy for DFIG System and Dynamic Voltage Restorer under Grid Voltage Dip*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2012. 1868 – 1873
- Chi Jin. (2008). *Enhancement of Low Voltage Ride-Through Capability for Wind Turbine Driven DFIG with Active Crowbar and Battery Energy Storage System*. IEEE.
- Cota, E. F. (2016). *Estudo de um Restaurador Dinâmico de Tensão Aplicado a Sistemas de Conversão de Energia Eólica com Gerador de Indução Duplamente Alimentado*. UFMG. (Dissertação de mestrado)
- EWEA (2019). *Global statistics*. Disponível em: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/>
- Ferreira, J. F. (2009). *Controlo de Geradores de Indução Duplamente Alimentados Em Turbinas Eólicas*. Dissertação De Mestrado, Departamento De Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências E Tecnologia Da Universidade Nova de Lisboa.
- Liu, S.Y. (2007). *Controle Direto de Potência em Gerador de Indução Duplamente Alimentado*. UFMG. (Dissertação de Mestrado)
- Mendes, V. F. (2009). *Avaliação do Comportamento de um Sistema de Conversão de Energia Eólica Utilizando Gerador de Indução Duplamente Excitado Durante Afundamentos de Tensão Equilibrados e Desequilibrados*. UFMG. Belo Horizonte. (Dissertação de Mestrado).
- Mendes, V. F. (2013). *Ride-Through Fault Capability Improvement Through Novel Control Strategies Applied for Doubly-Fed Induction Wind Generators*. UFMG. (Tese de Doutorado).
- Okedu, K. E. (2011). *Participation of facts in stabilizing dfig with crowbar during grid fault based on grid codes*. Department of Electrical Engineering. IEEE.
- Oliveira, R. G. (2009). *Contribuição ao Controle de um Sistema de Geração a Velocidade Variável Utilizando Gerador de Indução Duplamente Excitado*. UFMG. (Tese de Doutorado).

Oliveira, F. D. C. ***Suportabilidade a Afundamentos de Tensão em Geradores DFIG Empregando limitador Supercondutor***. UFES. (Tese de Doutorado).

Oliveira, R. G. ***Desenvolvimento de uma nova estratégia de controle de potência reativa em gerador de indução de dupla Alimentação para turbinas eólicas***. UFMG. (Artigo)

ONS (2019). ***Procedimentos de Redes***. Disponível em:  
<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>.

Peng, L. (2009). ***Improved Crowbar Control Strategy of DFIG Based Wind Turbines for Grid Fault Ride-Through***. IEEE.

Selênio, R. S. (2013). ***Tecnologia em Aero geradores***". UFMG. (Apostila Curso de Especialização em Energia Eólica).

WWEA (2019). ***Market for Wind energy***. Disponível em:  
<https://wwindea.org/information-2/information/>. Acesso em: 10 ago. 2019.

Xiao, S. (2011). ***Analysis of the Control Limit of Crowbar-less LVRT Methods for DFIG-based Wind Power Systems under Asymmetrical Voltage Dips***. IEEE.