

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ARTHUR EDUARDO ALVES AMORIM**

**AVALIAÇÃO DO LIMITADOR SUPERCONDUTOR  
RESISTIVO NO ELO-CC DO DFIG PARA  
SUPORTABILIDADE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

VITÓRIA  
2015

ARTHUR EDUARDO ALVES AMORIM

**AVALIAÇÃO DO LIMITADOR SUPERCONDUTOR RESISTIVO NO  
ELO-CC DO DFIG PARA  
SUPORTABILIDADE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:  
Prof. Dr. Domingos S. L. Simonetti

VITÓRIA  
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

A524a Amorim, Arthur Eduardo Alves, 1992-  
Avaliação do limitador supercondutor resistivo no elo-CC do  
DFIG para suportabilidade a afundamentos de tensão / Arthur  
Eduardo Alves Amorim. – 2015.  
108 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia eólica. 2. Supercondutividade. 3. Turbina eólica.  
4. Dispositivo limitador de corrente. 5. Geradores de indução  
duplamente alimentados (DFIG). I. Simonetti, Domingos Sávio  
Lyrio. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

---

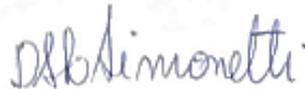
ARTHUR EDUARDO ALVES AMORIM

**AVALIAÇÃO DO LIMITADOR SUPERCONDUTOR RESISTIVO NO  
ELO-CC DO DFIG PARA  
SUPORTABILIDADE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

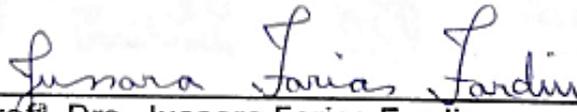
Aprovada em 09 de Outubro de 2015.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



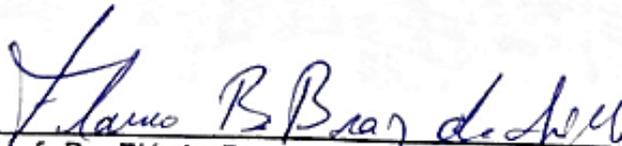
---

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



---

Prof.<sup>a</sup>. Dra. Jussara Farias Fardin  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador



---

Prof. Dr. Flávio Barcelos Braz da Silva  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Examinador

*“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,  
e o homem que adquire conhecimento;”*

*Bíblia Sagrada - Provérbios 3:13*

*Dedico esse trabalho à quem dediquei minha vida, Jesus Cristo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato a Deus, pois Ele me tem dado muito mais do que eu mereço: tenho vida, família, amigos, e tudo isso vem dEle.

Agradeço aos meus pais, Marcelo e Elvira, que me forneceram, além de material genético, formação, educação e caráter para chegar ao que sou hoje.

Ao meu irmão André, pela amizade e companheirismo.

Às minhas avós, Eliza e Eni, que tanto colaboram com minha formação.

Aos meus familiares, tios, tias e primos de perto e de longe.

Aos irmãos da Igreja Batista Viva, em especial Pr. Elias e Pra. Diza, pelas orações e encorajamento.

Aos colegas do LEPAC pelas conversas, descontração, hambúrgueres e conhecimentos compartilhados.

Ao Flávio Oliveira pela ajuda com as simulações e com os conceitos de supercondutividade.

Aos amigos que fiz em Vitória e em Barra de São Francisco.

Ao meu orientador, professor Domingos, pelo conhecimento que me agregou, pela disponibilidade durante esse período e pela oportunidade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

## RESUMO

Em um contexto de necessidade de aumento da oferta de energia elétrica e de busca por fontes renováveis e limpas de energia, a energia eólica tem experimentado um crescimento expressivo nos últimos anos. Uma das tecnologias mais empregadas em geradores eólicos, o DFIG, possui como maior susceptibilidade os distúrbios da rede, principalmente o afundamento de tensão.

Soluções na topologia e no controle do gerador têm sido propostas para aumento da suportabilidade do gerador a esses fenômenos. Este trabalho avalia a utilização de um limitador de corrente supercondutor resistivo no elo-CC do conversor *back-to-back* para proteção do conversor e aumento da suportabilidade a afundamentos de tensão em um gerador eólico baseado em DFIG. A aplicação da tecnologia de supercondutores na proteção de sistemas eólicos é recente e os resultados obtidos nesse trabalho contribuem com os estudos feitos na área. Com o gerador DFIG operando em condições normais, o supercondutor não transita para o estado condutor, e permanece invisível à operação. Na ocorrência de um afundamento de tensão na rede a corrente no circuito de rotor aumenta ultrapassando o valor da corrente crítica e levando o supercondutor ao estado condutor, inserindo um elemento resistivo, limitando assim, a corrente.

As análises são feitas utilizando o *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC com a implementação do limitador supercondutor em uma turbina eólica de 2MW. São avaliados aspectos tais como limitação de corrente, influência na resposta e atendimento à normativa de suportabilidade para duas posições do limitador dentro do elo-CC do conversor *back-to-back*. Os resultados obtidos demonstram que a inserção do limitador no elo-CC limita a corrente no rotor durante a ocorrência de afundamentos de tensão, ao mesmo tempo em que mantém a tensão do elo-CC em valores seguros, confirmando a validade da proposta.

## ABSTRACT

In a context of necessity to increase electric energy offer and to search clean and renewable energy sources, wind energy have experienced an expressive expansion through the last few years. One of the most employed wind generators, the DFIG, has its performance significantly affected by grid disturbances, especially voltage sag.

Topology and control solutions have been presented to increase generator's supportability to these phenomena. This work verifies the use of superconducting resistive current limiter placed on *back-to-back* converter DC-link to protect the converter and to increase low voltage ride-through for a DFIG-based wind generator. The application of superconducting technology on wind systems protection is novel and the obtained results contribute with other works in this area. Under DFIG normal operation, the superconductor doesn't transits to conductor state and remains invisible to the system. During a voltage dip the rotor circuit current surpasses the device critical current turning the superconductor to a conductor state inserting a resistive element, limiting the hazardous current.

The studies are made through electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC with implementation of a superconducting current limiter on a 2MW wind turbine. Aspects as current limitation, response influence and supportability standard attendance are evaluated for limiter inside *back-to-back* converter DC-link in two different settings. The obtained results demonstrate that if voltage sag occurs the limiter insertion on DC-link limits the rotor current at the same time that it maintains DC-link voltage in safe values, proving the proposal validly.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da Capacidade Instalada Global Acumulada.....	20
Figura 2 - Curvas $C_p$ de um Gerador Eólico .....	22
Figura 3 - Curva de Potência de uma Turbina Eólica .....	23
Figura 4 - Estrutura de um Aerogerador.....	25
Figura 5 - Esquemático de Turbina Eólica de Velocidade Fixa .....	26
Figura 6 - Configuração Típica de Turbina Eólica com DFIG .....	27
Figura 7 - Configuração Típica de Turbina Eólica com Conversor Pleno .....	28
Figura 8 - Códigos de Rede para Suportabilidade a Afundamentos de Tensão .....	29
Figura 9 - Código de Rede Brasileiro para Afundamentos de Tensão.....	30
Figura 10 - Comportamento do DFIG durante curto-circuito.....	32
Figura 11 – Conversor <i>Back-to-Back</i> com Limitador de Corrente Supercondutor (LCS) .....	34
Figura 12 - Sistema Eólico Baseado em DFIG.....	36
Figura 13 - Circuito Equivalente do MIRB .....	38
Figura 14 – Circuito Equivalente do MIRB Referido ao Estator .....	39
Figura 15 - DFIG: Regimes de Operação.....	41
Figura 16 - Circuito Equivalente Trifásico do DFIG .....	42
Figura 17 - Circuito Equivalente em Coordenadas $dq$ Referido ao Estator.....	44
Figura 18 - Tensão Induzida no Rotor em um Afundamento de Tensão .....	48
Figura 19 - Conversor Fonte de Tensão de Dois Níveis.....	49
Figura 20 - Modulação PWM Senoidal.....	50
Figura 21 - Filtro LCL Conectado ao GSC .....	51
Figura 22 - Malha de Controle do GSC .....	53
Figura 23 - Malha de Controle do RSC .....	55
Figura 24 - Estrutura do DSOGI-FLL .....	56
Figura 25 - Estrutura do FLL .....	57
Figura 26 - <i>Crowbar</i> Conectado ao DFIG.....	58
Figura 27 - Gráfico histórico da resistência do mercúrio em função da temperatura	61
Figura 28 - Representação da região supercondutora .....	62
Figura 29 - Evolução temporal da temperatura crítica dos supercondutores .....	63
Figura 30 - Modelo temporal da resistência do supercondutor .....	64

Figura 31 - Implementação do LCS entre o DFIG e a rede .....	66
Figura 32 - Implementação do LCS no rotor do DFIG .....	66
Figura 33 - Implementação do LCS no elo-CC do conversor .....	67
Figura 34 - LCS Configuração 1.....	67
Figura 35 - LCS Configuração 2.....	68
Figura 36 - Sistema Simulado .....	69
Figura 37 - Afundamento de Tensão Aplicado ao DFIG.....	69
Figura 38 - Resultados com <i>Crowbar</i> .....	71
Figura 39 - Resultados com LCS na Rede.....	72
Figura 40 – Conversor <i>Back-to-Back</i> com Limitador de Corrente Supercondutor (LCS) .....	73
Figura 41 - Comparativo entre as correntes para as duas configurações.....	73
Figura 42 – Comparativo entre as tensões para as duas configurações .....	76
Figura 43 – Comparativo entre as potências para as duas configurações .....	77
Figura 44 - Comportamento da Resistência e da Corrente no LCS.....	81
Figura 45 - Efeito da Resistência do LCS nas variáveis de interesse.....	82
Figura 46 - Resultados do Teste VD1 .....	83
Figura 47 - Resultados do Teste VD2 .....	85
Figura 48 - Resistência do LCS no Teste VD2.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Testes para Afundamentos de Tensão em Geradores Eólicos.....	30
Tabela 2 - Modos de Operação do MIRB.....	40
Tabela 3 - Valores Máximos Alcançados nos Testes .....	72
Tabela 4 - Comparativo entre as Configurações .....	80
Tabela 5 – Resumo Comparativo dos Resultados Obtidos .....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS

AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão;
CA	Corrente Alternada;
CC	Corrente Contínua;
DFIG	<i>Doubly-Fed Induction Generator</i> - Gerador de Indução Duplamente Alimentado;
DSOGI	<i>Double Second-Order Generalized Integrator</i> ;
FLL	<i>Frequency Locked Loop</i> ;
GSC	<i>Grid Side Converter</i> - Conversor do Lado da Rede;
HTS	<i>High Temperature Superconductor</i> – Supercondutor de Alta Temperatura;
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> ;
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos;
IGBT	<i>Insulated-gate bipolar transistor</i> ;
LCS	Limitador de Corrente Supercondutor;
LVRT	<i>Low Voltage Ride-Through</i> – Suportabilidade a Afundamento de Tensão;
MIRB	Motor de Indução de Rotor Bobinado;
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico;
PCC	Ponto de Conexão Comum;
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> - Síncronizador;
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator – Gerador Síncrono de Imãs Permanentes;
PNSC	<i>Positive/Negative-Sequence Calculation</i> ;
PROINFA	Programa de Incentivo ao uso de Fontes Renováveis de Energia Elétrica;
PWM	Pulse-Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso;
QSG	<i>Quadrature Signal Generator</i> ;
RSC	<i>Rotor Side Converter</i> – Conversor do Lado do Rotor;
SOGI	<i>Second-Order Generalized Integrator</i> ;
VSC	<i>Voltage Source Converter</i> - Conversor Fonte de Tensão;

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_v$	Potência do Vento (W)
$\rho$	Densidade do Ar (kg/m <sup>3</sup> )
$A_1$	Área Varrida pelo Rotor (m <sup>2</sup> )
$V_v$	Velocidade do Vento (m/s)
$C_p$	Coefficiente de Potência
$P_t$	Potência da Turbina (W)
$\beta$	Ângulo das Pás em Relação ao Fluxo de Vento (°)
$\lambda$	Relação de Velocidades
$\omega$	Velocidade Angular do Rotor (rad/s)
$V_s$ ou $v_s$	Tensão no Estator (V)
$I_s$ ou $i_s$	Corrente no Estator (A)
$f_s$	Frequência Elétrica no Estator (Hz)
$R_s$	Resistência do Estator ( $\Omega$ )
$L_{\sigma s}$	Indutância de Dispersão do Estator (H)
$E_s$ ou $e_s$	Tensão Induzida no Estator (V)
$V_s$ ou $v_s$	Tensão no Estator (V)
$N_s$	Número de Espiras no Estator
$\Psi_s$	Fluxo no Estator (Wb)
$P_s$	Potência Ativa no Estator (W)
$Q_s$	Potência Reativa do Estator (VAr)
$V_r$ ou $v_r$	Tensão no Rotor (V)
$I_r$ ou $i_r$	Corrente no Rotor (A)
$f_r, \omega_r$	Frequência Elétrica no Rotor (Hz e rad/s)
$R_r$	Resistência do Rotor ( $\Omega$ )
$L_{\sigma r}$	Indutância de Dispersão do Rotor (H)
$E_r$ ou $e_r$	Tensão Induzida no Rotor (V)
$V_r$ ou $v_r$	Tensão no Rotor (V)
$N_r$	Número de Espiras no Rotor
$\Psi_r$	Fluxo no Rotor (Wb)
$P_r$	Potência Ativa no Rotor (W)
$Q_r$	Potência Reativa do Rotor (VAr)

$L_m$	Indutância de Magnetização (H)
$\Psi_m$	Fluxo de Magnetização (Wb)
$s$	Escorregamento
$\omega_s$	Velocidade Angular Síncrona (rad/s)
$\omega_m$	Velocidade Angular da Máquina (rad/s)
$P_m$	Potência Mecânica (W)
$p$	Número de Polos
$T_{em}$	Torque Eletromagnético (N.m)
$V_{pre}$	Tensão da Rede Antes do Afundamento (V)
$V_{falta}$	Tensão da Rede Após o Afundamento (V)
$\psi_n$	Fluxo Natural (Wb)
$\psi_f$	Fluxo Forçado (Wb)
$\Psi_{n0}$	Fluxo Natural Inicial (Wb)
$p$	Profundidade do Afundamento de Tensão
$S_j$	Sinal de Comando da Chave Eletrônica
$v_{tri}$	Onda Triangular Portadora
$v_n$	Tensão da Saída do Filtro (V)
$R_T$	Resistência Série do Filtro ( $\Omega$ )
$L_T$	Indutância do Filtro (H)
$P_{GSC}$	Potência Ativa no GSC (W)
$Q_{GSC}$	Potência Reativa no GSC (VAr)
$P_g$	Potência Ativa Total do Gerador (W)
$Q_g$	Potência Reativa Total do Gerador (VAr)
$v_d$	Tensão de Eixo Direto (V)
$v_q$	Tensão de Eixo Quadratura (V)
$i_d$	Corrente de Eixo Direto (A)
$i_q$	Corrente de Eixo Quadratura (A)
$R_{crow}$	Resistência do <i>Crowbar</i> ( $\Omega$ )
$J_c$	Densidade de Corrente Crítica (A/m <sup>2</sup> )
$I_c$	Corrente Crítica (A)
$T_c$	Temperatura Crítica (K)
$H_c$	Campo Magnético Crítico (A/m)

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1. Pequeno Histórico da Energia Eólica .....	19
1.2. Tecnologias de Geradores Eólicos .....	21
1.2.1. Aerodinâmica de Turbinas Eólicas .....	21
1.2.2. Classificação de Geradores Eólicos .....	23
1.2.3. Componentes de um Sistema Eólico .....	24
1.2.4. Sistemas de Conversão de Energia Eólica .....	26
1.3. Afundamentos Momentâneos de Tensão .....	28
1.4. Caracterização do Problema .....	31
1.4.1. Escopo do Trabalho .....	33
1.4.2. Objetivos .....	34
1.4.3. Organização do Trabalho .....	34
<b>2. O GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO - DFIG .....</b>	<b>36</b>
2.1. Sistemas Eólicos Baseados em DFIG .....	36
2.2. Modelo Estacionário do DFIG .....	37
2.3. Modelo Dinâmico do DFIG .....	41
2.4. Análise do DFIG sob Afundamentos de Tensão .....	44
2.5. Conversor <i>Back-to-Back</i> .....	48
2.5.1. Conversor Fonte de Tensão .....	48
2.5.2. Modulação PWM .....	49
2.5.3. Filtro LCL .....	51
2.6. Controle do Conversor <i>Back-to-Back</i> .....	51
2.6.1. Controle do GSC .....	52
2.6.2. Controle do RSC .....	54
2.6.3 PLL .....	55
2.8. <i>Crowbar</i> .....	58
<b>3. LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR .....</b>	<b>60</b>
3.1. Breve Histórico da Supercondutividade .....	60
3.2. Aplicação do Supercondutor como Limitador de Corrente de Falta .....	63
3.3. Utilização do SCL no DFIG .....	65
3.3.1. Revisão Bibliográfica .....	65
3.3.2. Configurações Propostas .....	67

<b>4. ANÁLISE POR SIMULAÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>69</b>
4.1. Considerações.....	69
4.1.1. Afundamento de Tensão .....	69
4.1.2. Estratégia de Controle.....	70
4.1.3. Aspectos Avaliados .....	70
4.1.4. Referência para Comparação.....	70
4.2. Resultados.....	72
4.3. Efeito da Resistência do Supercondutor .....	80
4.4. Validação.....	83
4.4.1. Teste VD1 .....	83
4.4.2. Teste VD2 .....	85
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>88</b>
5.1. Contribuições.....	88
5.2. Conclusões.....	88
5.3. Propostas de Trabalhos Futuros .....	90
5.3.1. Variação da Corrente Crítica .....	90
5.3.2. Verificação do Modelo do Supercondutor .....	91
5.3.3. Comparar o desempenho do LCS resistivo e indutivo .....	91
5.3.4. Utilização de outras técnicas de controle dos conversores.....	91
5.3.5. Desenvolvimento de protótipos.....	91
<b>APÊNDICE A - REPRESENTAÇÃO VETORIAL .....</b>	<b>92</b>
1. Transformada de Clarke.....	92
2. Transformada de Park.....	93
<b>APÊNDICE B - PARÂMETROS DO DFIG UTILIZADO NA SIMULAÇÃO.....</b>	<b>95</b>
1. Máquina Elétrica.....	95
2. Conversor Eletrônico.....	95
3. Limitador de Corrente Supercondutor.....	95
4. Filtro Passivo.....	96
5. Ponto de Conexão.....	96
6. LCS Conectado à Rede.....	97
7. <i>Crowbar</i> .....	97
<b>APÊNDICE C - ESTRATÉGIAS ALTERNATIVAS NA IMPLEMENTAÇÃO DO</b>	
<b>LCS.....</b>	<b>98</b>
1. Controle do GSC na Configuração 2 .....	98

2. Detecção de Falta .....	99
<b>6. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>103</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são apresentados os conceitos básicos utilizados nesse trabalho. Primeiramente é feito um breve histórico da evolução da energia eólica no mundo e no Brasil.

A seguir é descrito o funcionamento básico de um sistema eólico para geração de energia elétrica, desde a aerodinâmica, as classificações, os componentes básicos até os métodos de conversão da energia eólica para elétrica.

Na seção seguinte são apresentadas as definições de fundamentos de tensão e as exigências dos códigos de rede em relação à operação das fazendas eólicas durante esses transitórios.

Adiante é feita a caracterização do problema e a definição do escopo desse trabalho, nesse momento discute-se o estado da arte das pesquisas relacionadas ao tema.

Por fim, têm-se um breve resumo de como se dará a organização do texto nos capítulos seguintes.

### 1.1. Pequeno Histórico da Energia Eólica

A energia do vento tem sido utilizada pela humanidade desde os tempos antigos. Data de 3000 a.C. sua aplicação no Egito como força motriz para as embarcações à vela. Há ainda relatos de sua aplicação a partir do século XVIII na Europa em aerogeradores para bombeamento de água e moagem de grãos (PATEL, 2005).

A primeira aplicação comercial para geração de eletricidade foi feita em 1976 na Dinamarca, com a ligação de um aerogerador à rede elétrica pública. A partir daí, também em decorrência da crise do petróleo nessa mesma época, houve interesse e investimento nesse setor, viabilizando o desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia em maior escala (PEREIRA, 2004).

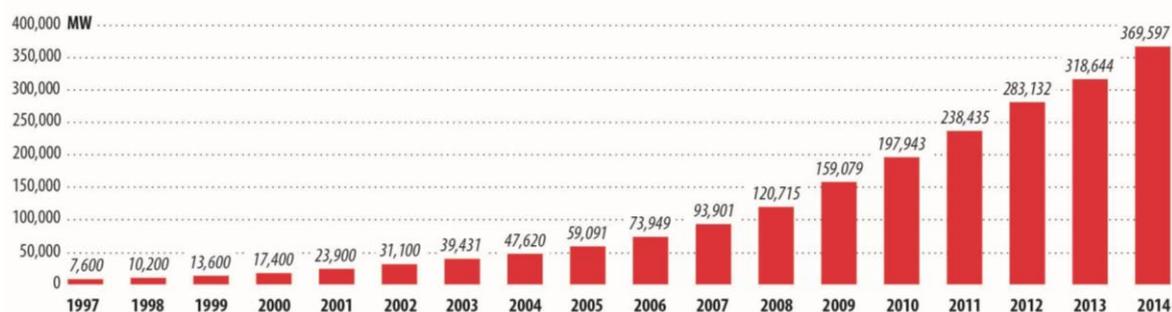
Recentemente, a atenção aos aerogeradores cresceu devido à ausência de custos com combustíveis da energia eólica e pelo fato desta ser uma das maiores fontes não poluidoras de eletricidade. No setor elétrico, as turbinas eólicas foram

primeiramente utilizadas para acionar um gerador elétrico, em geral de indução, por ser o mais comumente disponível. A potência gerada era minúscula, da ordem de centenas de Watts apenas. Hoje, já existem aerogeradores na faixa de Megawatts (TAGARE, 2011).

A energia eólica é a fonte de eletricidade com o crescimento mais acelerado no mundo, com uma potência instalada de 51GW apenas em 2014, acumulando em todo mundo, aproximadamente 370GW de potência instalada, Figura 1. O motivo desse comportamento é que o aproveitamento da energia oriunda do vento possui diversas vantagens (WIND ENERGY FOUNDATION, 2015):

- Há vários tamanhos diferentes de geradores eólicos, o que permite acomodar diferentes aplicações. Atualmente há aerogeradores de pequeno porte instalados em residências e fazendas eólicas com potência da ordem de Gigawatts;
- Os produtores estão menos suscetíveis a oscilações no mercado econômico, haja vista que não há custos com combustíveis;
- Trata-se de uma energia limpa e renovável. O impacto ambiental dessa fonte é mínimo comparado a outras tecnologias, já que não emite gases poluentes e não consome água;
- Diversos países apresentam incentivos fiscais para a produção de energia a partir de fontes renováveis.

Figura 1 - Crescimento da Capacidade Instalada Global Acumulada



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2014)

No Brasil, a energia eólica começou a se desenvolver a partir de 1992 com o início da operação comercial de um aerogerador, de 225kW, instalado em Fernando de Noronha (PE). Após o lançamento do PROINFA (Programa de Incentivo ao Uso de

Fontes Alternativas de Energia Elétrica) a energia eólica experimentou um crescimento significativo no país (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2015),

Em 2014, o Brasil foi o 4º país do mundo que mais instalou geradores eólicos, num total de 2,47GW. Hoje a capacidade total instalada no país é de 5,94GW, ocupando a 10ª colocação mundial nesse quesito (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2014).

## 1.2. Tecnologias de Geradores Eólicos

### 1.2.1. Aerodinâmica de Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas produzem eletricidade utilizando-se da potência do vento para acionar um gerador elétrico. A passagem do vento pelas pás da turbina produz forças de sustentação e arrasto, resultando na geração de torque, adaptando assim a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional.

O processo de extração de energia do vento pode ser entendido tomando como base o balanço de energia e a aplicação da equação de Bernoulli. Considera-se o rotor da turbina como um disco poroso, o qual causa uma diminuição da quantidade de movimento da massa de ar, resultando em uma diferença de pressão entre as faces do disco e uma deformação no fluxo a jusante. Dessa forma, a energia cinética do vento de velocidade  $V_v$  cruzando uma superfície de área  $A_1$  gera uma potência dada por:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot V_v^3 \quad (1.1)$$

Onde,  $\rho$  é a densidade do ar, em  $\text{kg/m}^3$ ,  $A_1$  é a área varrida pelo rotor em  $\text{m}^2$ , e  $V_v$  é a velocidade do vento em  $\text{m/s}$ .

A turbina eólica consegue extrair apenas uma parte dessa potência, portanto, insere-se o coeficiente de potência ( $C_p$ ), um parâmetro adimensional que expressa a eficiência da conversão de energia eólica em energia mecânica torcional, e obtém-se a equação (ABAD, LÓPES, *et al.*, 2011):

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot V_v^3 \cdot C_p \quad (1.2)$$

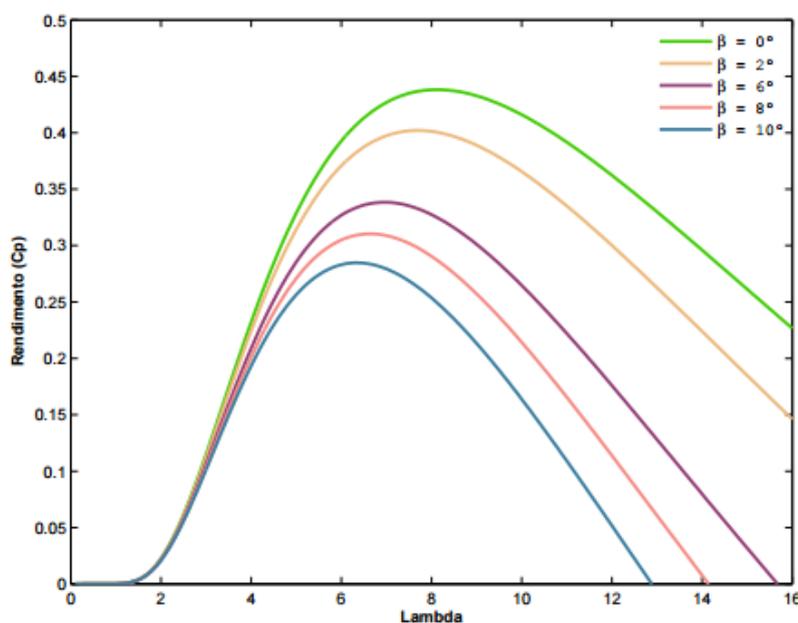
O coeficiente de potência é fator determinante para a eficiência de um aerogerador e é resultado da influência de duas variáveis, a saber:  $\beta$  e  $\lambda$ . Existem na literatura diversos modelos para o cálculo de  $C_p$  (HEIER, 1998) (SLOOTWEG, 2003), o limite teórico, contudo, é dado pelo limite de Betz como sendo 59,3%. A variável  $\beta$  é o ângulo das pás em relação ao fluxo do vento, ele determina quanto da força aplicada pela massa de ar é transferida de fato às pás da turbina. A outra variável,  $\lambda$ , é uma relação de velocidades descrita pela equação:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{V_v} \quad (1.3)$$

Onde,  $\omega$  é a velocidade angular do rotor e  $r$  é o raio do rotor da turbina.

As curvas do coeficiente de potência em função de  $\beta$  e  $\lambda$  de uma turbina real são mostradas na Figura 2 a seguir:

Figura 2 - Curvas  $C_p$  de um Gerador Eólico



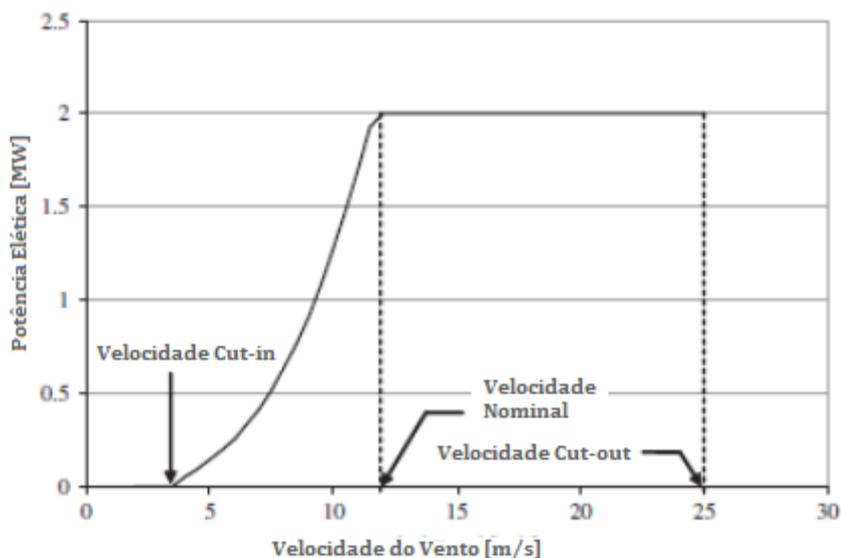
Fonte: (RAMOS, 2009)

Observa-se que para cada valor de  $\beta$ , existe apenas um valor de  $\lambda$  que fornecerá o máximo de coeficiente de potência. Nota-se também que os valores atingidos na

prática pelo coeficiente de potência atingem um valor máximo que dista do limite teórico de Betz.

Além da curva do coeficiente de potência, outra curva importante para a compreensão do funcionamento da turbina eólica é a curva de máxima potência em função da velocidade do vento. Um exemplo é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Curva de Potência de uma Turbina Eólica



Fonte: (ANAYA-LARA, JENKINS, *et al.*, 2009), Adaptado

Alguns pontos na escala de velocidade são importantes nessa curva:

- Velocidade de *Cut-in*: O valor mínimo da velocidade do vento a partir do qual a máquina começa a produzir potência;
- Velocidade de Vento Nominal: Esse valor é estabelecido para que o gerador elétrico funcione em sua potência máxima e de acordo com o perfil de vento da região em que o aerogerador está instalado;
- Velocidade de *Cut-out*: Velocidade de vento a partir da qual a operação do aerogerador pode causar riscos ou sobrecarga aos componentes.

### 1.2.2. Classificação de Geradores Eólicos

Os geradores eólicos podem ser classificados sob muitos aspectos.

- Orientação do eixo: as turbinas podem ser de eixo vertical ou horizontal. Atualmente as primeiras estão em desuso, sendo utilizadas apenas em

aplicações de baixa potência, enquanto as de eixo horizontal têm se desenvolvido e dominam o mercado.

- Velocidade de operação: As turbinas podem operar com velocidade fixa ou velocidade variável no rotor. Na realidade, a segunda situação é uma evolução da primeira que permitiu aumentar a potência e a eficiência dos aerogeradores.
- Controle de velocidade do rotor: o controle pode ser realizado variando-se o ângulo de *pitch* (ou passo) para limitação da potência extraída; outra estratégia é o controle por *stall* onde a aerodinâmica das pás limita a velocidade atingida pelo rotor, o controle de *stall* também pode ser realizado ativamente rotacionando as pás do rotor e alterando dessa forma o ângulo de ataque do vento em relação a elas.
- Tipo de gerador elétrico utilizado: podem ser usadas máquinas de indução gaiola de esquilo, máquinas síncronas ou máquinas de indução de rotor bobinado para conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- Localização: turbinas eólicas podem ser instaladas em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*).

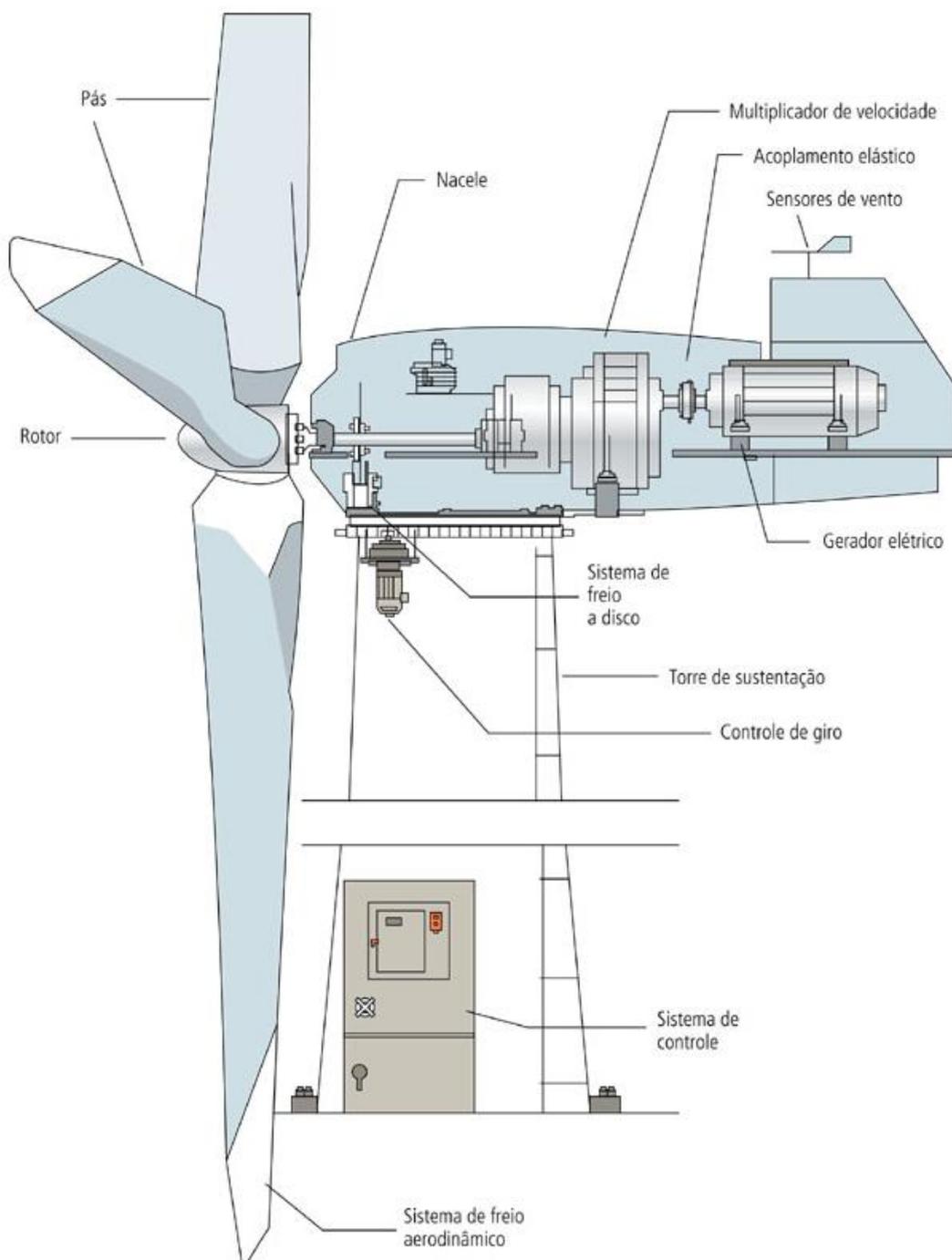
### 1.2.3. Componentes de um Sistema Eólico

A Figura 4 mostra os componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal, são eles: a torre, o rotor e a nacele.

A torre de uma turbina é a estrutura que sustenta a nacele e o rotor. A altura elevada da torre favorece o aproveitamento de energia, uma vez que a velocidade do vento aumenta à medida que se afasta do solo. A torre deve suportar, além da carga vertical devido ao peso da estrutura, uma carga horizontal elevada devido ao vento e às oscilações provocadas pelo movimento das pás.

Em geral a estrutura da torre é tubular ou treliçada. Estruturas tubulares oferecem maior segurança para as pessoas que realizam a manutenção das turbinas, enquanto as estruturas com treliças apresentam menor custo.

Figura 4 - Estrutura de um Aerogerador



Fonte: (ANEEL, 2000)

O rotor da turbina é composto pelo cubo e pelas pás. As turbinas modernas utilizam rotores com três pás, que capturam e transferem a potência do vento para o cubo. A construção dessas pás é muito semelhante à das asas de um avião e possuem mecanismos capazes de modificar seu ângulo de ataque em relação ao vento para atuar no controle da velocidade.

O cubo em geral contém algum sistema de rotação das pás permitindo a proteção da turbina e está conectado à nacele pelo eixo de baixa velocidade.

A nacele contém a maior parte dos componentes da turbina. Encontra-se apoiada sobre a torre em um mecanismo girante que permite apontar a turbina na direção do vento. No interior da nacele encontram-se a caixa de transmissão, o gerador elétrico, o freio mecânico e os equipamentos de controle da turbina e do gerador.

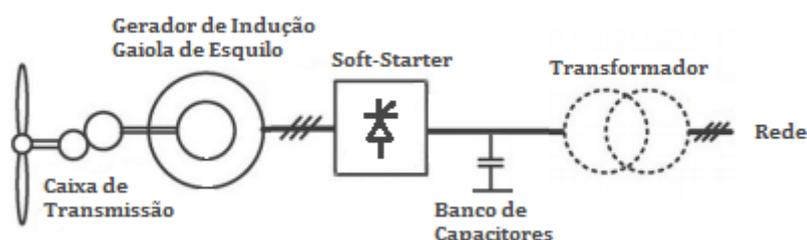
Sobre a nacele são localizados os medidores de direção e de velocidade do vento, essenciais para o correto funcionamento do sistema.

#### 1.2.4. Sistemas de Conversão de Energia Eólica

Até a década de 1990 a grande maioria dos geradores eólicos utilizava-se de máquinas de indução gaiola de esquilo. Essas máquinas operam em velocidade fixa determinada pela frequência da rede e a relação da caixa de transmissão.

Atualmente restritas a aplicações em baixas potências, as turbinas de velocidade fixa são equipamentos bastante simples. Consistem de um gerador de indução gaiola acoplado ao sistema elétrico por meio de um transformador. Em geral, utiliza-se também um banco de capacitores no lado do gerador para fornecer a potência reativa de excitação da máquina e um soft-starter para realizar a energização do gerador, como pode ser visto na Figura 5. Nessa tecnologia o gerador é conectado diretamente à rede, isto é, sem a presença de um conversor eletrônico de potência, o que faz com que o rendimento do sistema seja baixo por não se operar no ponto de máxima extração de potência.

Figura 5 - Esquemático de Turbina Eólica de Velocidade Fixa



Há de se ressaltar que o gerador possui uma pequena variação no escorregamento conforme o nível de potência gerado, entretanto, essa oscilação é inferior a 1% e, portanto, essas turbinas são consideradas de velocidade fixa. Não é possível

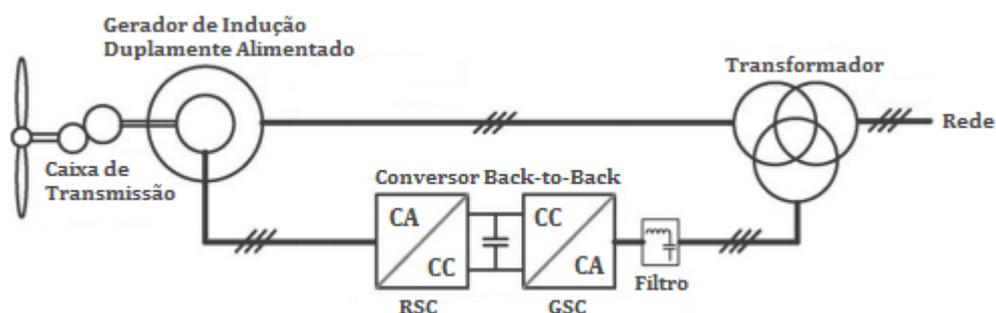
absorver a turbulência do vento em forma de energia rotacional, dessa forma variações no vento provocam flutuações na potência gerada e afetam a qualidade da energia da rede (PETERSSON, 2005).

A implementação de turbinas de velocidade variável aumentaram significativamente a capacidade de geração por permitirem a redução de estresses mecânicos e a possibilidade de operação no ponto de máxima eficiência. Hoje essa tecnologia domina o mercado, principalmente em potências elevadas, e está disponível em diferentes configurações e com diferentes tipos de máquinas elétricas.

As turbinas de velocidade variável possuem a capacidade de adaptar a velocidade do rotor de forma a manter o coeficiente de potência em seu valor máximo para uma grande faixa de valores de velocidade de vento. Essa funcionalidade representa um ganho significativo no aproveitamento da potência, entretanto, passa a ser necessária a utilização de um conversor eletrônico para adaptar a velocidade do rotor à frequência da rede elétrica.

Em 1996 foi proposta uma configuração de geração a velocidade variável utilizando o DFIG - gerador de indução duplamente alimentado (PENA, CLARE e ASHER, 1996). Com esse gerador é utilizado um conversor eletrônico para apenas uma fração da potência gerada pela turbina, Figura 6. Esse sistema será objeto desse trabalho e, portanto, será visto mais detalhadamente no próximo capítulo.

Figura 6 - Configuração Típica de Turbina Eólica com DFIG

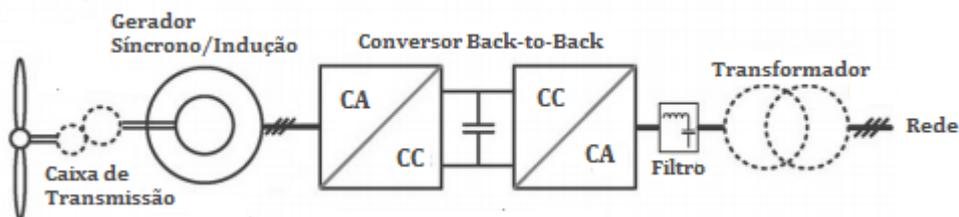


Fonte: (MATOS, 2012), Adaptado

Há várias outras tecnologias de turbinas de velocidade variável, pode-se também utilizar máquinas de indução ou máquinas síncronas, sejam elas com ímãs permanentes ou com enrolamentos no rotor. Nesse caso, o conversor adotado deve

transferir toda a potência da turbina para a rede. A Figura 7 ilustra como ocorre essa conexão.

Figura 7 - Configuração Típica de Turbina Eólica com Conversor Pleno



Fonte: (MATOS, 2012), Adaptado

Tem se tornado cada vez mais popular esse tipo de aplicação com a máquina síncrona de ímãs permanentes (PMSG). Utiliza-se uma construção com elevado número de polos, de forma que não seja necessária a caixa de transmissão de velocidades, sendo essa sua grande vantagem em relação a outros geradores.

Atualmente as tecnologias com PMSG e DFIG dominam o mercado e são adotadas por grandes fabricantes, tais como: General Electric, Vestas, Suzlon, Gamesa, Guodian United Power, Sinovel, MingYang, Enercon, entre outros.

### 1.3. Afundamentos Momentâneos de Tensão

Com o aumento da penetração de geradores eólicos no sistema elétrico os códigos de rede entendem que esses devem contribuir para a manutenção da estabilidade do sistema, tanto na frequência quanto na tensão, tal como as demais fontes, ditas tradicionais.

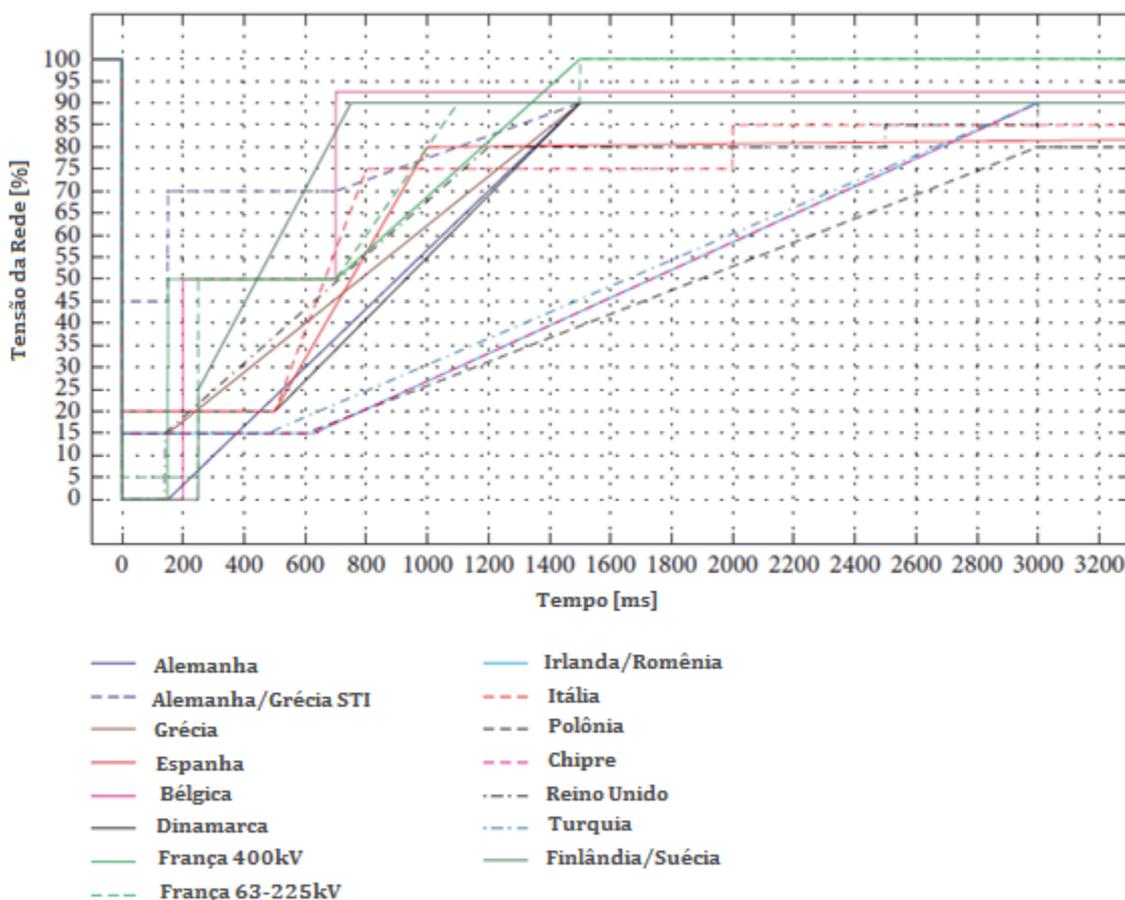
Os códigos de rede requerem que os geradores suportem: variações de tensão e frequência, dentro de determinados limites; regulação de potência ativa; controle de fator de potência; e suportabilidade a faltas (ONS - SUBMÓDULO 2.8, 2009) (IEC 61400-21, 2001) (SOURKOUNIS e TOUROU, 2013).

Segundo ONS (2009, p. 18)

Denomina-se Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT) o evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração superior ou igual a um ciclo (16,67 ms) e inferior ou igual a 3 (três) segundos.

O ponto mais crítico para a operação dos aerogeradores são as faltas, especialmente os afundamentos de tensão. Os códigos de rede exigem que o gerador permaneça conectado durante determinado período de tempo quando a tensão da rede cai, isso é chamado de suportabilidade a afundamentos de tensão, em inglês, *Low Voltage Ride Through (LVRT)*. Esse intervalo de tempo e o módulo da tensão remanescente variam entre os códigos de diferentes países, conforme pode ser visto na Figura 8.

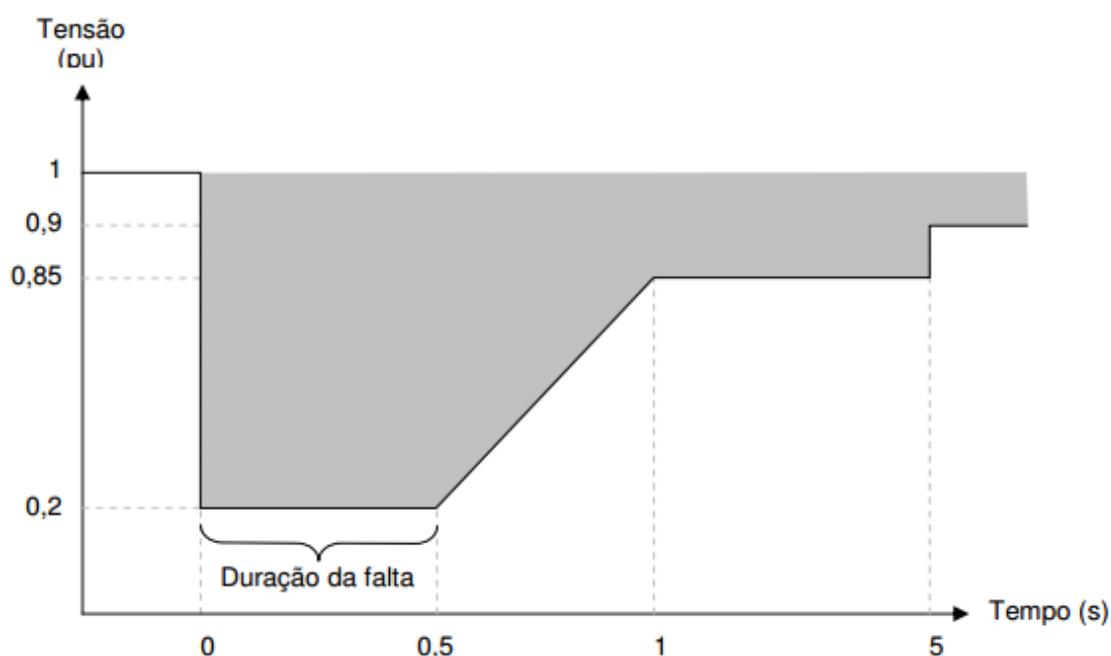
Figura 8 - Códigos de Rede para Suportabilidade a Afundamentos de Tensão



Fonte: (SOURKOUNIS e TOUROU, 2013), Adaptado

O código de rede brasileiro estabelece que o aerogerador deva suportar um afundamento de tensão de até 80% de profundidade por até 0,5s, conforme pode ser visto na Figura 9 (ONS - SUBMÓDULO 3.6, 2009).

Figura 9 - Código de Rede Brasileiro para Afundamentos de Tensão



Fonte: (ONS - SUBMÓDULO 3.6, 2009)

A norma internacional IEC 61400-21 (2001) especifica medições e avaliações das características de qualidade de energia para geradores eólicos conectados à rede elétrica. São tratados especificamente os testes que devem ser feitos em relação à suportabilidade a afundamentos de tensão em geradores eólicos, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Testes para Afundamentos de Tensão em Geradores Eólicos

CASO	MÓDULO DA TENSÃO (FASE-FASE)	MAGNITUDE DA SEQUÊNCIA POSITIVA	DURAÇÃO
VD1 – Afundamento de tensão trifásico simétrico	$0,9 \pm 0,05$	$0,9 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD2 – Afundamento de tensão trifásico simétrico	$0,5 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD3 – Afundamento de tensão trifásico simétrico	$0,2 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$
VD4 – Afundamento de tensão fase-fase	$0,9 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD5 – Afundamento de tensão fase-fase	$0,5 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD6 – Afundamento de tensão fase-fase	$0,2 \pm 0,05$	$0,6 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$

Fonte: (IEC 61400-21, 2001)

A norma trata tanto de afundamentos equilibrados quanto desequilibrados. Para ambos os casos são explorados afundamentos de diversas severidades, tanto em profundidade quanto em duração.

#### **1.4. Caracterização do Problema**

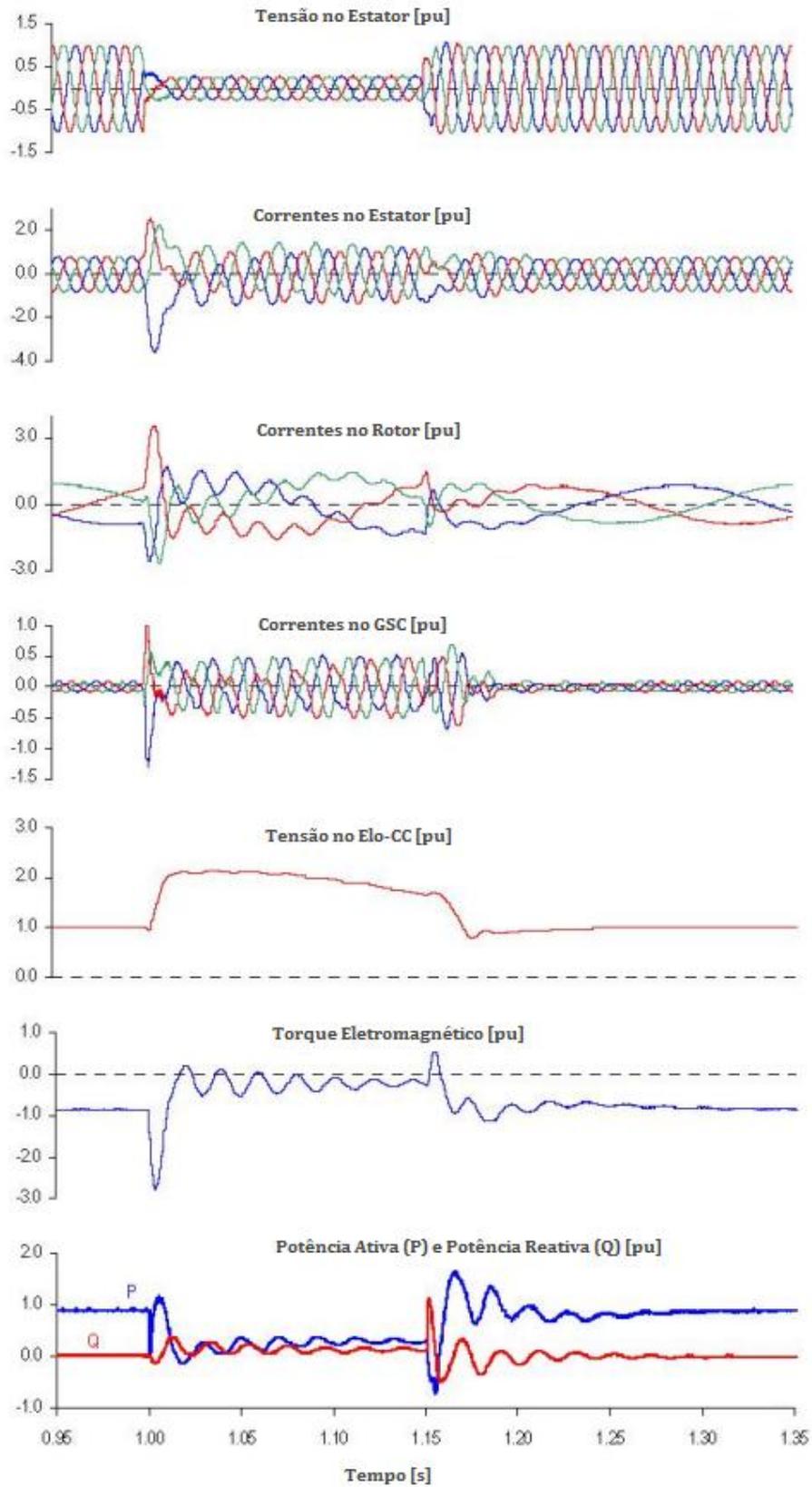
Nos aerogeradores baseados em DFIG o principal desafio das pesquisas realizadas é a suportabilidade a afundamentos de tensão. O problema ainda não foi completamente resolvido e o tema permanece relevante (EZZAT, BENBOUZID, *et al.*, 2013).

O efeito da falta sobre o DFIG pode ser demonstrado nos testes realizados por ERLICH, WREDE e FELTES (2007) via simulação, onde um curto-circuito trifásico foi aplicado no ponto de conexão comum (PCC) e nenhuma contramedida foi realizada no DFIG. Os resultados do teste são apresentados na Figura 10.

Como consequência do curto-circuito repentino, as correntes de estator começam a apresentar componentes em corrente contínua. No lado do rotor essas componentes aparecem em corrente alternada sobrepondo as correntes de regime permanente do rotor que possuem uma frequência muito inferior. Nota-se que a corrente nominal no rotor é excedida em mais de três vezes, o que é inaceitável.

As correntes altas no rotor levam ao aumento da tensão no elo-CC do conversor *Back-to-Back*. O capacitor do elo-CC normalmente não é capaz de reduzir consideravelmente esse efeito e a tensão, sem outras contramedidas, pode atingir mais de duas vezes a tensão nominal. Esse valor é muito além das especificações do projeto dos capacitores do conversor.

Figura 10 - Comportamento do DFIG durante curto-circuito



Fonte: (ERLICH, WREDE e FELTES, 2007)

Com o controle operando normalmente, o GSC (conversor do lado da rede), ver Figura 6, tenta estabilizar a tensão CC. Isso faz com que a corrente do GSC ultrapasse em até 50% a corrente nominal do gerador, o que corresponde a sobrecarga para o GSC. Apesar dessas ações do GSC a tensão do elo-CC irá se comportar conforme descrito anteriormente.

O eixo da turbina, por sua vez, experimenta oscilações de torque. O primeiro pico atinge 3 p.u. e as oscilações levam a enormes desgastes mecânicos. Além disso, ocorrem pulsações indesejáveis na potência gerada.

A análise teórica desses fenômenos e o modelo do DFIG serão abordados mais detalhadamente no capítulo seguinte.

#### **1.4.1. Escopo do Trabalho**

Uma grande quantidade de soluções foi, e continua sendo, proposta na literatura (ZHANG, PENG e YIKANG, 2008), (MEEGAHAPOLA, LITTLER e FLYNN, 2010), (ALARAIFI, 2013), (RAHIMI e PARNIANI, 2010). Algumas dessas soluções já estão muito bem estabelecidas e implementadas nos aerogeradores, outras ainda necessitam de amadurecimento e comprovação.

Recentemente têm sido feitas propostas de utilização de dispositivos limitadores de corrente supercondutores. Esses dispositivos, durante a operação normal possuem resistência nula, porém quando percorridos por correntes superiores ao seu valor crítico inserem uma resistência no caminho da corrente, limitando-a (OLIVEIRA, AMORIM, *et al.*, 2014), (NOE e STEURER, 2007), (NGAMROO e KARAIPOOM, 2014).

Sua vantagem é a atuação instantânea se a corrente ultrapassa o valor de segurança, enquanto sua desvantagem é a necessidade de um sistema criogênico para o material supercondutor.

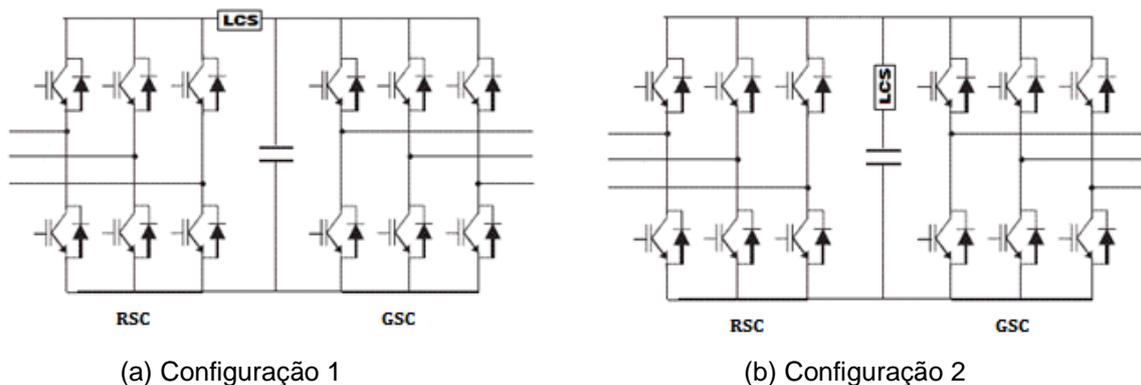
Propõe-se utilizar um limitador de corrente supercondutor resistivo (LCS) no elo-CC do conversor *Back-to-Back* para proteção do conversor e aumento da suportabilidade a afundamentos de tensão no DFIG.

### 1.4.2. Objetivos

O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito de um limitador de corrente supercondutor resistivo (LCS) inserido no elo de conexão dos inversores do *Back-to-back* do DFIG. Serão avaliados aspectos tais como limitação de corrente, influência na resposta e atendimento à normativa de suportabilidade.

Além disso, far-se-á a comparação do desempenho do limitador de corrente em duas configurações, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Conversor *Back-to-Back* com Limitador de Corrente Supercondutor (LCS)



### 1.4.3. Organização do Trabalho

No primeiro capítulo é apresentada uma visão geral do tema estudado. Foram abordados o panorama histórico, o funcionamento e os componentes básicos de um sistema de geração eólico. As normas referentes a afundamentos momentâneos de tensão e os requisitos de suportabilidade dos aerogeradores foram apresentados. Finalmente, estabeleceu-se o escopo do trabalho e os objetivos.

O segundo capítulo se dedica a descrever o comportamento do Gerador de Indução de Rotor Bobinado (DFIG). Além da máquina, propriamente, são descritos também os componentes necessários para sua interligação com o sistema elétrico (conversor, sistemas de controle, filtros, etc.).

O terceiro capítulo trata da utilização do dispositivo supercondutor como limitador de corrente. São apresentados o modelo utilizado para sua representação e sua implementação na proteção do DFIG.

A análise do sistema proposto no aumento da robustez a afundamento de tensão no DFIG é feita no capítulo 4. São também apresentados os dados de simulação e os resultados obtidos na comparação das duas configurações propostas.

Finalmente, o capítulo 5 avalia os resultados obtidos. São feitas as conclusões e as propostas de continuidade do trabalho.

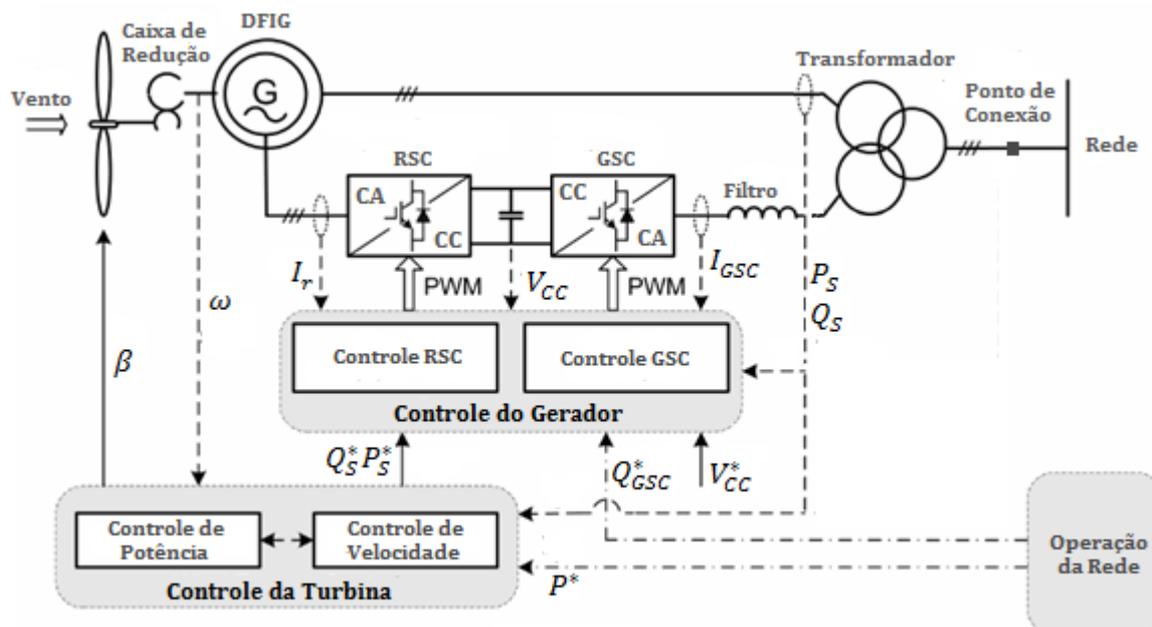
## 2. O GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO - DFIG

Nesse capítulo serão apresentados os princípios de conversão de energia em aerogeradores baseados em DFIG. Mais especificamente, serão abordados o funcionamento do gerador elétrico e do conversor eletrônico de potência; dessa forma não serão tratados aspectos relativos à turbina eólica, caixa de transmissão, e modelos da parte mecânica do aerogerador. Discutem-se aqui os modelos estacionário e dinâmico do DFIG, além de seu comportamento durante afundamentos de tensão. A estrutura do conversor, do filtro LCL, do PLL e das malhas de controle são apresentadas. Finalmente é feita uma breve descrição do funcionamento da proteção do DFIG utilizando o *crowbar*.

### 2.1. Sistemas Eólicos Baseados em DFIG

A Figura 12, apresenta um diagrama esquemático de um gerador eólico DFIG.

Figura 12 - Sistema Eólico Baseado em DFIG



Fonte: (BLAABJERG, 2006), Adaptado

Em turbinas eólicas que utilizam o DFIG é necessária uma caixa de transmissão para conexão da turbina com a máquina elétrica. O eixo de baixa velocidade é conectado ao rotor da turbina, enquanto o eixo de alta velocidade é conectado ao rotor da máquina de indução de rotor bobinado.

No gerador, os enrolamentos do estator são diretamente conectados à rede, através de um transformador, enquanto os terminais dos enrolamentos do rotor são conectados a um conversor *back-to-back*.

O conversor *back-to-back* é um conversor bidirecional composto por dois inversores de frequência trifásicos, operando como fonte de tensão, conectados por meio de um elo-CC. Em geral, esses conversores utilizam chaves IGBT comandadas por modulação por largura de pulso (PWM).

O conversor do lado do rotor (RSC) controla as correntes no rotor do DFIG. Por meio desse conversor pode-se fazer o controle do fluxo de potência ativa e reativa do estator da máquina. O conversor do lado da rede (GSC), por sua vez, controla a tensão do elo-CC do conversor e o fluxo de potência reativa entre o conversor e a rede. O elo-CC, ou barramento CC, armazena energia em um banco de capacitores para suportar variações de tensão atuando como uma inércia para as variações do fluxo de potência.

A comutação das chaves dos conversores gera componentes harmônicos de corrente de alta ordem, que podem ser danosos a outros equipamentos e prejudicar a qualidade de energia da rede elétrica. Para o RSC a indutância presente nos enrolamentos do rotor atua como filtro para essas correntes, podendo-se realizar a conexão direta do conversor com a máquina. No caso do GSC, a conexão com a rede é feita utilizando-se um filtro passivo para esses harmônicos. Em geral, utilizam-se filtros do tipo LCL que, apesar de apresentarem maior complexidade que um filtro indutivo puro, podem ser projetados com indutores de menor valor.

Os sistemas de controle fazem a leitura dos sinais de tensão, corrente e posição do rotor, processam esses sinais e determinam o chaveamento do conversor para atingir os valores de referência para as grandezas controladas. O processamento dos sinais inclui a detecção da fase (PLL), as transformadas matemáticas e as malhas de controle propriamente.

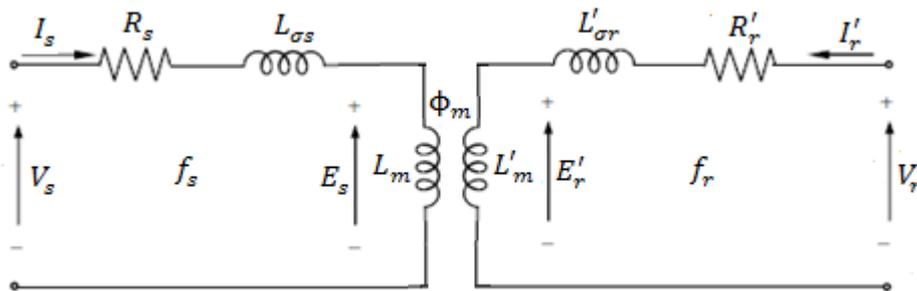
## **2.2. Modelo Estacionário do DFIG**

O DFIG é uma máquina de indução de rotor bobinado (MIRB), e sua construção é muito similar à construção do motor gaiola de esquilo. O estator é alimentado por

tensões e correntes alternadas de forma que a distribuição espacial dos enrolamentos produza um fluxo magnético girante no entreferro da máquina. No caso do MIRB as bobinas do rotor são conectadas a anéis coletores que permitem utilizar outra fonte para alimentar o circuito do rotor. As correntes do rotor também impõem um fluxo magnético girante no entreferro cuja frequência depende da frequência das correntes injetadas no rotor. A diferença entre as frequências das correntes inseridas no estator e no rotor definem o escorregamento da máquina, e consequentemente a sua velocidade de operação.

O circuito equivalente por fase da máquina, considerando-se as correntes de estator e rotor em frequências distintas, é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Circuito Equivalente do MIRB



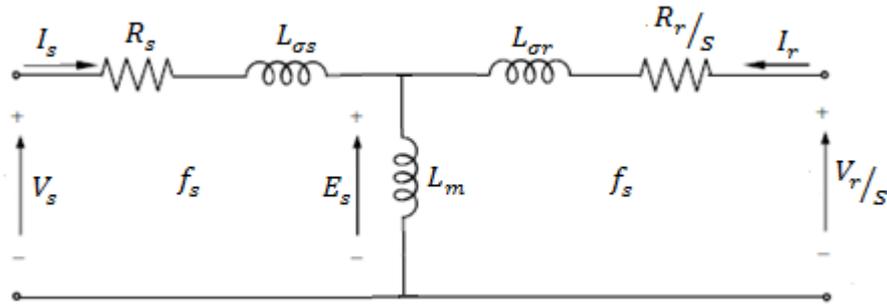
A análise do comportamento da máquina através desse circuito não é muito prática. O que se faz é transformar esse circuito em um equivalente em que as tensões e correntes estejam na mesma frequência. Para realizar essa transformação é necessário definir o escorregamento ( $s$ ), equação (2.1), e a relação de transformação ( $u$ ), equação (2.2)

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.1)$$

$$u = \frac{N_s}{N_r} \quad (2.2)$$

Dessa maneira, o circuito equivalente referido ao estator é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Circuito Equivalente do MIRB Referido ao Estator



A partir desse circuito podem-se estabelecer as relações:

$$\Psi_s = L_m(I_s + I_r) + L_{\sigma s}I_s = L_s I_s + L_m I_r \quad (2.3)$$

$$\Psi_r = L_m(I_s + I_r) + L_{\sigma r}I_r = L_m I_s + L_r I_r \quad (2.4)$$

$$V_s - R_s I_s = j\omega_s \Psi_s \quad (2.5)$$

$$V_r - R_r I_r = js\omega_s \Psi_r \quad (2.6)$$

Onde:

$$L_s = L_m + L_{\sigma s} \quad (2.7)$$

$$L_r = L_m + L_{\sigma r} \quad (2.8)$$

Podem-se determinar as expressões para o cálculo da potência ativa e reativa na máquina a partir do circuito equivalente estacionário, equações (2.9)-(2.12)

$$P_s = 3 \cdot \text{Re}\{V_s \cdot I_s^*\} \cong 3 \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot \text{Re}\{j \cdot I_r \cdot I_s^*\} \quad (2.9)$$

$$P_r = 3 \cdot \text{Re}\{V_r \cdot I_r^*\} \cong 3 \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot \text{Re}\{j \cdot I_s \cdot I_r^*\} \quad (2.10)$$

$$Q_s = 3 \cdot \text{Im}\{V_s \cdot I_s^*\} \cong 3 \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot \text{Re}\{I_r \cdot I_s^*\} \quad (2.11)$$

$$Q_r = 3 \cdot \text{Im}\{V_r \cdot I_r^*\} \cong 3 \cdot s \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot \text{Re}\{I_s \cdot I_r^*\} \quad (2.12)$$

Desprezando as perdas no cobre, pode-se aproximar a relação entre a potência no rotor e no estator da máquina pela equação 2.13. Essa equação evidencia o fato de que no DFIM apenas uma parcela da potência da máquina circula pelo conversor, e essa parcela é proporcional ao escorregamento.

$$P_r \cong -sP_s \quad (2.13)$$

A potência mecânica, portanto, é dada pela equação 2.14.

$$P_m \cong P_s - sP_s = (1 - s)P_s \quad (2.14)$$

O torque eletromagnético, por sua vez, pode ser expresso em função tanto da potência do estator quanto da potência do rotor, como visto na equação 2.15.

$$P_s \cong T_{em} \frac{\omega_s}{p} \text{ ou } P_r \cong T_{em} \frac{\omega_r}{p} \quad (2.15)$$

O MIRB, diferentemente da máquina de indução tradicional permite a operação como gerador ou motor independentemente da velocidade. A Tabela 2 mostra os diferentes pontos de operação que essa máquina pode assumir e também o sentido do fluxo de potência mecânico, do estator e do rotor, considerando a convenção motora.

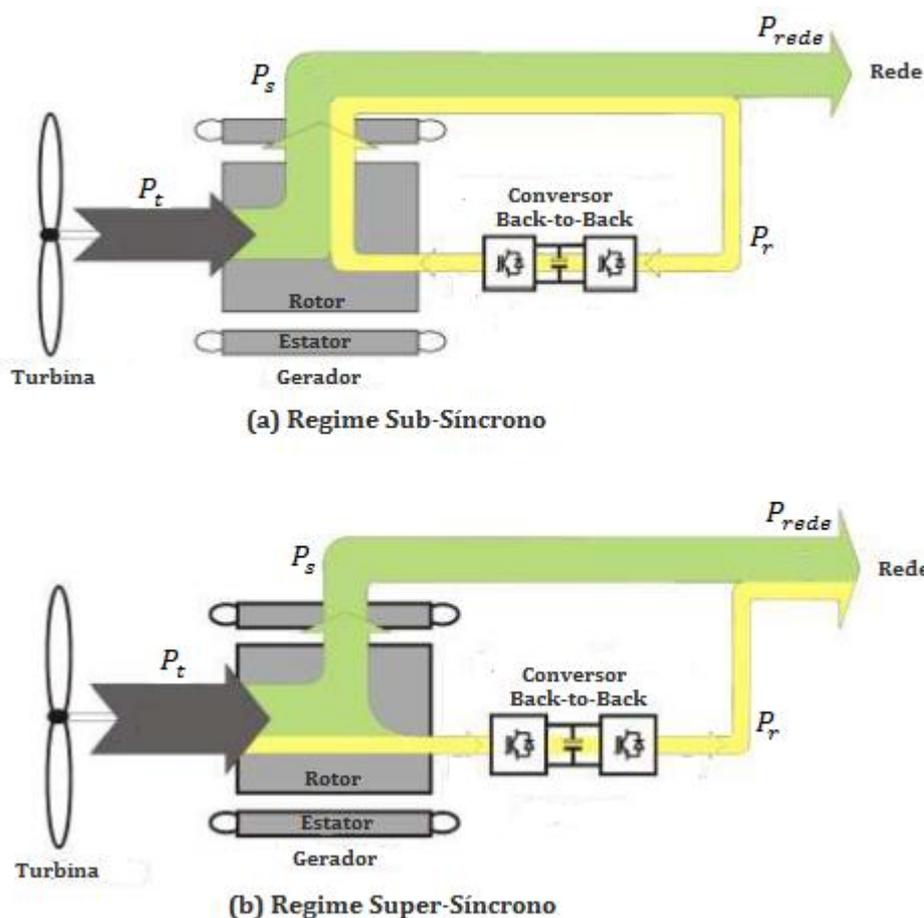
Tabela 2 - Modos de Operação do MIRB

<b>Modo</b>	<b>Velocidade</b>	<b><math>P_m</math></b>	<b><math>P_s</math></b>	<b><math>P_r</math></b>
<b>[1. Motor]</b> <b><math>T_{em} &gt; 0</math></b>	$s < 0$ <i>super-síncrono</i> $\omega_m > \omega_s$	$P_m > 0$ <i>Fornece</i>	$P_s > 0$ <i>Consome</i>	$P_r > 0$ <i>Consome</i>
<b>[2. Gerador]</b> <b><math>T_{em} &lt; 0</math></b>	$s < 0$ <i>super-síncrono</i> $\omega_m > \omega_s$	$P_m < 0$ <i>Consome</i>	$P_s < 0$ <i>Fornece</i>	$P_r < 0$ <i>Fornece</i>
<b>[3. Gerador]</b> <b><math>T_{em} &lt; 0</math></b>	$s > 0$ <i>sub-síncrono</i> $\omega_m < \omega_s$	$P_m < 0$ <i>Consome</i>	$P_s < 0$ <i>Fornece</i>	$P_r > 0$ <i>Consome</i>
<b>[4. Motor]</b> <b><math>T_{em} &gt; 0</math></b>	$s > 0$ <i>sub-síncrono</i> $\omega_m < \omega_s$	$P_m > 0$ <i>Fornece</i>	$P_s > 0$ <i>Consome</i>	$P_r < 0$ <i>Fornece</i>

Os modos de operação 2 e 4 são os tradicionais, idênticos ao motor de indução gaiola. Os modos 1 e 3 são permitidos graças a alimentação independente do circuito de rotor.

Para as aplicações com turbinas eólicas interessa o MIRB operando como gerador, também chamado de Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG). Essa configuração, utilizando-se um conversor eletrônico de potência que permita o fluxo bidirecional, é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - DFIG: Regimes de Operação



Fonte: (MENDES, 2013), Adaptado

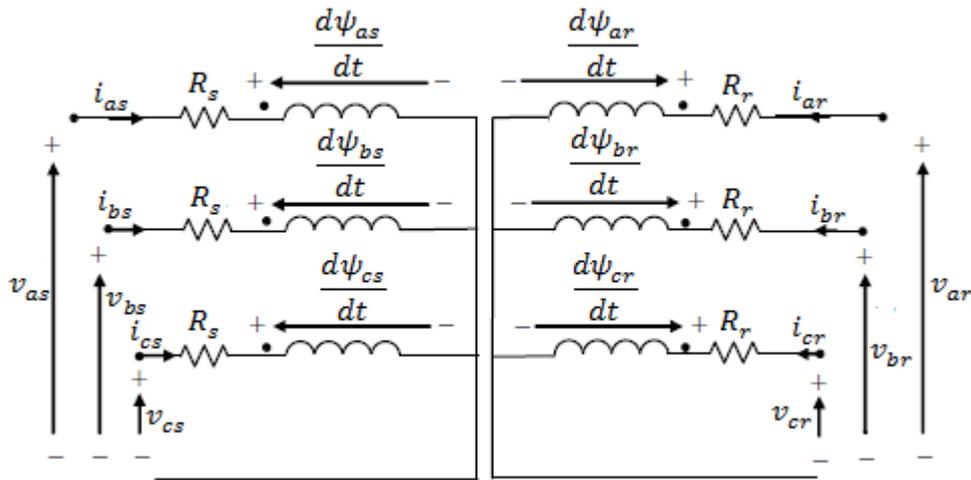
### 2.3. Modelo Dinâmico do DFIG

O modelo estacionário da máquina permite compreender os pontos de operação em que o gerador pode funcionar. O modelo dinâmico aborda como as transições entre esses estados ocorrem, além de ser fundamental para o desenvolvimento do sistema de controle do DFIG. Isso porque esse modelo permite determinar o desempenho das variáveis continuamente, inclusive durante os transitórios.

O equacionamento do modelo dinâmico adotado nesse trabalho tem por base os trabalhos de ABAD, LÓPES, *et al.*, (2011) e KOVÁCS (1984).

Nessa abordagem considera-se a simplificação da máquina como dois conjuntos de enrolamentos trifásicos: um no estator e outro no rotor, como mostrado na Figura 16. Esses enrolamentos possuem ponto comum independente, isto é, o neutro do estator não está conectado ao do rotor.

Figura 16 - Circuito Equivalente Trifásico do DFIG



Assim, podem-se estabelecer as relações:

$$v_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + \frac{d\psi_{as}(t)}{dt} \quad (2.16)$$

$$v_{bs}(t) = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\psi_{bs}(t)}{dt} \quad (2.17)$$

$$v_{cs}(t) = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\psi_{cs}(t)}{dt} \quad (2.18)$$

$$v_{ar}(t) = R_r i_{ar}(t) + \frac{d\psi_{ar}(t)}{dt} \quad (2.19)$$

$$v_{br}(t) = R_r i_{br}(t) + \frac{d\psi_{br}(t)}{dt} \quad (2.20)$$

$$v_{cr}(t) = R_r i_{cr}(t) + \frac{d\psi_{cr}(t)}{dt} \quad (2.21)$$

Ao invés de se adotar a representação clássica trifásica para o comportamento do modelo pode-se usar a representação vetorial. Essa notação apresenta de maneira simplificada as equações diferenciais do sistema em apenas dois eixos ( $\alpha\beta$ ) ao invés de três eixos (abc). Mais detalhes sobre essa transformação de referenciais são apresentados no Apêndice A.

Dessa forma as equações do estator e do rotor ficam:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \quad (2.22)$$

$$\vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} \quad (2.23)$$

$$\vec{\psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + L_m \vec{i}_r^s \quad (2.24)$$

$$\vec{\psi}_r^r = L_m \vec{i}_s^r + L_r \vec{i}_r^r \quad (2.25)$$

Com essa transformação as variáveis do estator são representadas em um referencial estático e apresentam comportamento senoidal na frequência síncrona. As variáveis do rotor são representadas em um referencial que gira na velocidade angular do rotor e apresentam comportamento senoidal na frequência de escorregamento.

Para objetivos de controle é comum a transformação dessas equações para um referencial síncrono (dq) – vide Apêndice A, resultando nas seguintes equações:

$$\vec{v}_s^a = R_s \vec{i}_s^a + \frac{d\vec{\psi}_s^a}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_s^a \quad (2.26)$$

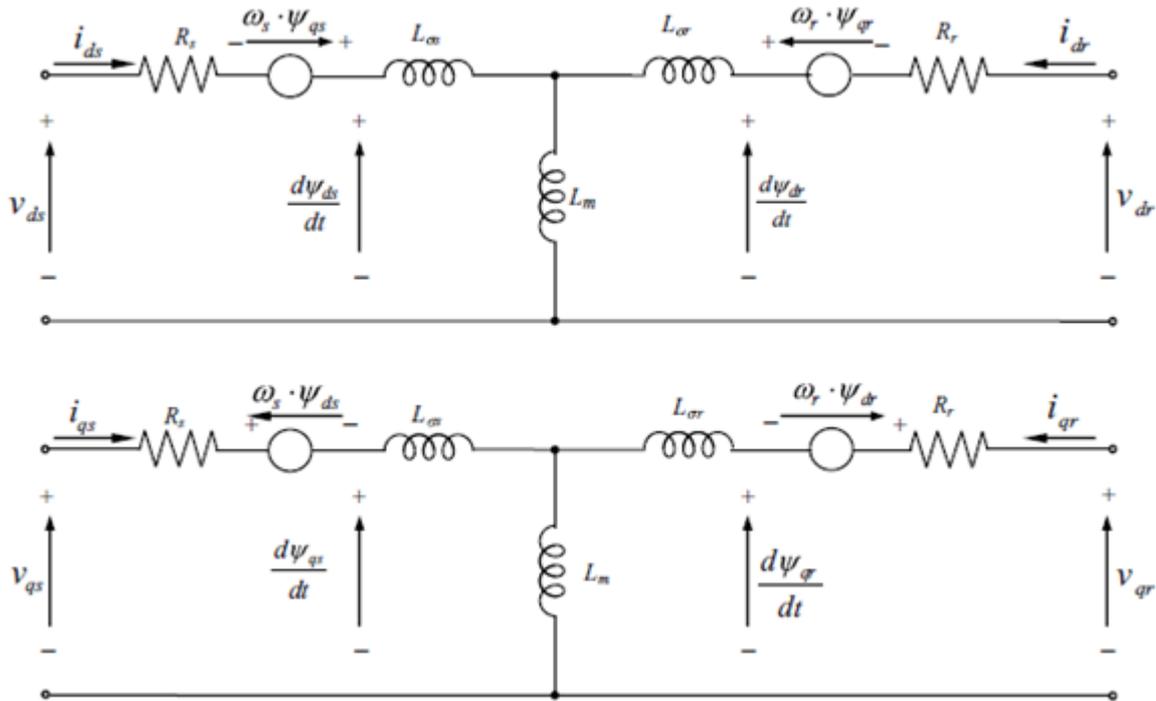
$$\vec{v}_r^a = R_r \vec{i}_r^a + \frac{d\vec{\psi}_r^a}{dt} + j(\overbrace{\omega_s}^{\omega_r} - \omega_m) \vec{\psi}_r^a \quad (2.27)$$

$$\vec{\psi}_s^a = L_s \vec{i}_s^a + L_m \vec{i}_r^a \quad (2.28)$$

$$\vec{\psi}_r^a = L_m \vec{i}_s^a + L_r \vec{i}_r^a \quad (2.29)$$

Adotando-se um referencial comum, as variáveis do rotor podem ser refletidas para o estator. Nessa condição de referencial síncrono todas as grandezas (tensão, corrente e frequência) apresentam comportamento constante, se vistas do estator. Os parâmetros da máquina – resistências e indutâncias, são os mesmos do modelo estacionário, ou seja, não são afetados pelas transformações. O circuito equivalente é mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Circuito Equivalente em Coordenadas dq Referido ao Estator



Dessa forma, pode-se efetuar o cálculo da potência ativa e reativa e também do torque eletromagnético.

$$P_s = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^*\} = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (2.30)$$

$$P_r = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\vec{v}_r \cdot \vec{i}_r^*\} = \frac{3}{2} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \quad (2.31)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{\vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^*\} = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (2.32)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{\vec{v}_r \cdot \vec{i}_r^*\} = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{dr} + v_{dr} i_{qr}) \quad (2.33)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \operatorname{Im}\{\vec{\psi}_s \cdot \vec{i}_r^*\} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\psi_{qs} \cdot i_{dr} - \psi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (2.34)$$

#### 2.4. Análise do DFIG sob Afundamentos de Tensão

Uma das maiores desvantagens do DFIG é sua susceptibilidade a distúrbios na rede. Os afundamentos de tensão são especialmente danosos por causarem sobrecorrentes e sobretensões no rotor e danificarem o conversor eletrônico se nenhuma contramedida for adotada.

Considera-se que o afundamento de tensão ocorra instantaneamente – o que não é fisicamente possível, mas tipifica o pior caso. A tensão no estator pode ser descrita pela expressão:

$$\vec{v}_s^s = \begin{cases} \hat{V}_{pre} e^{j\omega_s t} & \text{para } t < 0 \\ (1-p)\hat{V}_{pre} e^{j\omega_s t} & \text{para } t \geq 0 \end{cases} \quad (2.35)$$

Onde,  $\hat{V}_{pre}$  é o valor de pico do vetor da tensão no estator durante a operação normal do DFIG e  $p$  é a profundidade do afundamento de tensão.

Em regime permanente o fluxo do estator é proporcional à tensão da rede, ou seja, ele experimenta o mesmo decaimento da tensão, como mostrado na expressão:

$$\vec{\psi}_s^s(\text{regime permanente}) = \begin{cases} \frac{\hat{V}_{pre}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & \text{para } t < 0 \\ \frac{(1-p)\hat{V}_{pre}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & \text{para } t \geq 0 \end{cases} \quad (2.36)$$

Entretanto, o fluxo não varia instantaneamente devido à energia armazenada associada a ele. Ao invés disso, o fluxo varia progressivamente de um estado estacionário para outro. Essa transição é descrita pela equação:

$$\frac{d}{dt} \vec{\psi}_s^s = \vec{v}_s^s - \frac{R_s}{L_s} \vec{\psi}_s^s \quad (2.37)$$

Essa equação diferencial ordinária pode ter sua solução dividida em dois termos: solução homogênea e solução particular. A solução homogênea é o transiente ou resposta natural da equação e depende da condição inicial da solução total. A solução particular, por outro lado é a resposta estacionária e é proporcional ao valor da entrada, isto é, à tensão do estator. Esses termos são referidos como fluxo natural e fluxo forçado, respectivamente.

O fluxo forçado tem amplitude constante e proporcional à tensão da rede. Esse fluxo é um vetor girando na frequência da rede elétrica, como mostrado na equação:

$$\vec{\psi}_{sf}^s = \frac{\hat{V}_{falta}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} = \frac{(1-p)\hat{V}_{pre}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} \quad (2.38)$$

O fluxo natural é um fluxo transitório causado pela mudança na tensão, cujo valor independe da tensão do estator, mas unicamente das condições iniciais da máquina. Esse fluxo pode existir ainda que a tensão da rede seja nula, equação 2.39, e se apresenta como uma componente estática em relação ao estator. O valor inicial do fluxo natural é tal que imediatamente antes e após o afundamento o fluxo da máquina seja o mesmo, equação 2.40.

$$\vec{\psi}_{sn}^s = \vec{\Psi}_{n0} e^{-t/\tau_s} \quad (2.39)$$

$$\vec{\Psi}_{n0} = \frac{p \cdot \hat{V}_{pre}}{j\omega_s} \quad (2.40)$$

Dessa forma, o comportamento do fluxo do estator durante um afundamento de tensão trifásico equilibrado pode ser descrito pela expressão:

$$\vec{\psi}_s^s(t < 0) = \frac{\hat{V}_{pre}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} \quad (2.41)$$

$$\vec{\psi}_s^s(t \geq 0) = \frac{\hat{V}_{falta}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + \vec{\Psi}_{n0} e^{-t/\tau_s} \quad (2.42)$$

Ocorre que, por outro lado, a tensão do rotor é dada em função do fluxo do rotor, como visto na equação 2.43.

$$\vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} \quad (2.43)$$

O fluxo do rotor pode ser calculado em função do fluxo do estator e da corrente do rotor, equações (2.28) e (2.29), de forma que:

$$\vec{\psi}_r^r = \frac{L_m}{L_s} \vec{\psi}_s^r + \sigma L_r \vec{i}_r^r \quad (2.44)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \quad (2.45)$$

Substituindo na equação 2.43, tem-se:

$$\vec{v}_r^r = \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s^r + R_r \vec{i}_r^r + \sigma L_r \frac{d}{dt} \vec{i}_r^r \quad (2.46)$$

Essa equação mostra que a tensão no rotor depende diretamente do fluxo do estator e que, portanto, variações desse fluxo oriundas do afundamento de tensão, irão refletir em sobretensões no rotor da máquina. O primeiro termo dessa equação diz respeito à força eletromotriz induzida no rotor enquanto o segundo trata da queda de tensão na resistência e na indutância de dispersão.

A força eletromotriz induzida no rotor, por ser função do fluxo, também apresenta durante o afundamento duas componentes – forçada e natural, descritas pelas equações:

$$\vec{e}_{rf}^r = \frac{L_m}{L_s} \hat{V}_{falta} e^{j\omega_r t} s \quad (2.47)$$

$$\vec{e}_{rn}^r = -\frac{L_m}{L_s} j\omega_m \vec{\Psi}_{n0} e^{-t/\tau_s} e^{-j\omega_m t} \quad (2.48)$$

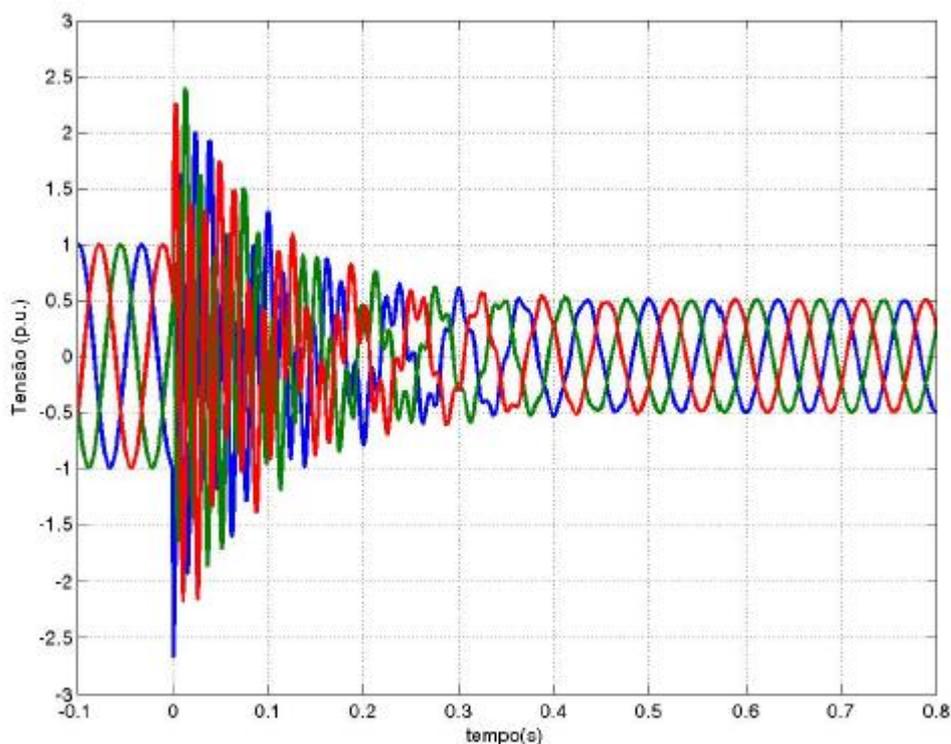
Finalmente, a força eletromotriz induzida total no rotor resulta da adição dessas duas componentes. Expressando essa tensão em função da profundidade do afundamento, tem-se:

$$\vec{e}_r^r = \frac{L_m}{L_s} \hat{V}_{pre} (s(1-p)e^{j\omega_r t} - (1-s)p e^{-j\omega_m t} e^{-t/\tau_s}) \quad (2.49)$$

Os dois termos dessa equação são de naturezas distintas. O primeiro é gerado pela nova tensão de rede durante o afundamento, e sua amplitude é pequena e proporcional ao escorregamento. Sua frequência é de apenas alguns hertz, dada pela diferença entre a frequência síncrona e a frequência do rotor. O segundo termo é uma tensão transiente causada pelo fluxo natural, cuja importância é proporcional à profundidade do afundamento. Sua frequência é igual à velocidade angular do rotor, ou seja, próximo à frequência síncrona.

A Figura 18 mostra a tensão induzida no rotor para um afundamento equilibrado de profundidade igual a 50%, obtida da simulação de um gerador com potência de 2MW. Para se observar o efeito do amortecimento da tensão induzida, a tensão da rede permanece reduzida até o final da simulação.

Figura 18 - Tensão Induzida no Rotor em um Afundamento de Tensão



O comportamento da corrente exerce influência sobre a tensão nos terminais do rotor. Segundo MENDES (2009), dependendo da estratégia de controle adotada no conversor, pode-se tornar mais rápida ou mais lenta a dinâmica de amortecimento da componente natural do fluxo. O detalhamento do mecanismo de limitação de corrente abordado nesse trabalho será descrito adiante.

## 2.5. Conversor *Back-to-Back*

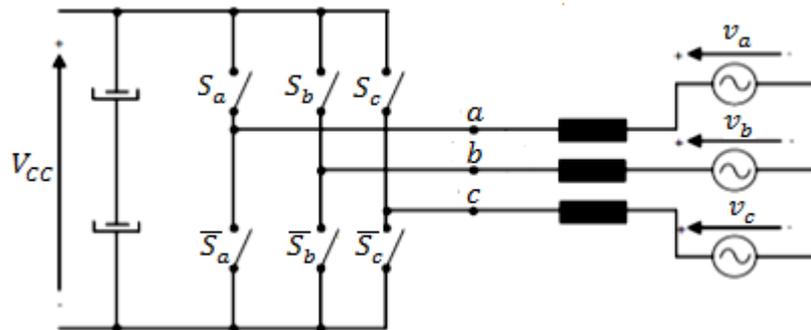
O conversor *back-to-back* é a tecnologia mais difundida em aerogeradores com DFIG para realizar a conexão do rotor com a rede. Trata-se de um conversor bidirecional CA-CA de dois estágios em que o conversor do lado do rotor (RSC) e conversor do lado da rede (GSC) - conversores fonte de tensão, são conectados por meio de um barramento CC.

### 2.5.1. Conversor Fonte de Tensão

Um Conversor Fonte de Tensão (VSC) é capaz de converter tensões e correntes CC para CA. Na topologia adotada, têm a capacidade de transferir potência em ambos os sentidos, de CA para CC, atuando como um retificador controlado ou de CC para CA, atuando como um inversor.

ABAD, LÓPES, *et al.* (2011) traz uma representação simplificada de um VSC de dois níveis conectado à rede através de um filtro, necessário para desacoplar as diferenças instantâneas de tensão.

Figura 19 - Conversor Fonte de Tensão de Dois Níveis



Fonte: (ABAD, LÓPES, *et al.*, 2011)

As chaves são controladas de tal maneira que as duas chaves de um mesmo braço nunca sejam acionadas simultaneamente para evitar o curto-circuito de braço. Com combinações diferentes de chaveamento é possível criar tensões CA com diversas amplitudes e frequências.

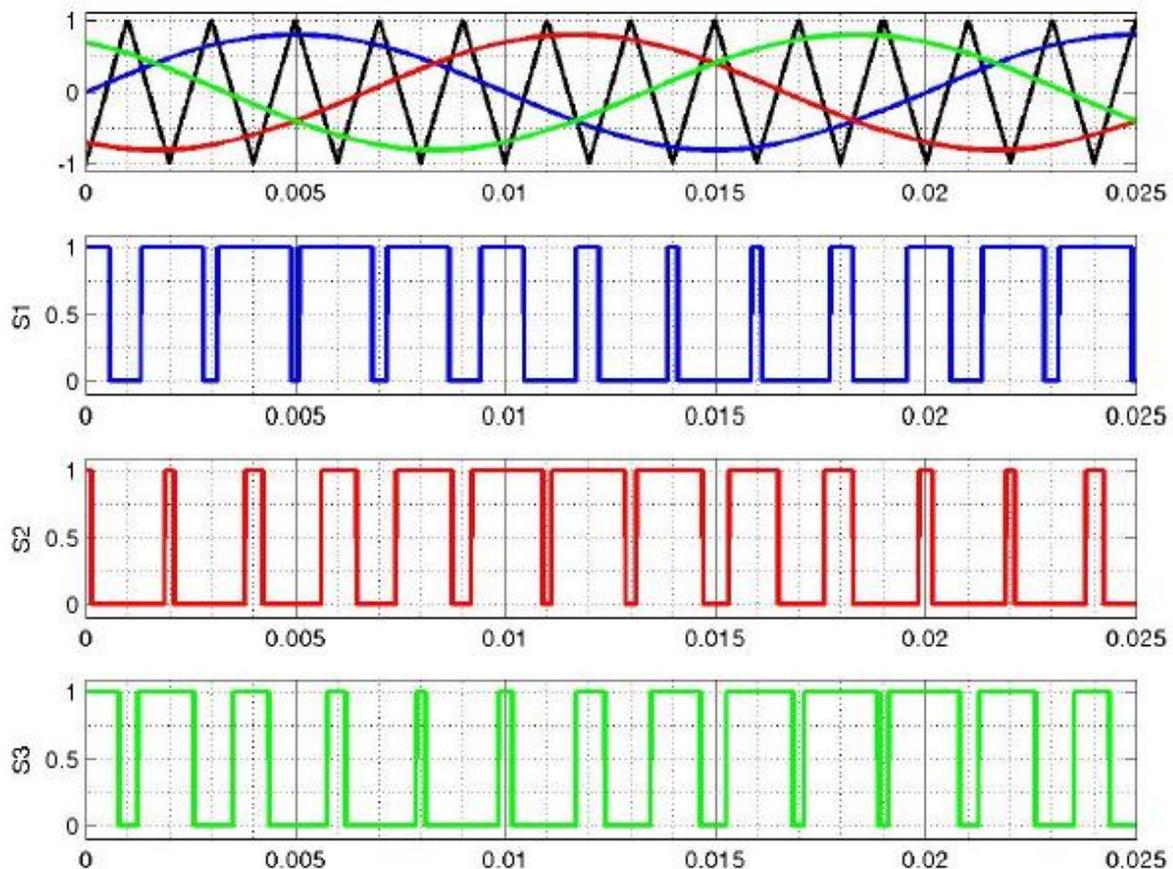
### 2.5.2. Modulação PWM

Os sinais de controle aplicados às chaves são controlados por uma lei de modulação. Uma das modulações largamente utilizadas em conversores estáticos é a modulação por largura de pulso (PWM), ela segue a seguinte condição:

$$S_j = 1 \quad \text{se} \quad v_j^* > v_{tri} \quad \text{com} \quad j = a, b, c \quad (2.50)$$

Onde  $v_a^*, v_b^*, v_c^*$  são tensões de referência (onda moduladora) para cada fase e  $v_{tri}$  é um sinal de onda triangular (onda portadora). Nesse trabalho foi adotada a técnica de PWM senoidal, ou seja, os sinais de referência são ondas senoidais, defasadas de  $120^\circ$ . A Figura 20 mostra esse esquema de modulação.

Figura 20 - Modulação PWM Senoidal



A tensão de saída é, portanto, uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão CC do inversor. A frequência da onda moduladora define a frequência da componente fundamental da tensão de saída, enquanto a frequência da onda portadora define a frequência de comutação das chaves do conversor (MARTINS e BARBI, 2008).

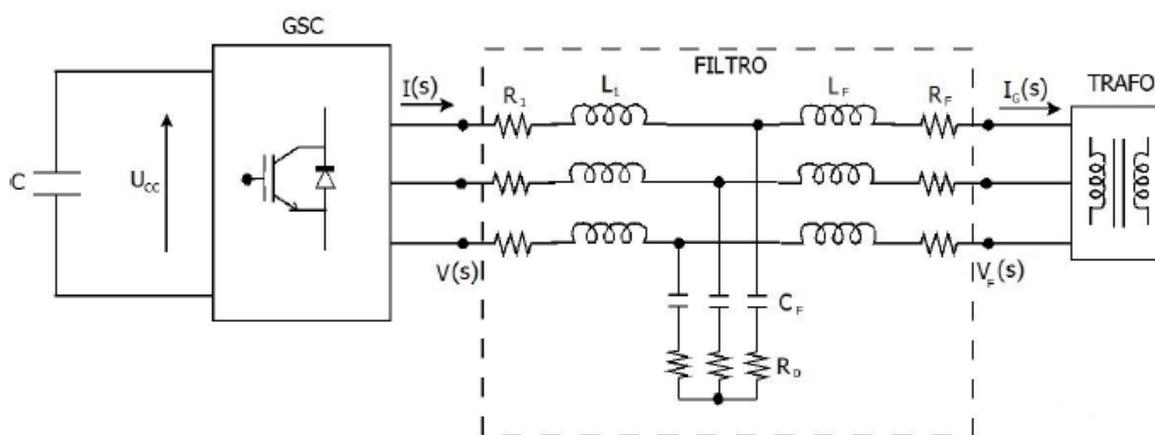
Ao utilizar essa técnica de modulação com frequências de comutação acima de 1kHz, a forma de onda da tensão de saída do conversor com o auxílio dos filtros é praticamente senoidal. Além disso, alterações de fase e amplitude podem ser feitas quase instantaneamente, modificando-se o sinal de referência.

Outras técnicas de PWM podem ser aplicadas em conversores fonte de tensão, algumas delas podem ser vistas em HOLTZ (1992).

### 2.5.3. Filtro LCL

A comutação das chaves do GSC gera harmônicos no espectro da frequência de chaveamento. Esses harmônicos prejudicam a qualidade da energia gerada e podem ser prejudiciais a outros equipamentos conectados ao sistema (IEEE 519, 2012). Para minimização desses efeitos a solução mais comum é a adoção de um filtro do tipo LCL, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Filtro LCL Conectado ao GSC



As resistências em série com as indutâncias são intrínsecas dos enrolamentos. As resistências em série com os capacitores são inseridas para aumentar o amortecimento do filtro. É comum a utilização de uma modelagem mais simplificada para o filtro, considerando-se um sistema de primeira ordem – filtro indutivo. O filtro utilizado nesse trabalho considera o modelo completo e foi projetado segundo a metodologia proposta por LISERRE, BLAABJERG e HANSEN (2005).

### 2.6. Controle do Conversor *Back-to-Back*

Utilizando o modelo dinâmico apresentado, as variáveis de estator e rotor estão representadas referidas ao estator em um sistema de coordenadas síncrono. Escolhendo-se adequadamente o referencial dq, as potências ativa e reativa são desacopladas, permitindo o seu controle independente.

O conversor do lado da rede (GSC) controla a tensão do barramento CC e o fluxo de potência reativa entre o conversor e a rede. O conversor do lado do rotor (RSC) controla os fluxos de potência ativa e reativa entre o estator da máquina e a rede elétrica.

### 2.6.1. Controle do GSC

Nesse trabalho adotou-se como referencial para a transformada dq o ângulo da tensão da rede elétrica, essa estratégia é chamada de orientação pelo fluxo da rede. Essa orientação, a despeito da orientação pelo fluxo do estator, apresenta a vantagem de não perder a estabilidade durante distúrbios da rede elétrica (PETERSSON, 2005).

Dessa forma tem-se que a tensão é dada por:

$$v_n = |V| + j \cdot 0 \quad (2.51)$$

Substituindo nas equações de potência:

$$P_{GSC} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\vec{v}_s \cdot \vec{i}^*\} = \frac{3}{2} (|V| \cdot i_d) \quad (2.52)$$

$$Q_{GSC} = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{\vec{v}_s \cdot \vec{i}^*\} = \frac{3}{2} (|V| \cdot i_q) \quad (2.53)$$

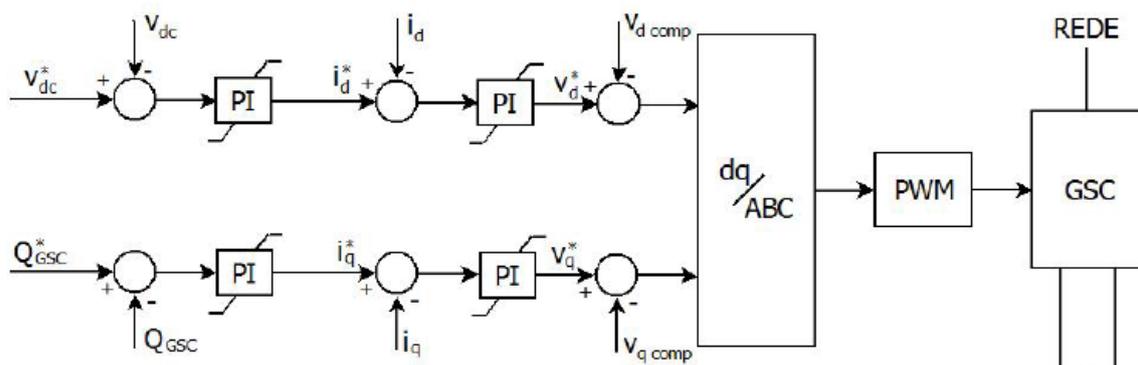
Fica claro que a potência ativa é controlada pela componente de eixo direto (d) da corrente, enquanto a potência reativa é controlada pela corrente no eixo em quadratura (q). Dessa forma tem-se o controle desacoplado da potência.

Pelo barramento CC flui apenas potência ativa. Assim, o controle da tensão CC é feito pelo balanço de potência entre o rotor e o GSC. Quando o rotor da máquina está consumindo potência ativa a tensão CC tende a diminuir, e o GSC consome potência da rede para impedir que isso ocorra. Quando o rotor fornece potência ativa o GSC deve despachar essa potência para a rede para impedir a elevação da tensão CC.

O controle de potência reativa é feito de forma independente, conforme o fator de potência desejado. Durante a operação normal a potência reativa é mantida em zero, garantindo fator de deslocamento unitário do conversor. Porém, na ocorrência de faltas na rede, o GSC pode ser usado para colaborar com o reestabelecimento do sistema, fornecendo reativos dentro dos limites da capacidade de corrente das chaves do conversor.

As malhas de controle da tensão do barramento CC e do fluxo de potência reativa funcionam como malhas externas em um sistema de controle em cascata. Isso significa que a saída desses controladores fornece o sinal de referência para uma malha de controle interna. Os sinais de referência são a corrente de eixo direto e de eixo quadratura. Na malha interna se irá determinar qual tensão deve ser sintetizada no conversor para garantir essa corrente e conseqüentemente a tensão CC e a potência reativa desejadas. A Figura 22 a seguir mostra o diagrama de blocos desse sistema de controle.

Figura 22 - Malha de Controle do GSC



Apesar de na malha de potência o controle estar desacoplado, devido à orientação adotada, na malha de corrente existe uma componente de acoplamento entre os eixos d e q. As expressões (2.54) e (2.55), que mostram a tensão considerando a simplificação para um filtro indutivo, explicitam esse fato.

$$v_d = -R_T \cdot i_d - L_T \cdot \frac{di_d}{dt} + e_d + \omega \cdot L_T \cdot i_q \quad (2.54)$$

$$v_q = -R_T \cdot i_q - L_T \cdot \frac{di_q}{dt} - \omega \cdot L_T \cdot i_d \quad (2.55)$$

Onde as tensões  $v_d$  e  $v_q$  representam as componentes de eixo direto e quadratura sintetizadas pelo conversor,  $R_T$  e  $L_T$  são os parâmetros do filtro e  $e_d$  é a tensão da rede, que apresenta apenas a componente de eixo direto.

Adota-se para compensação dos termos de acoplamento das tensões um controlador *feedforward* calculado pelas expressões:

$$V_{d \text{ comp}} = e_d + \omega \cdot L_T \cdot i_q \quad (2.56)$$

$$V_{q\ comp} = -\omega \cdot L_T \cdot i_d \quad (2.57)$$

### 2.6.2. Controle do RSC

Com o ajuste adequado do sistema de controle do GSC, tem-se uma tensão praticamente constante no barramento CC, permitindo o controle da potência através do RSC. Como dito anteriormente, o RSC controla as potências ativa e reativa do estator da máquina. O ângulo da rede é utilizado para orientação da referência da transformada dq.

A referência de potência ativa é gerada a partir da equação de potência do vento, apresentada no Capítulo 1. Esse controle determina indiretamente a velocidade do rotor, para se atingir o ponto de máximo coeficiente de potência, conforme explicitado na equação:

$$P_s^* = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \left( \frac{w_r, R}{k \cdot \lambda_{opt}} \right)^3 \cdot C_{p\ MAX} \quad (2.58)$$

Com a orientação adotada, as expressões para o cálculo do fluxo de potência são dadas por:

$$P_s = \frac{3}{2} \text{Re}\{\vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^*\} = \frac{3}{2} (|V| \cdot i_{sd}) \quad (2.59)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \text{Im}\{\vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^*\} = \frac{3}{2} (|V| \cdot i_{sq}) \quad (2.60)$$

$$i_{sd} = \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \quad (2.61)$$

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \quad (2.62)$$

Nota-se que assim como no GSC o controle das potências está desacoplado e a potência ativa está associada à componente de eixo direto da corrente enquanto a potência reativa está associada à componente em quadratura da corrente. Logo, o controle se dá da mesma maneira, sendo a malha externa – controle da potência; a fornecer a referência para a malha interna de controle.

Na malha interna as tensões a serem produzidas pelo conversor são dadas pelas equações:

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \sigma L_r \cdot \frac{di_{rd}}{dt} - \omega \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rq} - \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \psi_{sq} \quad (2.63)$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \sigma L_r \cdot \frac{di_{rq}}{dt} + \omega \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rd} \quad (2.64)$$

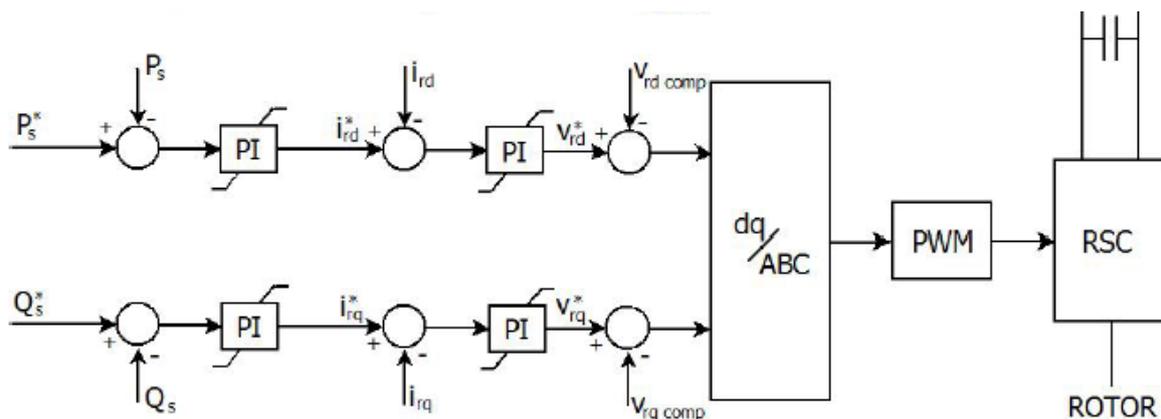
Não há componente direta do fluxo do estator porque com a tensão alinhada com o eixo d, o fluxo está aproximadamente  $90^\circ$  defasado em relação a ela, ou seja, alinhado com o eixo q. Nota-se que há um acoplamento entre os eixos que deverá ser compensado com um controlador *feedforward*, dado pelas expressões:

$$V_{rd \text{ comp}} = -\omega \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rq} - \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \psi_{sq} \quad (2.65)$$

$$V_{q \text{ comp}} = \omega \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rd} \quad (2.66)$$

A malha de controle do RSC é mostrada na Figura 23:

Figura 23 - Malha de Controle do RSC



### 2.6.3 PLL

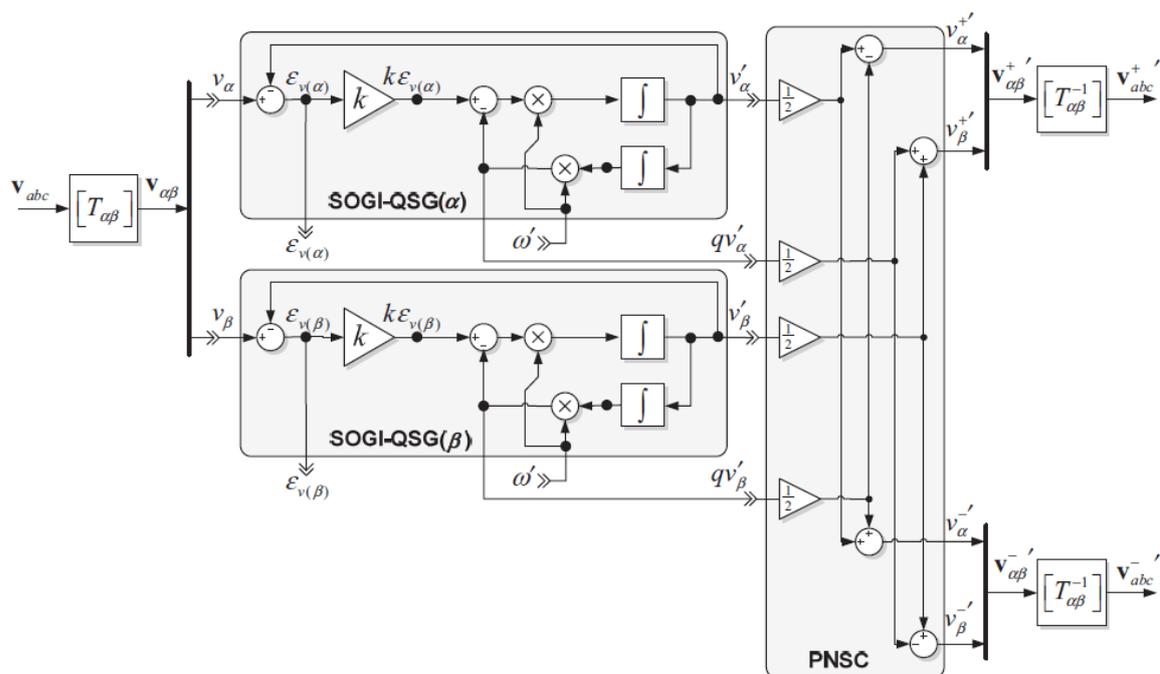
Como introduzido na seção anterior, para o correto funcionamento do sistema de controle é essencial a informação do ângulo do vetor de tensão da rede. Por meio dessa informação são realizadas as transformadas matemáticas para o sistema de coordenadas síncrono e o sinal de referência para a modulação PWM é gerado.

O detector de fase, ou sincronizador, é comumente chamado de PLL, sigla do inglês para *phase locked loop*. Há diversas estruturas para o PLL apresentadas na literatura, por se tratar de um sistema de primordial importância até mesmo para a proteção do conversor.

Idealmente, o vetor de tensão da rede deveria possuir módulo e frequência de rotação constantes, descrevendo tensões perfeitamente senoidais. Contudo, na prática há inúmeras não idealidades no sistema elétrico que originam distúrbios no vetor da tensão – componentes harmônicos, desbalanceamentos, oscilações na frequência, entre outros. O conversor que esteja conectado à rede está sujeito a todos esses distúrbios e para o seu correto funcionamento a sincronização com a rede deve ser feita corretamente.

O PLL usado nesse trabalho utiliza a estrutura DSOGI-FLL (*Double Second-Order Generalized Integrator - FLL*) demonstrada por TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ (2011), como mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Estrutura do DSOGI-FLL



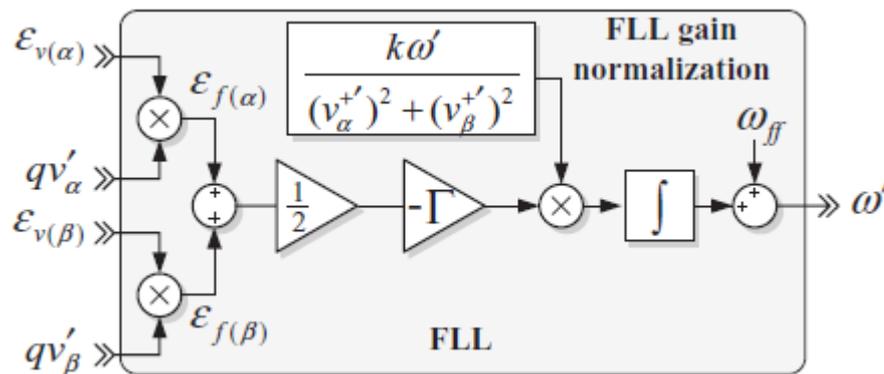
Fonte: (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011)

A estrutura DSOGI consiste em quatro blocos básicos:

- No primeiro bloco, chamado de  $T_{\alpha\beta}$ , as tensões trifásicas são convertidas para o sistema de eixos  $\alpha\beta$  por meio da transformada de Clarke, apresentada no Apêndice A.
- Os blocos SOGI-QSG (*Second-order Generalized Integrator for Quadrature Signal Generator*) realizam as mesmas operações para os vetores dos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ , separadamente. Esses blocos são filtros seletivos em torno da frequência  $\omega'$  (fornecida pelo FLL) que geram sinais em quadratura  $v_\alpha$ ,  $qv_\alpha$ ,  $v_\beta$  e  $qv_\beta$ .
- O bloco PNSC (*positive/negative-sequence calculation*) gera, a partir dos sinais em quadratura, os vetores  $\alpha$  e  $\beta$  de sequência positiva e negativa.
- Finalmente, os blocos  $T_{\alpha\beta}^{-1}$ , realizam a transformada inversa de Clarke convertendo os sinais novamente para o sistema trifásico em sequência positiva e negativa.

O detector de frequência, FLL adotado é apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Estrutura do FLL



Fonte: (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011)

Utiliza-se apenas um FLL para o cálculo de  $\omega'$  para os SOGI-QSG de  $\alpha$  e  $\beta$ , visto que ambos estão em uma mesma frequência. O que se faz, portanto, é calcular o erro médio a partir dos sinais fornecidos pelo QSG de  $\alpha$  e  $\beta$ . A frequência base do sistema,  $\omega_{ff}$ , é inserida para diminuir o esforço da malha de controle. O ganho  $\Gamma$  é ajustado para determinar o tempo de assentamento do sistema, segundo TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ (2011):

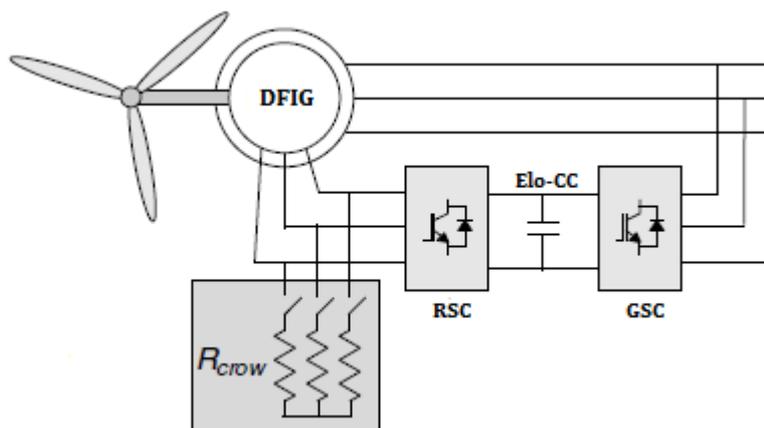
$$t_{\text{assentamento}} \cong \frac{4,6}{\Gamma} \quad (2.67)$$

## 2.8. Crowbar

A solução mais comum para a proteção do DFIG durante os afundamentos de tensão é o dispositivo *crowbar*. A efetividade dessa solução na proteção do conversor contra sobrecorrentes foi demonstrada em diversos trabalhos (ANAYA-LARA, LIU, *et al.*, 2008), (PENG, FRANCOIS e LI, 2009), (MORREN e DE HAAN, 2005).

O *crowbar* consiste em um conjunto de resistências externas, conectadas aos enrolamentos do rotor da máquina durante o falta, Figura 26. A atuação do *crowbar* deve ser condicionada à ultrapassagem da corrente do rotor de certo limite, protegendo o RSC dessas correntes. Dessa maneira, espera-se a atuação do *crowbar* nos instantes iniciais do afundamento e nos instantes após o seu término. Deve-se, portanto, detectar esses instantes para acionar o *crowbar*.

Figura 26 - Crowbar Conectado ao DFIG



O objetivo desse equipamento é aumentar a resistência nos enrolamentos do rotor amortecendo o fluxo natural. Durante a atuação do *crowbar* os pulsos do RSC deverão ser bloqueados e essa dinâmica de amortecimento será ditada pela constante de tempo elétrica da máquina. Com essa ação o controle do conversor deixa de funcionar durante esse período.

Teoricamente, quanto mais elevada a resistência inserida pelo *crowbar* maior seria a limitação de corrente e mais rápido se daria a extinção do fluxo natural.

Entretanto, caso a queda de tensão sobre essa resistência se torne maior do que a tensão do elo-CC do conversor os diodos do RSC irão conduzir e a tensão CC irá se elevar.

Cabe destacar que há um atraso na atuação do *crowbar* inerente ao tempo de detecção da falta e do tempo de atuação dos dispositivos eletrônicos. Assim, é comum o conversor sofrer o primeiro pico de corrente e só então o *crowbar* começar a atuar. Outro ponto importante é que ao curto-circuitar o rotor através do *crowbar* a máquina passa a funcionar como uma máquina de rotor em gaiola, o torque eletromagnético diminui e, desse modo, a velocidade da máquina aumenta.

A proposta apresentada nesse trabalho é uma alternativa à proteção realizada com o *crowbar*. Com a utilização de dispositivos supercondutores na limitação da corrente de falta, muitas das desvantagens apresentadas pelo *crowbar* deixam de existir, conforme será exposto no capítulo seguinte.

### **3. LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR**

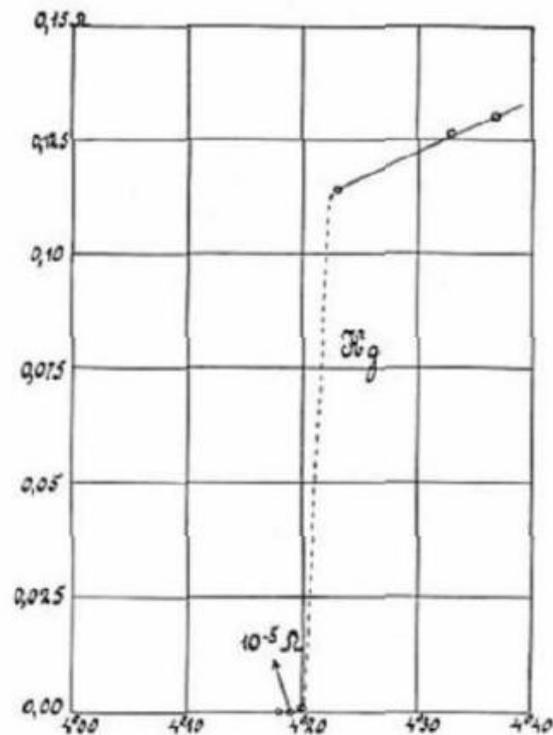
Recentemente, têm sido propostas alternativas para a proteção do DFIG durante afundamentos de tensão com a utilização dos dispositivos LCS - limitador de corrente supercondutor (ALARAIFI, MOAWWAD, *et al.*, 2013), (ELSHIEKH, MANSOUR e AZMY, 2013), (KARAIPOOM e NGAMROO, 2015), (NGAMROO e KARAIPOOM, 2014), (CHEN, DENG, *et al.*, 2015). Os estudos, sempre por simulação, têm apresentado resultados bastante promissores na limitação das correntes de estator e rotor e na proteção do circuito do conversor eletrônico.

Nesse capítulo serão abordados aspectos referentes à supercondutividade e sua aplicação em dispositivos limitadores de corrente. Mais especificamente, será tratada também a utilização desses dispositivos para a proteção do DFIG.

#### **3.1. Breve Histórico da Supercondutividade**

No ano de 1911, Heike K. Onnes, físico holandês, descobriu que a resistência elétrica do mercúrio reduz abruptamente abaixo de uma determinada temperatura, essa descoberta lhe rendeu o prêmio Nobel de Física em 1913 (ONNES, 1913). No caso do mercúrio, a temperatura crítica é igual a 4,2K e o comportamento da resistividade obtido por Onnes é mostrado na Figura 27, a seguir.

Figura 27 - Gráfico histórico da resistência do mercúrio em função da temperatura

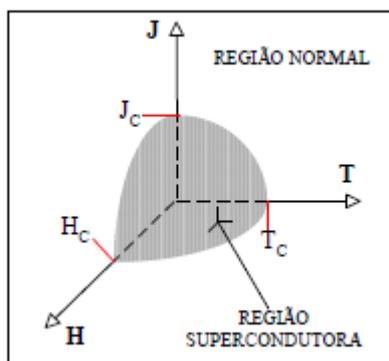


Fonte: (ONNES, 1913)

A partir dessa descoberta iniciou-se a pesquisa por materiais supercondutores e percebeu-se que nem todos os materiais desenvolvem esse comportamento quando submetidos a baixas temperaturas. Comprovou-se que o Chumbo, por exemplo, se torna supercondutor em temperaturas inferiores a 7,2K.

Descobriu-se também, nos anos seguintes, que o campo magnético e a densidade de corrente poderiam fazer com que o material saísse do estado supercondutor. Portanto, os valores de temperatura, campo magnético e densidade de corrente determinam um limiar para que o material esteja no estado supercondutor, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Representação da região supercondutora



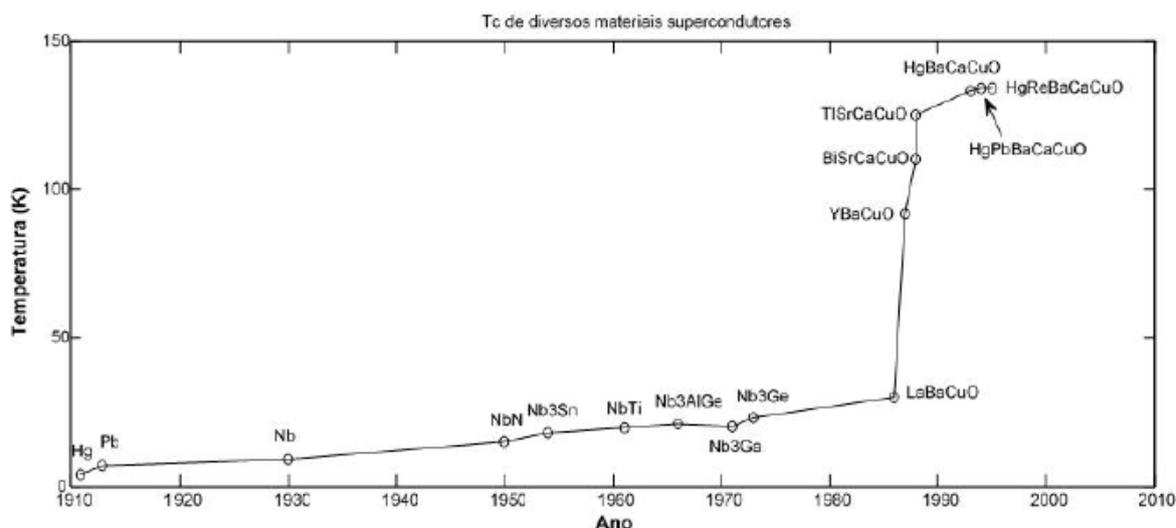
Fonte: (SILVA, 2014)

O avanço seguinte no estudo dos supercondutores foi feito em 1933. W. Meissner e R. Ochsenfeld observaram que os supercondutores são diamagnéticos perfeitos, esse comportamento foi chamado de Efeito Meissner. Isso significa que, mesmo na presença de um campo magnético externo, o material no estado supercondutor apresenta em seu interior um valor nulo de fluxo magnético.

Nos 50 anos seguintes buscou-se compreender o fenômeno da supercondutividade. Diversas teorias foram propostas e a mais difundida é a chamada teoria BCS, cujo nome é uma homenagem aos autores Bardeen, Cooper e Schrieffer. Segundo essa teoria a supercondutividade é explicada pressupondo a existência de superelétrons e assumindo-se um gap de energia formado entre o estado normal e o estado supercondutor (LONDON, 1935), (GINZBURG, 1950), (BARDEEN, COOPER e SCHRIEFFER, 1957). Nessa formulação os elétrons se movem aos pares – um comportamento que diverge daquele proposto pela mecânica clássica; e formam, por sua vez, as supercorrentes.

Mesmo com a teoria consolidada a temperatura crítica ainda se mostrava uma barreira para a utilização dos supercondutores. Até 1986 a temperatura mais alta na qual se podia obter supercondutividade era 30K. Nesse ano, J. G. Bednorz e K. A. Müller descobriram os supercondutores de alta temperatura (HTS). A partir dessa descoberta diversos materiais foram estudados e conseguiu-se atingir, com determinados materiais, temperaturas críticas superiores a 77K, o que permitiu a utilização de Nitrogênio líquido como refrigerante para os supercondutores. A Figura 29 mostra a evolução histórica dos supercondutores.

Figura 29 - Evolução temporal da temperatura crítica dos supercondutores



Fonte: (SILVA, 2014)

### 3.2. Aplicação do Supercondutor como Limitador de Corrente de Falta

Limitadores de corrente de falta são dispositivos que, quando submetidos a uma situação de falta, evitam que a circulação das correntes de falta seja prejudicial aos elementos percorridos por ela. Em termos gerais, durante a operação normal, esses dispositivos devem possuir impedância mínima para não causar queda de tensão significativa no circuito em que estão inseridos. Quando ocorre uma falta e a corrente sobe acima de valores limite, o limitador atua ceifando a corrente excessiva.

Há diversas tecnologias utilizadas para realizar essa função, porém os materiais supercondutores apresentam as características ideais para exercê-la. Sua operação se baseia nas propriedades dos supercondutores:

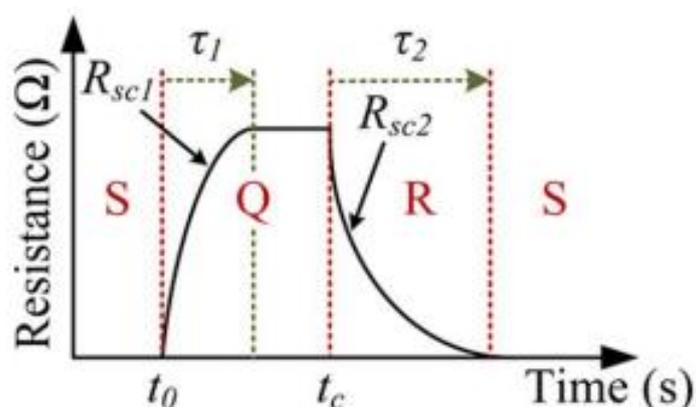
- Apresentar impedância nula no estado supercondutor;
- Transitar do estado supercondutor para o estado normal devido à densidade de corrente superior a limites pré-estabelecidos;
- Realizar a transição entre os estados em um intervalo de tempo mínimo;
- Alta confiabilidade;
- Recuperação, após a falta, rápida e automática.

Ao utilizar o limitador de corrente de falta supercondutor resistivo, insere-se o dispositivo em série no circuito que se deseja proteger. Na operação normal o supercondutor apresenta resistência nula, porém, ao ser percorrido por uma corrente superior à corrente crítica irá, inserir uma resistência no caminho da corrente, limitando-a.

Sabe-se que o fator que determina a transição dos estados, sob condições adequadas de temperatura e indução magnética, é a densidade de corrente no supercondutor. Portanto, a corrente que irá fazê-lo transitar está associada à área com que o limitador foi construído. Além disso, o valor da corrente durante a falta, com a atuação do dispositivo, é determinado pela resistência inserida pelo dispositivo. Essa resistência é função do comprimento do material supercondutor. Assim, todas as características necessárias para o projeto do dispositivo limitador de corrente supercondutor são determinadas em sua construção (OLIVEIRA, 2005).

Na prática, a transição entre os estados não é instantânea e é dependente da corrente crítica e da temperatura crítica. A modelagem completa dessas transições envolve o equacionamento das trocas de calor entre o material supercondutor e o fluido refrigerante. Diversos trabalhos têm utilizado um modelo temporal para essa dinâmica entre os estados (NGAMROO e KARAIPOOM, 2014), (WOO-JAE PARK, 2010), conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Modelo temporal da resistência do supercondutor



Fonte: (NGAMROO e KARAIPOOM, 2014)

O instante de tempo  $t_0$  é aquele em que a corrente ultrapassa seu valor crítico, e o supercondutor começa a apresentar uma resistência que é inserida no circuito.  $\tau_1$  é o intervalo de tempo que tarda a transição completa do estado supercondutor a

condutor normal. Em  $t_c$  a corrente volta a ficar abaixo de seu valor crítico e o material inicia sua recuperação, retornando ao estado supercondutor totalmente após o intervalo de tempo  $\tau_2$ . Em função de resultados disponibilizados na literatura já citada, neste trabalho assume-se que os intervalos de tempo  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são iguais a 1ms e 50ms, respectivamente

### **3.3. Utilização do SCL no DFIG**

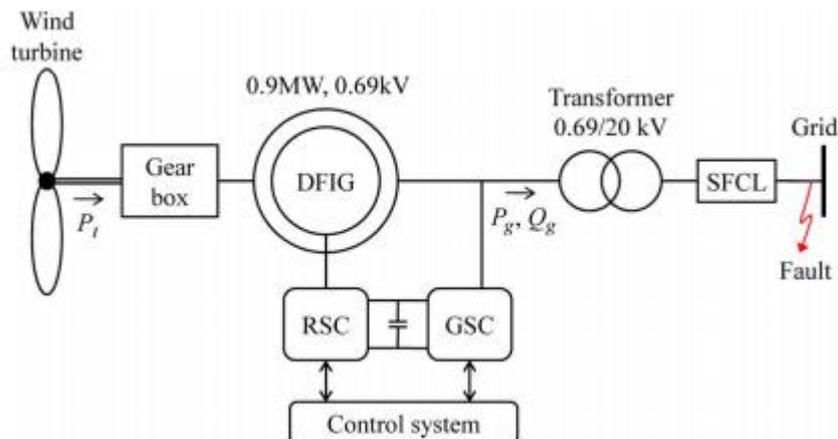
Dado o comportamento do DFIG durante afundamentos de tensão, conforme apresentado no Capítulo 2, o LCS se apresenta como uma alternativa viável à sua proteção nestas circunstâncias. O que se pretende com a sua utilização é a limitação das altas correntes fluindo, especialmente no rotor, durante os afundamentos de tensão. Essa limitação se dá devido à inserção de forma natural de uma impedância no circuito apenas no momento em que a falta ocorre.

#### **3.3.1. Revisão Bibliográfica**

Nesse contexto, diversos trabalhos científicos apresentaram propostas de utilização do LCS no DFIG (ALARAFI, MOAWWAD, *et al.*, 2013), (ELSHIEKH, MANSOUR e AZMY, 2013), (KARAIPOOM e NGAMROO, 2015), (NGAMROO e KARAIPOOM, 2014), (CHEN, DENG, *et al.*, 2015). Esse trabalho limita-se a avaliar o desempenho do LCS do tipo resistivo.

ELSHIEKH, MANSOUR e AZMY (2013) propõem o uso do LCS na conexão do aerogerador com o sistema, conforme mostrado na Figura 31. A ideia dessa configuração é inserir uma impedância entre a falta e a máquina de forma que a queda de tensão vista pelo gerador seja menor. Com isso, têm-se menores correntes no estator e, conseqüentemente, diminui-se o nível das correntes no rotor devido ao acoplamento magnético entre os enrolamentos. Demonstra-se também a obtenção de um melhor desempenho na dinâmica do fluxo de potência, diminuindo a aceleração indesejada do motor e fornecendo reativos ao sistema durante a falta.

Figura 31 - Implementação do LCS entre o DFIG e a rede

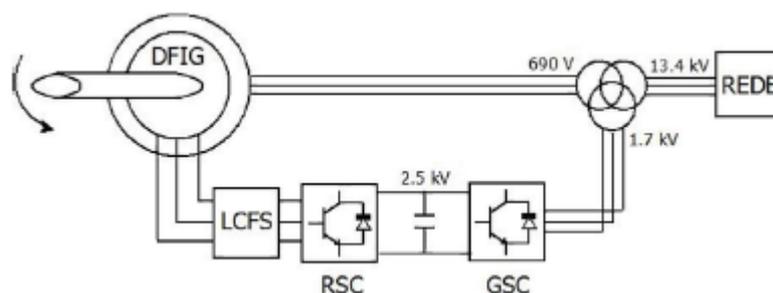


Fonte: (ELSHIEKH, MANSOUR e AZMY, 2013)

Entretanto, a corrente rotórica que circula para o conversor *back-to-back* ainda alcança valores expressivos.

OLIVEIRA, AMORIM, *et al.* (2014a) compara os resultados de ELSHIEKH, MANSOUR e AZMY (2013) com uma nova implementação do LCS. Nesse caso utiliza-se o dispositivo supercondutor no rotor do DFIG, Figura 32. Demonstrou-se que com essa configuração a limitação das correntes no rotor é mais efetiva, garantindo a proteção do conversor. Contudo, as referências para o sistema de controle de potência são ajustadas em zero, ou seja, a máquina não fornece reativos durante o afundamento.

Figura 32 - Implementação do LCS no rotor do DFIG

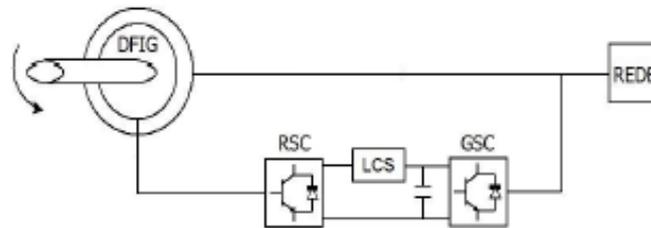


Fonte: (OLIVEIRA, AMORIM, *et al.*, 2014a)

Alguns avanços nesses resultados foram apresentados em OLIVEIRA, AMORIM, *et al.* (2014b). Nesse caso adota-se uma estratégia de controle diferente com a mesma topologia do LCS. O controle permite fornecer potência reativa durante o afundamento e mantém a limitação das correntes no rotor. Além disso, é proposta a

utilização do LCS em uma nova configuração, dessa vez no elo-CC do conversor, Figura 33.

Figura 33 - Implementação do LCS no elo-CC do conversor



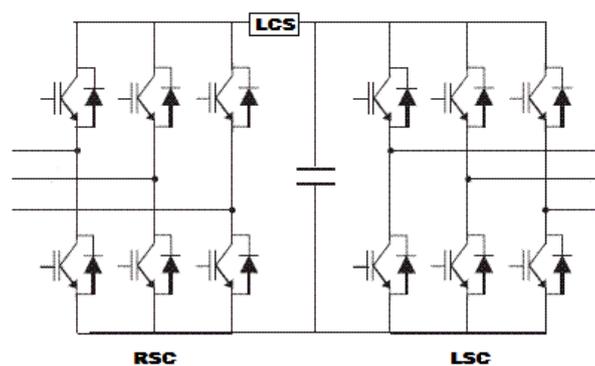
Fonte: (OLIVEIRA, AMORIM, *et al.*, 2014b)

Essa configuração apresenta como vantagem em relação às propostas anteriormente a utilização de apenas um dispositivo supercondutor, ao invés de três. O desempenho dessa configuração será avaliado mais profundamente adiante.

### 3.3.2. Configurações Propostas

Conforme dito anteriormente, serão avaliadas nesse trabalho duas configurações utilizando o LCS no elo-CC do conversor do DFIG. A primeira delas, chamada aqui de Configuração 1, é a apresentada em OLIVEIRA, AMORIM, *et al.* (2014b), mostrada na Figura 34

Figura 34 - LCS Configuração 1



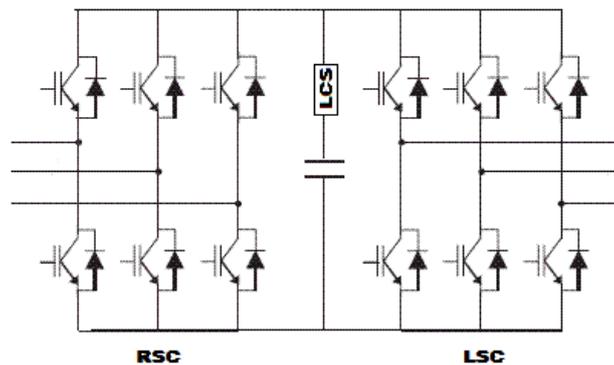
A Configuração 1 utiliza o LCS entre o capacitor do elo-CC e o conversor do lado do rotor. Desse modo, o GSC permanece com a mesma estratégia de controle para a tensão no capacitor durante o afundamento.

O aumento da suportabilidade se dá com a utilização dessa configuração pelo fato de que o RSC estará sujeito a uma tensão CC mais elevada. Isso ocorre porque no momento em que o LCS insere a resistência no circuito surge uma tensão sobre o

dispositivo somando-se à tensão no capacitor. Ao sintetizar uma tensão mais elevada haverá uma diferença de potencial menor entre a tensão induzida e a saída do inversor, assim, espera-se que a corrente a fluir pelo rotor seja limitada.

A Configuração 2, Figura 35, utiliza o LCS em série com o capacitor do elo CC. A tensão de todo o elo-CC será elevada durante a ocorrência da falta. O princípio utilizado para a limitação da corrente no rotor é o mesmo - uma tensão maior no elo-CC diminui a diferença de potencial em relação à tensão induzida. O GSC, por outro lado tentará manter a tensão, oferecendo um caminho para o escoamento do fluxo de potência oriunda do rotor da máquina.

Figura 35 - LCS Configuração 2

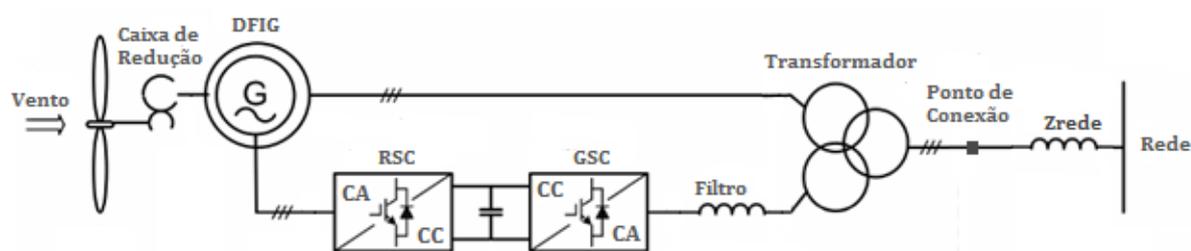


Os resultados obtidos, por meio de simulação computacional, são apresentados no próximo capítulo.

## 4. ANÁLISE POR SIMULAÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

As configurações propostas foram implementadas no software PSCAD/EMTDC em um sistema eólico com os parâmetros apresentados no Apêndice B. Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados gerados a partir dessas simulações. O sistema simulado básico, a partir do qual foram testadas as propostas, é apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Sistema Simulado

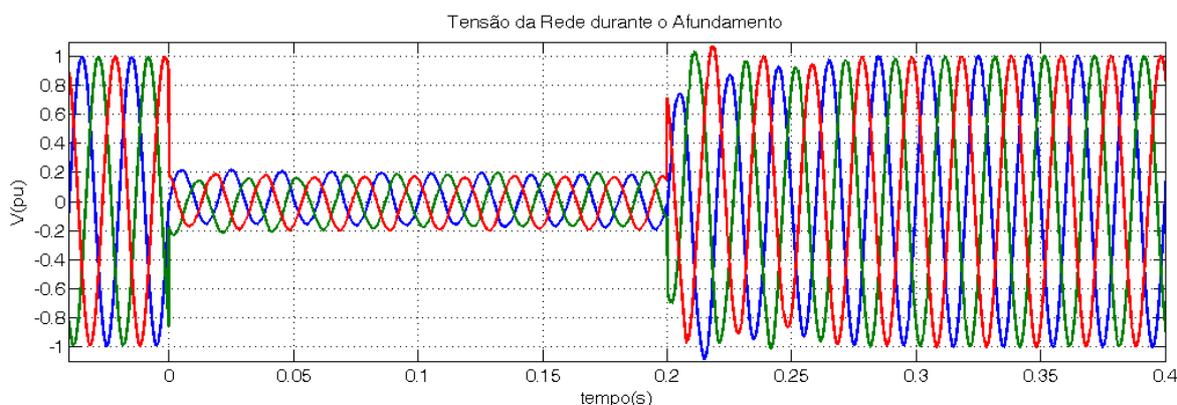


### 4.1. Considerações

#### 4.1.1. Afundamento de Tensão

Para fins de conformidade às normativas de suportabilidade, os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos sujeitando-se o aerogerador a afundamentos severos de tensão. A rede considerada é um barramento infinito e o afundamento ocorre no ponto de conexão com o gerador. A forma de onda da tensão é apresentada na Figura 37.

Figura 37 - Afundamento de Tensão Aplicado ao DFIG



Esse afundamento atende aos requisitos do teste VD3 – Afundamento de Tensão Trifásico Simétrico, da Norma IEC 61400-21 (2001) apresentados no Capítulo 1: o

afundamento tem profundidade igual a 0,8 e duração igual a 0,2s. Além disso, obedece aos requisitos da normativa brasileira publicada pela ONS (ONS - SUBMÓDULO 2.8, 2009). Esse afundamento foi escolhido por tipificar o pior caso para o sistema de proteção do DFIG, portanto, caso os resultados dos testes sejam satisfatórios para essa situação, presume-se que também o serão para as demais.

Além disso, os testes são feitos com o gerador operando a uma velocidade de vento tal que a velocidade do rotor seja igual a 1,25 pu, o que significa o ponto de maior geração de potência, também tipificando o pior cenário para o sistema de proteção.

#### **4.1.2. Estratégia de Controle**

Adota-se como estratégia de controle para o GSC, durante o afundamento, manter o controle da tensão sobre o capacitor do elo-CC. No caso da configuração 2, essa tensão é diferente da tensão do elo-CC efetivo. Entretanto, como pode ser visto no Apêndice C, essa estratégia apresentou melhores resultados.

Para o controle do RSC estabelecem-se como referências: potência ativa igual a zero, e máximo fornecimento de potência reativa pelo estator da máquina.

#### **4.1.3. Aspectos Avaliados**

Para avaliação do desempenho das configurações propostas e para fins de comparação foram eleitas algumas variáveis de interesse. A principal delas é a corrente no rotor da máquina, porém são também consideradas nas análises a tensão do elo-CC e a corrente no estator.

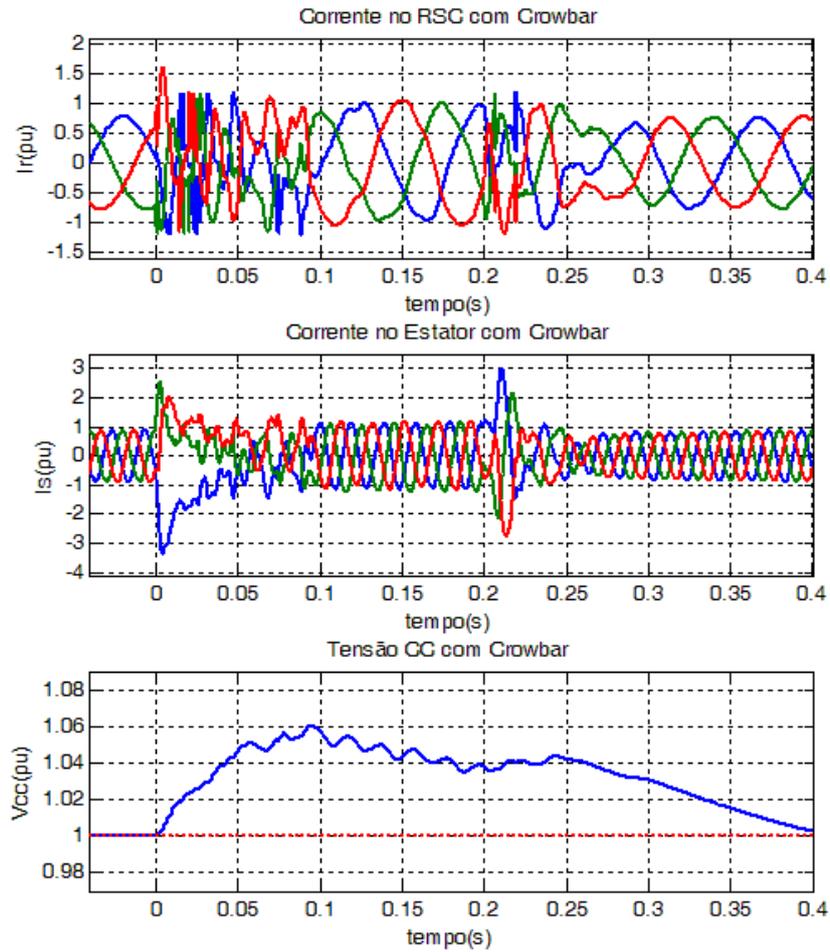
#### **4.1.4. Referência para Comparação**

Com o intuito de estabelecer uma referência para a avaliação do desempenho das configurações propostas nesse trabalho, faz-se um comparativo com os resultados apresentados por estratégias adotadas em outros trabalhos na literatura.

Ao utilizar o *crowbar* como dispositivo de proteção no sistema eólico escolhido (Apêndice B), obtêm-se os resultados mostrados na Figura 38 (ANAYA-LARA, JENKINS, *et al.*, 2009).

Figura 38 - Resultados com *Crowbar*

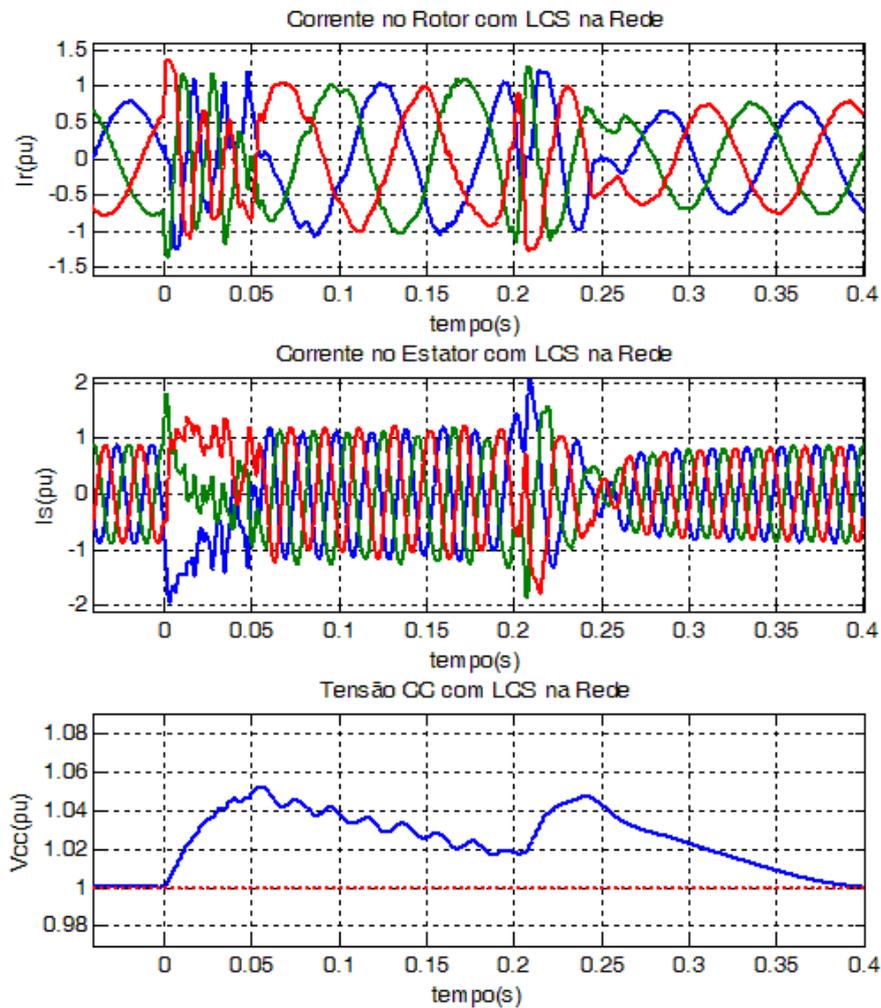
(a) Corrente no RSC; (b) Corrente no Estator; (c) Tensão CC



Com a utilização do dispositivo supercondutor na configuração proposta por ELSHIEKH, MANSOUR e AZMY (2013) os resultados obtidos são apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Resultados com LCS na Rede

(a) Corrente no RSC; (b) Corrente no Estator; (c) Tensão CC



Dessa forma, esses resultados, que servirão como referência para mensurar o desempenho das configurações propostas, são sumarizados na Tabela 3.

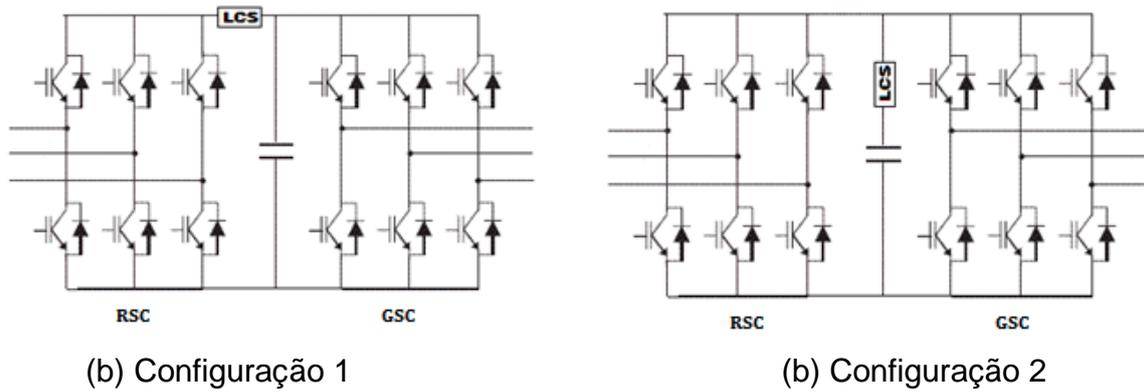
Tabela 3 - Valores Máximos Alcançados nos Testes

	<b>Crowbar</b>	<b>LCS na Rede</b>
Corrente no RSC	1,61pu	1,37pu
Corrente no Estator	3,397pu	2,055pu
Tensão do Elo-CC	1,06pu	1,052pu

## 4.2. Resultados

A seguir são apresentadas as correntes obtidas para a simulação das duas configurações propostas, que são aqui repetidas na Figura 40.

Figura 40 – Conversor *Back-to-Back* com Limitador de Corrente Supercondutor (LCS)



A Figura 41 mostra os comportamentos obtidos, em ambas as configurações para as correntes de rotor, de estator, no GSC e na rede.

Figura 41 - Comparativo entre as correntes para as duas configurações

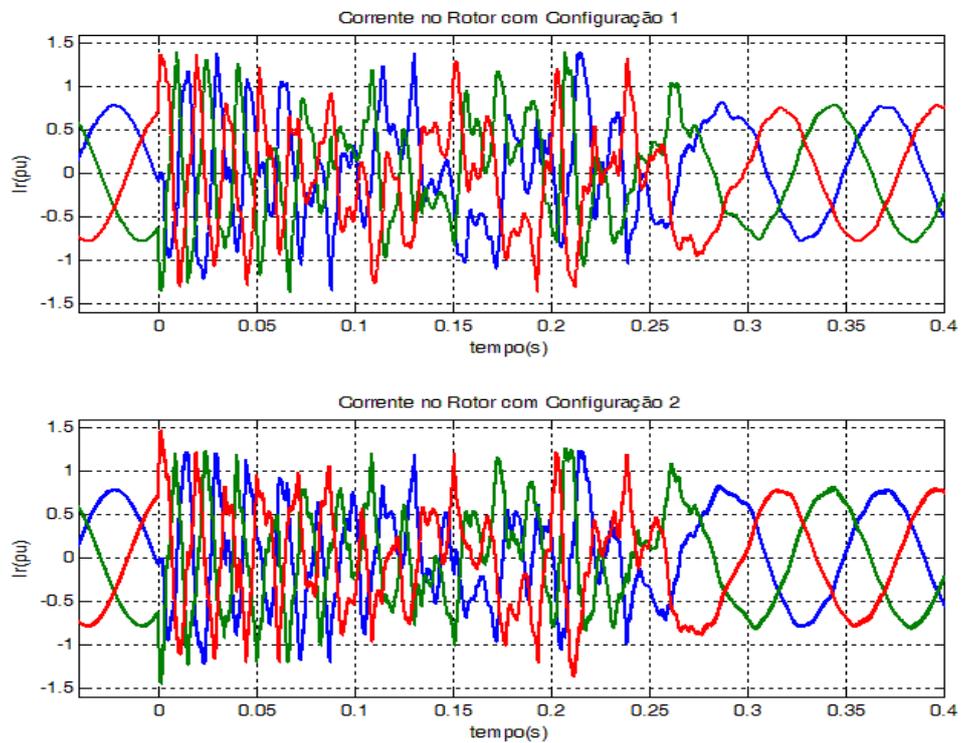


Figura 41 - Comparativo entre as correntes para as duas configurações (Continuação)

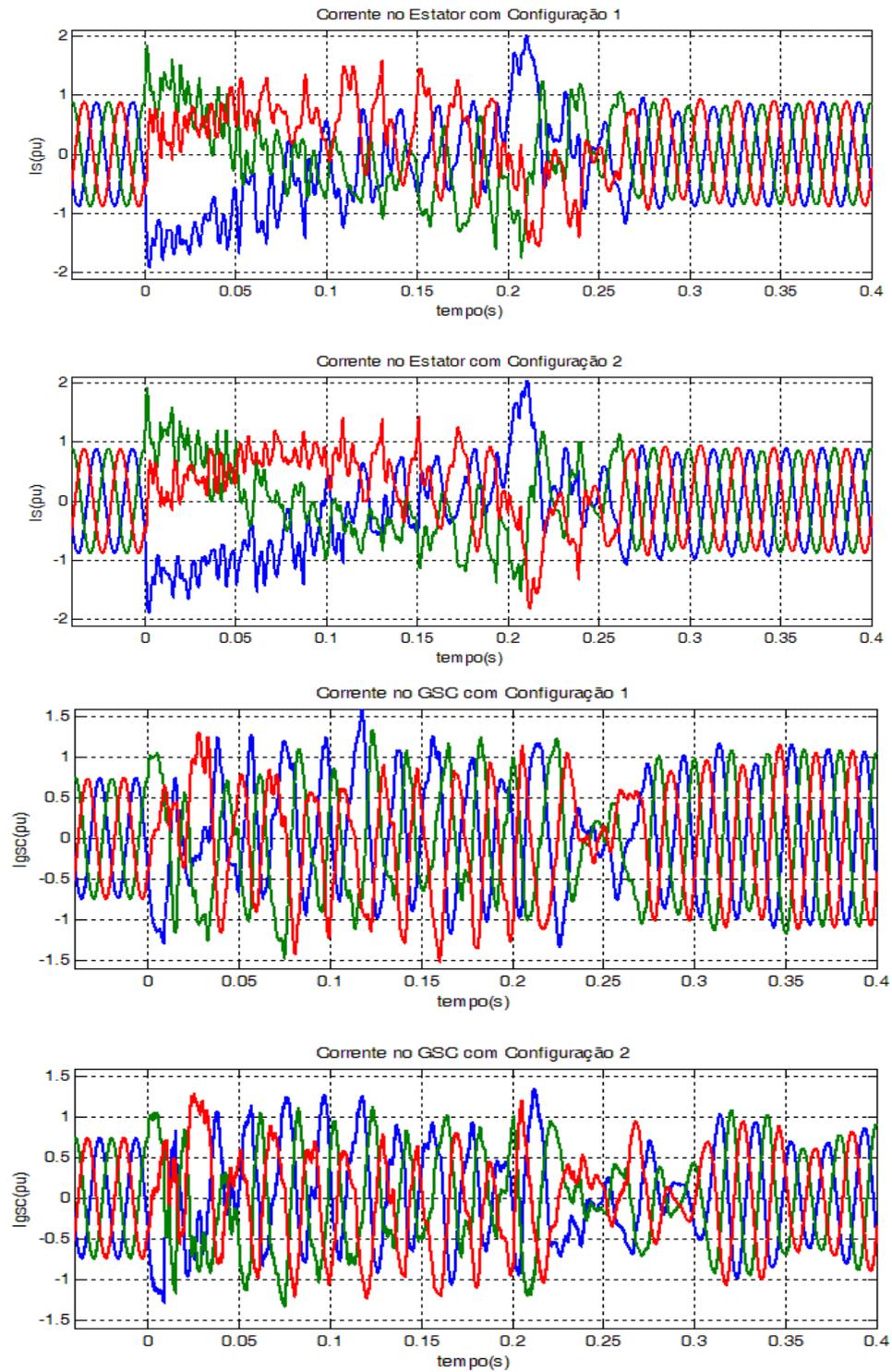
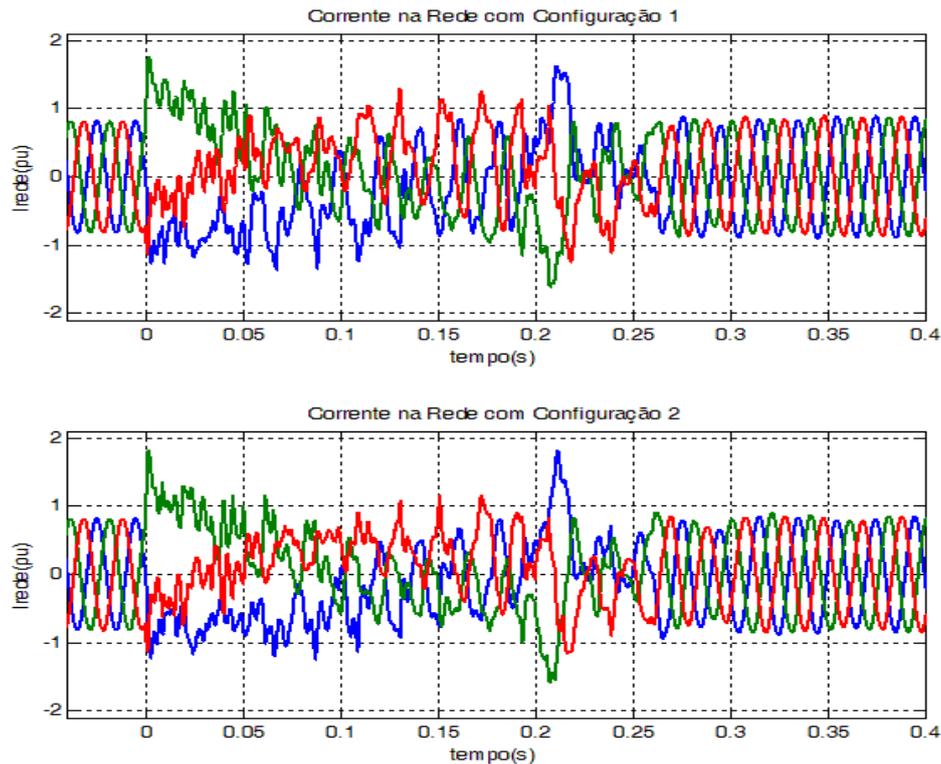


Figura 41 - Comparativo entre as correntes para as duas configurações (Continuação)



Observa-se que o comportamento das correntes para as duas configurações é muito similar. Do ponto de vista da corrente da rede e da corrente do estator, não há diferenças significativas que permitam optar por uma ou outra configuração.

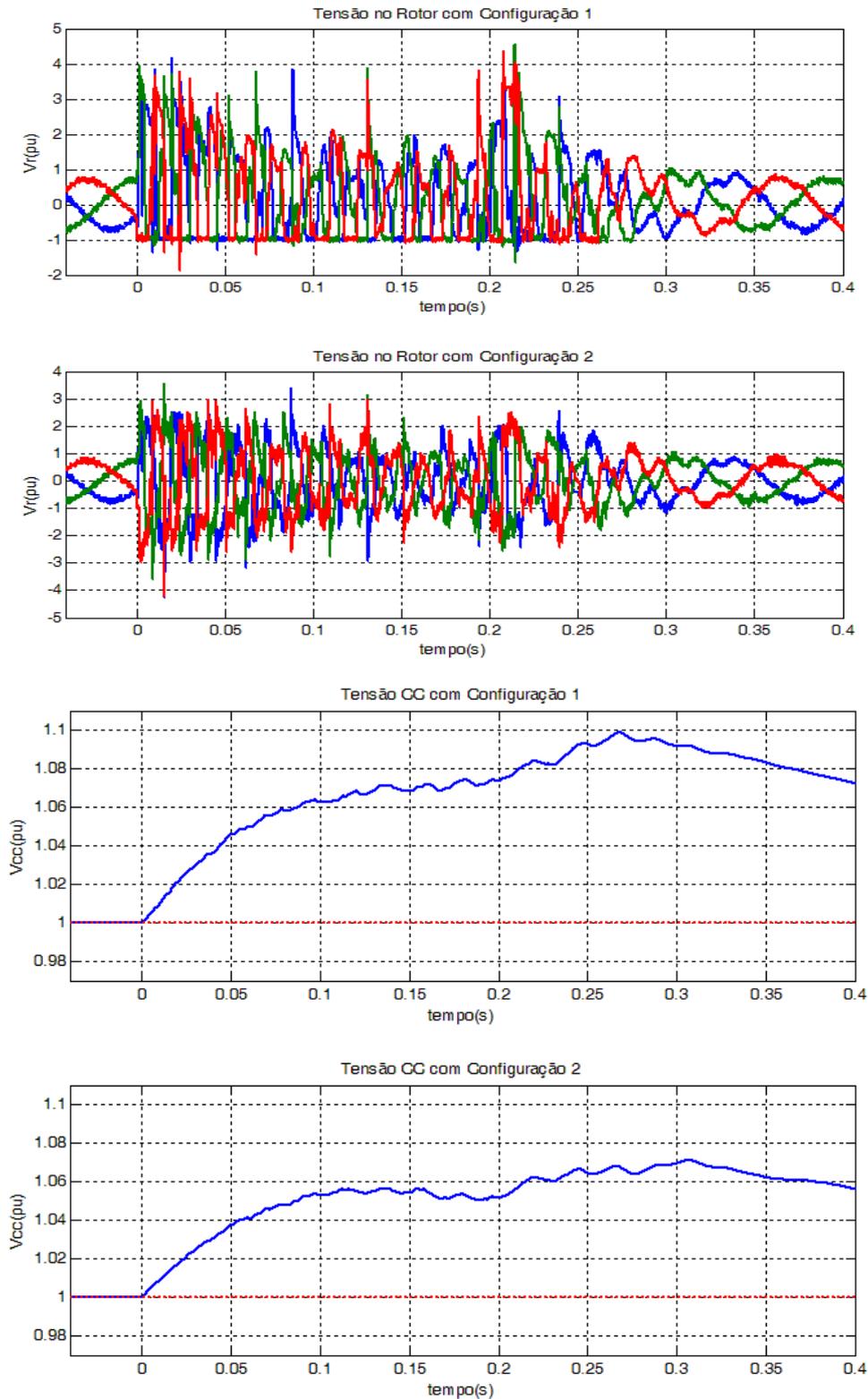
Quanto à corrente de rotor, apesar de ambas as configurações apresentarem um valor de pico semelhante, a Configuração 1 apresentou valores um pouco menores, não sendo essa diferença muito relevante.

As correntes do GSC, por sua vez, apresentaram um valor um pouco menor na Configuração 2, entretanto, possuem um transitório maior de recuperação após o término do afundamento, em relação à Configuração 1.

De maneira geral, nota-se que no requisito de limitação de correntes, os resultados apresentados por ambas as configurações sobrepujam àqueles utilizados como referência na seção anterior.

O comportamento obtido para as tensões no rotor e no capacitor do elo-CC é apresentado na Figura 42 a seguir:

Figura 42 – Comparativo entre as tensões para as duas configurações



Em ambos os casos, observa-se que é a produção de tensões elevadas no rotor que leva à necessidade de limitação de corrente. Quanto à tensão sobre o capacitor no elo-CC, nota-se que a Configuração 2 apresentou uma menor sobre-elevação.

Por outro lado, observa-se que a inserção no limitador no elo-CC do conversor faz com que a tensão deste fique mais elevada que os casos de referência.

O comportamento das potências ativa e reativa é visto na Figura 43:

Figura 43 – Comparativo entre as potências para as duas configurações

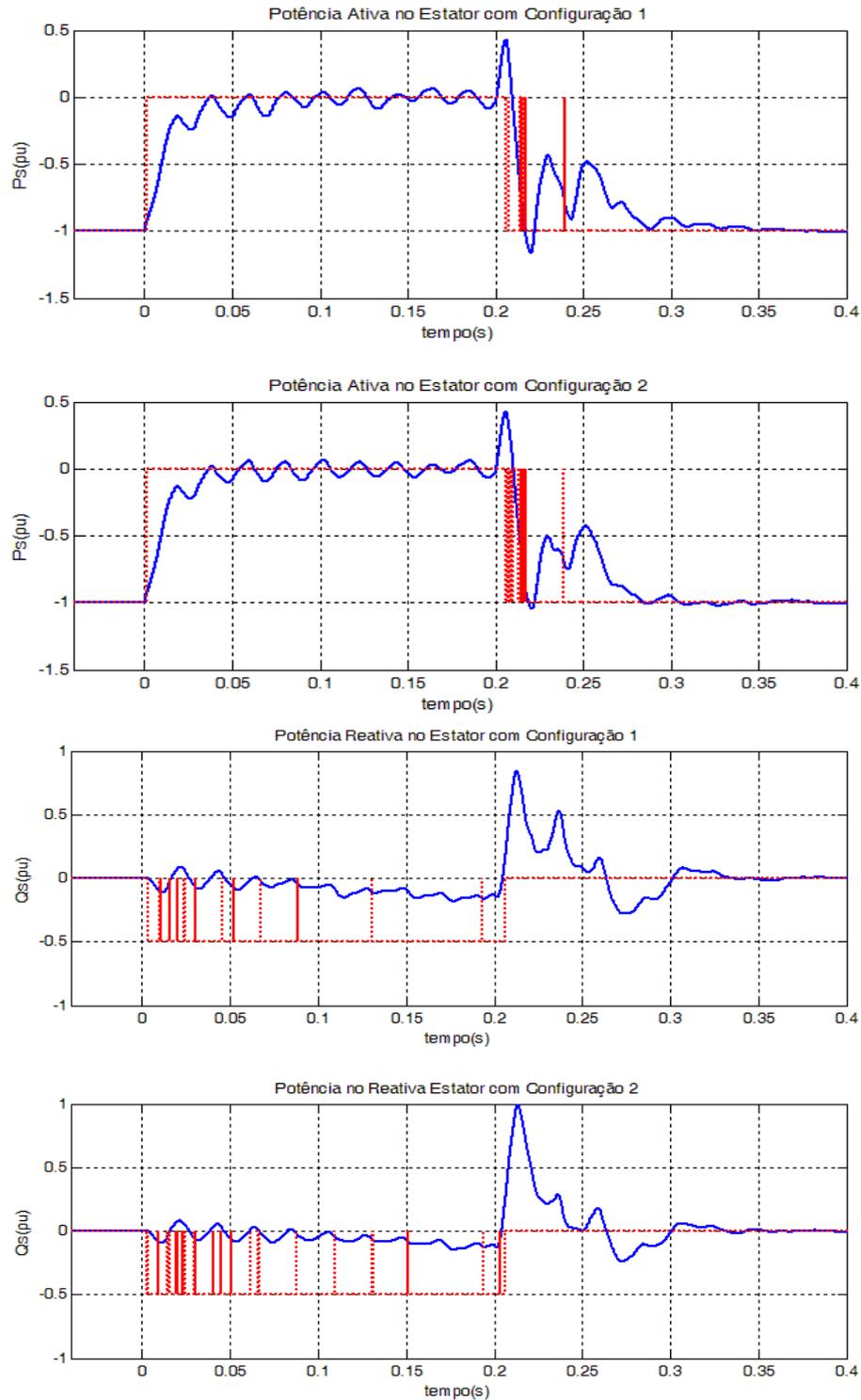


Figura 43 – Comparativo entre as potências para as duas configurações (Continuação)

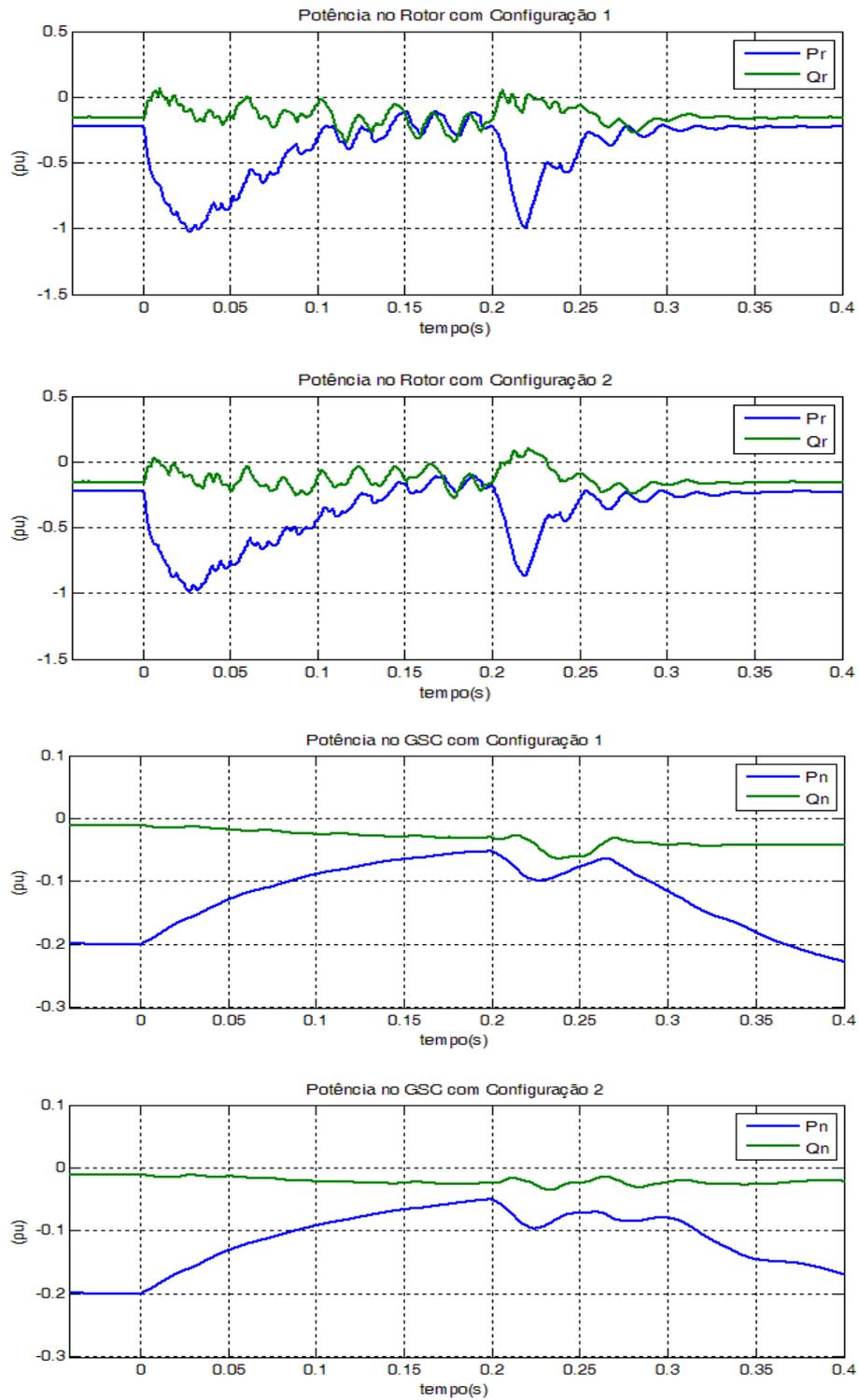
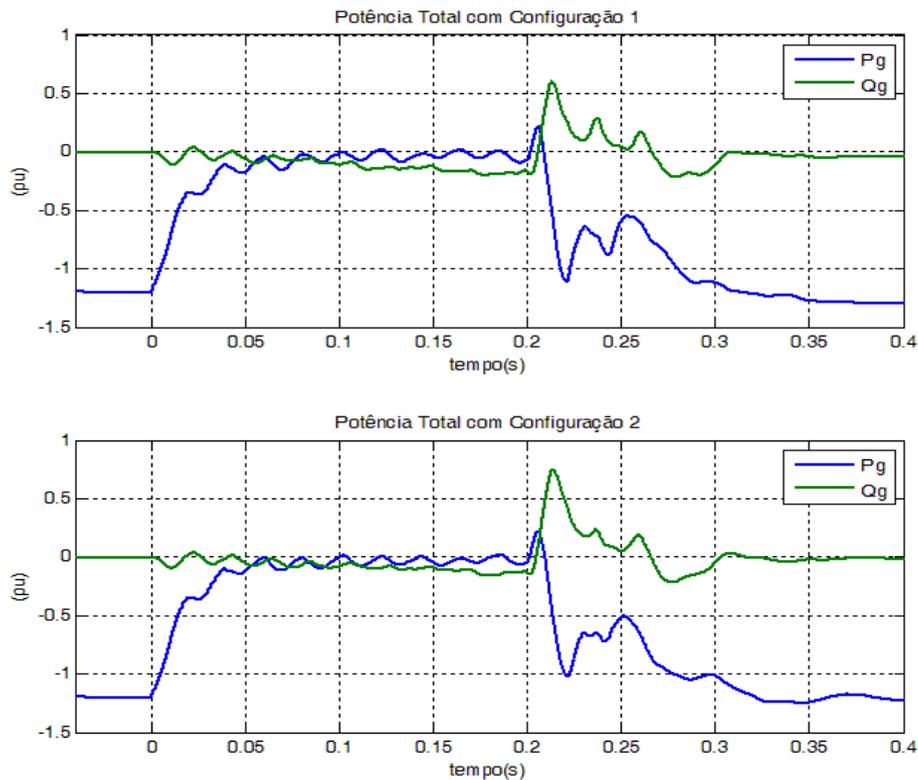


Figura 43 – Comparativo entre as potências para as duas configurações (Continuação)



No que diz respeito ao comportamento das potências, nota-se novamente uma equivalência entre as duas configurações. A Configuração 1 apresenta uma ligeira vantagem, pois consome menos reativos após o término do afundamento – como pode ser notado nos gráficos da potência total do gerador e da potência do estator. Além disso, apresenta após um período curto de tempo um estabelecimento da potência gerada, depois de findado o distúrbio – vide gráfico da potência total do gerador; fato que não é repetido na Configuração 2.

Pode ser visto que, durante o período em que a falta está ocorrendo e logo após o seu término, as referências de potência ativa e reativa a serem geradas pelo estator oscilam. Isso se dá pela escolha da estratégia de detecção de falta adotada pelo sistema, que observa apenas os valores das correntes de rotor. Outra estratégia que monitora também a tensão da rede (e, portanto não oscila) foi testada, porém apresentou desempenho inferior. Os resultados desse teste podem ser vistos no Apêndice C.

A Tabela 4 apresenta um comparativo entre as principais variáveis de interesse para as duas configurações propostas. Nessa tabela são mostrados os valores máximos alcançados por essas grandezas.

Tabela 4 - Comparativo entre as Configurações

	<b>Configuração 1</b>	<b>Configuração 2</b>
Corrente no RSC	1,39pu	1,46pu
Corrente no Estator	2,013pu	2,035pu
Tensão do Elo-CC	1,098pu	1,071pu

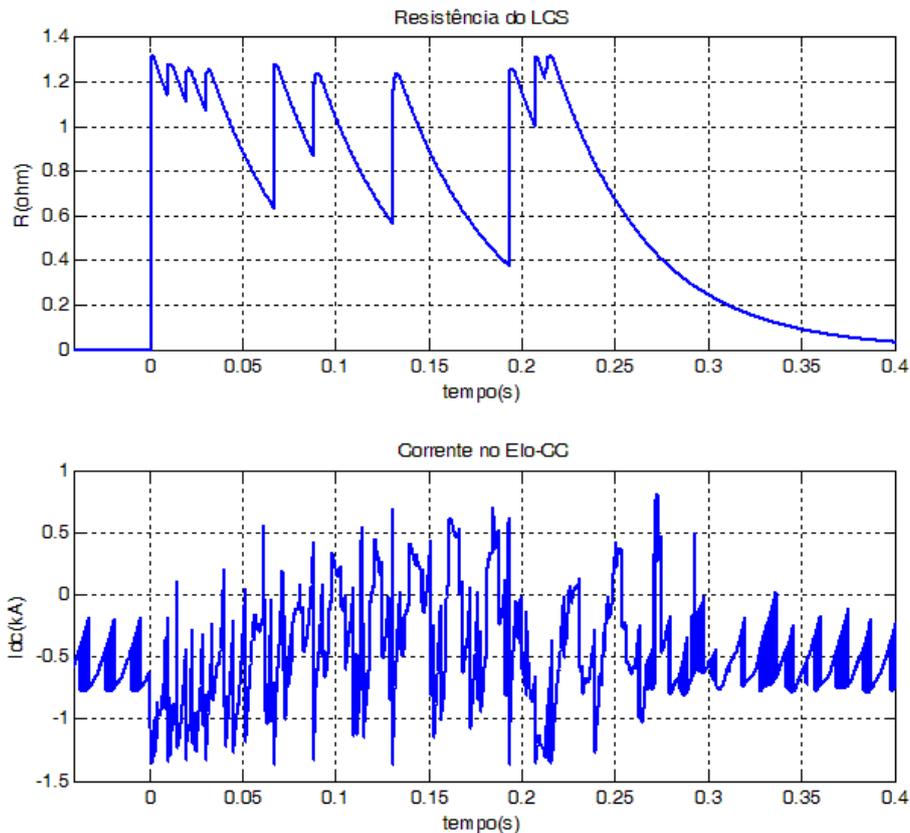
Através desses resultados pode-se concluir que as configurações propostas atendem aos requisitos de aumentar a suportabilidade à afundamentos de tensão no DFIG. Apresentam desempenho superior ao do *crowbar* e equivalente à estrutura com LCS na rede. Contudo, para a implementação da estrutura do LCS na rede são necessários três dispositivos supercondutores – um por fase, e a resistência utilizada é muito maior (vide Apêndice B), o que implica em um dispositivo de maiores dimensões.

Por apresentar ligeira vantagem no desempenho dessas variáveis, e sobretudo no tempo para recuperação após o afundamento de tensão, a Configuração 1 se caracteriza como a melhor opção entre as propostas. Por esse motivo, apenas essa configuração será considerada nos demais testes realizados.

### **4.3. Efeito da Resistência do Supercondutor**

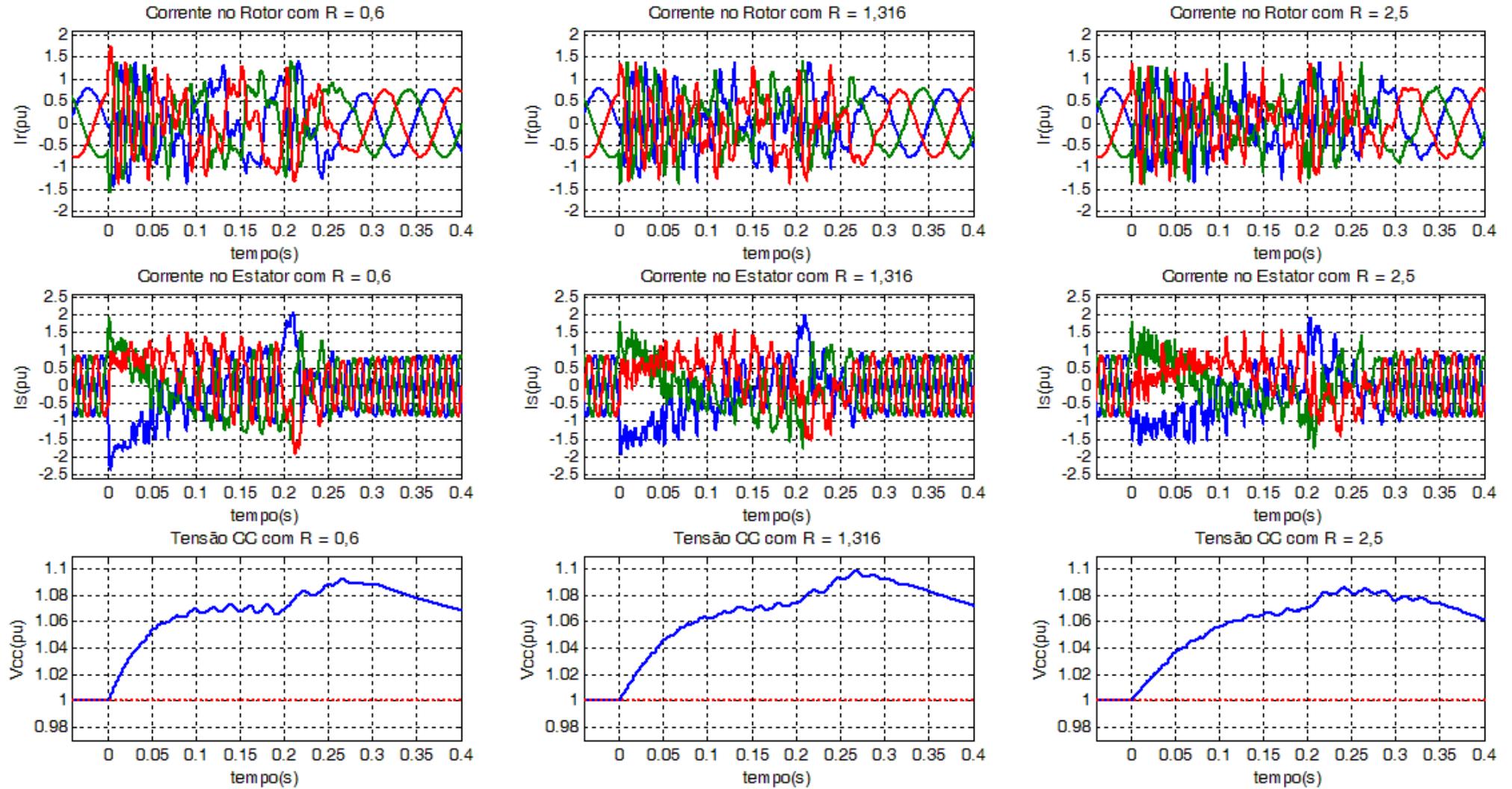
Para o afundamento de tensão severo, foi avaliado o efeito da resistência inserida pelo dispositivo supercondutor. De acordo com o modelo adotado, no momento em que a corrente ultrapassa um valor crítico a resistência do dispositivo aumenta gradualmente até atingir um valor máximo. Quando a corrente diminui, a resistência decai até que o dispositivo retorne ao estado supercondutor. Esse comportamento é mostrado na Figura 44, onde são apresentados a resistência do supercondutor e a corrente que circula por ele no elo-CC.

Figura 44 - Comportamento da Resistência e da Corrente no LCS



Com o intuito de verificar o efeito da resistência inserida pelo dispositivo supercondutor no desempenho do sistema durante o afundamento de tensão foram realizadas simulações com outros valores de resistência. Os resultados adquiridos ao se realizar esses ensaios são apresentados na Figura 45.

Nota-se que a variação do valor da resistência não possui efeito significativo nas correntes no estator da máquina. Ao se diminuir o valor da resistência não é possível obter a mesma limitação de corrente no rotor e percebe-se que ao aumentar o valor da resistência não se têm nenhum ganho significativo a partir de certo limite. Vale ressaltar que o valor da resistência está estritamente ligado às dimensões do dispositivo supercondutor e do sistema criogênico, portanto, o aumento da resistência implica em maiores custos para o dispositivo supercondutor e para sua operação.

Figura 45 - Efeito da Resistência do LCS (em  $\Omega$ ) nas variáveis de interesse

## 4.4. Validação

Para validar a proposta, foram realizados os demais testes de afundamentos trifásicos equilibrados presentes na normativa IEC 61400-21 (2001). Todos os testes foram realizados com o gerador operando a uma velocidade de 1,25 pu para tipificar o pior caso.

### 4.4.1. Teste VD1

O teste VD1 consiste em aplicar um afundamento de tensão trifásico equilibrado de profundidade igual a 0,1, por um período de 0,5s. Esse é um afundamento brando, seus efeitos podem ser visualizados na Figura 46:

Figura 46 - Resultados do Teste VD1

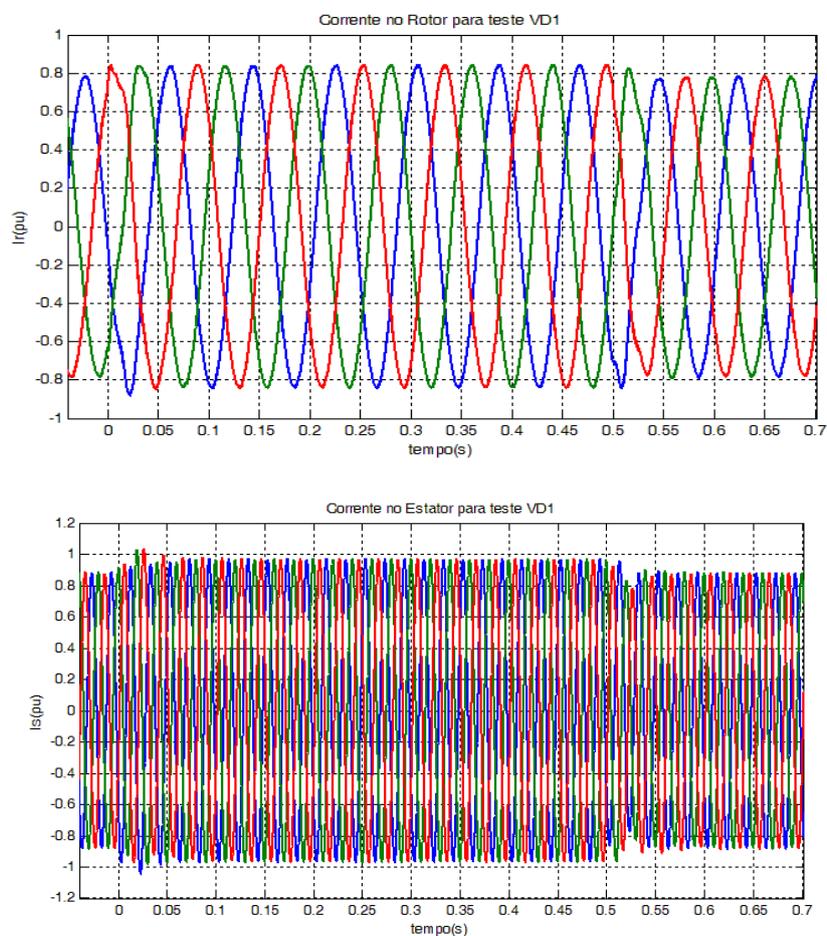
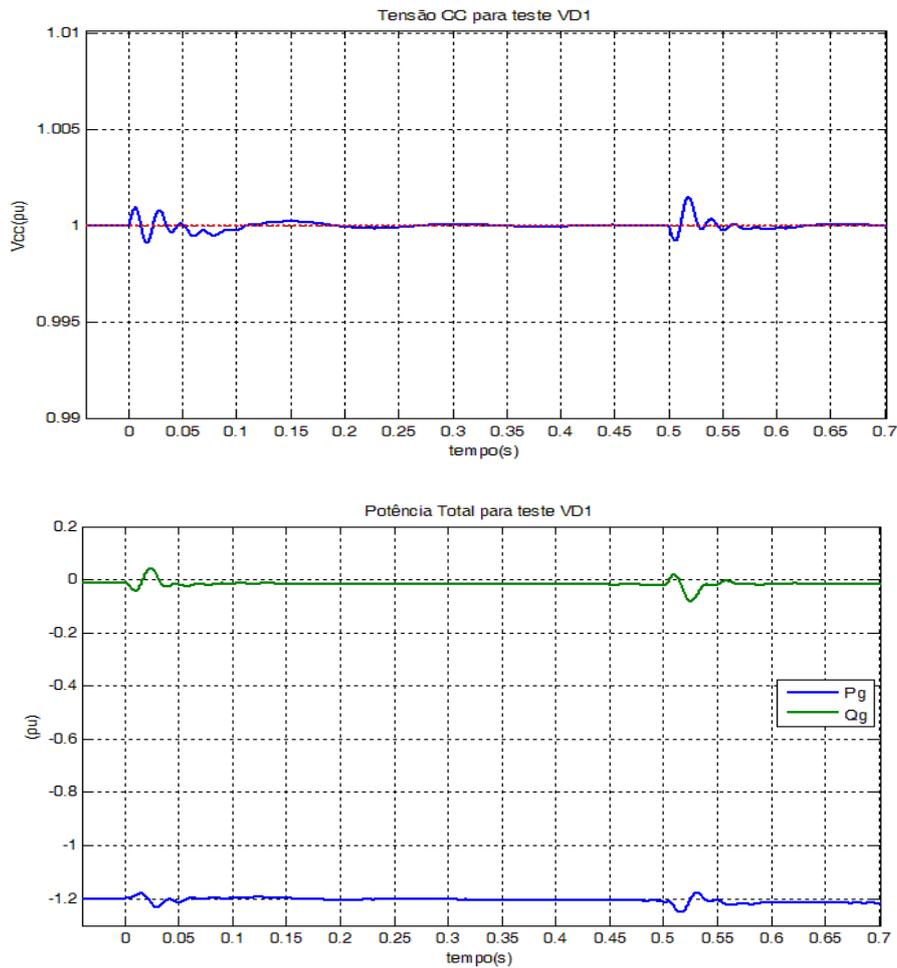


Figura 46 - Resultados do Teste VD1 (Continuação)



Para esse teste, o próprio sistema de controle é capaz de atuar e manter as correntes em níveis aceitáveis para a operação do conversor. Portanto, não há atuação do dispositivo supercondutor. Esse comportamento é satisfatório, pois segundo a normativa da ONS (ONS - SUBMÓDULO 2.8, 2009) afundamentos de tensão dessa profundidade devem ser suportados durante um período de tempo indeterminado, ou seja, o gerador deve lidar com essa operação em regime contínuo.

Observa-se para esse caso que não há alteração na tensão do elo-CC tampouco nos fluxos de potência ativa e reativa. As correntes também não apresentaram sobressinal que possa causar dano ao sistema.

#### 4.4.2. Teste VD2

O teste VD2 é aplicado ao sistema e os resultados são mostrados na Figura 47. Esse teste é um afundamento trifásico simétrico de duração 0,5s e profundidade igual a 0,5.

Figura 47 - Resultados do Teste VD2

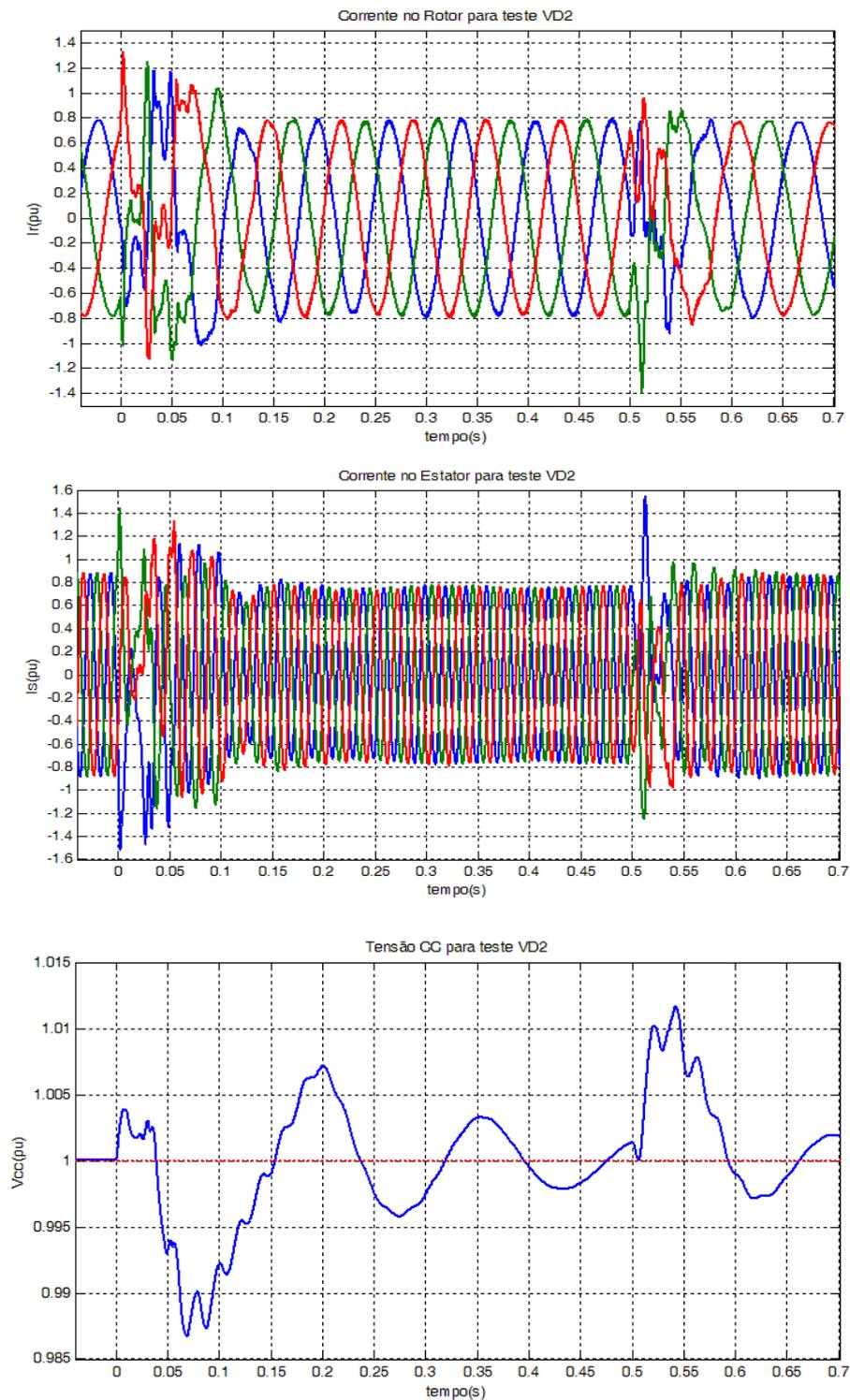
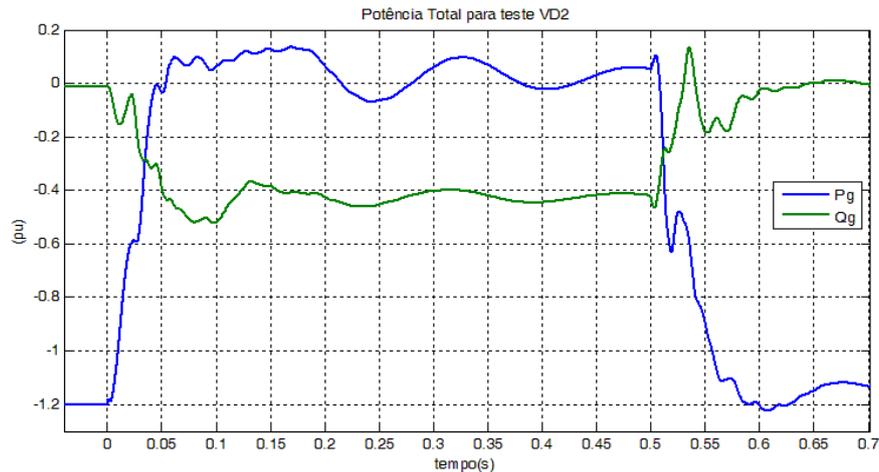


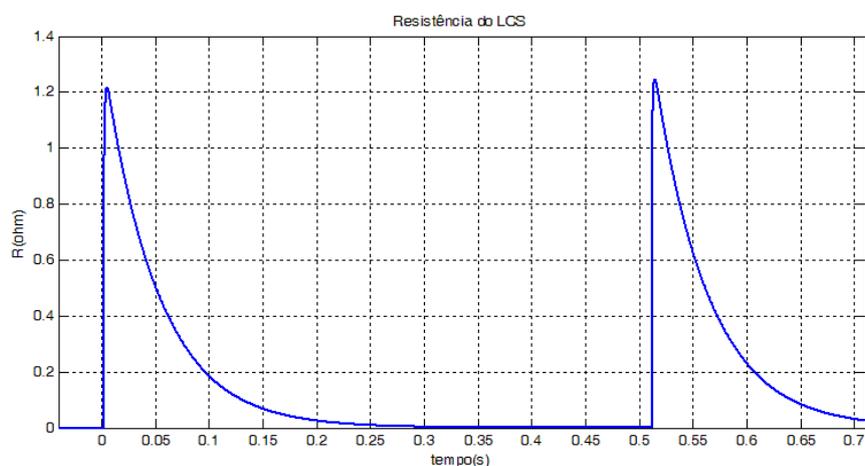
Figura 47 - Resultados do Teste VD2 (Continuação)



Pode ser visto, para esse caso, que o dispositivo supercondutor atua limitando a corrente em níveis totalmente seguros para o conversor do rotor. Nota-se também que a corrente no estator permanece limitada e se recupera rapidamente após os transitórios. A tensão CC possui variação mínima para esse tipo de distúrbio. Isso faz com que rapidamente a potência ativa fornecida seja ajustada em zero e o gerador consiga fornecer potência reativa contribuindo com a recuperação da rede durante o afundamento.

O comportamento da resistência do LCS pode ser visto na Figura 48. O dispositivo supercondutor transita em apenas dois momentos, no início e no fim do afundamento, inserindo a resistência no circuito.

Figura 48 - Resistência do LCS no Teste VD2



Portanto, foram apresentados os resultados obtidos para a simulação do DFIG com as configurações propostas, bem como um comparativo com outras tecnologias utilizadas na proteção do gerador. O efeito da resistência do dispositivo supercondutor na resposta do sistema ao afundamento de tensão foi analisado. E, por fim, pode-se concluir que o desempenho obtido pelas configurações propostas foi satisfatório e os testes de validação comprovaram a sua efetividade.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Nesse capítulo apresenta-se uma análise geral do desempenho da proposta, e comentários finais sobre os resultados obtidos. Além disso, são feitas algumas sugestões de trabalhos futuros, para continuidade da pesquisa sobre o tema.

### **5.1. Contribuições**

A principal contribuição desse trabalho é a verificação da aplicabilidade do LCS resistivo para aumento da suportabilidade a afundamentos de tensão no DFIG com sua utilização no circuito CC do conversor eletrônico.

Contribui-se, do ponto de vista das pesquisas com aerogeradores baseados em DFIG, com mais uma alternativa de solução para o seu maior gargalo, a saber, a suportabilidade a distúrbios na rede. Por outro lado, do ponto de vista das pesquisas com supercondutores, contribui-se apresentando mais um nicho de aplicação dessa tecnologia.

### **5.2. Conclusões**

A tecnologia de limitadores de corrente supercondutores é recente e sua aplicação na proteção do DFIG é extremamente nova. Os estudos por meio de simulação computacional colaboram para o desenvolvimento de soluções e verificação de sua efetividade. Nesse sentido, os resultados apresentados aqui e as propostas desenvolvidas demonstram o potencial que a utilização desses dispositivos tem para serem utilizados nessa aplicação.

Demonstrou-se que esse pode ser mais um campo de aplicação para a tecnologia de supercondutores. Essa tecnologia é recente e, portanto, ainda apresenta custos elevados para implantação. Além disso, a necessidade de um sistema criogênico para se manter o material no estado supercondutor ainda dificulta sua maior disseminação.

Comprovou-se que o objetivo principal - a limitação de corrente no circuito de rotor; foi alcançado com a implementação da solução proposta. A utilização de limitadores de corrente supercondutores prova ser, do ponto de vista técnico, competitiva com as soluções já utilizadas em aerogeradores.

Foi estudado o comportamento de um gerador eólico baseado em DFIG quando sujeito a afundamentos de tensão, dando ênfase, sobretudo, aos afundamentos severos. As alternativas propostas apresentaram desempenho satisfatório nesse tipo de afundamento e demonstraram, também, sua efetividade em afundamentos mais brandos, assegurando que essas soluções são válidas para serem usadas como dispositivo de proteção no DFIG.

Duas alternativas com limitador de corrente supercondutor resistivo foram analisadas, ambas no elo-CC do conversor *back-to-back*. Uma delas contempla o limitador entre o inversor rotórico e o capacitor, e a outra com o limitador em série com o capacitor do elo-CC.

Quanto aos resultados obtidos, comprova-se que as configurações apresentadas apresentam atuação superior à do *crowbar* e equivalente à atuação do LCS no ponto de conexão com a rede. Esses resultados foram sumarizados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Resumo Comparativo dos Resultados Obtidos

	<b><i>Crowbar</i></b>	<b>LCS na Rede</b>	<b>Configuração 1</b>	<b>Configuração 2</b>
Corrente no RSC	1,61pu	1,37pu	1,39pu	1,46pu
Corrente no Estator	3,397pu	2,055pu	2,013pu	2,035pu
Tensão do Elo-CC	1,06pu	1,052pu	1,098pu	1,071pu

Na comparação com o *crowbar*, nota-se que enquanto as correntes no rotor com esse dispositivo atingem 1,61 pu, com as configurações propostas essas correntes não excedem 1,39 pu e 1,46 pu. No que se refere às correntes de estator há uma disparidade ainda maior. Devido ao tempo de retardo no acionamento do *crowbar*, essas correntes chegam a valores de até 3,4 pu, enquanto a implementação apresentada limita essas correntes a valores próximos a 2,0 pu apenas. A tensão do elo-CC apresenta ligeira vantagem para o dispositivo *crowbar*, entretanto, essa pequena vantagem é obtida à custa da perda de controle da máquina durante o seu funcionamento, uma vez que os pulsos do RSC são cessados durante a atuação do *crowbar*.

Quando se compara as novas configurações com o LCS na rede, observa-se que, a diferença é mínima nos valores atingidos pelas correntes de rotor, inferior a 2% se comparado com a Configuração 1. Nas correntes de estator, ambas as configurações sobrepujam os resultados obtidos pelo LCS implementado na rede, também por uma diferença desprezível. A tensão CC, por sua vez, apresenta resultados um pouco melhores com o LCS na rede, contudo, os valores atingidos por essa tensão com as configurações propostas não chegam a ser danosos aos componentes do conversor. Por outro lado, quando se leva em conta que o LCS na rede necessita de três dispositivos limitadores enquanto as configurações propostas necessitam apenas de um, a inserção do LCS no circuito CC se justifica. Além disso, o LCS na rede necessita de conexões em média tensão, enquanto o LCS CC se conecta em tensões inferiores, necessitando de isolamentos mais simples. Têm-se ainda que a resistência inserida para se obter essa limitação é inferior no elo CC ( $1,316\Omega$  e  $1,974\Omega$ , para as configurações 1 e 2, respectivamente) do que na rede ( $5,0\Omega$ ), o que está diretamente ligado ao comprimento do imitador a ser utilizado.

### **5.3. Propostas de Trabalhos Futuros**

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foram notados vários pontos que poderiam ser explorados para verificação de algumas considerações e para avanço na pesquisa do assunto. Entretanto, o conteúdo desses pontos extrapola o escopo desse trabalho e por isso eles são apresentados aqui.

#### **5.3.1. Variação da Corrente Crítica**

No desenvolvimento da proposta avaliou-se que a variação da resistência inserida pelo dispositivo supercondutor afeta o desempenho na limitação de corrente. Acredita-se que a variação do outro principal parâmetro do LCS, a corrente crítica, produza efeitos semelhantes que podem ser explorados, ou seja, um projeto de limitador com corrente crítica mais elevada faria com que o dispositivo fosse acionado por um tempo menor, o que afetaria diretamente o seu desempenho. Sugere-se um estudo que combine a escolha da resistência e da corrente crítica com vistas à obtenção de um ponto ótimo de operação para o dispositivo.

### **5.3.2. Verificação do Modelo do Supercondutor**

Observou-se na literatura que, em geral, utiliza-se o LCS para operar com correntes que oscilam na frequência da rede elétrica. Entretanto, nesse trabalho, as oscilações de corrente se deram em uma frequência muito mais elevada e fez-se a consideração de que o comportamento do supercondutor seria o mesmo para essa operação. Propõe-se verificar se essa modelagem é válida para essa situação, por meio de experimentos reais com o dispositivo supercondutor.

Deve ser verificado, ainda, o efeito que essas correntes em alta frequência causam sobre o dispositivo supercondutor e sobre suas propriedades.

O tempo de recuperação dos modelos utilizados considera o supercondutor sem carga, entretanto, para a recuperação com carga, como é o caso da aplicação no DFIG, esse modelo deverá ser revisado.

### **5.3.3. Comparar o desempenho do LCS resistivo e indutivo**

Nesse trabalho foi explorado apenas o uso do LCS do tipo resistivo, entretanto, devido à propriedade dos supercondutores como diamagnéticos perfeitos, sua utilização em bobinas supercondutoras tem apresentado resultados interessantes em outros campos de aplicação. Podem ser feitos estudos, comparando-se essas duas implementações de dispositivos supercondutores.

### **5.3.4. Utilização de outras técnicas de controle dos conversores**

Explorou-se, nesse trabalho, apenas uma técnica de controle, entre várias existentes na literatura, para operação do DFIG. Pode ser verificado o desempenho do DFIG utilizando outras estratégias em conjunto com o dispositivo supercondutor.

### **5.3.5. Desenvolvimento de protótipos**

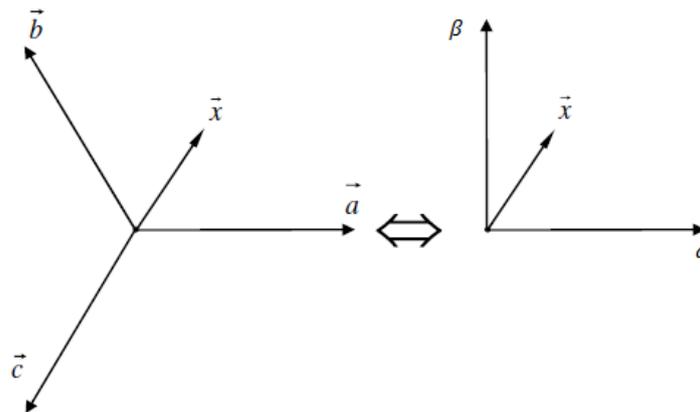
Para maior comprovação dos resultados obtidos por meio de simulação, pode-se realizar a construção de protótipos em *hardware* para emulação do sistema eólico, em menor escala, utilizando o limitador de corrente supercondutor. Dessa forma, seria possível verificar na prática o desempenho desse dispositivo.

## APÊNDICE A - REPRESENTAÇÃO VETORIAL

### 1. Transformada de Clarke

A transformada de Clarke converte um sistema em coordenadas trifásicas (ABC) para bifásicas ( $\alpha\beta$ ) ambos com os eixos em posição estacionária em relação a um ponto fixo. Enquanto os eixos A, B e C estão separados por um defasamento espacial de  $120^\circ$ , os eixos  $\alpha$  e  $\beta$  distam  $90^\circ$  entre si, conforme Figura A.1.

Figura A.1 - Transformação de Coordenadas



Essa transformação se aplica a todas as grandezas, a saber: tensão, corrente e fluxo. A mudança do sistema abc para o sistema  $\alpha\beta$  se dá utilizando a matriz de transformação direta de Clarke, equação A.1, para um sistema trifásico equilibrado (sequência zero nula)

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

A operação reversa, do sistema  $\alpha\beta$  para o sistema abc é realizada pela transformação inversa de Clarke, equação A.2.

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

## 2. Transformada de Park

A transformada de Park refere as variáveis de um sistema com referencial estacionário ( $\alpha\beta$ ) para um sistema rotacional (dq). As matrizes de transformação que realizam essa operação e a operação reversa são mostradas nas equações (A.3) e (A.4)

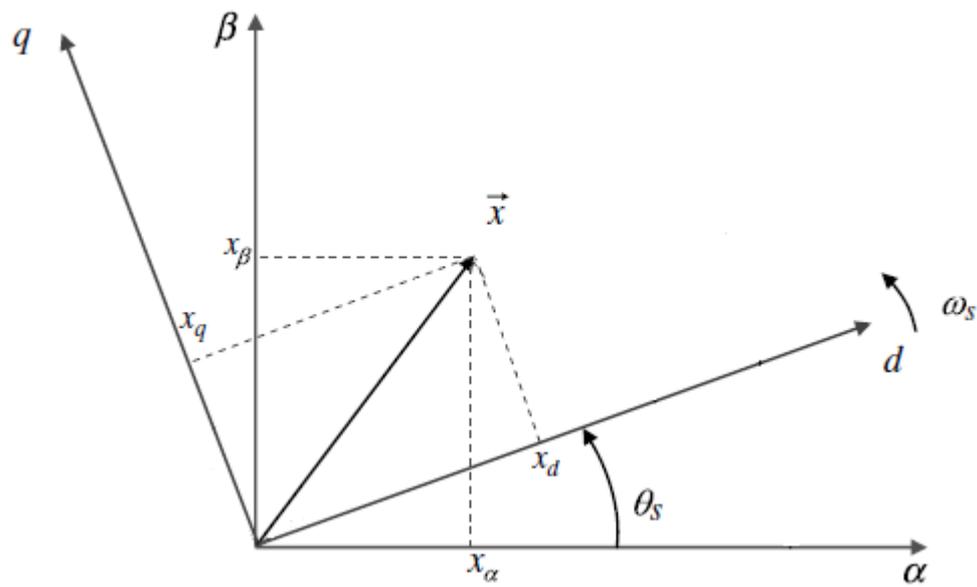
$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

O ângulo  $\theta$  representa a posição angular dos eixos de referência girantes. Pode-se assumir a variação desse ângulo em diferentes velocidades, o que distingue os referenciais em uma máquina elétrica como:

- Referencial do Estator ( $\alpha\beta$ ). Nesse caso, assume-se a velocidade de giro dos eixos de referência igual a zero (eixo estacionário). Utiliza-se a notação  $x^s$  para representar as variáveis nesse referencial.
- Referencial do Rotor. Assume-se aqui o referencial girando com o rotor da máquina ( $\omega_m$ ). A notação  $x^r$  é usada para denotar essa referência.
- Referencial Síncrono (dq). Os eixos de referência se movem na frequência síncrona, ou seja, na frequência da rede elétrica ( $\omega_s$ ). Nesse caso a notação utilizada é:  $x^a$ . O diagrama fasorial dessa transformação é mostrado na Figura A.2.

Figura A.2 - Transformação para Eixos Rotacionais



A representação no referencial síncrono é a mais aplicável para utilização em sistemas de controle, uma vez que nesse sistema as grandezas aparecem como valores contínuos – a despeito das outras referências em que as variáveis são senóides.

## APÊNDICE B - PARÂMETROS DO DFIG UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

### 1. Máquina Elétrica

A Tabela 3 apresenta os dados relativos ao Gerador de Indução Duplamente Alimentado – DFIG.

Tabela B.1 - Parâmetros do DFIG

Potência Nominal	2,6MW
Tensão de Linha do Estator	690V
Corrente Nominal do Estator	1760A
Torque Nominal	12732Nm
Velocidade/Frequência Nominal	1500rpm/50Hz
Relação Estator/Rotor	1/3
Conexão Estator/Rotor	Y/Y
Pares de Polos	2
Indutância de Magnetização	2,5mH
Indutância de Dispersão do Estator	0,783mH
Indutância de Dispersão do Rotor	0,087mH
Resistência do Estator	2,64mΩ
Resistência do Rotor	26,1mΩ

### 2. Conversor Eletrônico

A Tabela apresenta os dados relativos ao conversor *back-to-back* utilizado para alimentação do rotor da máquina.

Tabela B.2 - Parâmetros do Conversor *Back-to-Back*

Potência Nominal	800kW
Tensão do Elo-CC	1,2kV
Capacitância do Elo CC	700mF

### 3. Limitador de Corrente Supercondutor

A Tabela apresenta os dados relativos ao Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo utilizado nas duas configurações.

Tabela B.3 – Parâmetros do LCS

	Configuração 1	Configuração 2
Corrente Crítica	1,3kA	1,3kA
Resistência Final	1,316Ω	1,974Ω
Tempo de Transição $\tau_1$	1ms	1ms
Tempo de Transição $\tau_2$	50ms	50ms

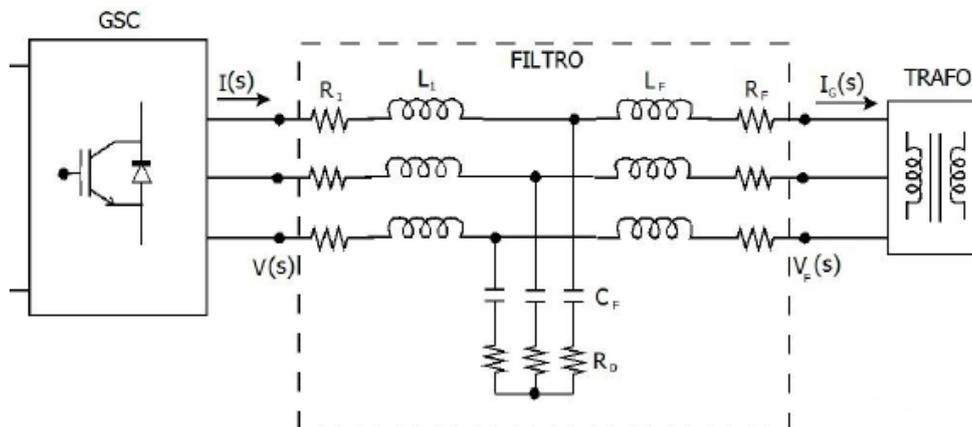
#### 4. Filtro Passivo

A Tabela apresenta os dados relativos ao Filtro LCL utilizado para conexão do GSC com o sistema, conforme Figura B.1.

Tabela B.4 - Parâmetros do Filtro LCL

Resistência $R_1$	5mΩ
Indutância $L_1$	700μH
Resistência $R_F$	5mΩ
Indutância $L_F$	144μH
Resistência $R_0$	15,87Ω
Capacitância $C_F$	200μF

Figura B.1 - Filtro LCL



#### 5. Ponto de Conexão

A rede elétrica é considerada um barramento infinito conectado ao transformador por meio de uma impedância. A conexão com o gerador é feita por meio de um transformador ideal de três enrolamentos. Os parâmetros desse sistema são mostrados na Tabela B.5.

Tabela B.5 - Parâmetros do Ponto de Conexão

<b>Rede Elétrica</b>	
Tensão Nominal	13,8kV
Frequência	50Hz
Impedância da Rede	0,16pu
<b>Transformador</b>	
Tensão Primário	13,8kV
Tensão Secundário - Estator	690V
Tensão Secundário - Conversor	400V

## 6. LCS Conectado à Rede

Nos testes realizados com o dispositivo supercondutor no ponto de conexão entre a rede e o DFIG, foram utilizados os parâmetros:

Tabela B.6 – Parâmetros do LCS na Rede

Corrente Crítica	150A
Resistência Final	5,0 $\Omega$

## 7. Crowbar

Para os testes utilizando o *crowbar*, foi utilizado um dispositivo com as características:

Tabela B.7 – Parâmetros do Crowbar

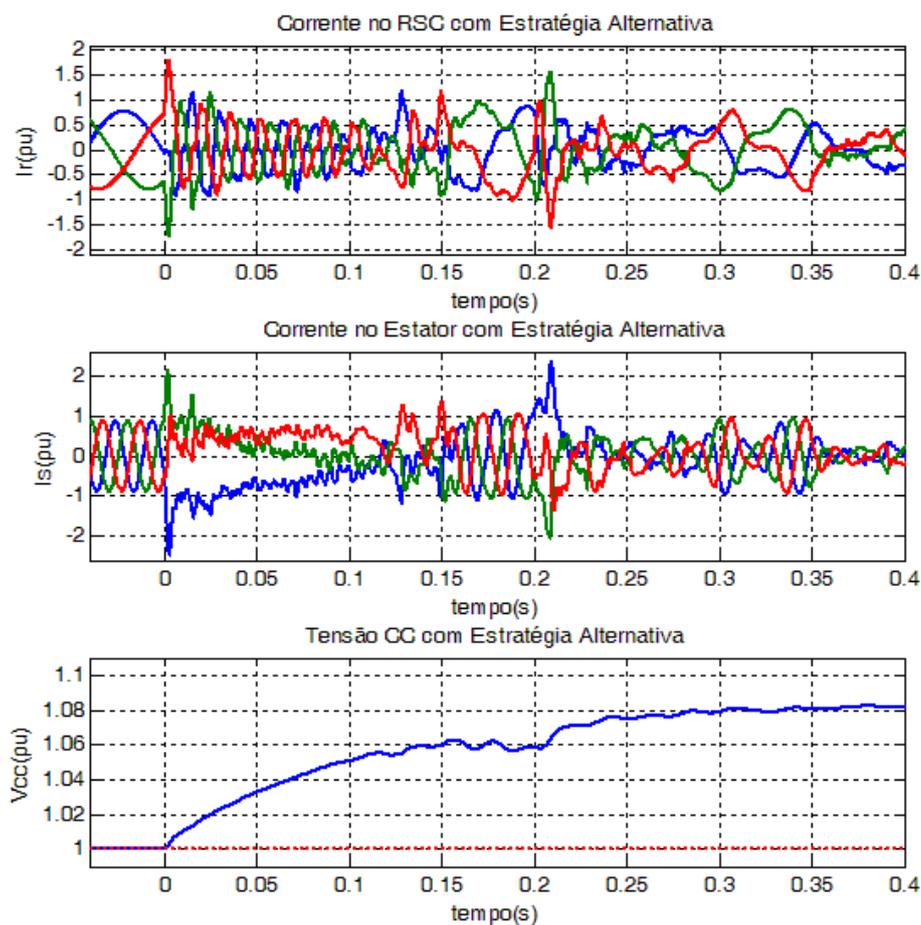
Corrente para Acionamento	1,2kA
Resistência CC	1,25 $\Omega$

## APÊNDICE C - ESTRATÉGIAS ALTERNATIVAS NA IMPLEMENTAÇÃO DO LCS

### 1. Controle do GSC na Configuração 2

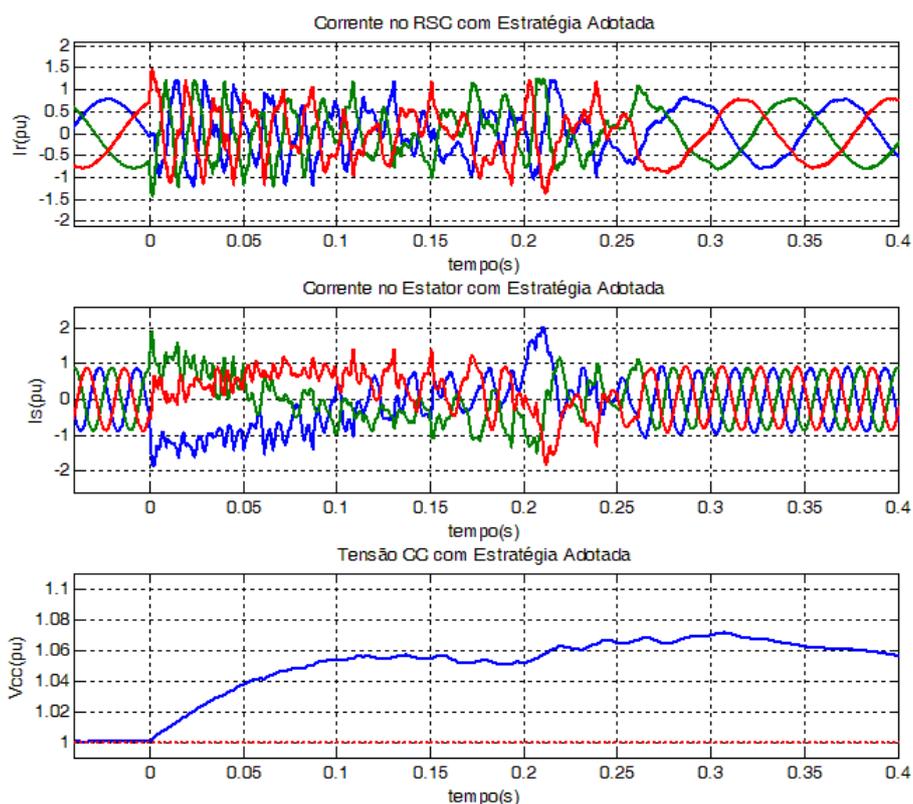
Na abordagem adotada no texto do trabalho, adotou-se para o controle do GSC uma estratégia de controle cujo objetivo era manter a tensão do capacitor do elo-CC regulada em seu valor de referência. Apresentam-se aqui, os resultados de uma estratégia alternativa na qual o sistema de controle do GSC objetiva regular a tensão total do elo-CC (Capacitor + LCS). A Figura C.1 mostra os resultados obtidos.

Figura C.1 – Resultados para Estratégia Alternativa de Controle na Configuração 2



Para fins de comparação, repetem-se aqui as curvas obtidas para a configuração adotada no texto do trabalho, Figura C.2.

Figura C.2 – Resultados para Estratégia de Controle Adotada na Configuração 2



Nota-se que o desempenho da estratégia alternativa fica aquém do obtido pela outra estratégia. A corrente de rotor atinge valores mais elevados, da mesma forma a corrente de estator. Além do mais, a tensão CC demanda um tempo muito mais elevado para se reestabelecer no valor de referência. Os resultados levaram ao descarte desta solução.

## 2. Detecção de Falta

Nos resultados comparativos apresentados no trabalho para as duas estratégias foi adotado um sistema de detecção de faltas que monitora apenas a corrente no rotor. Com esse sistema, devido ao fato da corrente de falta ser altamente ruidosa, as referências de potência oscilam durante o período da falta.

Aqui são apresentados os resultados obtidos para as duas configurações com outro método de detecção de falta. Nessa nova abordagem a partir do momento em que uma sobrecorrente é percebida o sistema passa a monitorar a tensão da rede. Enquanto essa tensão permanece afundada, mantêm-se as referências de potência ativa nula e potência reativa máxima. Os resultados obtidos para as duas

configurações são apresentados na Figura C.3 comparando-os com a estratégia adotada neste trabalho.

Figura C.3 – Comparativo entre as Configurações com Estratégia Alternativa de Controle

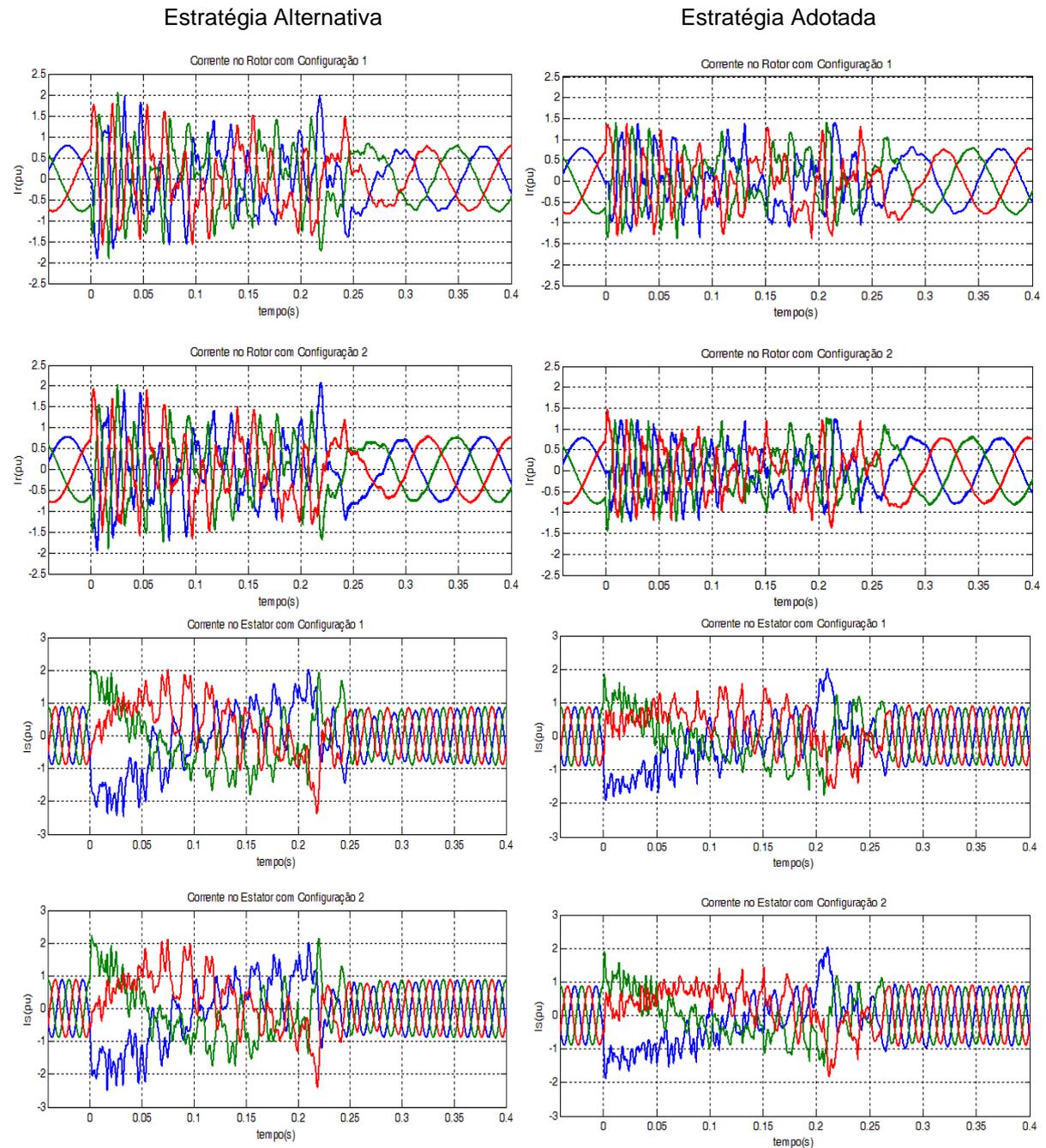
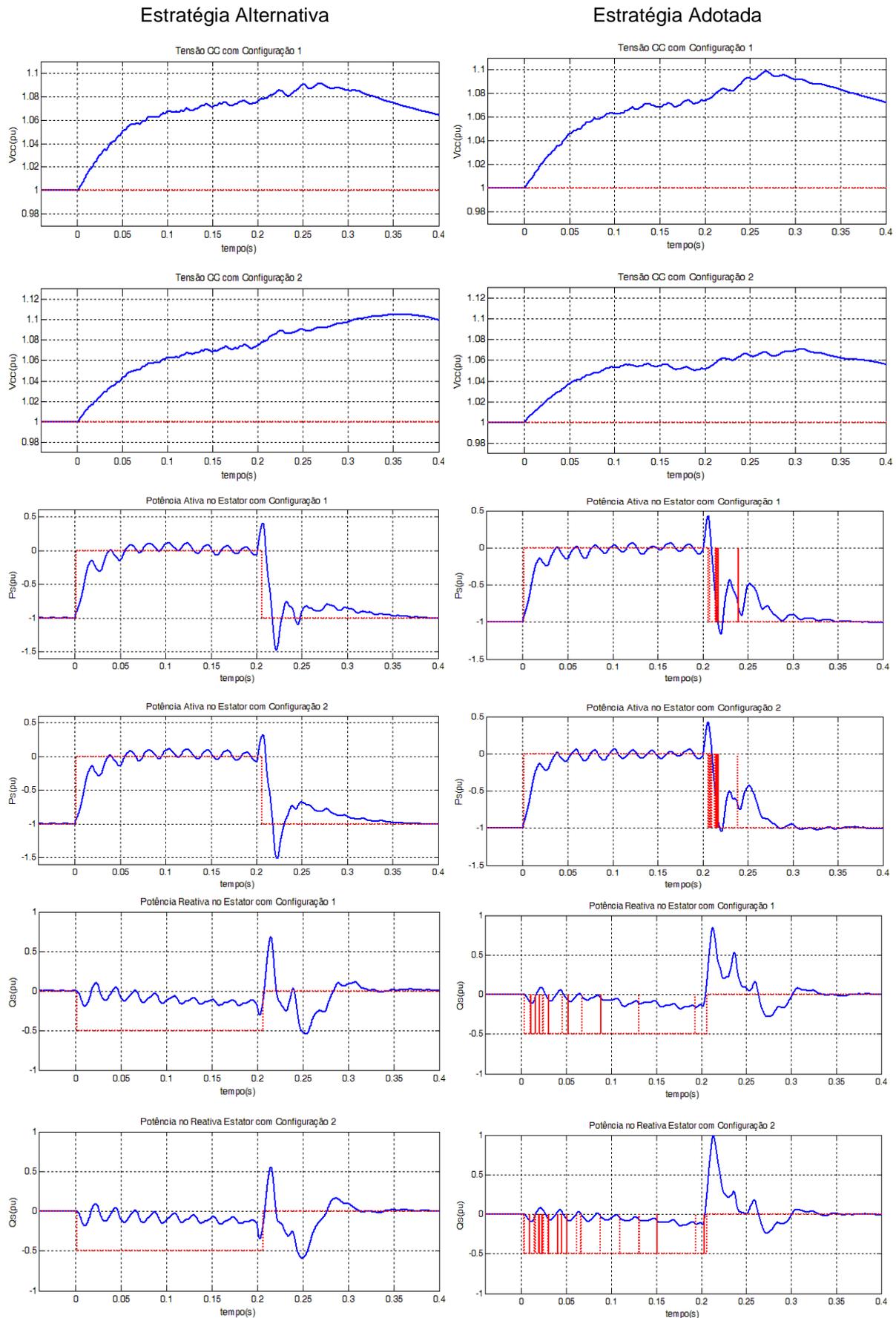


Figura C.3 – Comparativo entre as Configurações com Estratégia Alternativa de Controle (Continuação)



Percebe-se que, em ambos os casos, o desempenho dessa estratégia alternativa foi inferior ao obtido com a estratégia de monitoramento da corrente apenas. As correntes de rotor obtidas apresentam valores muito mais elevados, e não há vantagem significativa nas outras grandezas que justifique sua utilização.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ABAD, G. et al. **Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

ALARAIFI, S. . M. A. . M. E. . S. M. . & K. V. Voltage booster schemes for fault ride-through enhancement of variable speed wind turbines. **Sustainable Energy, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 4, p. 1071-1081, Outubro 2013. ISSN 1949-3029.

ALARAIFI, S. et al. Voltage booster schemes for fault ride-through enhancement of variable speed wind turbines. **Sustainable Energy, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 4, p. 1071-1081, 2013.

ANAYA-LARA, O. et al. **Optimal DFIG crowbar resistor design under different controllers during grid faults**. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on. [S.I.]: IEEE. 2008. p. 2580-2585.

ANAYA-LARA, O. et al. **Wind Energy Generation Modelling and Control**. Olimpo: John Wiley & Sons, 2009.

ANEEL. Atlas de Energia Eólica. **Site da Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2000. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_eolica/6\\_4.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_4.htm)>. Acesso em: 26 Agosto 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. ABEEólica: Nosso Setor. **Site da Associação Brasileira de Energia Eólica**, 2015. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>>. Acesso em: 24 Julho 2015.

BARDEEN, J.; COOPER, L. N.; SCHRIEFFER, J. R. Theory of superconductivity. **Physical Review**, v. 108, n. 5, p. 1175-1204, 1957.

BLAABJERG, F. . C. Z. . T. R. . I. F. **Power electronics in wind turbine systems**. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. [S.I.]: [s.n.]. 2006. p. 1-11.

CHEN, L. et al. Fault Ride-Through Capability Enhancement of DFIG-Based Wind Turbine With a Flux-Coupling-Type SFCL Employed at Different Locations. **Applied Superconductivity, IEEE Transactions on**, v. 25, n. 3, p. 1-5, 2015.

ELSHIEKH, M. E.; MANSOUR, D. A.; AZMY, A. M. Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter. **Applied Superconductivity, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 3, p. 5601204-5601204, 2013.

ERLICH, I.; WREDE, H.; FELTES, C. **Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during Grid Faults**. Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07. Nagoya: IEEE. 2007. p. 1195 - 1200.

EZZAT, M. et al. **Low-voltage ride-through techniques for DFIG-based wind turbines**: state-of-the-art review and future trends. Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE. Vienna: IEEE. 2013. p. 7681 - 7686.

GINZBURG, V. L. . L. L. On the Theory of Superconductivity. **Zh. Eksp. Teor. Fiz, USSR**, v. 20, p. 1064-1082, 1950.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report**. Global Wind Energy Council. Bruxelles. 2014.

HEIER, S. **Grid integration of wind energy conversion systems**. 1<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 1998.

HOLTZ, J. Pulsewidth modulation-a survey. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 39, n. 5, p. 410-420, 1992.

IEC 61400-21. **Wind turbine generator system – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines**. International Electrotechnical Commission. [S.I.]. 2001.

IEEE 519. **Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems**. Institute of Electrical and Electronics Engineers. [S.I.], p. Nova Iorque. 2012.

KARAIPOOM, T.; NGAMROO, I. Optimal superconducting coil integrated into DFIG wind turbine for fault ride through capability enhancement and output power fluctuation suppression. **Sustainable Energy, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 1, p. 28-42, 2015.

KOVÁCS, P. K. **Transient Phenomena in Electrical Machines**. [S.l.]: Elsevier Science Publishing Co., 1984.

LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; HANSEN, S. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, v. 41, n. 5, p. 1281-1291, 2005.

LONDON, F. . L. H. The electromagnetic equations of the superconductor. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 149, p. 71-88, 1935.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA**. 2ª. ed. Florianópolis: [s.n.], 2008.

MATOS, F. F. **Uma Discussão sobre Suportabilidade Frente a Afundamentos de Tensão de Sistemas Eólicos com Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

MEEGAHAPOLA, L. G.; LITTLER, T.; FLYNN, D. Decoupled-DFIG fault ride-through strategy for enhanced stability performance during grid faults. **Sustainable Energy, IEEE Transactions on**, v. 1, n. 3, p. 152-162, Outubro 2010. ISSN 1949-3029.

MENDES, V. F. **Avaliação do Comportamento de um Sistema de Conversão de Energia Eólica Utilizando Gerador de Indução Duplamente Excitado Durante Afundamentos de Tensão Equilibrados e Desequilibrados**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

MENDES, V. F. **Ride-Through Fault Capability Improvement Through Novel Control Strategies Applied for Doubly-Fed Induction Wind Generators**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

MORREN, J.; DE HAAN, S. W. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. **Energy conversion, iee transactions on**, v. 20, n. 2, p. 435-441, 2005.

NGAMROO, I.; KARAIPOOM, T. Cooperative control of SFCL and SMES for enhancing fault ride through capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind farm. **Applied Superconductivity, IEEE Transactions on**, v. 24, n. 5, p. 1-4, Julho 2014. ISSN 1051-8223.

NGAMROO, I.; KARAIPOOM, T. Cooperative control of SFCL and SMES for enhancing fault ride through capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind farm. **Applied Superconductivity, IEEE Transactions on**, v. 24, n. 5, p. 1-4, 2014.

NOE, M.; STEURER, M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. **Superconductor Science and Technology**, v. 20, n. 3, p. R15, Março 2007.

OLIVEIRA, F. D. C. **Limitador de Corrente de Falta Supercondutor**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. VITÓRIA. 2005.

OLIVEIRA, F. D. et al. **Efeito de um Limitador Supercondutor no Desempenho de um DFIG Durante Afundamento de Tensão**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Foz do Iguaçu: [s.n.]. 2014.

OLIVEIRA, F. D. et al. **Efeito de um Limitador Supercondutor no Desempenho de um DFIG Durante Afundamento de Tensão**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Foz do Iguaçu: [s.n.]. 2014a.

OLIVEIRA, F. D. et al. **Metodologia e Desempenho de um Projeto de um Limitador de Corrente Supercondutor para um DFIG**. XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte, MG: [s.n.]. 2014b.

ONNES, H. K. **Investigations into the Properties of Substances at Low Temperatures, which Have Led, amongst Other Things, to the Preparation of Liquid Helium**. Nobel Prize. [S.I.]. 1913.

ONS - SUBMÓDULO 2.8. **Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de Seus Componentes.** Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.I.]. 2009.

ONS - SUBMÓDULO 3.6. **Requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica.** Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.I.]. 2009.

PATEL, M. R. **Wind and solar power systems: design, analysis, and operation.** 2ª. ed. Boca Raton: CRC press, 2005.

PENA, R.; CLARE, J. C.; ASHER, G. M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, v. 143, n. 3, p. 231-241, Maio 1996.

PENG, L.; FRANCOIS, B.; LI, Y. **Improved crowbar control strategy of DFIG based wind turbines for grid fault ride-through.** Applied Power Electronics Conference and Exposition. [S.I.]: IEEE. 2009. p. 1932-1938.

PEREIRA, M. M. **Um estudo do Aerogerador de Velocidade variável e sua aplicação para fornecimento de potência elétrica constante.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2004.

PETERSSON, A. **Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines.** [S.I.]: Chalmers University of Technology, 2005.

RAHIMI, M.; PARNIANI, M. Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators. **Electric Power Systems Research**, v. 80, n. 2, p. 184-195, Fevereiro 2010.

RAMOS, M. C. D. L. **Análise do Comportamento de Aerogeradores Frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão.** Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

SILVA, F. B. B. D. **LIMITADOR DE CORRENTE DE PARTIDA DE MIT UTILIZANDO SUPERCONDUTOR HTS RESISTIVO.** UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. VITÓRIA. 2014.

SLOOTWEG, J. G. **Wind power: Modelling and impact on power system dynamics.** [S.l.]: Delft University of Technology, 2003.

SOURKOUNIS, C.; TOUROU, P. **Grid Code Requirements for Wind Power Integration in Europe.** Conference Papers in Energy. [S.l.]: Hindawi Publishing Corporation. 2013.

TAGARE, D. M. **Electric Power Generation - The Changing Dimensions.** Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **GRID CONVERTERS FOR PHOTOVOLTAIC AND WIND POWER SYSTEMS.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-05751-3.

WIND ENERGY FOUNDATION. What is Wind Energy? **Site da Wind Energy Foundation**, 2015. Disponível em: <<http://windenergyfoundation.org/what-is-wind-energy/>>. Acesso em: 24 Julho 2015.

WOO-JAE PARK, B. C. S. J.-W. P. The Effect of SFCL on Electric Power Grid With Wind-Turbine Generation System. **IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY**, v. 20, n. 3, p. 1177-1181, 2010.

ZHANG, W.; PENG, Z.; YIKANG, H. **Analysis of the by-pass resistance of an active crowbar for doubly-fed induction generator based wind turbines under grid faults.** Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on. IEEE., Wuhan: [s.n.]. 2008. p. 2316-2321.