

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

João Luiz Bergamo Zamperin

**MELHORIA NAS FORÇAS RESTAURATIVAS DO EQUILÍBRIO
DO GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO
POR MEIO DE CONTROLE DA TENSÃO INTERNA**

Ilha Solteira – SP

Fevereiro/2015

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Melhoria nas Forças Restaurativas do Equilíbrio do Gerador de Indução Duplamente Alimentado por meio de Controle da Tensão Interna”

JOÃO LUIZ BERGAMO ZAMPERIN

Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
Fevereiro/2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Z26m Zamperin, João Luiz Bergamo.
Melhoria nas forças restaurativas do equilíbrio do gerador de indução duplamente alimentado por meio de controle da tensão interna / João Luiz Bergamo Zamperin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
91 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: Laurence Duarte Colvara
Inclui bibliografia

1. Controle. 2. Estabilidade transitória. 3. Gerador de indução duplamente alimentado. 4. Método analítico. 5. Sistema de potência. 6. Tempo crítico.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO: Melhoria nas forças restaurativas do equilíbrio do gerador de indução duplamente alimentado por meio de controle da tensão interna

AUTOR: JOÃO LUIZ BERGAMO ZAMPERIN

ORIENTADOR: Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JEAN MARCOS DE SOUZA RIBEIRO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. IGOR KOPCAK
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação - Eeec / Universidade Federal de Goiás


Prof. Dr. WALMIR DE FREITAS FILHO
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 20 de fevereiro de 2015.

À minha querida família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por permitir vivenciar intensamente a cada instante desta minha vida, me proporcionando caminhos fascinantes. Minha enorme gratidão por me proteger, guiar e vivenciar a realização deste trabalho.

Ao meu Pai João V. Zamperin e a minha mãe Maria A. B. Zamperin (Cida) por todo cuidado, apoio, ensinamento, carinho e principalmente o amor, definidos como insubstituíveis. Caso exista uma outra vida a qual vivemos além desta, e se me for concedido a poder de escolha, escolherei ser seu filho novamente, sem palavras.

Ao Professor Laurence Duarte Colvara, que desde o ano de 2008 (tempo do mestrado) embarcou em uma incrível jornada, a qual é este trabalho. Percorremos longos caminhos, e eis aqui um porto alcançado pela sua valiosa orientação, obrigado aos inúmeros ensinamentos repassados ao longo destes anos.

Ao meu amor chamado, Rose, que pacientemente se põe a escutar as infinitas e longas histórias, sendo que em seu mais profundo mundo abstrato e encantado dos eólicos, é apenas observar e pacientemente escutar, obrigado pelo carinho e o amor.

Aos professores Dr. Dionízio Paschoareli Júnior, Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro e Dr. Walmir Freitas Filho pelas inúmeras sugestões para o aprimoramento deste trabalho ao Dr. Luiz Fernando Bovolato pelo apoio concedido no início do meu doutorado e ao Dr. Percival Bueno de Araujo pela amizade e inúmeras trocas de informações.

Aos meus amigos da UNESP, os quais eu sem dúvida jamais irei esquecer.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica (FEIS – UNESP) pelo suporte técnico e de infraestrutura para realização deste trabalho. A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (FEIS – UNESP) e do Câmpus central pelo suporte técnico e pela amizade.

Ao governo brasileiro e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por todo suporte financeiro.

*“Prefiro me arriscar fazendo algo que gosto perdidamente do que me sentir perdido por não
fazer o que amo”*

Rocky Balboa

(personagem criado por Sylvester Stallone)

RESUMO

Propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de um método analítico para o estudo da estabilidade dos geradores de indução duplamente alimentados (DFIG - Doubly Fed Induction Generator) com base no monitoramento da tensão interna E' , uma vez que a degradação da mesma resulta na perda da capacidade de transmissão de potência. Deste modo, faz-se a análise do desempenho transitório da máquina pela observação da grandeza em que efetivamente reside a causa da instabilidade. Uma vez detectada a possível causa da instabilidade do gerador, um controle é proposto sobre a grandeza em que se desenvolve a instabilidade do gerador. A filosofia de controle desenvolvida baseia-se no controle da magnitude da tensão interna, contribuindo decisiva e positivamente para o aumento da capacidade de transmissão e, conseqüentemente, das forças restaurativas de equilíbrio do DFIG, resultando em melhoria da estabilidade do sistema. A validação da aplicação do controle via metodologia da tensão E' é realizada por meio de simulações computacionais em diversas contingências e com a ação conjunta do circuito crowbar. Evidencia-se que este método pode ser empregado para avaliação da criticidade do sistema em tempo real.

Palavras chave: Controle. Estabilidade transitória. Gerador de indução duplamente alimentado. Método analítico. Sistema de potência. Tempo crítico.

ABSTRACT

This thesis proposes the development of an analytical method for stability analysis of the Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based on the monitoring of the internal voltage E' , since its degradation implies in decreasing of power transmission capacity and as consequence the reduction of transient performance. Thus, the analysis of the transient performance of the machine is performed by observing the quantity which is the effective cause of instability. Once detected the possible cause of the instability of the generator, is proposed a control of the quantity which originates the generator instability. The control philosophy is based on internal voltage magnitude control, contributing decisive and positively to the increase of transmission capacity and the DFIG equilibrium restorative forces, resulting improved stability of the system. The validation of the application of control methodology via voltage E' is proven through computational simulations in diverse contingencies, with and without action of crowbar circuit control. It is evident that this method can be used to evaluate the criticality of the system in real time.

Key words: Analytical method. Control. Critical clearing time. Doubly fed induction generator. Power system. Transient stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Capacidade global acumulada de energia eólica instalada entre 1997-2014	16
Figura 2 – Capacidade global instalada de energia eólica entre 1997-2014 por ano	17
Figura 3 – Divisão de turbinas eólicas instaladas por configuração de 2000 a 2009	18
Figura 4 – Fluxograma da contribuição deste trabalho	21
Figura 5 – Entradas e saídas de potência dos geradores de indução: DFIG (a) e SCIG (b).....	24
Figura 6 – Estator do gerador de indução.....	24
Figura 7 – Rotor da máquina de indução do tipo bobinado.....	25
Figura 8 – Esquema elétrico do gerador de indução duplamente alimentado	26
Figura 9 – Desconexão do RSC, durante o período de falta.....	28
Figura 10 – Não desconexão do RSC, durante o período de falta.....	28
Figura 11 – Evolução da capacidade instalada por tipo de turbina, 2000-2009, em valores absolutos	29
Figura 12 – Método da velocidade crítica por meio das curvas de Torque elétrico × escorregamento.	31
Figura 13 – DFIG versus sistema barra infinita	31
Figura 14 – Circuito equivalente do sistema completo	32
Figura 15 – Primeira etapa para redução de Thévenin do circuito completo	33
Figura 16 – Equivalente do Thévenin do DFIG	34
Figura 17 – Curvas do Torque elétrico × escorregamento do DFIG com a variação de v_{qr} e $v_{dr}=0$	35
Figura 18 – Curvas do Torque elétrico × escorregamento do DFIG com a variação de v_{dr} e $v_{qr}=0$	35
Figura 19 – Variação das grandezas: v_{qr} (a); v_{dr} (b) com vistas ao deslocamento do escorregamento crítico	36
Figura 20 – DFIG versus sistema barra infinita	39
Figura 21 – Diagrama fasorial do DFIG versus barra infinita durante um período de recuperação do transitório.....	41
Figura 22 – DFIG modelado com o conversor fonte de tensão ideal, com controle Proporcional-Integral (Pi)	42
Figura 23 – DFIG com conversores RSC e GSC	45
Figura 24 – Malha do controle da (a) tensão terminal (b) potência reativa através de v_{dr}	46

Figura 25 – Malha do controle da (a) velocidade do rotor (b) potência ativa através de v_{qr}	47
Figura 26 – Malha do controle da tensão do link CC via v_{dc}	47
Figura 27 – Controle da tensão terminal via v_{qc}	47
Figura 28 – As grandezas: tensão interna E' , ângulo θ e potência elétrica, definem E'_{crit} valor o qual se encontra no vértice da parábola, local determinado pela interseção das duas superfícies.....	50
Figura 29 – DFIG versus barra infinita com os instrumentos de medição TP e TC.....	52
Figura 30 – Algoritmo de operação do método da tensão interna.....	53
Figura 31 – Controle para contribuição no aumento das forças restaurativas de equilíbrio do DFIG durante um período transitório por meio do critério da tensão interna.....	55
Figura 32 – Margem de tensão interna através do método da tensão interna.....	57
Figura 33 – DFIG versus barra infinita.....	58
Figura 34 – Movimento da tensão interna do DFIG nos casos críticos de estabilidade e instabilidade do sistema.....	59
Figura 35 – Analisando o escorregamento do DFIG nos momentos críticos de estabilidade e instabilidade.....	60
Figura 36 – Ação do controle da magnitude da tensão interna com diferentes valores de ganho (K_{CMTI}) com tempo de falta de 740ms.....	62
Figura 37 – Fluxograma de atuação do método de investigação da estabilidade e do controle do CMTI.....	63
Figura 38 – Evolução do tempo crítico com a consideração do controle da magnitude da tensão interna.....	64
Figura 39 – Comportamento do escorregamento do DFIG com a atuação do controle da magnitude da tensão interna.....	65
Figura 40 – Comportamento da tensão interna do DFIG referente aos dados Tabela 2, (a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9, a10).....	66
Figura 41 – Comportamento do escorregamento do DFIG referente aos dados Tabela 2 (b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b10).....	66
Figura 42 – Desempenho do CMTI e método da tensão interna na rede fraca.....	70
Figura 43 – Análise do desempenho do método da tensão interna e do CMTI em condições de aumento no carregamento do sistema.....	71
Figura 44 – Análise da capacidade de transmissão com o aumento no carregamento do sistema em 50% e do CMTI.....	72

Figura 45 – Fluxograma do DFIG durante um transitório com a ação dos controles CMTI e crowbar	74
Figura 46 – Tendência do sistema definidos pela direção do sistema após o vórtice (após a eliminação da falta).....	75
Figura 47 – Tensão interna em função do tempo com ação do CMTI e crowbar	77
Figura 48 – Ampliação da Figura 47, instantes após a eliminação da falta	77
Figura 49 – Comportamento do escorregamento em função do tempo com ação conjunta do CMTI e do crowbar.....	78
Figura 50 – Desempenho do tensão interna com os seguintes valores, $K_{CMTI}=0.008$, resistência do crowbar $R_{crow}= 30\%$ do valor da resistência do rotor, e os tempos de atuação do crowbar estão especificados em 150 e 500ms após a aplicação do transitório	79
Figura 51 – Sistema teste para o estudo da estabilidade do DFIG (SALLES, 2009).....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lógica de operação do controle da magnitude da tensão interna	61
Tabela 2 – Análise do tempo crítico do sistema com diferentes valores de ganhos do controle	65
Tabela 3 – Análise da estabilidade em redes fracas com o controle da magnitude da tensão interna.	69
Tabela 4 – Análise do tempo crítico em situações de aumento no carregamento do sistema com o controle da magnitude da tensão interna.....	71
Tabela 5 – Lógica de operação dos controladores.....	73
Tabela 6 – Resistência do crowbar $R_{crow}=30\%$ da resistência do rotor, tempo de atuação do crowbar 150 após a eliminação da falta (as variáveis de análise são: o ganho do CMTI e a filosofia de controle do RSC).....	76
Tabela 7 – Dados da rede elétrica e da carga do sistema teste	90
Tabela 8 – Dados do gerador de indução duplamente alimentado	90
Tabela 9 – Dados do gerador assíncrono	90
Tabela 10 – Dados dos reguladores PI's do conversor RSC para controle de tensão do DFIG	90
Tabela 11 – Dados dos reguladores PI's dos conversores RSC para controle da máquina do DFIG.	91

LISTA DE ABREVIACES

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CMTI – Controle da Magnitude da Tensão Interna

DFIG – Doubly Fed Induction Generator

EESG – Electrically Excited Synchronous Generator

GSC – Gride Side Converter

GWEC – Global Wind Energy Council

MTE' – Margem da Tensão Interna

PACMTI – Partida de Aplicao do Critério da Mínima Tensão Interna

PMSG – Permanent Magnet Synchronous Generators

RSC – Rotor Side Converter

SCIG – Squirrel Cage Induction Generator

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

WRIG – Wound Rotor Induction Generator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Cenários do setor eólico no mundo	16
1.2	Expectativa da estabilidade sobre os geradores eólicos	18
1.3	Contribuição do trabalho	20
1.4	Organização do trabalho	22
2	GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO	23
2.1	Aspecto construtivo	23
2.2	Componentes do DFIG	26
2.2.1	<i>Conversores/Controle</i>	27
2.2.2	<i>Sistema de proteção do DFIG (Crowbar)</i>	28
2.3	Motivação em analisar o DFIG	29
3	MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO	30
3.1	Modelo matemático do DFIG para estudo da estabilidade em regime permanente	30
3.2	Modelagem do DFIG para o estudo da estabilidade transitória	38
3.2.1	<i>Modelo matemático do DFIG</i>	39
3.2.2	<i>DFIG versus barra infinita com conversor fonte de tensão ideal</i>	41
3.2.3	<i>Modelo completo do DFIG versus barra infinita</i>	44
3.3	Modelos de controle do RSC e do GSC	46
3.4	Sistema de proteção Crowbar	48
4	DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO POR MEIO DO MONITORAMENTO DA TENSÃO INTERNA	49
4.1	Estudo da estabilidade dos geradores de indução através da tensão interna E'	49
4.2	Análise da tensão interna crítica do DFIG versus barra infinita	50
4.3	A causa da perda de capacidade de transmissão do gerador DFIG	53
4.4	Proposta de um método de controle para melhoria nas forças restaurativas do equilíbrio do DFIG durante um período transitório via critério da tensão interna	54
4.5	Região de capacidade de transmissão de potência positiva dos geradores assíncronos e aplicação do CMTI (Controle da Magnitude da Tensão Interna)	56
5	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA E CONTROLE DA TENSÃO INTERNA VIA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	58
5.1	Análise da performance da tensão interna E' do DFIG contra uma barra infinita durante um período transitório	58
5.1.1	<i>Investigação da estabilidade transitória do sistema por meio do critério da tensão interna</i>	59
5.2	Investigação do desempenho do controle da magnitude da tensão interna durante o período transitório	61

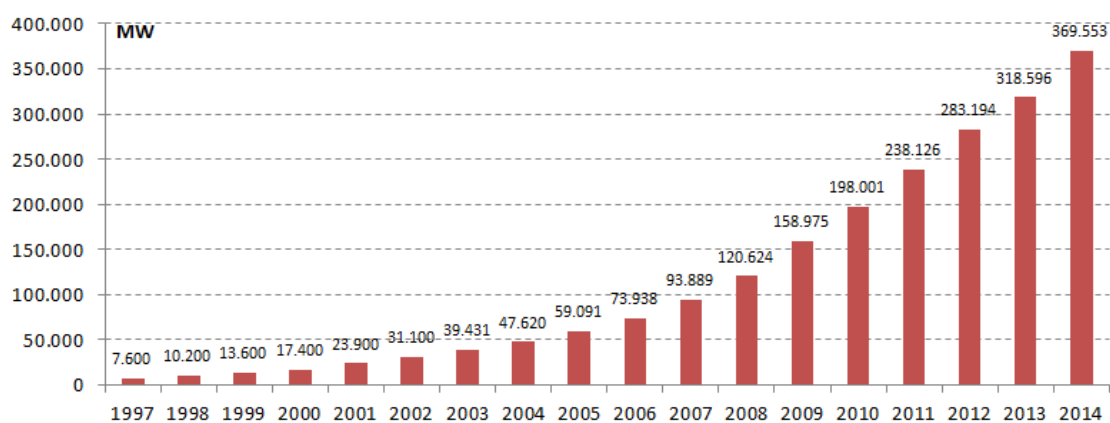
5.2.1	<i>Controle da magnitude da tensão interna com ação no aumento das forças restaurativas de equilíbrio do DFIG</i>	62
5.2.2	<i>Análise da estabilidade transitória com o controle da magnitude da tensão interna</i>	63
5.2.3	<i>Análise do desempenho da metodologia e ação do controle atuando em redes fortes e fracas</i>	69
5.2.4	<i>Análise do desempenho da metodologia e ação do controle durante condições de aumento no carregamento do sistema</i>	70
5.3	Análise do desempenho do método tensão interna E' e o controle CMTI junto a um circuito Crowbar no DFIG	73
5.3.1	<i>Análise da capacidade de transmissão do DFIG com a inserção do Crowbar durante o período de falta com ação do CMTI</i>	74
6	CONCLUSÕES	80
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – Artigos Publicados	89
	ANEXO A – Dados do sistema teste	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Cenários do setor eólico no mundo

De acordo com o Conselho Global de Energia Eólica no mundo (GWEC, 2014) a evolução acumulada de instalações de centrais eólicas no mundo cresce de modo bastante considerável. Estes dados podem ser observados na análise sobre a evolução da capacidade global instalada no período de 1997 à 2014 apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Capacidade global acumulada de energia eólica instalada entre 1997-2014.

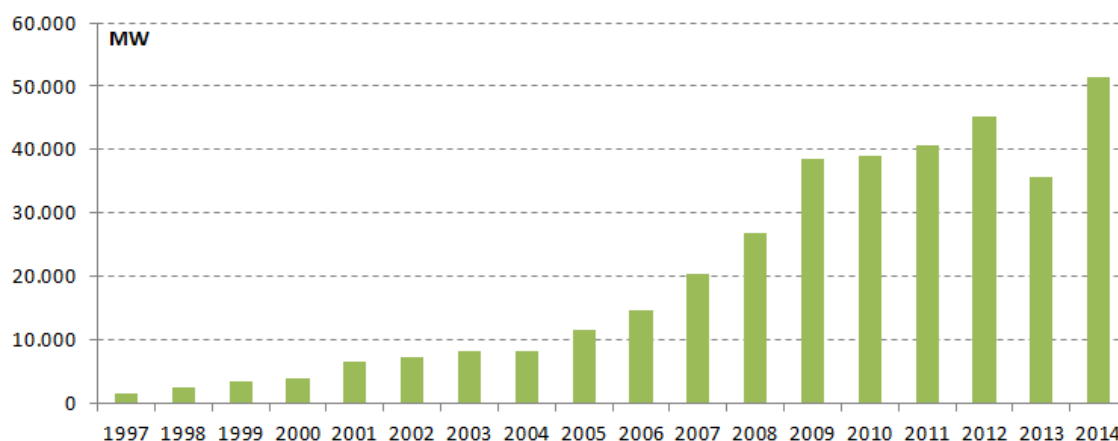


Fonte: GWEC (2014).

No decorrer dos anos, com o aumento da população mundial o consumo de energia elétrica cresce consideravelmente (ANEEL, 2014; EPE, 2013), e para que o sistema elétrico se mantenha em equilíbrio, as fontes geradoras devem seguir em constante evolução. Esta expansão pode ser verificada pela observação da Figura 2, a qual mostra a quantidade de MW instalados anualmente entre 1997 e 2014 provenientes da geração eólica (GWEC, 2014).

Desta forma é possível constatar um crescente investimento no setor eólico, sendo que uma das parcelas contribuintes a esta evolução provém do incentivo na geração de energia proveniente de fontes renováveis (AKHMATOV, 2003a; ACKERMAN, 2005; ANAYA-LARA et al., 2009; GWEC, 2014; JENKINS et al., 2000).

Figura 2 – Capacidade global instalada de energia eólica entre 1997-2014 por ano.



Fonte: GWEC (2014).

Com o aumento desta fonte de energia, cresce a preocupação sobre o comportamento do setor elétrico (CIGRÉ, 2000; HANSEN et al., 2007; MÜLLER et al., 2002; SLOOTWEG, 2001, 2003a, 2003b, 2003c), uma vez que este tipo de geração está sujeita a perturbações inerentes do sistema e dos fenômenos aleatórios da natureza (AKHMATOV, 2003a, 2003b; SLOOTWEG, 2003a, 2003d). Dependendo do nível da perturbação a qualidade e o fornecimento de energia fica totalmente comprometido afetando diretamente o fornecimento de energia elétrica. Com a intenção de contornar estes inconvenientes se faz o estudo da estabilidade destes geradores eólicos (AKHMATOV, 2003a, 2003b; GRILO et al., 2007; SAMUELSON; LINDAHL, 2005; SLOOTWEG, 2002) determinando sistemas de controle de atuação instantânea, capazes de detectar situações que podem levar o sistema a um colapso geral e atuar de modo a amenizar e/ou evita-lo.

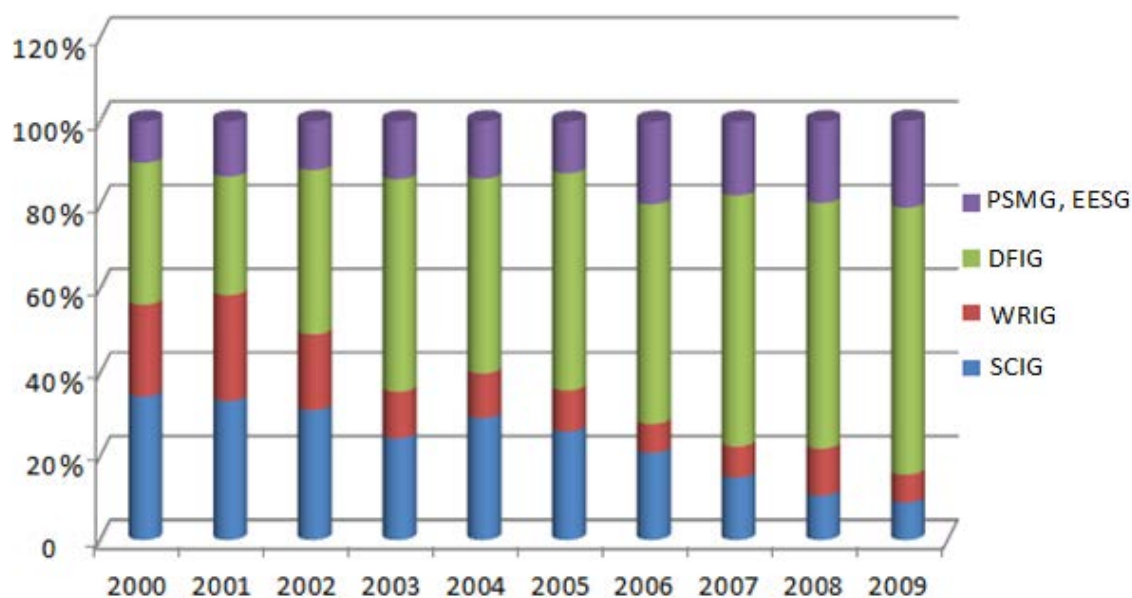
Devido a grande maioria dos sistemas de energia serem interligados (KUNDUR, 1994), na eventual falta de operação de uma fonte de geração outra unidade geradora deve suprir a necessidade do sistema, a fim de garantir um sistema confiável, e evitar interrupções de fornecimento, considerados os sistemas de energia elétrica tradicionais, e, mais recentemente, os parques eólicos inseridos no conjunto das fontes do sistema.

1.2 Expectativa da estabilidade sobre os geradores eólicos

De acordo com Iglesias et al. (2011), um estudo sobre os geradores em operação foi desenvolvido sobre 91% da capacidade eólica instalada durante o período de 2000 à 2009, sendo que o percentual restante não foi divulgado por questões políticas de alguns países.

Na classificação da Figura 3, os geradores são: Gerador de indução em gaiola de esquilo - SCIG (Squirrel Cage Induction Generator), Gerador de indução com rotor bobinado com variação de resistência - WRIG (Wound Rotor Induction Generator), Gerador de Indução Duplamente Alimentado - DFIG (Doubly Fed Induction Generator), Gerador síncrono excitado eletricamente com enrolamento de campo - EESG (Electrically Excited Synchronous Generator) e o gerador síncrono de ímã permanente - PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) (ABAD et al., 2011; ACKERMANN, 2005; AKHMATOV, 2003 a; HANSEN et al., 2001; LI ; CHEN, 2008; JENKINS et al., 2000; MÜLLER et al., 2002; PENA, 1996; PÖLLER, 2003; SLOWTEG, 2003a; WU, 2011).

Figura 3 – Divisão de turbinas eólicas instaladas por configuração de 2000 a 2009.



Fonte: Iglesias et al. (2011).

Analisando os dados da Figura 3, evidencia-se a evolução da eletrônica de potência nos geradores eólicos, observe que no ano de 2000, os geradores equipados com conversores de potência correspondiam a uma parcela de 28% no cenário mundial.

Observando o mercado eólico no ano de 2009, note que este percentual saltou para 80% do mercado, mostrando que esta é a tendência mundial para os próximos anos (BTM, 2009; IGLESIAS et al., 2011).

Inúmeras bibliografias discutem os problemas de estabilidade do sistema de energia elétrica, evidenciando que uma das soluções das centrais eólicas equipadas com geradores de indução está no controle da potência reativa (ABAD, 2011; ACKERMAN, 2005; AKHMATOV, 2003a, 2006; ANAYA-LARA et al., 2009; BIM, 2012; FITZGERALD et al., 2006; GOMEZ, 2002; SALMAN, 2003; TAPIA, 2001a, 2001b; TLEIS, 2008).

No ano de 2009 os geradores de indução correspondem a uma parcela de 72% do mercado de todas centrais eólicas (BTM, 2009; IGLESIAS, 2011). Esta grande diferença entre a utilização em números de geradores síncronos e assíncronos na geração eólica se dá pelo fato de os geradores síncronos serem mais sensíveis à aleatoriedade de torque originado da fonte primária em razão da natureza do acoplamento entre a parte mecânica e elétrica da máquina, implicando em que perturbações que ocorram na parte mecânica se refletem mais acentuadamente no lado elétrico. Nas máquinas assíncronas, no caso de uma perturbação na parte mecânica (proveniente da fonte primária, o vento) a parte elétrica não sofre os efeitos na mesma intensidade uma vez que o escorregamento admite uma faixa de variação. Isto se traduz em uma maior robustez quando comparada com as máquinas síncronas.

Desta forma obtendo a maior parcela deste tipo de geradores no mercado, alterações surgem na dinâmica do sistema, devido ao gerador assíncrono apresentar característica diferente de operação em relação ao gerador síncrono (KUNDUR, 1994; FREITAS et al. 2006), tradicionalmente empregado. Os métodos de estudo de estabilidade das máquinas síncronas não são aplicados aos geradores assíncronos (GRILO et al., 2007; MACHOWSKI et al., 2008).

Segundo Samuelson e Lindahl (2005), Grilo et al. (2007) e Salles (2009), o estudo de estabilidade é realizado através da velocidade da máquina assíncrona. Caso o sistema venha a sofrer um curto-circuito trifásico próximo ao terminal da máquina, a potência elétrica transmitida é anulada e, a potência mecânica continua sendo aplicada no eixo da máquina, se desenvolve o desbalanço das potências causando a aceleração do rotor do gerador e, esta falta não sendo eliminada, este sistema evolui para instabilidade. Em virtude desta observação, Zamperin e Colvara (2010, 2011a, 2011 b, 2012, 2013) apontaram que a instabilidade do gerador de indução em gaiola de esquilo é originada

pela desmagnetização da máquina, implicando em deterioração da tensão interna E' . Em razão desta análise, questiona-se a possível instabilidade do gerador duplamente alimentado, sabendo que a diferença existente entre o SCIG e o DFIG está no acesso e controle das grandezas do rotor do DFIG. Com base nesta investigação e considerando que ambas as máquinas têm a natureza assíncrona, aponta-se que a possível instabilidade do DFIG seja causada pela deterioração da tensão interna.

Detectada a possível origem da instabilidade do gerador DFIG, um controle é proposto sobre a grandeza na qual se desenvolve a instabilidade da máquina visando elevar as forças restaurativas do equilíbrio do DFIG e aumentar a capacidade de transmissão de potência do sistema.

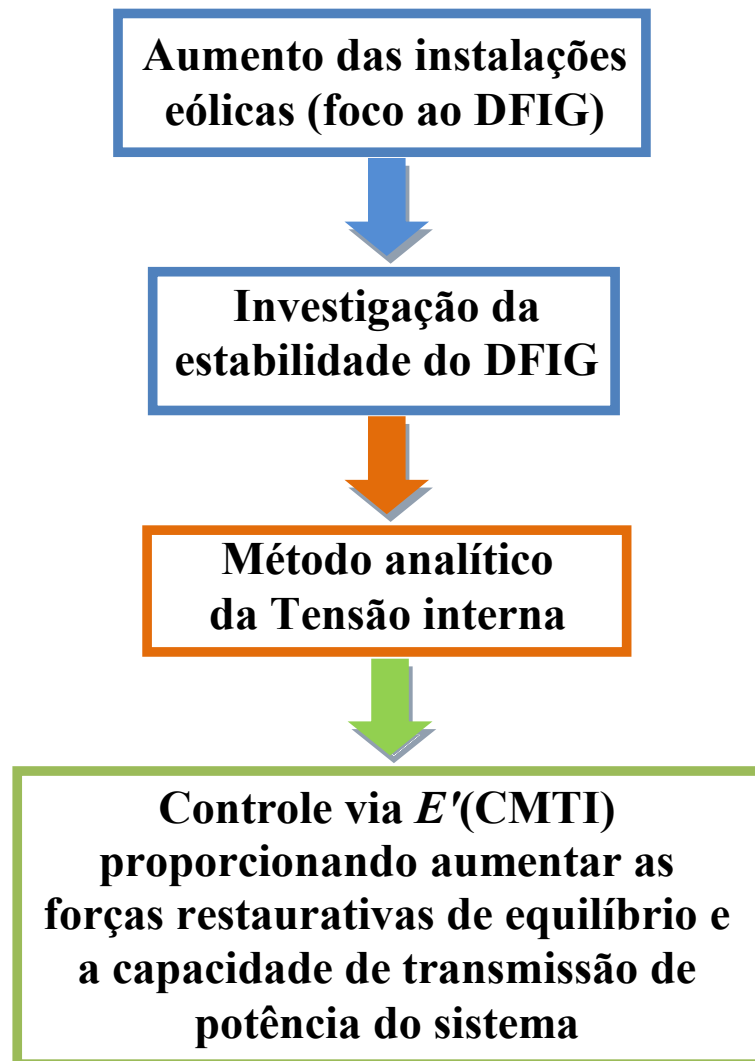
1.3 Contribuição do trabalho

A contribuição deste trabalho é evidenciada na forma de um fluxograma apresentado na Figura 4. Com o aumento das instalações eólicas a investigação da estabilidade é de extrema importância em razão de assegurar o fornecimento a transmissão de potência. Desta forma um critério é desenvolvido para análise da estabilidade do DFIG através da observação do movimento da tensão interna (E') e caso esta tensão seja inferior ao limitador de capacidade de transmissão definido como E'_{crit} (ZAMPERIN; COLVARA, 2010) o sistema perde a capacidade de transmissão e evolui para instabilidade. Após esta investigação, é proposto um controle cuja função está em proporcionar um aumento nas forças restaurativas do DFIG com vistas a um aumento na capacidade de transmissão da potência durante períodos transitórios no sistema elétrico de potência.

O controle tem o seguinte propósito: manter a capacidade de transmissão quando o sistema é submetido a uma perturbação, tendo em vista que durante o período transitório a tensão interna passa a apresentar uma deterioração tendendo a violar o limite de criticidade (E'_{crit}). A tensão interna quando se encontra operando em regime permanente até o seu limite crítico apresenta uma margem de operação. Quando esta margem de tensão apresentar uma redução em razão de uma perturbação, o sistema de controle é acionado visando o controle da magnitude da tensão interna E' , evitando que a máquina opere abaixo do seu valor crítico, assim promovendo o aumento das forças restaurativas de equilíbrio da máquina.

Para contornar estes inconvenientes uma possível solução está no uso do Controle da Magnitude da Tensão Interna (CMTI) evitando a perda da capacidade de transmissão de potência.

Figura 4 – Fluxograma da contribuição deste trabalho.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

1.4 Organização do trabalho

De forma sucinta, este trabalho se encontra dividido nos seguintes capítulos:

- O Capítulo 2 aborda brevemente o conceito da máquina de indução duplamente alimentada, seus principais componentes e suas possíveis estratégias de controle.
- O Capítulo 3 descreve a modelagem do DFIG para o estudo da estabilidade transitória da máquina. São tratados dois modelos, sendo um simplificado (conversor RSC (Rotor Side Converter) representado por uma fonte de tensão ideal) e o completo (modelagem do RSC, GSC (Grid Side Converter) e a dinâmica do link CC).
- O Capítulo 4 apresenta a principal contribuição deste trabalho o qual é composto pela metodologia da tensão interna e a técnica de controle da magnitude da tensão interna cujo objetivo está em proporcionar melhorias nas forças restaurativas de equilíbrio do sistema.
- O Capítulo 5 destaca os resultados das simulações computacionais apresentando a avaliação da estabilidade do DFIG por meio do critério da mínima tensão interna e o desempenho do controle via magnitude da tensão interna proporcionando um aumento das forças restaurativas de equilíbrio do DFIG durante períodos transitórios. Com esta análise permite-se um maior entendimento sobre o comportamento do DFIG.
- O Capítulo 6 destaca as conclusões obtidas ao longo deste estudo.

2 GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO

Neste capítulo, é realizada uma fundamentação teórica sobre o gerador de indução duplamente alimentado. Brevemente são destacados o conceito sobre: aspectos construtivos, conversores e o sistema de proteção do tipo crowbar com as duas filosofias de operação.

2.1 Aspecto construtivo

O foco deste trabalho constitui-se em analisar a estabilidade do gerador DFIG, e neste capítulo apresenta-se um estudo sucinto, com o propósito de conhecimento da máquina de indução do tipo rotor bobinado, e para maiores evidências e detalhamento encontram-se nas seguintes bibliografias: (ABDAD et al., 2009; ACKERMAN, 2005; AKHMATOV, 2003a; ANAYA-LARA et al., 2009; BIM, 2012; CIGRÉ, 2000; FITZGERALD et al., 2006; JENKINS, 2000; MÜLLER, 2002; PEÇAS LOPES, 2004; PENA, 1996; POLINDER, 2006; PÖLLER, 2003; SLOOWTEG, 2003a; WU, 2011).

As máquinas elétricas são dispositivos que fazem conversão eletromecânica de energia, ou seja, um gerador elétrico converte energia mecânica em energia elétrica.

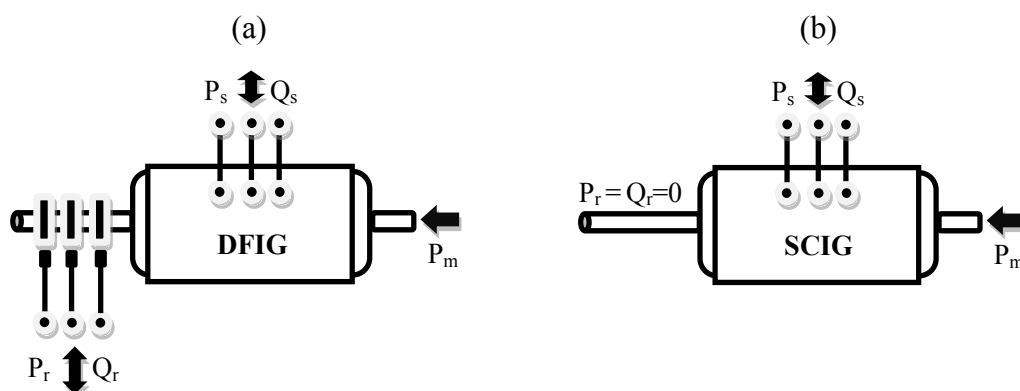
Do ponto de vista eletromagnético a máquina elétrica é dividida em duas partes:

- **Indutor (campo)** – Responsável pela magnetização do circuito magnético do gerador;
- **Induzido (armadura)** – Local onde ocorre a conversão eletromecânica de energia (FITZGERALD et al., 2006).

Note que as grandezas expressas na Figura 5 são as potências constatadas nos terminais dos geradores de indução. Nos terminais do estator e rotor têm-se as potências ativa (P_s) e (P_r) e as potências reativas (Q_s) e (Q_r) (BIM, 2012; FITZGERALD et al., 2006) e, no eixo, a potência mecânica (P_m) proveniente de uma máquina primária, no caso deste trabalho uma turbina eólica (POLINDER et al., 2006).

De acordo com a Figura 5, é possível observar a diferença do gerador de rotor bobinado (a) em relação ao do tipo gaiola de esquilo (b), sendo que no de rotor bobinado têm-se, através do acesso aos terminais do rotor o caminho para o controle da máquina (BIM, 2012; EKANAYAKE, 2004; NUNES, 2003; YAMAMOTO, 1991).

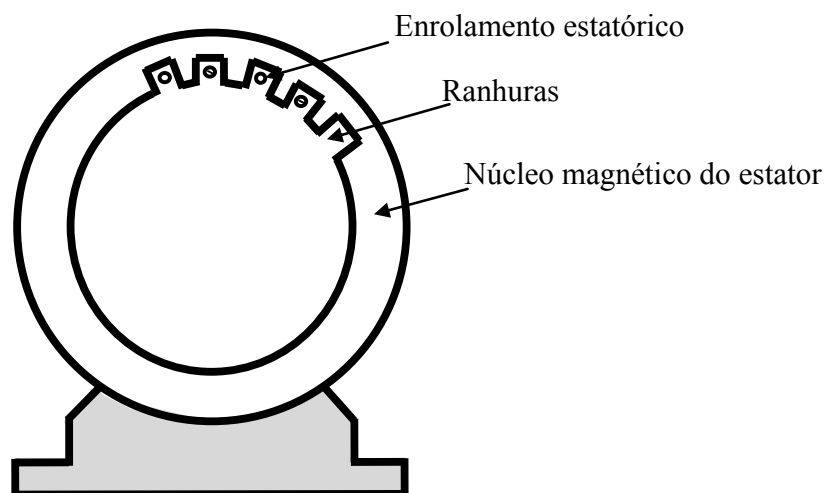
Figura 5—Entradas e saídas de potência dos geradores de indução: DFIG (a) e SCIG (b).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Geradores e motores são máquinas elétricas, diferenciando-se pelo sentido de transformação da energia. Ambos possuem as mesmas características básicas, com enrolamentos fixados no estator e no rotor onde as correntes circulantes produzem os campos magnéticos necessários para o funcionamento da máquina (FITZGERALD, 2006).

Figura 6 – Estator do gerador de indução.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

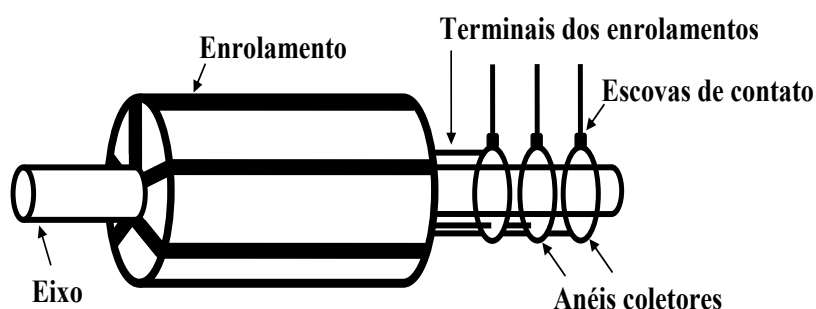
O estator é composto de um núcleo ferromagnético na forma de coroa cilíndrica, constituído de lâminas de aço silício justapostas no sentido longitudinal e isoladas uma da outra. Na superfície interna do cilindro existem ranhuras distribuídas uniformemente,

onde são alojadas as bobinas que formarão o enrolamento do estator (FITZGERALD, 2006).

A Figura 6 mostra apenas duas bobinas para efeito de visualização de sua execução, mas na máquina real elas existem usualmente em quantidade igual ao número de ranhuras, cada bobina alojada em um par de ranhuras distanciadas adequadamente, formando o que se chama de enrolamento imbricado de dupla camada. Este conjunto de bobinas irá formar o enrolamento trifásico, cuja função será produzir um campo magnético rotativo no entreferro quando submetido a correntes trifásicas simétricas.

O rotor bobinado (Figura 7) é composto de um núcleo ferromagnético cilíndrico também constituído de lâminas, com a superfície externa ranhurada, onde é alojado um enrolamento trifásico similar ao do estator. As terminações das bobinas que formam o enrolamento são conectadas a três anéis coletores ao eixo (isolados eletricamente do mesmo e entre si). O acesso ao rotor é então obtido através de escovas de carvão apropriadas, fixadas à estrutura da máquina (FITZGERALD, 2006).

Figura 7 - Rotor da máquina de indução do tipo bobinado.



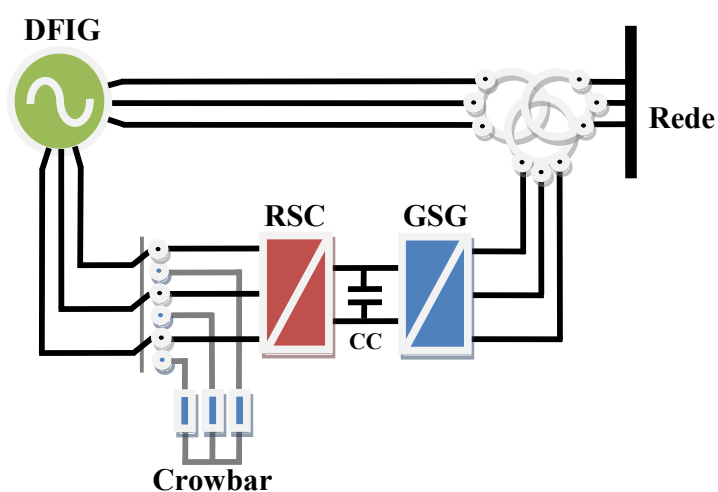
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Desse modo, os anéis coletores e as escovas formam um sistema de contatos móveis tornando possível o acesso ao enrolamento mesmo com o rotor em movimento. Essa variante construtiva tem a vantagem de permitir a alteração de parâmetros elétricos do rotor por inserção de elementos externos de circuito, tipicamente resistores, ou conversores de potência, os quais promovem modificação das características da máquina (EKANAYAKE et al., 2003 a; FEIJÓO et al., 2000; PENA et al., 1996; PÖLLER, 2003).

2.2 Componentes do DFIG

O DFIG é composto por uma máquina de indução do tipo rotor bobinado, conforme apresentado na Seção 2.1, com os terminais do estator conectados a rede, usualmente através de um transformador, enquanto que os terminais do rotor são alimentados por conversores de potência CA/CC/CA a partir dos terminais da própria máquina, como ilustrado na Figura 8 (ABAD et al., 2011; AKHMATOV, 2003a; SLOOTWEG, 2003a). Um banco de resistores compõe o dispositivo crowbar o qual tem por função limitar as correntes do rotor (EKANAYAKE, 2003b; ERLICH, 2007; MORREN ; HAAN, 2007; VIEIRA, 2009; SALLES, 2009). Esta configuração permite que o DFIG opere variando sua rotação sendo ela subsíncrona ($s > 0$), síncrona ($s = 0$) e supersíncrona ($s < 0$), (AKHMATOV, 2003 (a); ALMEIDA, 2006), sendo que s é a diferença relativa da velocidade do campo girante (ω_s) de estator para a velocidade do rotor (ω_r), definido como escorregamento $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ (KUNDUR, 1994).

Figura 8 – Esquema elétrico do gerador de indução duplamente alimentado.



Fonte: Adaptado de Almeida e Peças Lopes (2004).

A Figura 8 mostra o esquema elétrico do DFIG, sendo que o conversor conectado no lado do rotor é denominado como RSC (Rotor Side Converter) e o do lado da rede GSC (Grid Side Converter) (AKHMATOV, 2003a, HU, 2009). Estes conversores estão conectados através de um link CC usualmente dimensionado com capacidade de 30% da potência nominal da máquina (AKHMATOV, 2003a; FREITAS et al., 2006; JENKINS, 2000). Através dos conversores obtém-se a grande vantagem do

DFIG que está em trabalhar a velocidade variável garantindo menor impacto nas redes elétricas quando comparado com o SCIG (EKANAYAKE, 2003a, 2004; PÖLLER, 2003; SLOOTEWG, 2003a), visto que os gaiolas de esquilo estão conectados diretamente a rede operando em velocidade fixa, e portanto mais susceptível a perturbações da rede (AKHMATOV, 2003a; HOLDWORTH, 2003, 2004; NUNES, 2003, 2004; RODRIGUEZ, 2002). Maiores detalhes sobre os conversores de potência podem ser encontrados em Iglesias et al. (2011), Blaabjerg (2012) e Hansen (2001).

A flexibilidade de controle proporcionada pelos conversores eletrônicos associados a este tipo de gerador conduz o DFIG a operar de forma semelhante a das unidades síncronas convencionais (MACHOWSKI, 2008) oferecendo possibilidade de controle de tensão e potência por meio do controle dos circuitos rotóricos.

2.2.1 Conversores/Controle

Os conversores estáticos possibilitam a troca bidirecional de potência ativa entre rotor e a rede elétrica. Em operação super-síncrona, onde a velocidade angular do gerador está acima da velocidade angular síncrona, a potência ativa do rotor pode ser aproveitada e entregue à rede (MÜLLER, 2002; PENA, 1996; PÖLLER, 2003).

Devido ao aerogerador ser controlado para operar com velocidade variável e dependendo da filosofia de controle adotada as potências ativas do estator e rotor compõem-se, de tal forma que a potência ativa total entregue à rede corresponda a potência total (ANAYA-LARA et al, 2009).

O conversor de potência RSC está conectado nos terminais do rotor do gerador o qual tem a principal função de controlar a potência ativa ou velocidade do rotor e o controle da potência reativa ou a tensão terminal no estator da máquina, e este controle está associado a magnitude da tensão do link CC (PENA, 1996; PÖLLER, 2003). Este conversor opera com diferentes frequências de acordo com a velocidade do aerogerador. Praticamente este dispositivo controla o DFIG injetando tensões ou correntes controladas no rotor da máquina elétrica a partir da estratégia de controle pré-definida (TAPIA, 2001a, 2001b; XU, 2007, 2008).

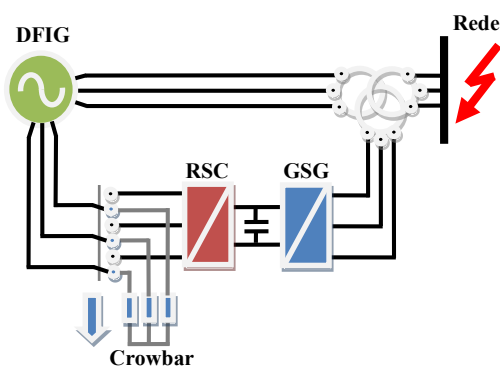
O conversor GSC montado em cascata com o conversor RSC funciona como uma fonte de corrente controlada, cujo controle impõe valores de correntes desejadas permitindo o controle de fluxo de potência reativa trocada com a rede elétrica, assim como o controle da magnitude da tensão no link CC, a fim de permitir gerador-

conversor e conversor-rede o controle de ambos os lados de forma independente (AKHMATOV, 2003a; PENA, 1996; PÖLLER, 2003; PERDANA, 2004).

2.2.2 Sistema de proteção do DFIG (Crowbar)

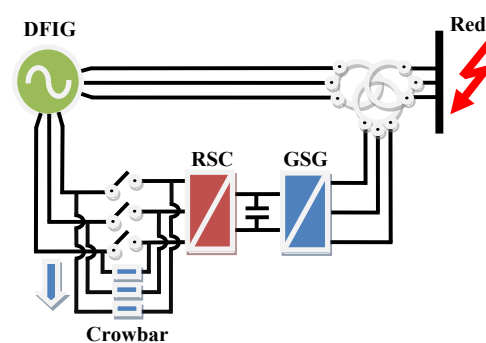
Supõe-se que o sistema venha a sofrer um curto-circuito na linha de transmissão próximo a barra terminal do DFIG: durante o período da falta os enrolamentos do rotor são curto-circuitados desativando o conversor estático (RSC), e acrescenta-se em série uma resistência para limitar as correntes de rotor as quais poderiam atingir valores de ordem elevada. Caso não fosse acionado o crowbar, consequentemente resultaria na queima do conversor RSC, sendo esta uma filosofia de operação do controle (ALMEIDA, 2004; ERLICH, 2007; HANSEN, 2007; NUNES, 2003; SUN, 2005; PETERSSON, 2005a, 2005b) (vide Figura 9).

Figura 9 – Desconexão do RSC, durante o período de falta.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 10 – Não desconexão do RSC, durante o período de falta



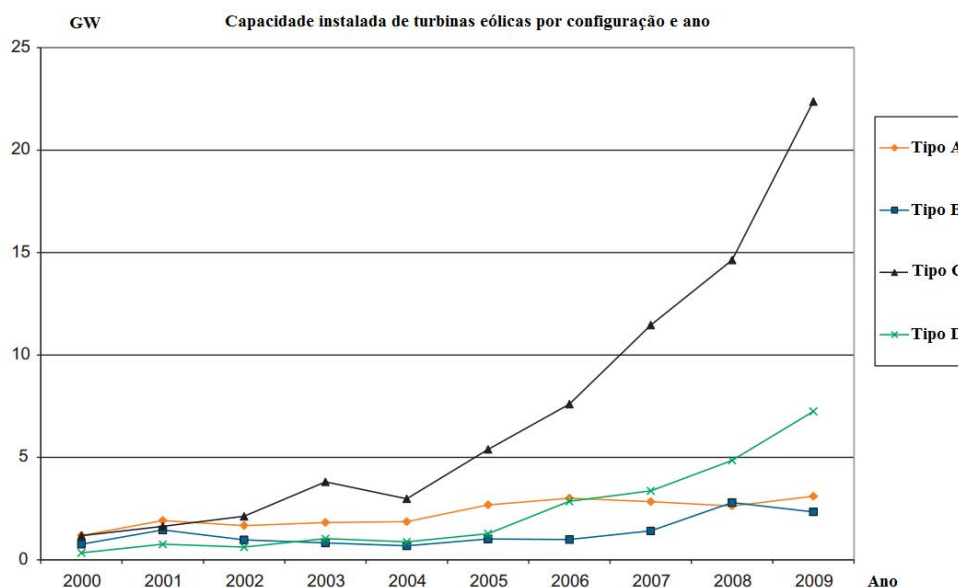
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Porém outra condição de operação é sugerida por Morren e Haan (2005), os quais apresentaram uma solução capaz de fazer com que geradores eólicos equipados com DFIG permaneçam conectados à rede elétrica durante uma falta. A ideia foi utilizar resistores conectados ao circuito do rotor, com o propósito de limitar as correntes rotóricas durante a falta na rede e, ainda, oferecer um caminho alternativo para estas correntes, de forma a manter conectados tanto o conversor do lado da máquina quanto o conjunto aerogerador-rede (vide Figura 10). É válido ressaltar que as Figuras 9 e 10 mostram a operação do Crowbar durante o regime de falta, optando pela desconexão ou a não desconexão do RSC.

2.3 Motivação em analisar o DFIG

A Figura 11 aponta a evolução da produção de energia elétrica com diferentes tipos de geradores elétricos, destacando o aumento por parte dos geradores duplamente alimentados e encorajando o estudo de análise de estabilidade deste tipo de máquina (IGLESIAS, 2011; HANSEN, 2001, 2007; LI; CHEN, 2008).

Figura 11 – Evolução da capacidade instalada por tipo de turbina, 2000-2009, em valores absolutos.



Fonte: Iglesias et al. (2011).

As máquinas destacadas na Figura 11 são: Tipo A – SCIG; Tipo B – WRIG; Tipo C – DFIG; Tipo D – Geradores síncronos que estão conectados a rede através de um dispositivo de eletrônica de potência. Uma das características marcantes está no aumento dos geradores do Tipo C e D este aumento se dá por conta da evolução da eletrônica de potência (Iglesias et al 2011).

É válido ressaltar que uma das vantagens do DFIG é a flexibilidade de controle proporcionada pelos conversores eletrônicos associados a este tipo de gerador, conduzindo o DFIG a operar de forma semelhante a das unidades síncronas convencionais oferecendo capacidade de controle (MACHOWSKI, 2008). E uma das desvantagens deste gerador é por ele estar conectado diretamente à rede elétrica através do estator, tornando-o mais sensível às perturbações da rede elétrica (LEDESMA, 2004, 2005; PERDANA, 2004; SUN, 2005).

3 MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO

Ao longo do desenvolvimento deste capítulo será abordada a modelagem para o estudo da estabilidade do DFIG versus barra infinita, nos regimes: permanente e transitório.

3.1 Modelo matemático do DFIG para estudo da estabilidade em regime permanente

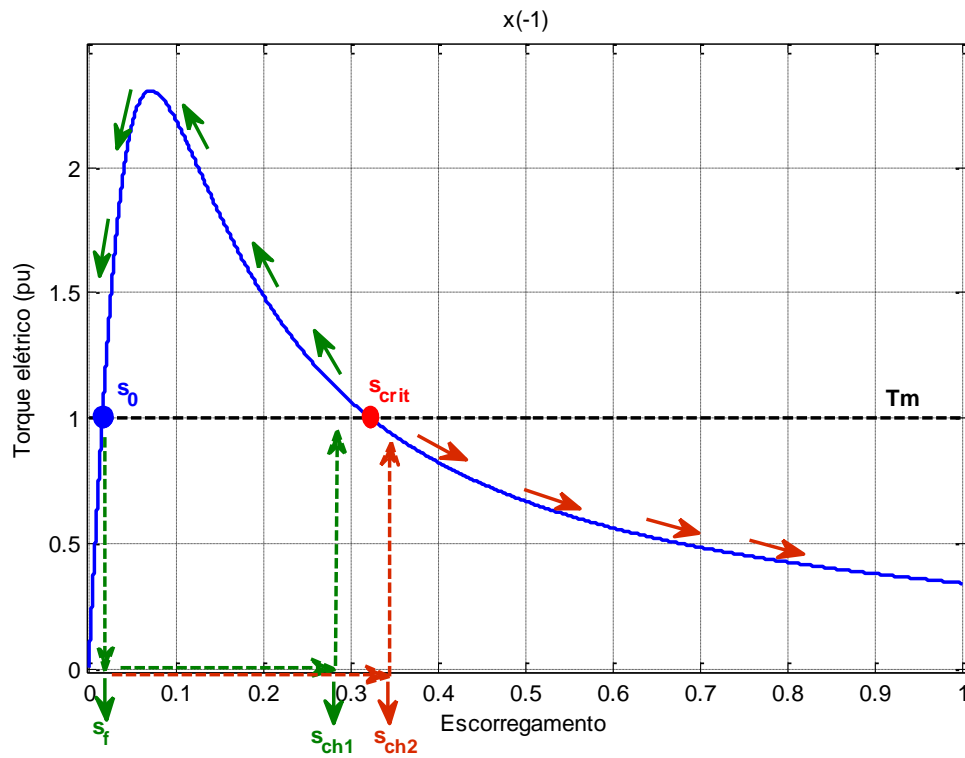
A estabilidade do gerador de indução pode ser associada a velocidade da máquina através da curva torque elétrico \times escorregamento (AKHMATOV, 2000; SAMUELSON; LINDAH, 2005), conforme mostra a Figura 12.

O escorregamento da máquina de indução é representado pela equação (1), sendo ω_r a velocidade angular do rotor e ω_s a velocidade angular do estator, tomadas em rad/s (KUNDUR, 1994; FITZGERALD et al., 2006).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1)$$

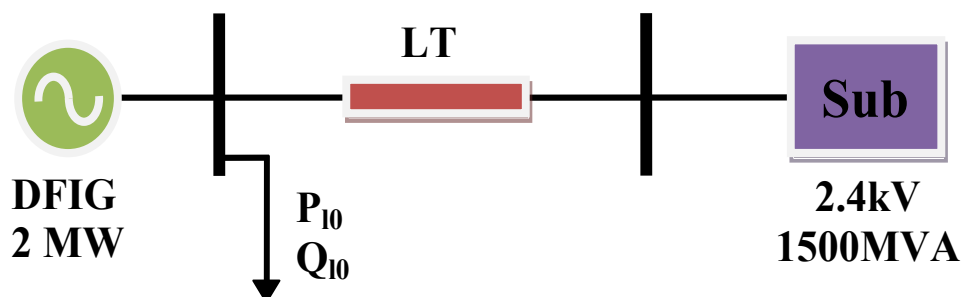
Nas interseções da curva de torque mecânico (T_m) com a curva do torque elétrico \times escorregamento dois pontos de equilíbrio para o sistema são obtidos, um estável (s_0) e o outro instável (s_{crit}). Desta forma o conceito de estabilidade fica definido no valor limite de escorregamento, chamado de escorregamento crítico (s_{crit}). Se o sistema é submetido a uma falta (s_f), e ela eliminada em s_{ch1} antes de atingir o valor do s_{crit} , o sistema evolui para o ponto de equilíbrio estável. Caso o escorregamento ultrapasse o valor do escorregamento crítico (s_{crit}) mesmo a falta sendo eliminada (s_{ch2}), o sistema perde a estabilidade, (GRILO et al., 2007; SALLES, 2009).

Figura 12 – Método da velocidade crítica por meio das curvas de Torque elétrico \times escorregamento.



Este estudo foi proposto para os SCIG's (GRILLO et al., 2007) e se expande aos DFIG's (SALLES, 2009). Esta seção se aplica neste trabalho para fins de sensibilidade do entendimento do desempenho do gerador de indução duplamente alimentado.

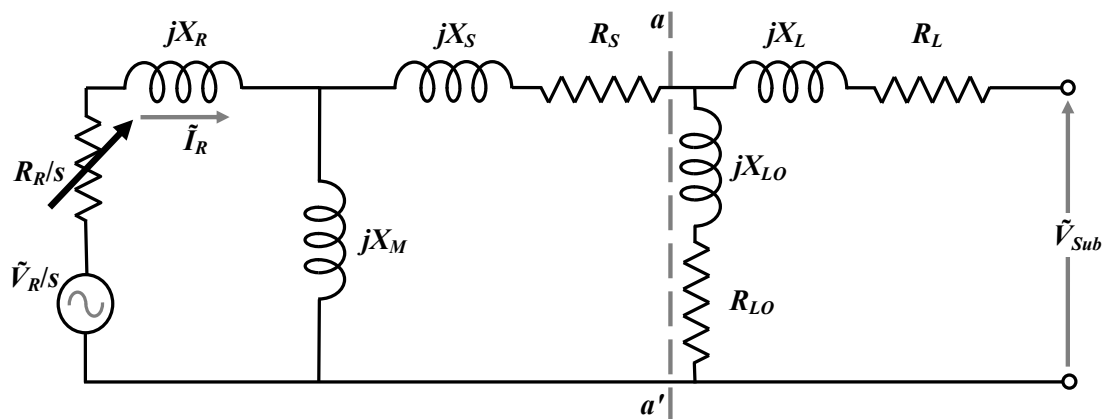
Figura 13 – DFIG versus sistema barra infinita.



O DFIG é uma máquina de indução com rotor do tipo bobinado com uma fonte de tensão conectada aos terminais do seu rotor (PEÇAS LOPES, 2004). Evidencia-se, que as grandezas do rotor do gerador estão referenciadas ao lado do estator da máquina. A Figura 13 representa um sistema teste o qual pode ser expresso pelo circuito equivalente mostrado na Figura 14, no qual será aplicada a primeira redução por Thévenin (KUNDUR, 1994), para o estudo da estabilidade do DFIG em regime permanente.

Tem-se que $\tilde{I}_R = i_{dR} + ji_{qR}$ é o fasor da corrente do rotor (pu), $\tilde{V}_R = v_{dr} + jv_{qr}$ é o fasor da tensão aplicada ao rotor da máquina (pu), $Z_S = R_S + jX_S$ é a impedância do estator (pu), jX_M é a reatância de magnetização (pu), $Z_R = R_R + jX_R$ é a impedância do, \tilde{V}_{Sub} é o fasor de tensão da subestação (pu); $Z_L = R_L + jX_L$ é a impedância equivalente que representa a linha de transmissão (pu) e $Z_{L0} = R_{L0} + jX_{L0}$ é a impedância equivalente que representa a carga (pu).

Figura 14 – Circuito equivalente do sistema completo.



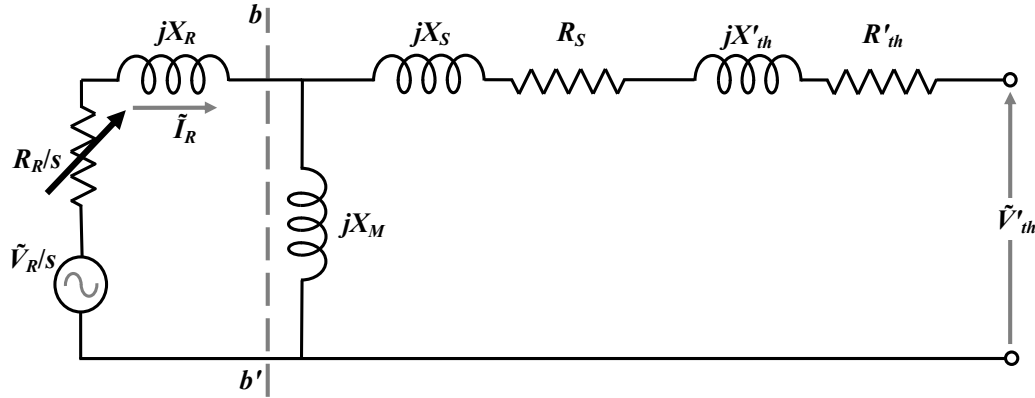
Fonte: Adaptado de Salles (2009).

Mediante uso do Teorema de Thévenin, o circuito apresentado na Figura 14 pode ser reduzido para o circuito da Figura 15. De fato, qualquer sistema mais complexo, incluindo cargas, desde que estas sejam representadas por um modelo de impedância constante, pode ser facilmente reduzido para o circuito apresentado na Figura 16. Para isso, calcula-se o equivalente de Thévenin à direita dos pontos a e a' dados na Figura 14, cujos parâmetros são dados, por:

$$Z'_{th} = R'_{th} + jX'_{th} = \frac{Z_{L0}Z_L}{Z_{L0} + Z_L} \quad (2)$$

$$\tilde{V}'_{th} = \tilde{V}_{Sub} \frac{Z_{L0}}{Z_{L0} + Z_L} \quad (3)$$

Figura 15 – Primeira etapa para redução de Thévenin do circuito completo.



Fonte: Adaptado de Salles (2009).

Para considerar o sistema completo, os parâmetros equivalentes da rede devem ser associados ao modelo da máquina, resultando no circuito apresentado na Figura 16. Neste circuito, se a impedância equivalente de Thévenin da rede for somada à impedância do estator, ele apresentará a mesma configuração do circuito ilustrado na Figura 16, o que torna possível a aplicação do método da velocidade crítica (s_{crit}) (SALLES, 2009). Aplicando mais um processo de redução sobre b e b' por Thévenin chega-se ao modelo equivalente do DFIG,

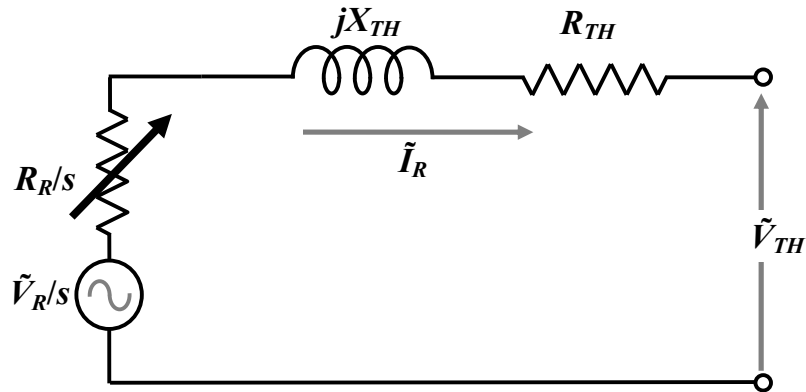
$$\tilde{V}_{TH} = \frac{jX_m}{(Z_s + Z'_{th}) + jX_m} \tilde{V}'_{th} \quad (4)$$

$\tilde{V}_{TH} = V_{dTH} + jV_{qTH}$ fasor da tensão equivalente de Thévenin (pu),

$$Z_{TH} = \frac{jX_m(Z_s + Z'_{th})}{(Z_s + Z'_{th}) + jX_m} + jX_r \quad (5)$$

$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH}$ impedância equivalente de Thévenin (pu),

Figura 16 – Equivalente do Thévenin do DFIG.



Fonte: Adaptado de Salles (2009).

A corrente do rotor é calculada a partir do circuito equivalente de Thévenin do DFIG,

$$\tilde{I}_R = \frac{\tilde{V}_{TH} - \frac{\tilde{V}_R}{s}}{(R_{TH} + jX_{TH}) + \frac{R_R}{s}} \quad (6)$$

O conjugado eletromagnético fornecido ao eixo do gerador é dado pela relação entre a potência no entreferro do gerador, a qual depende da corrente do rotor, e da velocidade do gerador, resultando em,

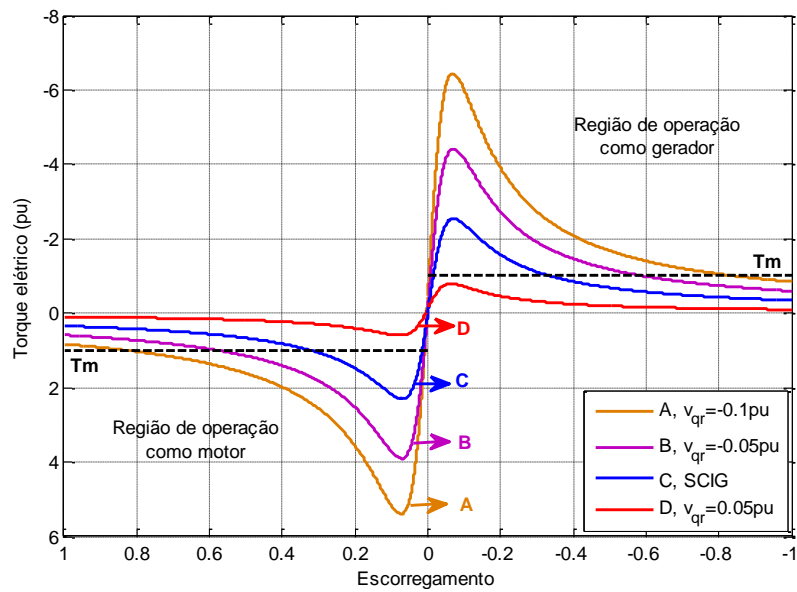
$$T_E = \left(|\tilde{I}_R|^2 \frac{R_r}{s} \right) + \frac{P_r}{s} \quad (7)$$

em que a potência do rotor é dada por,

$$P_r = \text{Re} \left(\frac{V_r}{s} I_R^* \right) \quad (8)$$

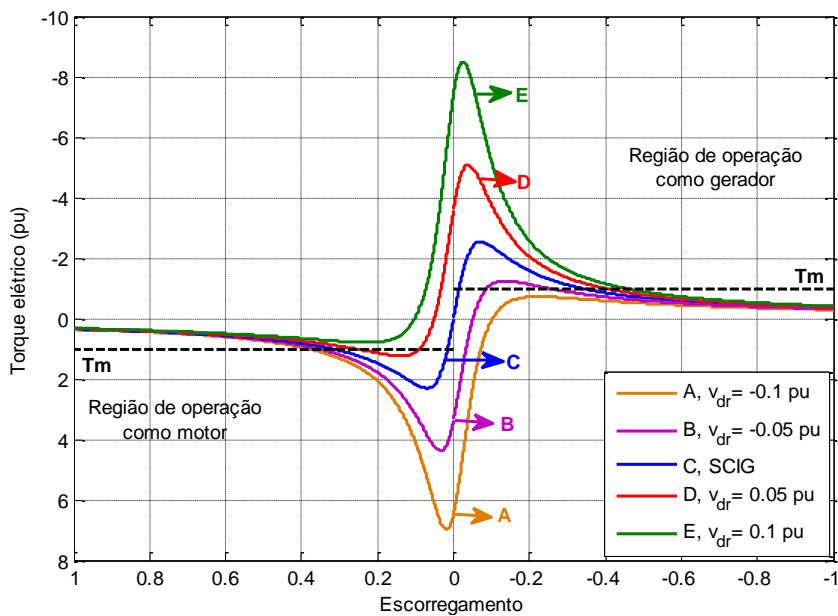
A partir dessa equação, é possível obter a relação de conjugado eletromagnético, com o escorregamento para diferentes parâmetros da máquina assíncrona, tais como as curvas apresentadas nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Curvas do Torque elétrico \times escorregamento do DFIG com a variação de v_{qr} e $v_{dr}=0$.



Fonte: Adaptado de SALLES (2009).

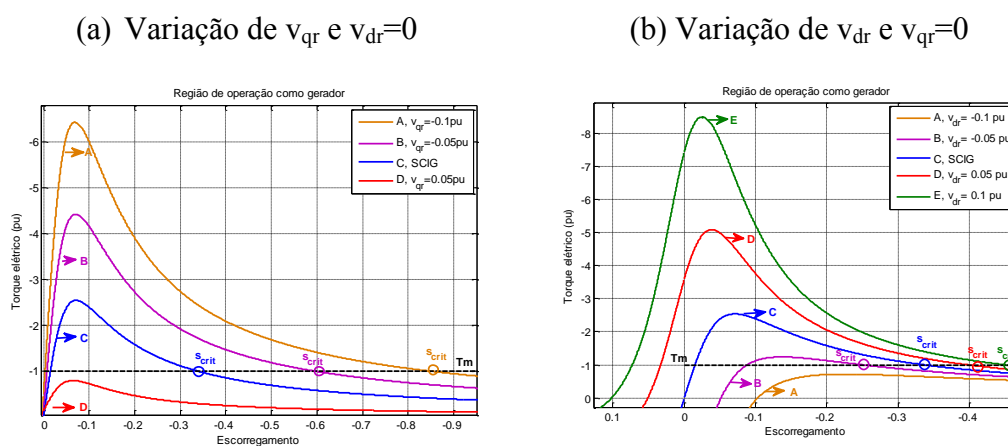
Figura 18 – Curvas do Torque elétrico \times escorregamento do DFIG com a variação de v_{dr} e $v_{qr}=0$.



Fonte: Adaptado de SALLES (2009).

Nota-se que os eixos coordenados nas figuras foram invertidos com o propósito de facilitar a visualização da região de operação do gerador. A convenção empregada neste trabalho tem as seguintes características: para valores negativos de conjugado eletromagnético e mecânico indicam operação como gerador; e valores positivos indicam operação como motor (FITZGERALD et al., 2006).

Figura 19 – Variação das grandezas (a) v_{qr} e (b) v_{dr} com vistas ao deslocamento do escorregamento crítico.



Para entender o conceito relacionado às grandezas de acesso ao controle do DFIG, enfatiza-se que, alterando-se os valores das tensões aplicadas ao enrolamento rotórico, permite-se tanto aumentar ou reduzir a estabilidade da máquina. Esta conclusão se dá pelo deslocamento do s_{crit} , situação observada nas Figuras 19 (a) e (b), sendo estas ampliações das Figuras 17 e 18 respectivamente.

As Figuras 18 e 19 (b) mostram o conjugado eletromagnético considerando-se a aplicação de diferentes valores da componente de eixo direto da tensão nos enrolamentos do rotor (v_{dr}). Com o aumento desta tensão, o valor de conjugado eletromagnético fornecido pela máquina, na região de operação como gerador aumenta, permitindo que o DFIG opere mesmo em regiões síncronas e subsíncronas, verificando-se que v_{dr} está associado ao controle de tensão da máquina. Uma vez garantido o suporte de reativo a este gerador a fim de manter o seu campo magnético induzido, ele passará a ter uma ampliação da margem de operação.

Verificando a condição de estabilidade do DFIG com a variação do valor de v_{dr} , e conforme se propicia maior suporte reativo ao gerador, consequentemente obtém-se melhores níveis de estabilidade, em virtude de maiores valores de escorregamento

crítico. No entanto, é importante ressaltar que há limitações físicas impostas pelos limites de operação das máquinas, que não podem ser ultrapassados.

De acordo com as Figuras 17 e 19 (a) é realizada a variação no valor da tensão do rotor v_{qr} . Destacando que com o aumento desta tensão negativa, tanto para a região de operação como motor, quanto na região como gerador, o conjugado eletromagnético máximo aumenta ao passo que uma tensão positiva diminui o módulo do conjugado eletromagnético máximo para ambas as regiões de operação (SALLES, 2009).

A aplicação de tensão no eixo em quadratura do rotor (v_{qr}) afeta o torque de resistência no rotor da máquina de modo que, ao aumentar o valor desta tensão incorre-se em maior risco de instabilidade (região de operação como gerador).

As curvas de conjugado eletromagnético do DFIG são importantes na análise de sua estabilidade, conforme verificado pelo estudo dos pontos de operação do gerador.

Analisando o impacto gerado na variação dos valores da tensão do rotor, nota-se uma diferença existente na trajetória entre as curvas com a variação de v_{dr} e v_{qr} . As curvas com modificação de v_{qr} todas passam pela origem, e possuem um maior deslocamento por parte do s_{crit} (Figura 19 (a)), sendo que com a variação de v_{dr} resulta no deslocamento das curvas em relação à origem, operação em regiões com $s \geq 0$ para gerador.

Igualando-se a expressão do conjugado eletromagnético (7) com a equação do torque mecânico (ANAYA-LARA et al., 2009), resulta em,

$$T_M = \frac{1}{s \cdot \omega_s} \cdot \left[|\tilde{I}_R|^2 R_R + R_e \left\{ \tilde{V}_R \text{conj}(\tilde{I}_R) \right\} \right] \quad (9)$$

Substituindo a equação da corrente (6) na equação do T_M (9), obtém-se uma equação em função do escorregamento da máquina, na forma de uma equação de segundo grau, cujos parâmetros são (SALLES, 2009)

$$a = T_M \omega_s (R_{TH}^2 + X_{TH}^2) \quad (10)$$

$$b = 2\omega_s T_M R_{TH} R_R - R_{TH} K_1 - X_{TH} K_2 - R_R \left| \tilde{V}_{TH} \right|^2 \quad (11)$$

$$c = T_M \omega_S R_R^2 + R_{TH} |\tilde{V}_R|^2 + R_R K_1 \quad (12)$$

Em que

$$K_1 = V_{dr} V_{dTTH} + V_{qr} V_{qTTH} \quad (13)$$

$$K_2 = V_{dr} V_{qTTH} - V_{qr} V_{dTTH} \quad (14)$$

Para o caso da máquina operando como gerador ($T_M < 0$) as soluções da equação são dois valores de escorregamento, calculados por (SALLES, 2009):

$$s_0 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (15)$$

$$s_{crit} = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (16)$$

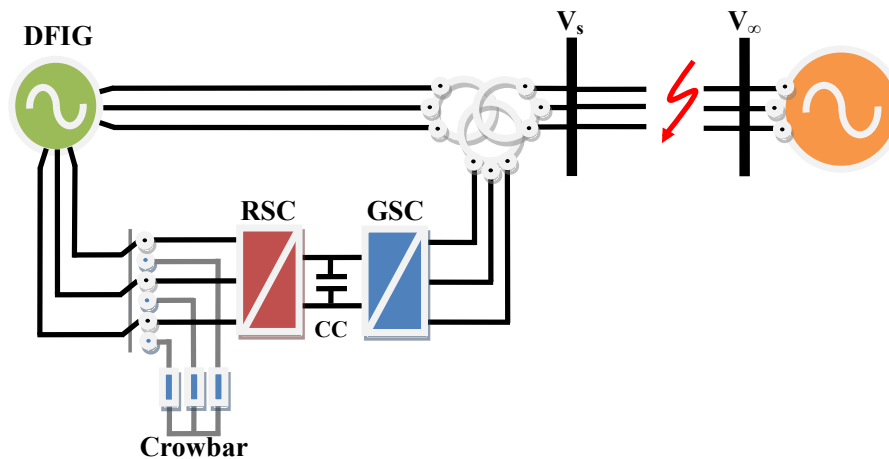
Em que $\Delta = b^2 - 4ac$.

De acordo com Grilo (2007) e Salles (2009), caso a velocidade da máquina ultrapasse o valor do s_{crit} a velocidade da máquina evolui exponencialmente para instabilidade.

3.2 Modelagem do DFIG para o estudo da estabilidade transitória

A Figura 20 ilustra um gerador de indução duplamente alimentado conectado a um grande sistema representado por uma barra infinita por meio de uma linha de transmissão.

Figura 20 – DFIG versus barra infinita.



Fonte: Adaptado de Almeida e Peças Lopes (2004; 2006).

3.2.1 Modelo matemático do DFIG

A modelagem da máquina de indução duplamente alimentada tem por base o modelo da máquina de indução em gaiola de esquilo (SCIG) (ANAYA-LARA et al., 2009; EKANAYAKE et al., 2003b; FEIJÓO et al., 2000). A diferença básica entre elas consiste no tratamento matemático das equações dos circuitos do rotor que são, neste caso, diferentes de zero, uma vez que o rotor não se encontra curto-circuitado como é o caso do SCIG (AKHMATOV, 2003a; SLOWWTEG, 2003a; EKANAYAKE, 2003b).

É importante observar que o modelo matemático adotado nesta seção determina que o conversor eletrônico ligado no rotor do DFIG seja modelado como uma “fonte de tensão controlada”. A razão disto está nas componentes v_{dr} e v_{qr} presentes nas equações da tensão interna do eixo direto (e'_d) e quadratura (e'_q) do gerador (ANAYA-LARA et al., 2009). O módulo da tensão interna é dado por $E' = \sqrt{(e'_d)^2 + (e'_q)^2}$, e suas componentes são regidas por,

$$\dot{e}'_d = \frac{1}{T'_o} \left[-e'_d + (X_{ss} - X'_s) i_{qs} \right] + s \omega_s e'_q - \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \quad (17)$$

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_o} \left[-e'_q - (X_{ss} - X'_s) i_{ds} \right] - s \omega_s e'_d + \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} \quad (18)$$

sendo X'_s a reatância transitória da máquina, T'_0 a constante de tempo transitória de circuito aberto, s o escorregamento do rotor, ω_s a velocidade angular do estator (velocidade nominal) e X_{ss} a reatância de dispersão do estator somada à reatância de acoplamento estator-rotor, L_m a indutância mútua e L_{rr} a indutância mútua mais a do rotor, e as correntes do estator são dadas pelo eixo direto (i_{ds}) e quadratura (i_{qs}) (AKHMATOV, 2003a).

A equação de oscilação é dada por (19) considerando o modelo de massa único (lumped mass) (EKANAYAKE; JENKINS, 2004; SALMAN; TEO, 2003), que acopla a inércia da turbina eólica com o gerador, detalhes em (AKHMATOV, 2003a; NUNES, 2003; ALMEIDA, 2004).

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H}(P_m - P_e) \quad (19)$$

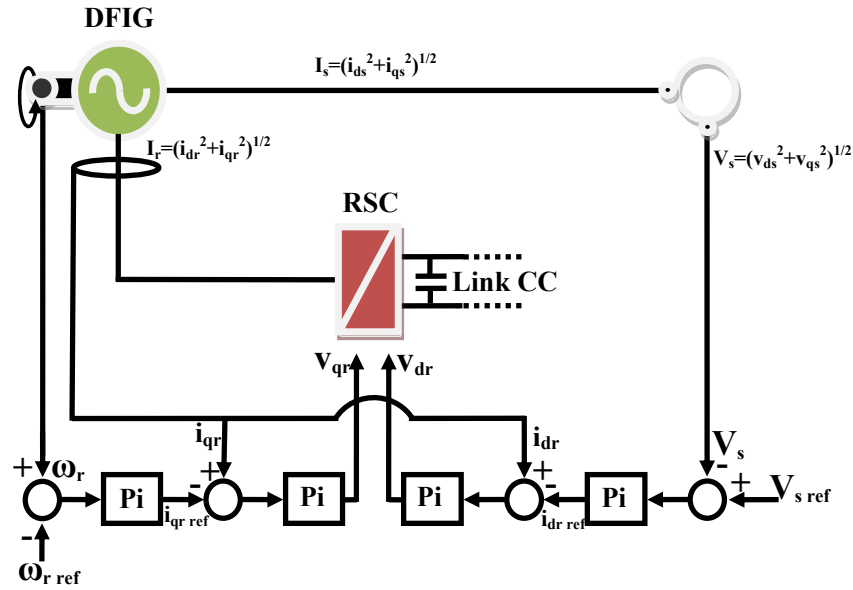
Naturalmente, o sistema encontra-se em equilíbrio quando $\dot{e}'_d = \dot{e}'_q = \dot{\omega}_r = 0$, o que determina os valores de regime permanente das variáveis de estado, incluindo a óbvia igualdade $P_m = P_e$. A variação de e'_d e e'_q durante um período transitório implica na mudança do módulo da tensão E' , esta variação dá origem ao surgimento ao ângulo β' como mostra a Figura 21.

A potência elétrica entregue pela máquina pode ser escrita desta forma:

$$P_e = \frac{E'V_\infty}{X'_s + X_e} \text{sen}(\delta - \beta') \quad (20)$$

As grandezas apresentadas nas equações são definidas: V_∞ é a tensão na barra infinita, X_e a reatância equivalente do sistema de transmissão, a qual inclui o transformador, e θ é o ângulo de defasagem entre a tensão interna E' e a tensão da barra infinita. Porém, é importante observar que este ângulo não tem o mesmo significado que o ângulo de carga (normalmente designado por δ) das máquinas síncronas. O ângulo θ empregado aqui, diferentemente do δ da máquina síncrona, não tem dinâmica própria e, portanto, não se qualifica como variável de estado.

Figura 22 – DFIG modelado com o conversor fonte de tensão ideal, com controle Proporcional-Integral (Pi).



Fonte: Adaptado de Almeida e Peças Lopes (2004).

Neste modelo considera-se apenas a potência reativa fornecida pelo estator da máquina, ou seja, a potência reativa fornecida pelo conversor ligado à rede (GSC) será igual a zero $Q_{gsc}=0$, operando com fator de potência unitário (NUNES et al., 2003).

O funcionamento do conversor RSC é equivalente ao de uma fonte de tensão controlada, ligada ao rotor da máquina.

As correntes de eixo direto e de eixo em quadratura do estator são dadas pelas equações (21) e (22), onde o fasor da corrente do estator é $I_s = \sqrt{(i_{ds})^2 + (i_{qs})^2}$,

$$i_{ds} = \frac{e'_q - V_\infty \cos\theta}{X_e + X'_s} \quad (21)$$

$$i_{qs} = \frac{V_\infty \sin\theta - e'_d}{X_e + X'_s} \quad (22)$$

A tensão do estator do DFIG é representada por v_{ds} e v_{qs} , e $V_s = \sqrt{(v_{ds})^2 + (v_{qs})^2}$

$$v_{ds} = e'_d - R_s i_{ds} + X'_s i_{qs} \quad (23)$$

$$v_{qs} = e'_q - R_s i_{qs} - X'_s i_{ds} \quad (24)$$

As equações da corrente do rotor de eixo direto e quadratura do DFIG são dadas por (i_{dr}) e (i_{qr}) , sendo que $I_r = \sqrt{(i_{dr})^2 + (i_{qr})^2}$,

$$i_{dr} = \frac{L_m}{L_{rr}} i_{ds} + \frac{e'_q}{L_m} \quad (25)$$

$$i_{qr} = \frac{L_m}{L_{rr}} i_{qs} - \frac{e'_d}{L_m} \quad (26)$$

As equações a seguir evidenciam as potências ativas e reativas do estator e do rotor,

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (27)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (28)$$

$$P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (29)$$

$$Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \quad (30)$$

As potências, ativa (P_{grid}) e reativa (Q_{grid}) do DFIG fornecida à rede são dadas pelas equações (31) e (32), considerando apenas o modelo do conversor RSC conectado ao gerador,

$$P_{grid} = P_s + P_{gsc} \quad (31)$$

$$Q_{grid} = Q_s + Q_{gsc} \quad (32)$$

$$P_{gsc} = P_r \quad (33)$$

$$Q_{gsc} = 0 \quad (34)$$

Uma das vantagens do DFIG está no possível fornecimento de energia elétrica para a rede elétrica com a máquina trabalhando abaixo, acima e, inclusive, na velocidade síncrona (ANAYA-LARA et al., 2009), condição a qual não é possível para as máquinas de indução do tipo gaiola de esquilo.

3.2.3 Modelo completo do DFIG versus barra infinita

O esquema completo dos controladores do gerador de indução duplamente alimentado com RSC e GSC são evidenciados na Figura 23, para o desenvolvimento desta modelagem, basta considerar as equações já apresentadas nas seções anteriores sendo elas: e'_d , e'_q , ω_r , s , i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} , P_s , Q_s , P_r , Q_r .

As equações do modelo que expressam a corrente do GSC são dadas por

$$\frac{di_{dc}}{dt} = \frac{1}{X_c} (v_{ds} - v_{dc} - R_c i_{dc} - i_{qc} X_c \omega_s) \quad (35)$$

$$\frac{di_{qc}}{dt} = \frac{1}{X_c} (v_{qs} - v_{qc} - R_c i_{qc} + i_{dc} X_c \omega_s) \quad (36)$$

Sendo R_c a resistência do filtro e X_c a reatância do filtro

$$P_c = v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} = v_{ds} i_{dc} + v_{qs} i_{qc} \quad (37)$$

$$Q_c = v_{qc} i_{dc} - v_{dc} i_{qc} = v_{qs} i_{dc} - v_{ds} i_{qc} \quad (38)$$

A potência ativa injetada ou absorvida pelo rotor da máquina é trocada com a rede elétrica a partir do conversor GSC dependendo de um correto controle da tensão do link CC, uma vez que a energia entre ambos os conversores, circula pelo próprio elo de corrente contínua. Desprezando-se as perdas no link CC e os harmônicos das frequências de chaveamento das correntes de saída do conversor GSC (JENKINS et al., 2000), pode-se considerar que a energia armazenada no capacitor no “link” CC é dada em Joule por,

$$E_{cc} = \frac{1}{2} C_{cc} v_{cc}^2 \quad (39)$$

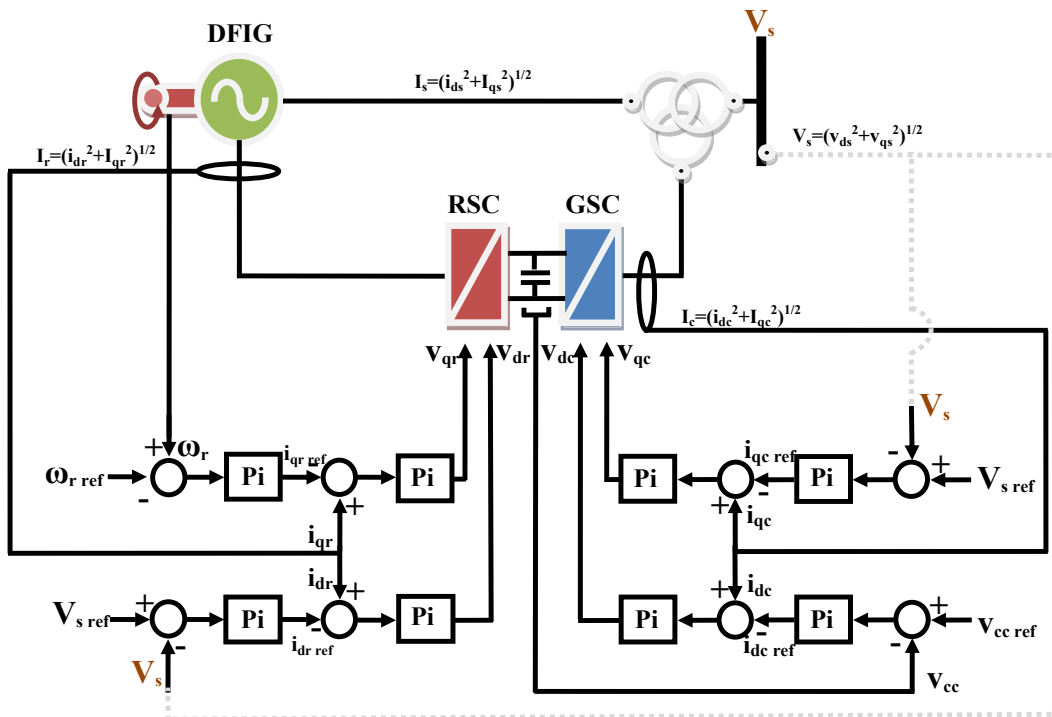
Onde, v_{cc} é a tensão e C_{cc} é a capacitância do link CC, e derivando E_{cc}

$$\dot{E}_{cc} = \frac{1}{2} C_{cc} \dot{v}_{cc}^2 = P_c - P_r + R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) \quad (40)$$

Logo a equação diferencial que representa a dinâmica do link CC é representada por

$$\dot{v}_{cc} = \frac{[P_c - P_r + R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2)]}{v_{cc} C_{cc}} \quad (41)$$

Figura 23 – DFIG com conversores RSC e GSC.



Fonte: Adaptado de Akhmatov (2003).

As potências são

$$P_c = v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} = v_{ds} i_{dc} + v_{qs} i_{qc} \quad (42)$$

$$Q_c = v_{qc} i_{dc} - v_{dc} i_{qc} = v_{qs} i_{dc} - v_{ds} i_{qc} \quad (43)$$

$$P_{grid} = P_s + P_c \quad (44)$$

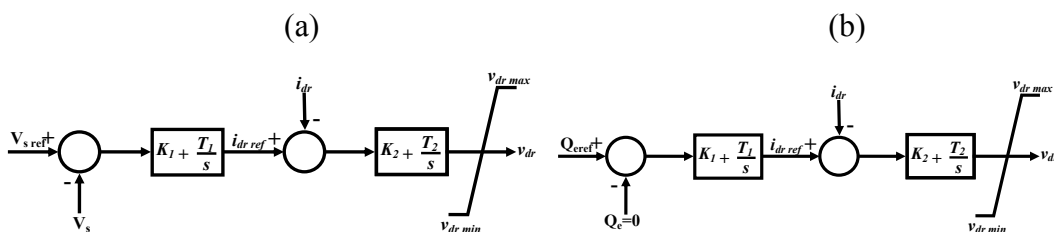
$$Q_{grid} = Q_s + Q_c \quad (45)$$

3.3 Modelos de controle do RSC e do GSC

Neste estudo o sistema de controle foi descrito nas Seções anteriores, conforme mostram as Figuras 22 e 23, sendo que uma malha de controle tem por função controlar a velocidade angular/potência ativa gerando o sinal por meio da grandeza v_{qr} , e outra malha de controle controla a tensão terminal/potência reativa gerando um sinal através de v_{dr} (PEÇAS LOPES, 2004; ALMEIDA, 2006).

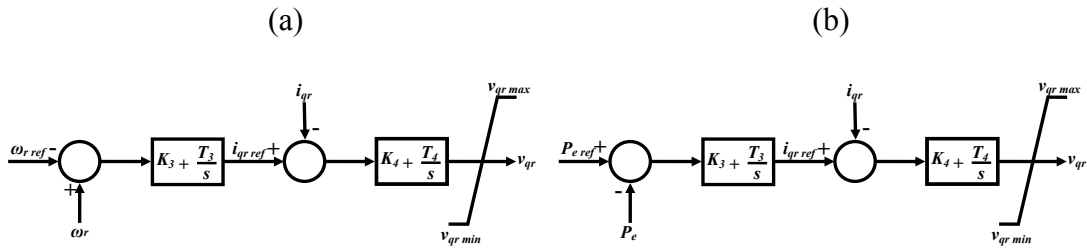
Os sinais de entrada para os controladores são abordados nesta etapa do trabalho, sendo que o conversor RSC é equivalente a uma fonte de tensão controlada, ligada sobre o rotor da máquina, podendo tanto controlar a tensão terminal da máquina e consequentemente a potência reativa gerando sinal v_{dr} , como também a velocidade angular e por sequência a potência ativa produzida gerando o sinal de v_{qr} . A malha de controle do RSC está representada nas Figuras 24 e 25 (PENA, 2002; PÖLLER, 2003).

Figura 24 – Malha de controle da (a) tensão terminal (b) potência reativa através de v_{dr} .



Fonte: Adaptado de Akhmatov (2003).

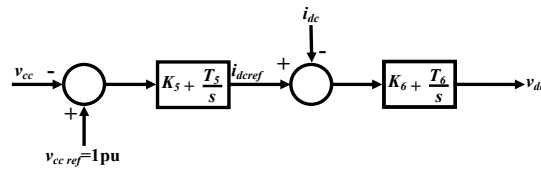
Figura 25 – Malha do controle da (a) velocidade do rotor e (b) potência ativa através de v_{qr} .



Fonte: Adaptado de Akhmatov (2003).

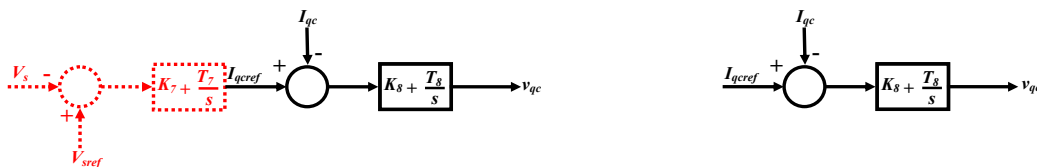
O conversor GSC se encontra interligado à rede e montado em cascata com o conversor RSC, cuja finalidade está em manter a tensão no barramento CC sempre constante e o controle da potência ativa que o rotor troca com a rede através da grandeza v_{dc} , este controlador também permite o controle de fluxo de potência reativa trocada com a rede elétrica proporcionando a semelhança de um STATCOM através da grandeza v_{qc} (AKHMATOV, 2003a; PENA, 1996; PÖLLER, 2003).

Figura 26 – Malha do controle da tensão do link CC via v_{dc} .



Fonte: Adaptado de Akhmatov (2003).

Figura 27 – Controle da tensão terminal via v_{qc} .



Fonte: Adaptado de Akhmatov (2003).

3.4 Sistema de proteção Crowbar

O Crowbar é um circuito acionado via tiristores o qual insere uma resistência R_{crow} , cuja finalidade é limitar a corrente no rotor da máquina, e assim atuar como um sistema de proteção que tem por finalidade evitar danos de sobrecorrente aos dispositivos eletrônicos do RSC (ABAD et al, 2011; ANAYA-LARA et al, 2009; NUNES et al, 2003). Concomitantemente, a introdução desta resistência afeta a constante de tempo transitória de circuito aberto, como se observa na equação (46).

$$T'_0 = \frac{L_{rr}}{\omega_0(R_r + R_{crow})} \quad (46)$$

Durante a operação, o conversor do lado do rotor pode ser desconectado (HANSEN; HANSEN, 2007) ou pode ser mantido conectado (MORREN; HAAN, 2005) para evitar perder o controle sobre a máquina.

4 DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO POR MEIO DO MONITORAMENTO DA TENSÃO INTERNA

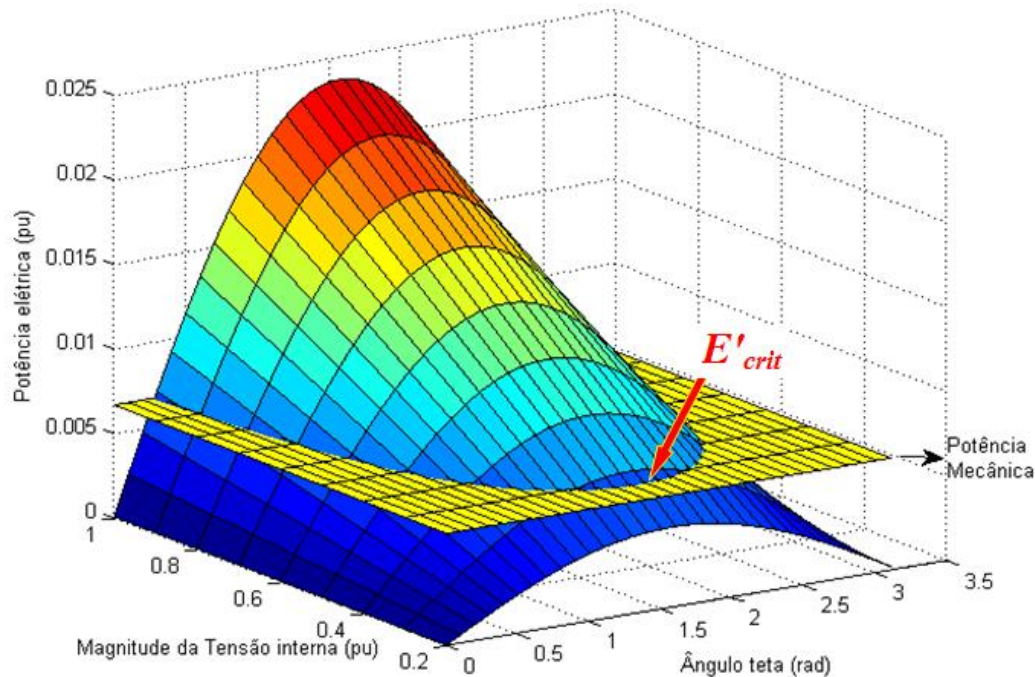
O critério da tensão interna tem como estratégia a investigação da estabilidade dos geradores de indução com base no monitoramento da tensão interna E' . Esta metodologia se mostrou bastante atrativa no estudo da estabilidade dos geradores assíncronos em gaiola de esquilo, ensejando que com os devidos ajustes o critério da tensão interna esteja apto a ser utilizado nos geradores de indução duplamente alimentado permitindo novos horizontes para o entendimento real da instabilidade deste tipo de gerador.

4.1 Estudo da estabilidade dos geradores de indução através da tensão interna E'

Nota-se que a tensão interna E' , uma vez que tem suas componentes governadas pelas equações \dot{e}'_d (17) e \dot{e}'_q (18), não é constante. A equação da potência elétrica em função das variáveis E' e θ determina a superfície mostrada na Figura 28, onde se sobrepõe um plano representando a potência mecânica (constante).

A interseção entre as duas superfícies é o lugar dos possíveis pontos de operação e o seu vértice determina a mínima tensão interna como condição necessária para a existência de equilíbrio. Dito de outro modo, a tensão interna E' avaliada no vértice da curva, determina a capacidade de transmissão justamente igual à potência entregue ao eixo da máquina e, se a tensão interna da máquina apresentar valor inferior a este, não há possibilidade de existência do equilíbrio. Neste caso, como decorrência da deterioração da tensão interna originada da desmagnetização da máquina o sistema de transmissão perde a capacidade de fornecimento de potência. Nesta situação a potência mecânica inserida no eixo do rotor da máquina é aplicada para acelerar o rotor, e, no extremo, quando a tensão interna se anula, a totalidade da potência mecânica é convertida em potência acelerante. O valor da tensão interna avaliado no vértice da curva P_e versus θ que tangencia a superfície da potência mecânica é definido como tensão interna crítica (E'_{crit}).

Figura 28 – As grandezas: tensão interna E' , ângulo θ e potência elétrica, definem E'_{crit} , valor o qual se encontra no vértice da parábola, local determinado pela interseção das duas superfícies.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Têm-se então três situações de potência elétrica a ser transmitida, com $E' > E'_{crit}$, $E' = E'_{crit}$ e $E' < E'_{crit}$. No primeiro caso, com $E' > E'_{crit}$, a capacidade de transmissão é superior à potência mecânica aplicada no eixo da máquina, portanto apresentando possibilidade de operação estável, caracterizada pela existência de torque restaurativo do equilíbrio. No segundo caso, a capacidade de transmissão tangencia o valor da potência aplicada ao eixo, caracterizando a situação limite de estabilidade. A terceira situação, com $E' < E'_{crit}$ a capacidade de transmissão é inferior à potência mecânica aplicada no eixo, e, neste caso, é impossível que toda a potência injetada no eixo da máquina seja transmitida. Como consequência, não existe ponto de equilíbrio e uma parcela da potência mecânica é utilizada para acelerar o rotor, que instabiliza, com crescimento monotônico da velocidade.

4.2 Análise da tensão interna crítica do DFIG versus barra infinita

Considerado o exposto, determina-se o valor crítico da tensão interna para posterior uso como um apontador de criticidade durante o transitório da máquina

assíncrona.

A expressão que define a tensão interna crítica (E'_{crit}), é obtida a partir da equação da máxima potência transferida pelo gerador

$$P_{e\max} = \frac{E'V_{\infty}}{X_{total}} \quad (47)$$

Sendo que $X_{total} = X'_s + X_e$, estabelece a expressão para a tensão interna crítica,

$$E'_{crit} = \frac{P_m X_{total}}{V_{\infty}} \quad (48)$$

No entanto, para aplicar o critério da tensão interna algumas considerações sobre a dinâmica da tensão devem ser levadas em conta. Como evidenciado nas equações de \dot{e}'_d (17) e \dot{e}'_q (18), a tensão interna E' tem dinâmica governada em parte sob dependência da constante de tempo T'_0 e portanto não admite variações bruscas. Assim, após a eliminação da falta, mesmo nos casos evidentemente estáveis, apresenta um necessário intervalo de tempo de regeneração. Se o critério da tensão E' for aplicado neste intervalo de tempo, pode conduzir a um resultado errôneo, apontando instabilidade quando o comportamento do sistema ainda não se definiu. Visando evitar este tipo de erro, considera-se um intervalo de tempo após cessar a perturbação (no caso, eliminar a falta) antes de aplicar o método da tensão E' .

Observando resultados de simulação, considera-se a aplicação do critério da mínima tensão interna após transcorrido intervalo equivalente a $T'_0/3$ a partir da eliminação da falta, como razoável. Este instante de tempo é definido como Partida de Aplicação do Critério da Mínima Tensão Interna (PACMTI).

A tensão E' não é acessível para a medição direta, no entanto, ela pode ser facilmente obtida a partir das grandezas medidas no terminal da máquina, como mostra a Figura 29, permitindo aplicar o critério de estabilidade proposto em situações em tempo real.

Têm-se então as seguintes medidas: a tensão (V_s) e a corrente (I_t) nos terminais gerador e a potência reativa (Q_e) consumida pela máquina do sistema. Assim,

considerando a potência reativa determinada por

$$Q_e = V_s I_t \text{sen } \varphi \quad (49)$$

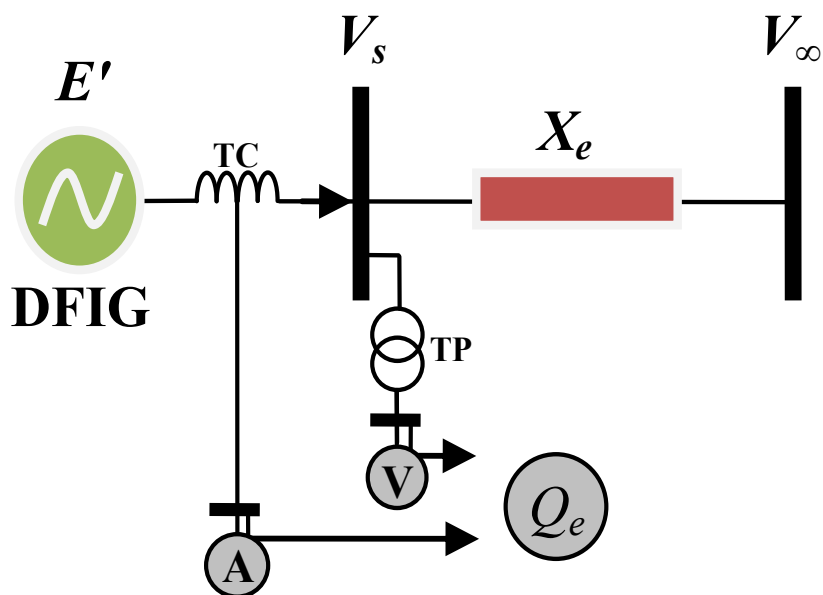
obtem-se

$$\varphi = \arcsen \left(\frac{Q_e}{V_s I_t} \right) \quad (50)$$

O fasor da tensão interna é determinada por,

$$\tilde{E}' = \tilde{V}_s + jX'_s I_t \underline{\varphi} \quad (51)$$

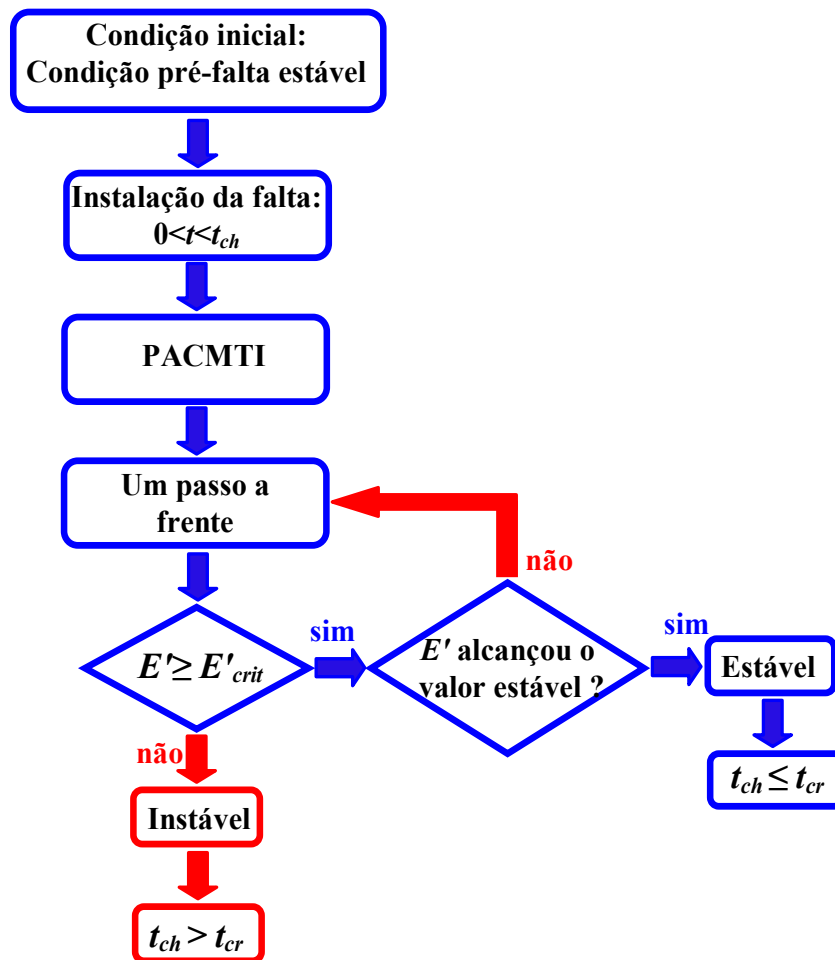
Figura 29 – DFIG versus barra infinita com os instrumentos de medição TP e TC.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Convém destacar que o fluxograma apresentado na Figura 30 evidencia a estratégia de operação do critério da tensão interna.

Figura 30 – Algoritmo de operação do método da tensão interna.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O procedimento de análise de estabilidade consiste em, durante um transitório, monitorar a tensão interna E' , comparando com o valor crítico E'_{crit} , determinando precisamente o instante em que o sistema perde a capacidade de estabilizar quando E' fica menor que E'_{crit} .

4.3 A causa da perda de capacidade de transmissão do gerador DFIG

De acordo com a equação (47), pode-se observar que a capacidade de transmissão é afetada apenas por uma quantidade variável, que é a tensão interna E' . Assim, durante uma perturbação a equação mecânica dá origem a mudanças de velocidade sendo uma consequência da variação da tensão interna.

De acordo com o referido, se o sistema é submetido a uma perturbação transitória a qual possa levar o sistema a instabilidade, isto é devido à redução ou

possível anulação total da capacidade de transmissão de energia, devido à degeneração de tensão interna. É então evidente que a estabilidade ou a instabilidade da máquina é, em primeiro lugar, devido à tensão interna.

4.4 Proposta de um método de controle para melhoria nas forças restaurativas do equilíbrio do DFIG durante um período transitório via critério da tensão interna

O controle corretivo on-line de capacidade de transmissão do sistema baseia-se em medidas variáveis do sistema. O controle consiste em atuar na grandeza com maior participação sobre a magnitude da tensão interna da máquina. De forma geral, durante os transitórios provocados por curtos-circuitos trifásicos, as máquinas próximas da falta apresentam uma deterioração da tensão interna e o sistema perde a capacidade de transmissão de potência. Desse modo o controle tem por objetivo:

- Evitar que a máquina opere com tensão interna abaixo do valor crítico;
- Proporcionar o aumento nas forças restaurativas de equilíbrio do sistema.

É possível constatar que, ao longo de um período transitório do sistema, a perda da capacidade de transmissão do sistema se dá pela deterioração da tensão interna. A tensão E' é composta por e'_d e e'_q , cada uma destas grandezas está referida a um tipo de controle da máquina, sendo: e'_d está relacionado ao controle de potência ativa, enquanto e'_q está relacionado ao controle de tensão.

O desempenho dinâmico da tensão E' é afetado principalmente pela dinâmica do laço reativo, o que significa uma maior sensibilidade a variações de e'_q . Uma vez que este gerador mantenha seu campo magnético induzido por meio do controle de e'_q , a capacidade de transmissão se manterá superior a potência mecânica inserida no eixo do rotor da máquina.

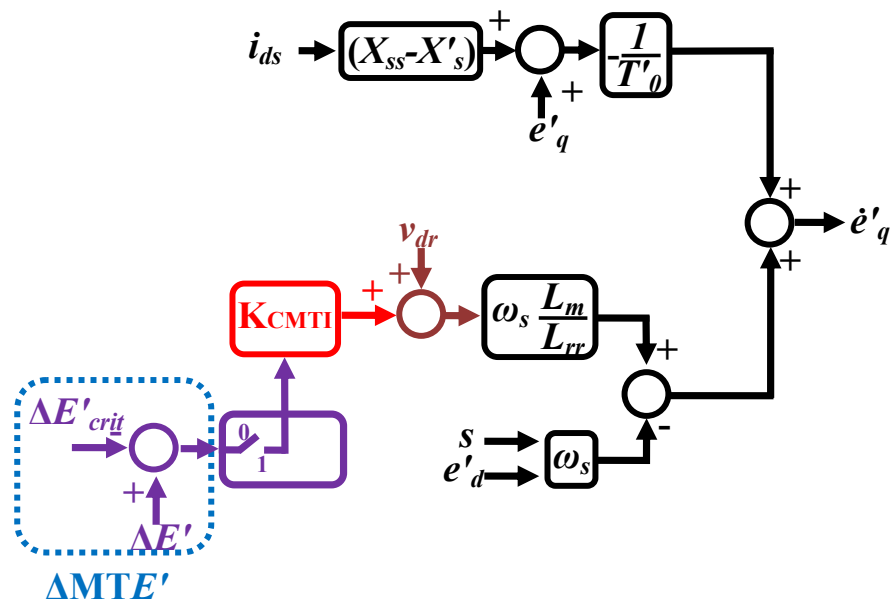
Sendo assim, é proposta uma filosofia de controle a qual se baseia no ajuste da magnitude da tensão interna E' (CMTI – Controle da Magnitude da Tensão Interna), através do ajuste da grandeza e'_q , devido esta parcela estar associada a estabilidade de tensão da máquina. Uma vez controlando adequadamente a grandeza cujo desempenho efetivamente pode implicar na instabilidade da máquina, o gerador é dotado com maiores forças restaurativas de equilíbrio quando submetido a um transitório. Este controle tem por função manter a tensão interna superior ao valor de E'_{crit} .

Desta forma, ao longo do movimento do sistema, quando a margem de tensão vem a ser igual e/ou inferior a 40% do seu valor original, um novo controle é acionado nos circuitos do rotor como mostra a Figura 31, significando uma nova entrada na equação que governa e'_q com ganho K_{CMTI} , tal que,

- em regime permanente: $K_{CMTI} = 0$ (chave na posição 0);
- em regime transitório, a partir do instante em que MTE' cai abaixo de 40% e até que se estabeleça um regime permanente: $K_{CMTI} \neq 0$ (chave na posição 1).

Destacando, em termos de capacidade de transmissão a partir do momento em que o controle passa a ser considerado no sistema, o DFIG vem a possuir maiores forças restaurativas de equilíbrio quando comparado com o DFIG sem o controle adicional.

Figura 31 – Controle para contribuição no aumento das forças restaurativas de equilíbrio do DFIG durante um período transitório por meio do critério da tensão interna.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.5 Região de capacidade de transmissão de potência positiva dos geradores assíncronos e aplicação do CMTI (Controle da Magnitude da Tensão Interna)

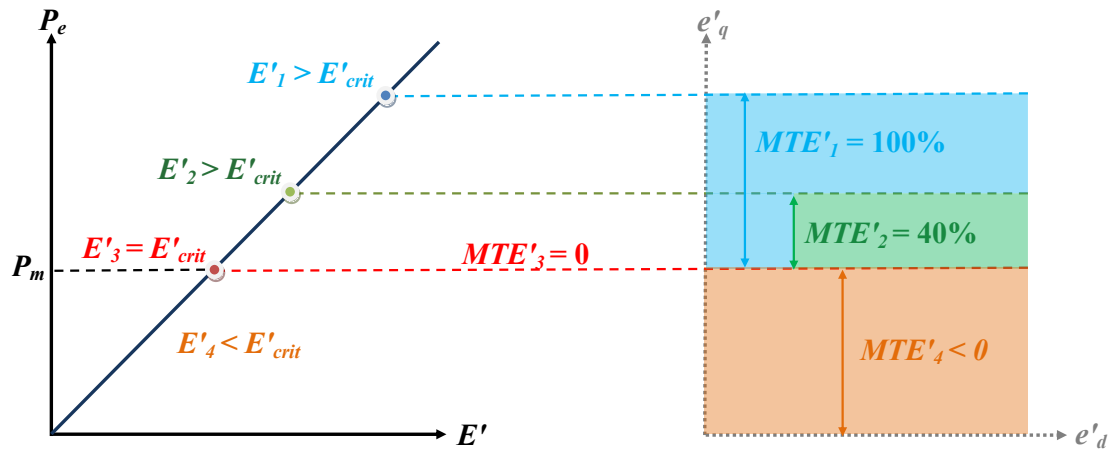
Para contornar a eventual causa de perda de capacidade de transmissão de potência do gerador aplica-se o CMTI, e uma questão emerge sobre qual o momento para se aplicar o controle adicional (CMTI) e que contribua ao sistema acrescentando as forças restaurativas de equilíbrio.

A Figura 32 evidencia o comportamento do gerador de indução e da tensão interna em diversas condições de operação, como segue $E'_1 > E'_{crit}$, $E'_2 > E'_{crit}$, $E'_3 = E'_{crit}$, $E'_4 < E'_{crit}$. Define-se margem de tensão E' (MTE') como a diferença entre a magnitude da tensão E' e a tensão interna crítica E'_{crit} . Esta medida é empregada na implementação do CMTI observando suas variações obtidas como a diferença da variação da tensão interna e da variação do limite crítico ($\Delta MTE' = \Delta E' - \Delta E'_{crit}$). Quando esta margem é reduzida, indica que a capacidade de transmissão está sendo reduzida, seja porque a tensão interna está em processo de deterioração ou o sistema de transmissão sofre um enfraquecimento, com origem em algum tipo de perturbação no sistema. Estima-se que, quando esta margem for reduzida em 60% em relação ao seu valor de regime permanente, o sistema encontra-se vulnerável e então o controle CMTI (região esverdeada da Figura 32) é acionado, proporcionando maiores forças restaurativas de equilíbrio ao sistema, fazendo com que a tensão E' não opere abaixo do E'_{crit} após o PACMTI. Na região em laranja o sistema evolui para instabilidade por ser uma região com forças restaurativas insuficientes para assegurar o equilíbrio.

Na situação de $E'_1 > E'_{crit}$, têm-se que o sistema é caracterizado como estável, por ser dotado de forças restaurativas de equilíbrio, note que a margem de tensão interna está em seu patamar de 100%, e a tensão interna opera na região de capacidade de transmissão positiva (RCTP).

Na segunda situação, com $E'_2 > E'_{crit}$, a tensão interna está decrescendo motivada por alguma perturbação, a MTE'_2 foi reduzida em 60% do seu valor inicial, e diante desta condição o sistema com a DFIG está perdendo sua capacidade de transmissão. Detectada a eventualidade, o controle CMTI é acionado, com a função de proporcionar que o DFIG deixe de operar na região de perda de capacidade de transmissão de potência.

Figura 32 – Margem de tensão interna através do método da tensão interna.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Se $E'_3 = E'_{crit}$, a tensão interna tangencia o valor crítico de estabilidade do sistema, esta é a situação limite da região de capacidade de transmissão de potência, a margem de tensão E'_3 é anulada e o controle CMTI é acionado.

Considerando $E'_4 < E'_{crit}$, a margem da tensão E'_4 tornou-se negativa, e, caso a tensão interna esteja operando nesta região, o sistema perde a capacidade de transmissão de potência em virtude da deterioração da tensão interna e a potência mecânica inserida do eixo do rotor da máquina passa a superar a capacidade de transmissão de potência.

Portanto, com base neste contexto, destaca-se a relação da estabilidade e instabilidade dos geradores de indução com a capacidade de transmissão de potência. Nota-se que os possíveis problemas de instabilidade dos geradores de indução podem ser evitados com a aplicação do controle CMTI, fazendo com que a magnitude da tensão interna permaneça em valores acima do crítico.

5 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA E CONTROLE DA TENSÃO INTERNA VIA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

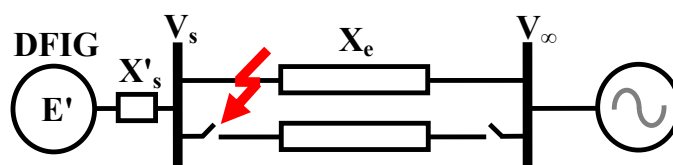
Neste capítulo será tratado via simulações computacionais, o desempenho do critério da tensão interna para fins de investigação da estabilidade do sistema e do controle da magnitude da tensão interna com vistas as forças restaurativas de equilíbrio e a estabilidade transitória do sistema e por fim a ação conjunta do controle da magnitude da tensão interna com o dispositivo crowbar.

5.1 Análise da performance da tensão interna E' do DFIG contra uma barra infinita durante um período transitório

Neste trabalho, todas as simulações foram realizadas utilizando o *software* Matlab/Simulink.

O estudo da estabilidade transitória desenvolvida neste trabalho refere-se a análise em um sistema simplificado como evidencia a Figura 33, composto de um gerador DFIG conectado a um grande sistema representado por uma barra infinita através de duas linhas de transmissão em paralelo. O modelo utilizado para representar o conversor RSC é o fonte de tensão ideal (AKHMATOV, 2003; PÖLLER, 2002), os dados deste sistema encontram-se no Anexo I.

Figura 33 – DFIG versus barra infinita.



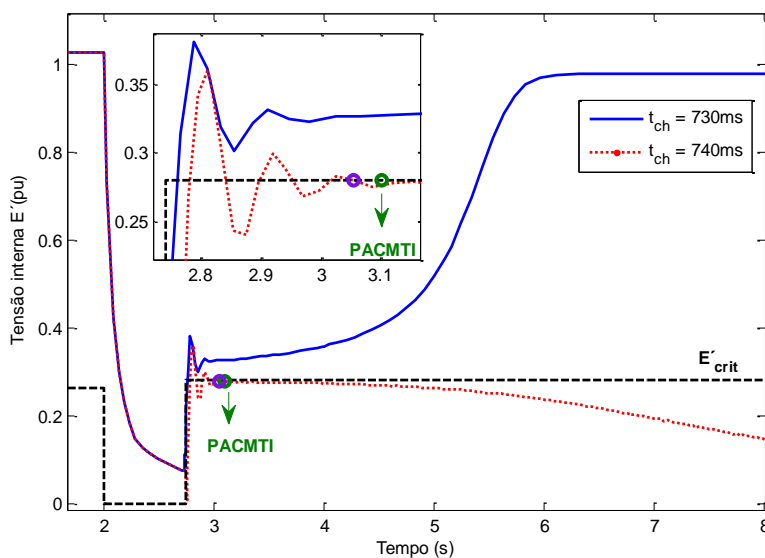
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A baixa complexidade do sistema teste permite obter uma visão clara dos resultados, contribuindo para o desenvolvimento da metodologia e do controle proposto neste trabalho.

5.1.1 Investigação da estabilidade transitória do sistema por meio do critério da tensão interna

Como teste de validação do método analítico consideram-se as situações críticas de estabilidade e instabilidade do sistema. De acordo com o sistema teste apresentado na Figura 33, realizaram-se simulações de contingências do tipo curto-circuito, com tempo de duração da falta de 730 e 740ms (dentro deste intervalo está contido o tempo crítico de eliminação do defeito), os sinais considerados para realimentação do RSC foram a potência ativa e a tensão terminal. Considera-se que o sistema opera em condições normais (regime permanente), quando, no instante de tempo $t_f=2s$ ocorre um curto-circuito trifásico na linha de transmissão próximo do local do gerador, e que o defeito é eliminado posteriormente, por meio da abertura de uma linha de transmissão no instante t_{ch} .

Figura 34 – Movimento da tensão interna do DFIG nos casos críticos de estabilidade e instabilidade do sistema.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

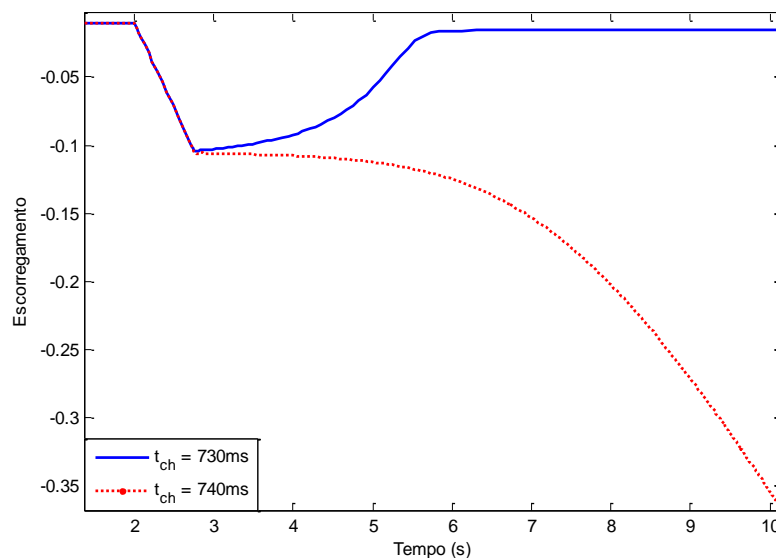
No caso criticamente estável (duração da falta de 730ms), analisando a Figura 34, percebe-se que a tensão interna não apresenta uma recuperação instantânea após a eliminação do curto-circuito e se mostra debilitada. Se o método de comparação da magnitude da tensão interna com o valor crítico fosse aplicado no instante

imediatamente após a eliminação da falta, levaria a análise a uma falsa conclusão de instabilidade. Portanto para evitar esta conclusão errônea é considerado um intervalo de “desabilitação” do teste PACMTI.

Considerado a “habilitação” do método da tensão interna no instante t_{pacmti} correspondente ao tempo de falta de 730ms, a curva da tensão E' mantém-se superior ao E'_{crit} , e diante desta circunstância o sistema apresenta capacidade de transmissão de potência superior à potência mecânica aplicada no eixo da máquina. Portanto, a condição de operação estável é caracterizada pela existência de torque restaurativo do equilíbrio e o sistema evolui para a estabilidade.

Considerando $t_{ch}=730ms$ na Figura 35, nota-se o comportamento estável da velocidade do rotor. A debilitação do torque parte da degeneração da tensão interna, em virtude da capacidade de transmissão de potência estar próxima do seu valor limite criticamente estável do sistema.

Figura 35 – Analisando o escorregamento do DFIG nos momentos críticos de estabilidade e instabilidade.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para o caso crítico de instabilidade, quando a falta é eliminada em $t_{ch}=740ms$, ou seja, a falta é eliminada após o tempo crítico do sistema (t_{cr}), o critério da tensão interna é aplicado no instante de tempo $t_{pacmti}=3.1s$ (PACMTI), porém é importante observar que a partir do instante de tempo $t_{e'ins}=3.059s$ a tensão interna é inferior ao valor crítico,

motivando a perda da capacidade de transmissão da potência fornecida ao eixo da máquina e o excedente de potência é aplicado ao rotor levando à aceleração e consequente instabilização, conforme mostrado nas Figuras 34 e 35.

Durante o período da falta do tipo curto-circuito trifásico, a expressão que define E'_{crit} , apresenta valor nulo no denominador, resultando que o apontador de capacidade de transmissão seja infinito. Este valor não é representado nos gráficos, mas é oportuno observar que o valor infinito é compatível com o fato de que a tensão nula que leva a este valor significa desconexão da máquina do sistema e neste caso a estabilidade, que é definida em relação ao sistema, também perde significado. Esta opção de não plotar o limitador tendendo ao infinito não compromete a investigação da estabilidade uma vez que o critério só é válido a partir do instante do PACMTI.

5.2 Investigação do desempenho do controle da magnitude da tensão interna durante o período transitório

O propósito é analisar o desempenho do método de ação corretiva on-line para melhorar a estabilidade transitória do sistema de energia elétrica, sendo que os problemas de instabilidade do gerador de indução são desenvolvidos pelo forte desbalanço entre as potências durante um período transitório, sendo assim o controle tem o propósito de reduzir este desbalanço atuando no controle da magnitude da tensão interna.

Tabela 1 - Lógica de operação do controle da magnitude da tensão interna.

Lógica de Operação	
$\Delta MTE'$	CMTI
$\Delta MTE' > 40\%$	0
$\Delta MTE' \leq 40\%$	1

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

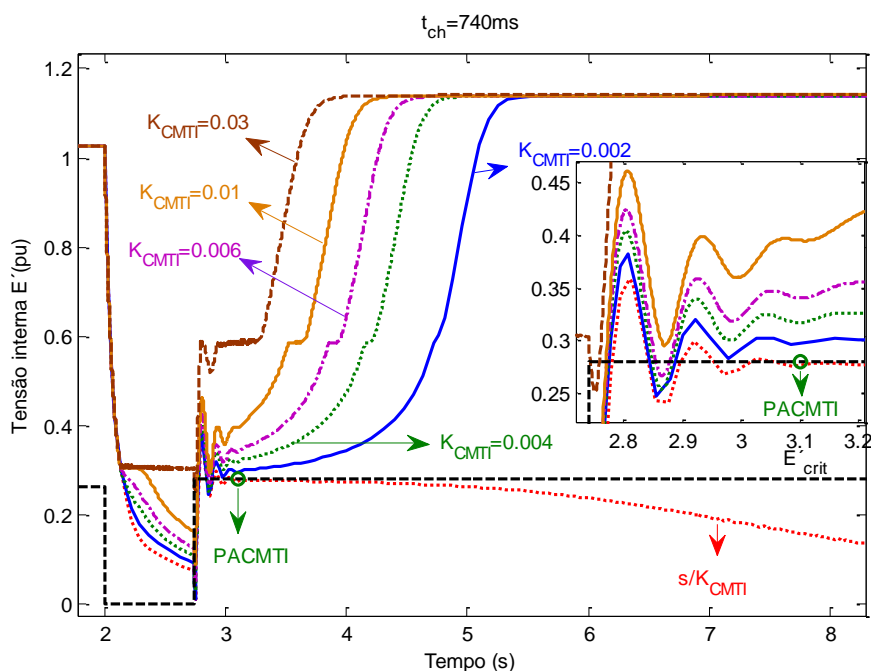
A lógica de operação do controle trata-se da observação da margem da tensão interna, caso a margem da tensão interna venha a sofrer uma redução abrupta e seja inferior a 40% do seu valor em regime permanente, este fato evidencia a declividade da tensão interna, desta forma o CMTI sai da posição “0” (off) para operante “1” (on), caso o sistema alcance um valor estável e a tensão interna se recupere o controle é

desativado, do contrário, o sistema não é capaz de se manter em equilíbrio e o sistema evolui para instabilidade.

5.2.1 Controle da magnitude da tensão interna com ação no aumento das forças restaurativas de equilíbrio do DFIG

A estratégia do controle é adotada com um aumento no ganho do controle da magnitude da tensão interna (K_{CMTI}) com vistas ao desempenho da tensão interna. Para fins de investigação considera-se um curto-circuito trifásico próximo a barra terminal do DFIG com tempo de duração da falta de $t_f=740\text{ms}$ sem o controle da magnitude da tensão interna (s/ CMTI). Neste caso, o sistema apresenta comportamento instável, situação que é revertida com a ação do CMTI, comprovando a ação de aumentar as forças restaurativas de equilíbrio do sistema.

Figura 36 – Ação do controle da magnitude da tensão interna com diferentes valores de ganho (K_{CMTI}) com tempo de falta de 740ms.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Note-se que a medida que se aumenta o ganho do controlador (K_{CMTI}) a tensão interna alcança o ponto de operação estável do sistema em intervalos de tempo menores.

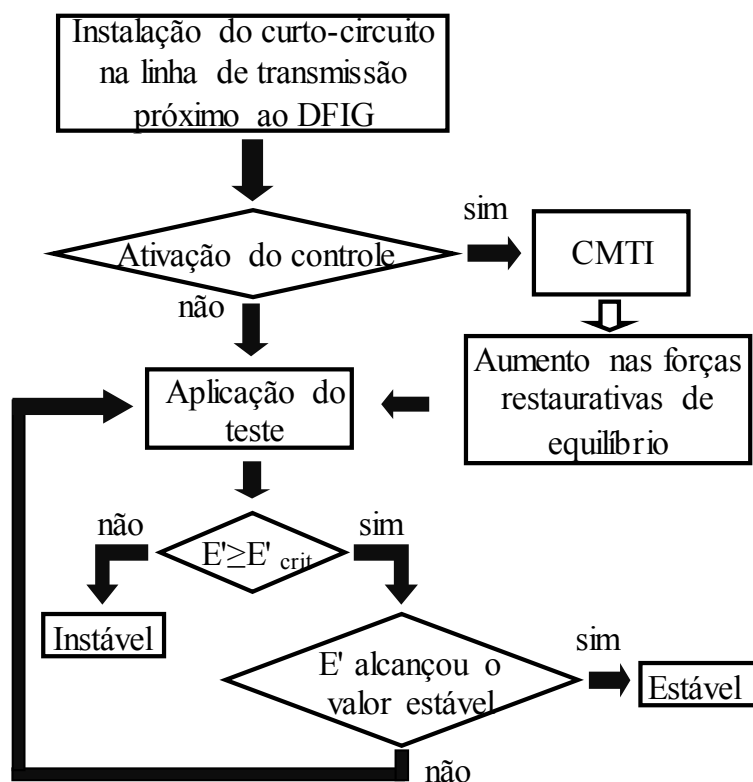
5.2.2 Análise da estabilidade transitória com o controle da magnitude da tensão interna

O controle da tensão interna melhora o desempenho transitório do sistema, o que é indicado pelo aumento do tempo crítico de eliminação da falta.

Desse modo o algoritmo de controle para melhorias da estabilidade transitória têm por objetivo:

- Evitar que a tensão interna opere abaixo da tensão crítica, reduzindo o desbalanço entre as potências.
- Aumento do tempo crítico de eliminação da falta com abertura de linha de transmissão.

Figura 37 – Fluxograma de atuação do método de investigação da estabilidade e do controle do CMTI.

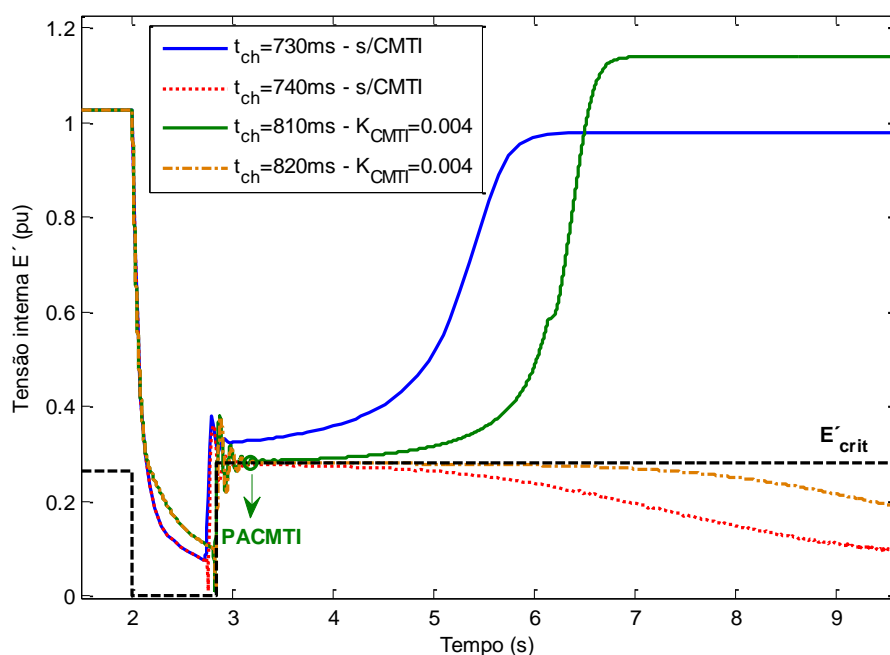


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A ação do controle da magnitude da tensão interna pode ser comprovada com o

aumento do tempo crítico do sistema, detectando o benefício do controle ao sistema. Para a contingência considerada, os limites de criticidade do sistema sem o controle CMTI está entre 730 e 740ms. Inserido o controle CMTI com ganho em “ $K_{CMTI}=0.004$ ”, o limite crítico da estabilidade e instabilidade do sistema evolui para 810-820ms conforme mostra a Figura 38.

Figura 38 – Evolução do tempo crítico com a consideração do controle da magnitude da tensão interna.

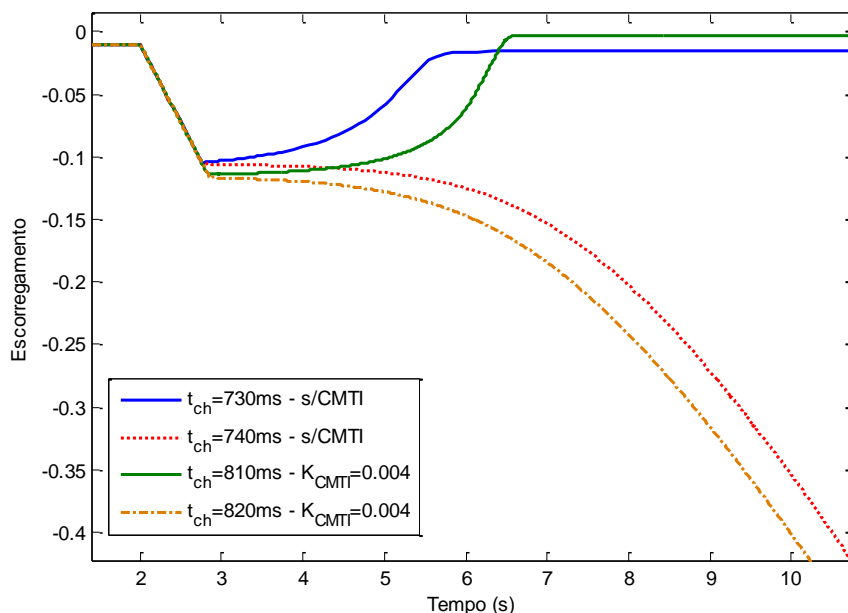


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 39 mostra o comportamento do escorregamento do DFIG durante os períodos críticos com e sem o controle de magnitude da tensão interna.

Para fins de investigação e comprovação, as próximas simulações mostram o benefício do controle da magnitude da tensão interna e o desempenho do critério da tensão interna em detectar a perda da capacidade de transmissão do DFIG, com diferentes valores do ganho e com seus respectivos tempos críticos, os quais podem ser comprovados pela Tabela 2.

Figura 39 – Comportamento do escorregamento do DFIG com a atuação do controle da magnitude da tensão interna.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

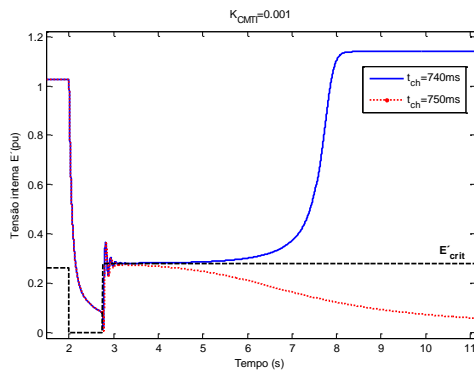
Tabela 2 – Análise do tempo crítico do sistema com diferentes valores de ganhos do controle.

K_{CMTI}	Intervalo t_{cr} (ms)	Figura 40	Figura 41
0	730-740	-	-
0.001	740-750	a1	b1
0.002	770-780	a2	b2
0.003	790-800	a3	b3
0.004	810-820	a4	b4
0.005	830-840	a5	b5
0.006	850-860	a6	b6
0.007	870-880	a7	b7
0.008	890-900	a8	b8
0.009	900-910	a9	b9
0.01	920-930	a10	b10

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

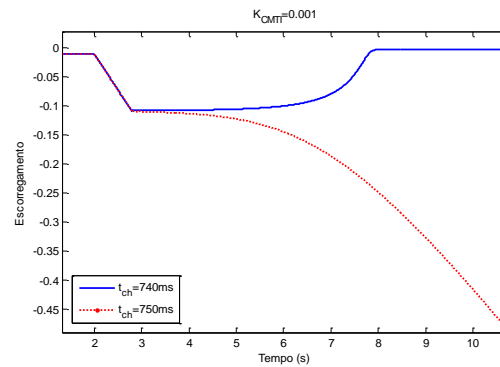
Os resultados apresentados na Tabela 2 com os ganhos do CMTI a partir de 0.001, são evidenciados por meio das simulações das grandezas da tensão interna Figura 40 (a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9, a10) e do escorregamento Figura 41 (b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b10).

Figura 40 – Comportamento da tensão interna do DFIG referente aos dados Tabela 2, (a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9, a10).

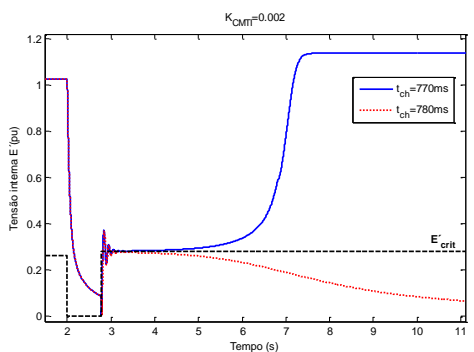


(a1)

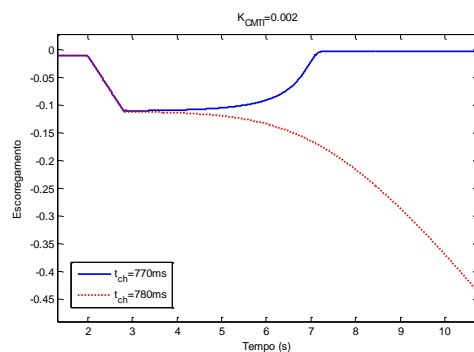
Figura 41 – Comportamento do escorregamento do DFIG referente aos dados Tabela 2 (b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b10).



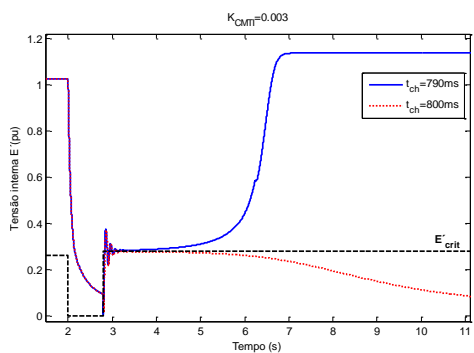
(b1)



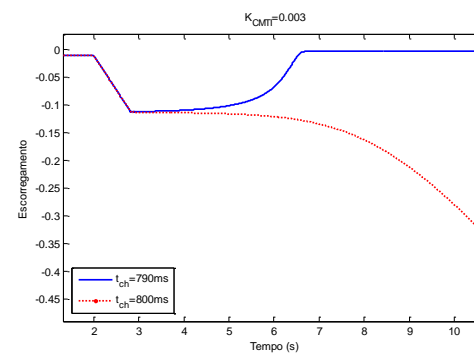
(a2)



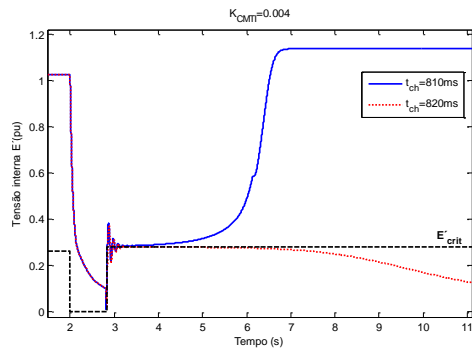
(b2)



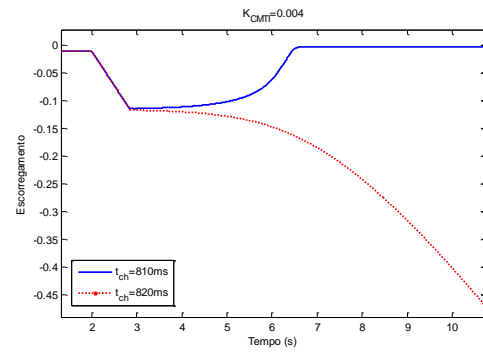
(a3)



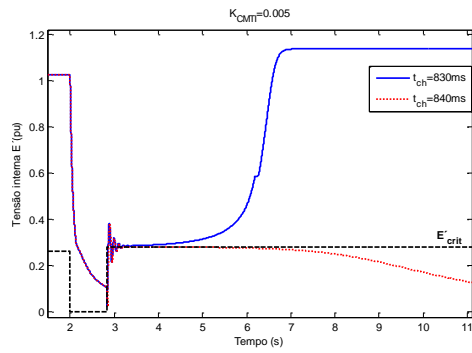
(b3)



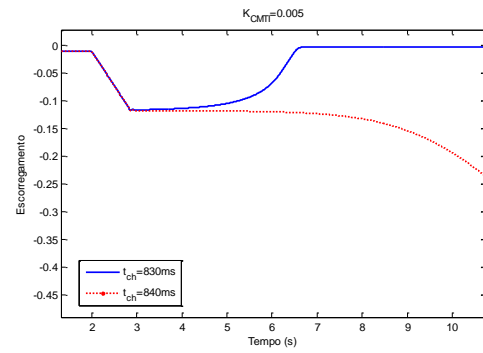
(a4)



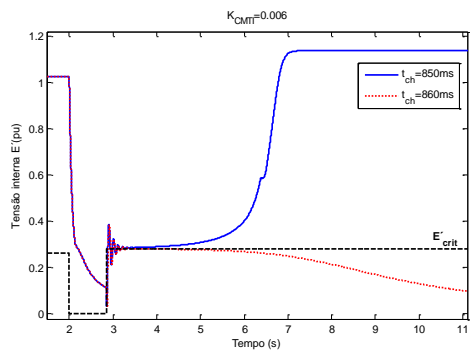
(b4)



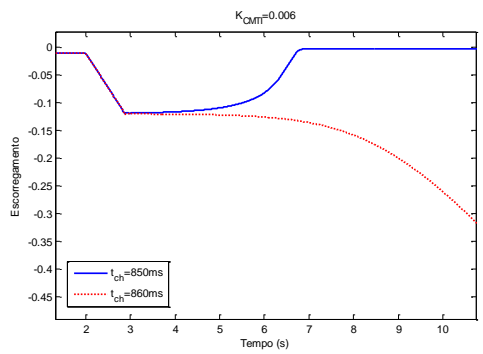
(a5)



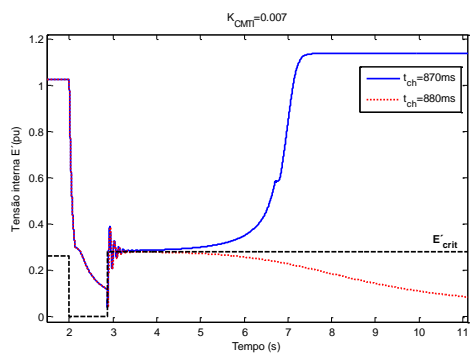
(b5)



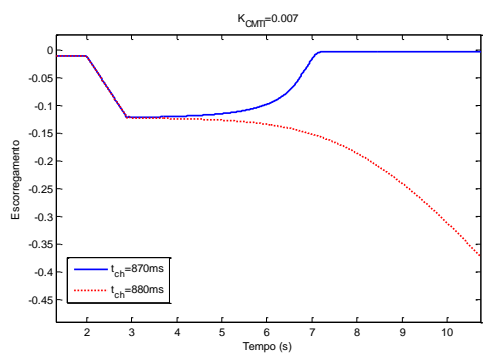
(a6)



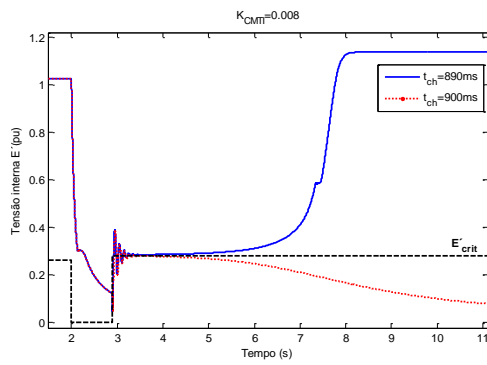
(b6)



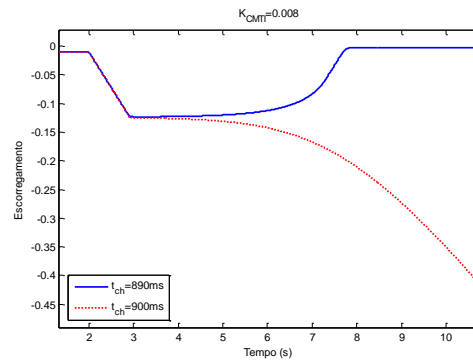
(a7)



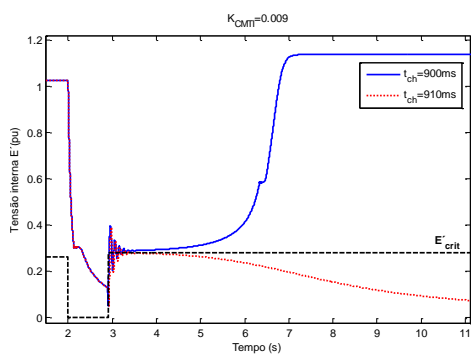
(b7)



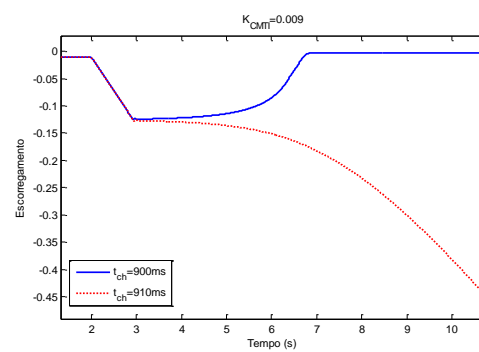
(a8)



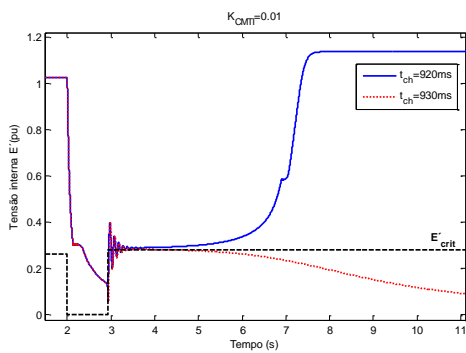
(b8)



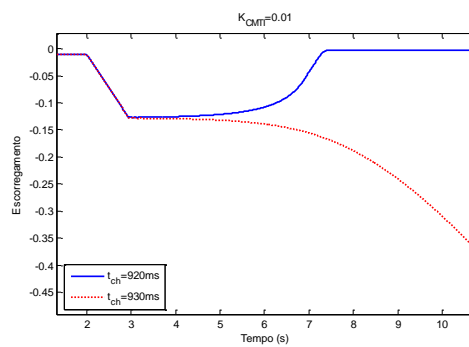
(a9)



(b9)



(a10)



(b10)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

De todo o exposto, evidencia-se que o controle da magnitude da tensão interna propicia um benefício à estabilidade transitória com o aumento do tempo de eliminação de falta.

5.2.3 Análise do desempenho da metodologia e ação do controle atuando em redes fortes e fracas

A investigação é baseada na análise do tempo crítico de eliminação de faltas no sistema em diferentes configurações da rede, e se observa que a medida que se enfraquece o sistema de transmissão o tempo crítico é reduzido. Para reverter esta condição acrescenta-se o controle da magnitude da tensão a este tipo de situação, e, como mostrado anteriormente, conforme se aumenta o ganho do controlador melhores índices de estabilidade são obtidos devido ao aumento do tempo crítico do sistema, como pode ser constatado na Tabela 3.

Com aumento de 50 e 100% no comprimento da linha de transmissão, ao passo que o sistema de transmissão se torna mais fraco, o sistema está ficando mais susceptível a instabilidade devido a redução do tempo crítico do sistema.

Porém, a introdução do controle da magnitude da tensão interna, e o aumento no ganho do controle CMTI levam o sistema a melhorias na estabilidade do sistema, esta condição é proporcionada pela reestruturação das forças restaurativas de equilíbrio do sistema.

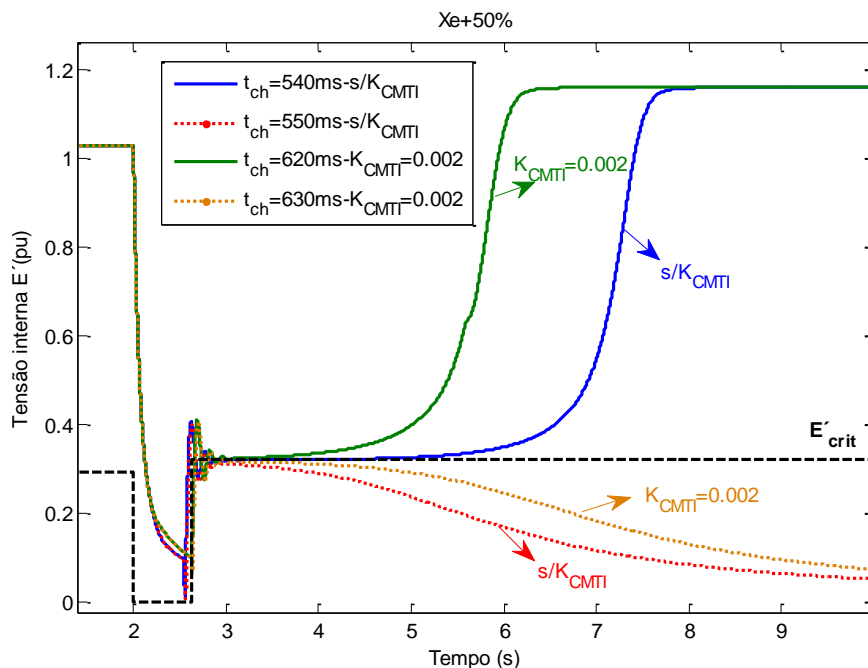
Tabela 3 – Análise da estabilidade em redes fracas com o controle da magnitude da tensão interna.

K_{CMTI}	Intervalo t_{cr} (ms)		
	X_e	$X_e+50\%$	$X_e+100\%$
0	730-740	540-550	410-420
0.002	770-780	620-630	480-490
0.004	810-820	700-710	550-560
0.006	850-860	770-780	620-630
0.008	890-900	840-850	680-690

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 42 mostram-se dois casos particulares apresentados na Tabela 3, sendo que ambos tratam o caso da rede aumentada em 50% do seu valor original, casos críticos do sistema sem o controle (s/ K_{CMTI}) o tempo crítico pertence ao intervalo de tempo entre 540 e 550ms. Este cenário pode ser modificado com a contribuição do controle CMTI sendo que o controlador com valor do ganho $K_{CMTI}=0.002$ o tempo crítico vai estar contido entre o intervalo de 620 e 630ms.

Figura 42 – Desempenho do CMTI e método da tensão interna na rede fraca.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.2.4 Análise do desempenho da metodologia e ação do controle durante condições de aumento no carregamento do sistema

Apresenta-se uma análise do desempenho do CMTI diante de aumento no carregamento do sistema, visando proporcionar melhorias a estabilidade transitória com o aumento do tempo crítico do sistema. A Tabela 4 mostra os intervalos os quais contém o tempo crítico do sistema diante de situações de aumento no carregamento do sistema.

De acordo com a Tabela 4, note-se que o aumento do carregamento do sistema é variado gradativamente até 70%, e conforme se aumenta o carregamento do sistema o tempo crítico sofre uma redução. Esta tendência pode ser compensada com o aumento da participação do controle da magnitude da tensão interna.

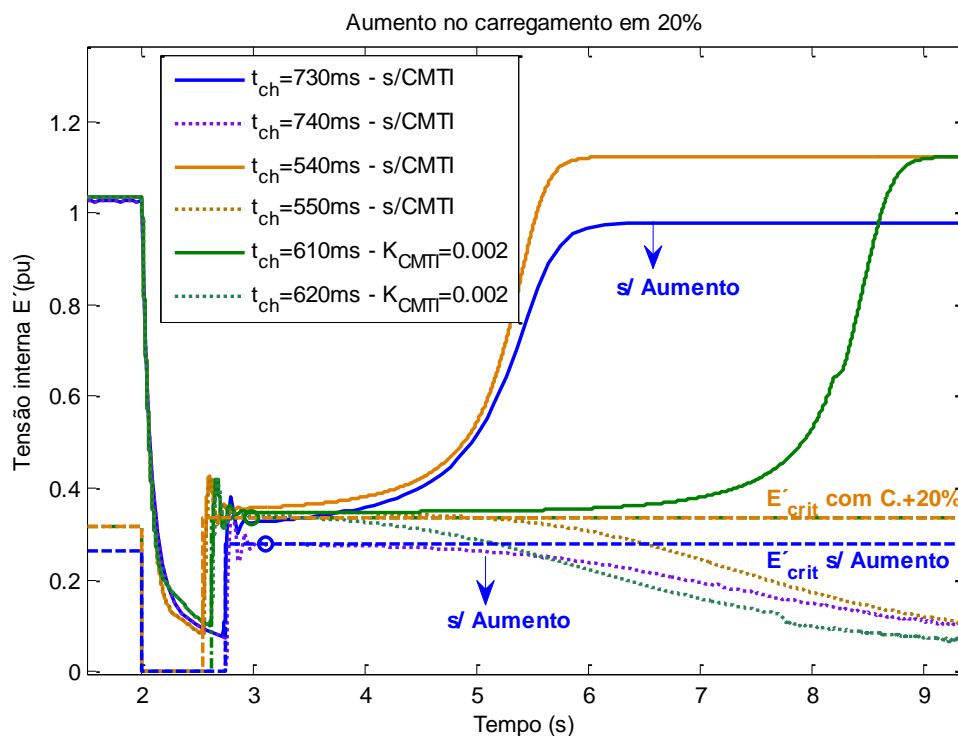
Observa-se que a maior susceptibilidade do sistema a instabilidade é detectada pelo critério da tensão interna em razão do aumento do valor de E'_{crit} (Figura 43). Como o método da tensão interna é baseado em medidas de variáveis do sistema, a todo instante e durante a aplicação do método a dinâmica do sistema é acompanhada.

Tabela 4 – Análise do tempo crítico em situações de aumento no carregamento do sistema com o controle da magnitude da tensão interna.

K_{CMTI} Carregamento	Intervalo t_{cr} (ms)				
	0	0.002	0.004	0.006	0.008
Caso base	730-740	770-780	810-820	850-860	890-900
10%	590-600	650-660	720-730	790-800	860-870
20%	540-550	610-620	670-680	720-730	780-790
30%	440-450	490-500	540-550	590-600	640-650
40%	360-370	410-420	460-470	500-510	550-560
50%	290-300	330-340	370-380	410-420	450-460
60%	230-240	270-280	310-320	340-350	380-390
70%	180-190	220-230	260-270	290-300	320-330

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 43 – Análise do desempenho do método da tensão interna e do CMTI em condições de aumento no carregamento do sistema.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

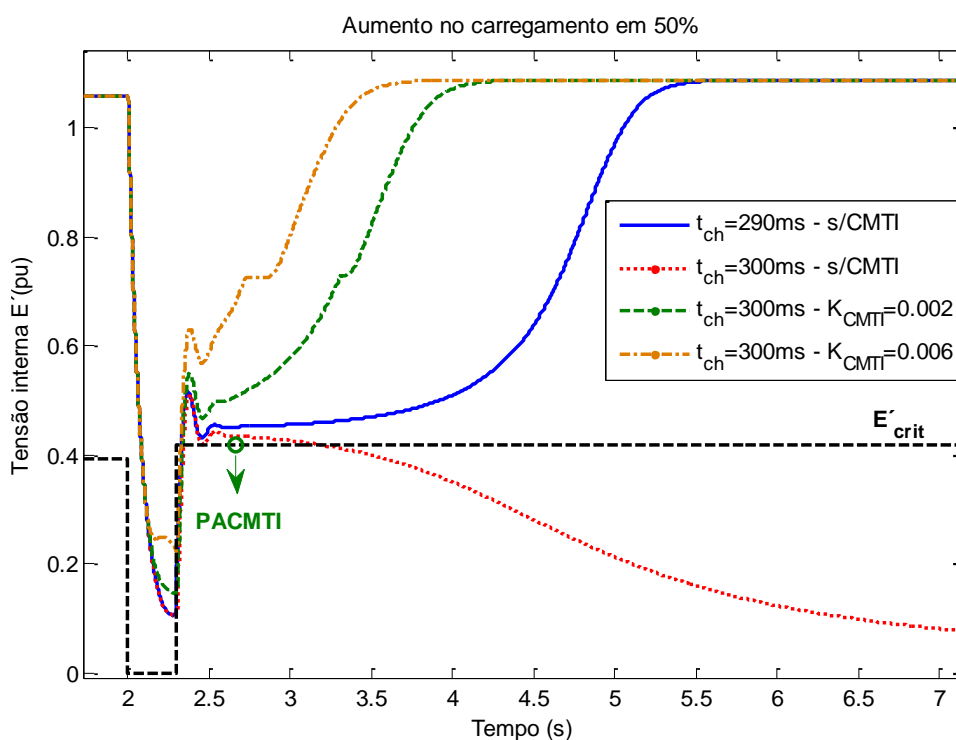
O tempo crítico do caso base pertence ao intervalo entre 730 e 740ms com seu E'_{crit} correspondente, e à medida que o sistema sofre um aumento de 20% no carregamento (C. 20%) o intervalo de tempo o qual contém o tempo crítico modifica-se

entre 540 e 550ms, com valor do E'_{crit} maior, evidenciando que o sistema está se tornando mais frágil pela redução da diferença entre a tensão interna e a tensão interna crítica.

Fixando o caso anterior de aumento no carregamento de 20% e acrescentando a participação do CMTI com valor de $K_{CMTI}=0.002$ o tempo crítico aumenta passando para o intervalo de tempo de 610 a 620ms. Estes resultados mostram a eficiência do CMTI e do método da tensão interna no caso de aumento nas forças restaurativas do sistema, assim como na detecção da instabilidade do DFIG.

De acordo com a Figura 44, consideram-se as seguintes contingências, eleva-se o carregamento do sistema em 50% e no instante de tempo de $t_f=2s$ o sistema sofre um curto-circuito trifásico, abordam-se as situações de estabilidade e instabilidade do sistema sem o controle CMTI (s/ CMTI) que possuem os seguintes tempos de eliminação da falta 290 a 300ms.

Figura 44 – Análise da capacidade de transmissão com o aumento no carregamento do sistema em 50% e do CMTI.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Focando o caso instável com tempo de falta de 300ms note a contribuição do controle conforme o valor do ganho é aumentado de $K_{CMTI}=0.002$ para $K_{CMTI}=0.006$, a tensão interna atinge o seu valor de operação de equilíbrio em um rápido intervalo de tempo, evidenciando a rápida resposta proporcionada por este controle, capacitando o sistema com um aumento nas forças restaurativas de equilíbrio do sistema.

De forma geral, durante os transitórios provocados por curtos-circuitos trifásicos, a máquina próxima da falta tende a perder a capacidade de transmissão de potência, desse modo o algoritmo de controle para melhoria da estabilidade transitória têm por objetivo:

- Evitar que a tensão interna opere abaixo da tensão crítica;
- Aumentar a diferença entre a tensão interna e a tensão interna crítica.

5.3. Análise do desempenho do método tensão interna E' e o controle CMTI junto a um circuito Crowbar no DFIG

Durante um período transitório o gerador de indução duplamente alimentado pode apresentar duas filosofias de controle em relação a configuração do circuito crowbar.

De acordo com Hansen (2007) opta-se pela desconexão do conversor RSC durante um período transitório e insere-se o crowbar (R_{crow}) limitando os altos índices de tensão e corrente do rotor e, a partir do instante em que os valores de tensão e corrente do gerador apresentarem valores normais de operação, o RSC é reconectado ao DFIG. A segunda filosofia se baseia em Morren e Haan (2005), na intenção de evitar a perda do controle sobre a máquina, mantém-se o RSC conectado na máquina mesmo em momentos de falta e o crowbar é inserido em série com os circuitos do rotor. A Tabela 5 mostra a lógica de operação dos controles da magnitude da tensão interna e do crowbar.

Tabela 5 – Lógica de operação dos controladores.

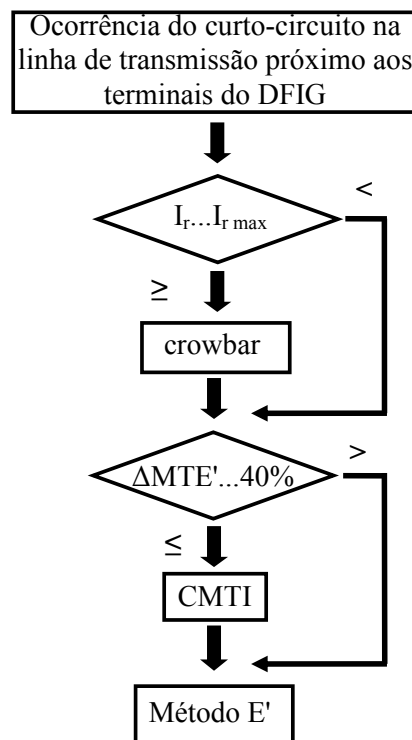
Lógica de Operação			
Tensão interna		Corrente do rotor	
$\Delta MTE'$	CMTI	I_r	Crowbar
$\Delta MTE' > 40\%$	0	$I_r < I_{rmax}$	0
$\Delta MTE' \leq 40\%$	1	$I_r \geq I_{rmax}$	1

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O objetivo desta investigação está em analisar o comportamento do critério de tensão interna com a ação conjunta do controle CMTI e do dispositivo limitador de corrente do rotor, evidenciando que os problemas de instabilidade é a causa da perda de capacidade de transmissão do sistema, e de que o sistema quando dotado de um sistema de controle ajustado, beneficiará diretamente o sistema com melhores condições de capacidade de transmissão potência.

O fluxograma da ação conjunta dos controles da magnitude da tensão interna e do crowbar e da aplicação do critério da tensão interna é mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Fluxograma do DFIG durante um transitório com a ação dos controles CMTI e crowbar.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

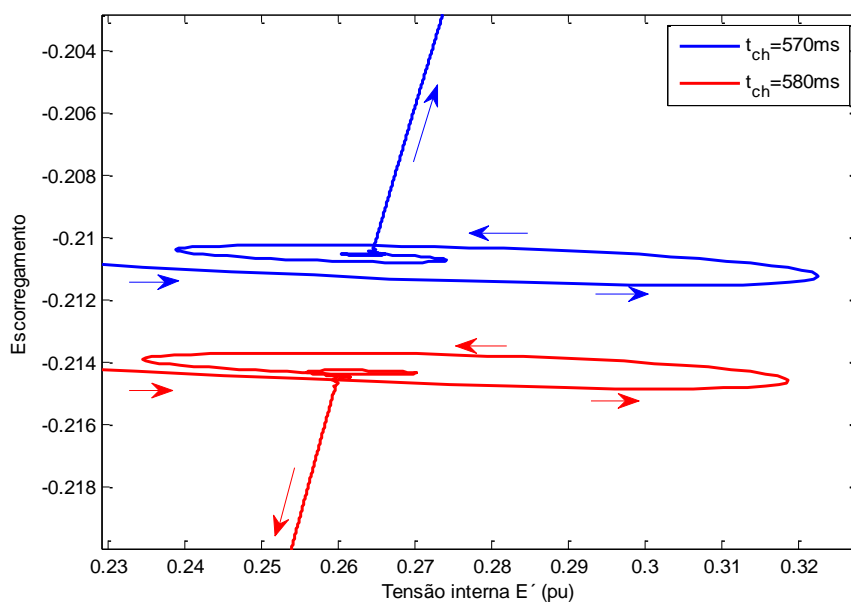
5.3.1 Análise da capacidade de transmissão do sistema com a inserção do Crowbar durante o período de falta com ação do CMTI

Nesta seção o sistema teste utilizado é o DFIG completo conectado a uma barra infinita por meio de um sistema de transmissão, os parâmetros do sistema encontram-se no anexo II.

O sistema está operando em regime permanente quando no instante de tempo de $t_f=4s$ o sistema é submetido a um curto-circuito trifásico próximo a barra terminal do sistema e é eliminado posteriormente com a abertura de uma linha de transmissão. Neste caso, os limites críticos de estabilidade e instabilidade do sistema pertencem ao intervalo de tempo de 570 a 580ms.

A Figura 46 mostra a tendência da estabilidade e instabilidade do sistema por meio do escorregamento contra a tensão interna. Mostra-se o caso de duração da falta de 570ms, em que o escorregamento e a tensão interna estão aumentando e o sistema evolui para estabilidade. No outro caso a tendência do sistema é a evolução para instabilidade com escorregamento e tensão interna diminuindo considerando a falta com duração de 580ms.

Figura 46 – Tendência do sistema definidos pela direção do sistema após o vórtice (após a eliminação da falta).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Evidenciado o intervalo crítico do sistema, observam-se duas filosofias de operação do crowbar juntamente com o controle da magnitude da tensão interna com vistas a capacidade de transmissão do sistema por meio do critério da tensão interna.

A Tabela 6 mostra os limites críticos do sistema com diversas técnicas de operação, sendo elas:

- (RSC=OFF), DFIG com a proposta de desconectar o conversor RSC durante o período transitório é desconectado durante o período transitório e o crowbar é inserido a fim de limitar o excesso das correntes rotóricas, até no instante de tempo de t_{crow} , a reconexão dos conversores é desencadeada uma vez que a corrente do rotor se encontra em condições de operação segura para integridade física dos conversores, assim como proposto por HANSEN (2007).
- (RSC=ON), a filosofia de controle de MORREN; HAAN (2005) em optar por não desconectar o conversor RSC e inserir em série o circuito crowbar a fim de limitar as corrente rotóricas (RSC=ON). Os valores das resistência do crowbar em ambos casos correspondem a 30% do valor da resistência do rotor, o tempo de atuação do crowbar é de 150ms após a eliminação da falta. Para fins de análise será analisado a ação conjunta do CMTI com as duas filosofias de operação dos conversores.

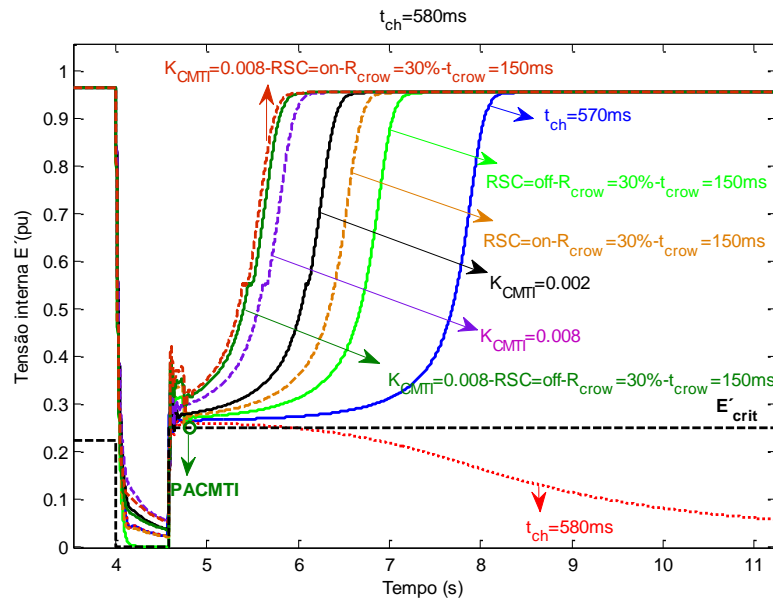
Tabela 6 – Resistência do crowbar $R_{crow}=30\%$ da resistência do rotor, tempo de atuação do crowbar de 150ms após a eliminação da falta (as variáveis de análise são: o ganho do CMTI e a filosofia de controle do RSC).

Tempo crítico (ms)					
	R_{crow}	s/ CMTI	$K_{CMTI}=0.004$	$K_{CMTI}=0.008$	$K_{CMTI}=0.02$
		570-580	610-620	660-670	760-770
RSC=off	30%	590-600	630-640	680-690	790-800
RSC=on	30%	600-610	640-650	690-700	800-810

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Conforme pode ser observado na Tabela 6, o CMTI afeta diretamente a estabilidade do sistema. A medida que se aumenta o valor do ganho K_{CMTI} , contribui-se para as forças restaurativas de equilíbrio do sistema, o que é evidenciado pelo aumento do tempo de eliminação de falta.

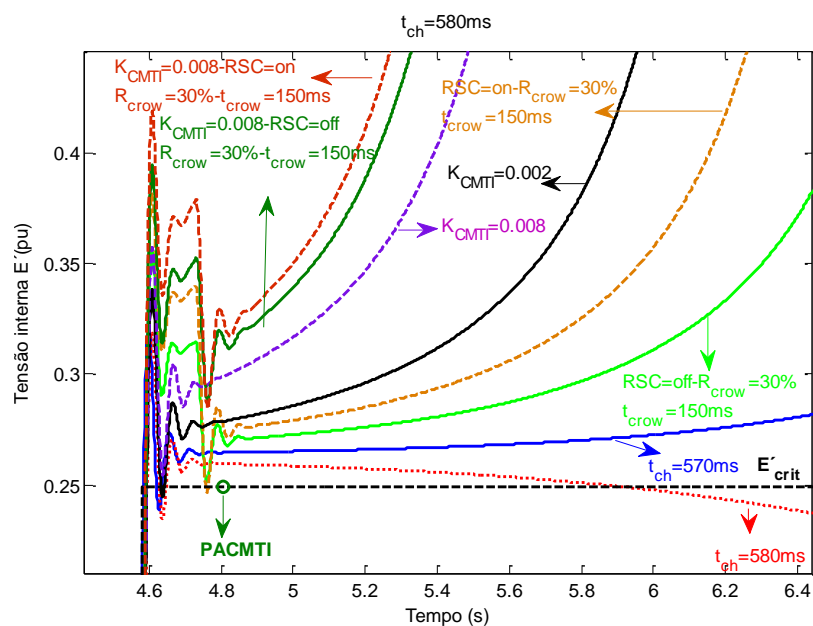
Figura 47 – Tensão interna em função do tempo com ação do CMTI e do crowbar.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

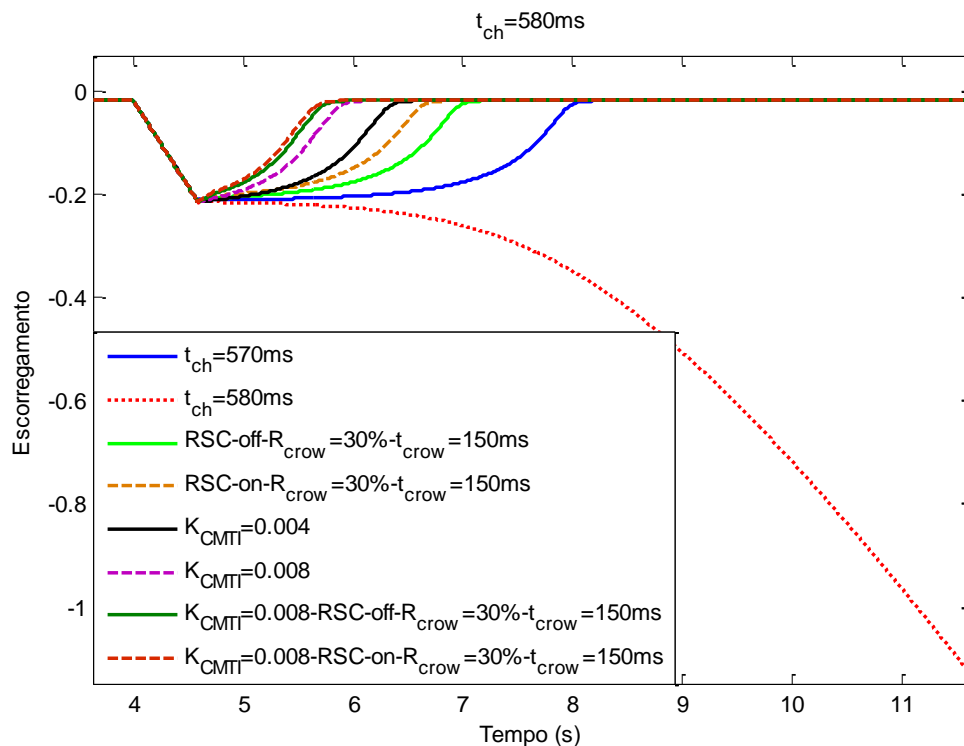
De acordo com as simulações apresentadas na Figura 47, nota-se que no caso base com duração da falta de 580ms o sistema é instável, porém obtém-se a evolução do sistema para a estabilidade conforme se acrescem os controles no sistema. Este bom desempenho pode ser observado pela recuperação do escorregamento do DFIG, mostrado pela Figura 49.

Figura 48 – Ampliação da Figura 47, instantes após a eliminação da falta.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 49 – Comportamento do escorregamento em função do tempo com ação conjunta do CMTI e do crowbar.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O desempenho do tempo de atuação do dispositivo crowbar é notado na Figura 50. Quanto maior é o tempo de atuação do circuito limitador de corrente, mais rápida é a recuperação da tensão interna, por reduzir a corrente rotórica e contribuir na estabilização da máquina.

Os tempos de atuação do crowbar utilizado são 150ms e 500ms (SALLES, 2009), por questões de comprovação do desempenho do critério da tensão interna e ação conjunta do CMTI. Em todos os casos o desempenho do controle e do indicador de perda de capacidade de transmissão foram comprovados.

Não é propósito deste trabalho, porém é válido ressaltar que o ajuste da resistência (HANSEN; HANSEN, 2007; SALLES, 2009, 2010) e o tempo de atuação do dispositivo crowbar (ABAD, 2011; ALMEIDA, 2004) são de extrema importância para a operação do DFIG durante um período transitório (ERLICH, 2007).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo inicial a investigação da estabilidade do gerador de indução duplamente alimentado, e assim um método analítico foi desenvolvido enfocando a grandeza cuja dinâmica pode levar o DFIG a instabilidade.

Verificou-se que durante os períodos transitórios no sistema, a tensão interna (E') do gerador de indução duplamente alimentado pode apresentar um intenso enfraquecimento, e, tal como constatado anteriormente para o SGIG (ZAMPERIN; COLVARA, 2011a), pode implicar na perda de capacidade de transmissão de potência entre a máquina e o sistema ao qual esta está conectada. Consequentemente, o método de análise baseou-se em monitorar a tensão interna ao longo do movimento transitório do sistema, comparando com um valor crítico E'_{crit} , explicitamente determinado, possibilitando precisar o instante em que o sistema perde a capacidade de estabilizar quando E' fica menor que E'_{crit} .

Desde que a dinâmica é acompanhada e detectada precisamente a condição indicativa de que o sistema perde a capacidade de transmissão de potência devido a deterioração da tensão interna do DFIG, o método da tensão interna apresentou resultados bastante satisfatórios.

Uma vez que a análise da influência e comportamento da tensão interna propiciaram informações substanciais sobre a dinâmica e condições para estabilidade do sistema, possibilitou-se a concepção de uma estratégia de controle baseada na inserção de um controle da tensão interna visando melhoria da capacidade de transmissão de potência do sistema sob condições de regime transitório. Sendo que após detectada a grandeza em função da qual se desenvolve a instabilidade do DFIG, um controle foi proposto a fim de melhorar o desempenho transitório desta máquina. O controle foi aplicado sobre a magnitude da tensão interna, visando mantê-la superior a tensão interna crítica após uma perturbação e durante o período transitório decorrente dela.

O desempenho do controle da magnitude da tensão interna proporcionou respostas satisfatórias com vistas a estabilidade transitória do sistema obtidas por meio de análise do tempo crítico de eliminação de falta do tipo curto-circuito do sistema.

De forma geral, conforme apontado pelo capítulo de simulações, o controle da magnitude da tensão interna:

- Evitou que a tensão interna opere abaixo da tensão interna crítica, mantendo a capacidade de transmissão da potência entregue pelo gerador ao sistema (visto como barra infinita);
- Proporcionou o aumento nas forças restaurativas de equilíbrio do sistema quando submetido a um transitório.
- Aumentou o tempo crítico de eliminação de faltas.

Constatou-se que a ação conjunta do controle da magnitude da tensão interna e do dispositivo crowbar no DFIG durante os períodos transitórios pode estabelecer de uma forma geral uma melhoria na estabilidade do DFIG. O ajuste adequado do controle da magnitude da tensão interna proporciona que a tensão interna opere acima do limite mínimo de modo a manter a capacidade de transmissão de potência.

O dispositivo crowbar foi investigado em duas configurações, sendo uma com desconexão do RSC e conexão do crowbar durante a falta e a outra sem desconexão do RSC e inserção em série do limitador de corrente rotórica, sendo que a última configuração se mostrou mais favorável a evolução da estabilidade do DFIG juntamente com o CMTI

De todo o exposto, evidencia-se que os resultados obtidos foram bastante favoráveis para estabilidade e de grande importância para a melhoria do desempenho de operação do DFIG, contribuindo decisiva e positivamente para o aumento da capacidade de transmissão e das forças restaurativas de equilíbrio do DFIG, resultando em maiores tempos críticos de eliminação de defeitos, sendo eles comprovados por meio de simulações computacionais.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a aplicação da metodologia do critério da tensão interna e do controle em um parque eólico para análise e desempenho com vistas a estabilidade transitória.
- Desenvolvimento de outras estratégias de controle para melhoria da estabilidade do DFIG.
- Aplicação do método para analisar a estabilidade e controlar aerogeradores SCIG e DFIG sujeitos a variação aleatória da velocidade do vento.

REFERÊNCIAS

ABAD, G.; LÓPEZ J.; RODRÍGUEZ M. A.; MARROYO L.; IWANSKI, G. **Doubly fed induction machine modeling and control for wind energy generation**. Piscataway. John Wiley & Sons, 2011. 633 p.

ACKERMANN T. **Wind power in power systems**. England: John Wiley & Sons, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Energia no Brasil e no mundo: parte 1**. Brasília, DF, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf>. Acesso em: 20 de Setembro de 2014.

AKHMATOV, V.; KNUDSEN, H.; BRUNTT, M.; NIELSEN, A. H.; PEDERSEN, J. K.; POULSEN, N. K. A dynamic stability limit of grid-connected induction generators. In: IASTED INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY, 2000, Marbela. **Proceedings...** Marbela: [s. n.], 2000. p. 235-244.

AKHMATOV, V. **Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power**. 2003. 261 f. Thesis (Ph.D. Electrical Engineering) - Technical University of Denmark, Denmark 2003a.

AKHMATOV, V.; KNUDSEN, A. H.; NIELSEN, J. K.; PEDERSEN; POULSEN, N. K. Modelling and transient stability of large wind farms. **Int. J. Elect. Power Energy Syst.**, Oxford, v. 25, p. 123–144, 2003b.

AKHMATOV, V. System stability of large wind power networks: a danish study case. **Int. J. Elect. Power Energy Syst.**, Oxford, v. 28, n. 1, p. 48–57, 2006.

ALMEIDA, R. G.; PEÇAS LOPES, J. A.; BARREIROS, J. A. L. **Improving power system dynamic behavior through doubly fed induction machines controlled by static converter using fuzzy control**. **IEEE transactions on Power System**, Piscataway, v. 19, n. 4, p. 1942-1950, 2004.

ALMEIDA, R. G. **Contribuições para avaliação da capacidade de fornecimento de serviços de sistemas por parte de aerogeradores de indução duplamente alimentados**. 2006. p. 253 Tese (Doutorado em Engenharia elétrica) - Universidade do Porto, Porto, 2006.

ANAYA-LARA, O; JENKINS, N.; EKANAYAKE, J.; CARTWRIGHT, P.; HUGHES, M. **Wind energy generation modelling and control**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2009.

BIM, E. Máquinas elétricas e acionamento. 2. ed. [S. l.]: Campus, 2012. 568 p.

BLAABJERG, F.; LISERRE, M.; MA, K. Power electronics converters for wind turbine systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Piscataway, v. 48, n. 2, p. 708-719, 2012.

BTM Consult. World Market Update 2009 and similar reports of previous years; 2010.

CIGRE. CIGRE technical brochure on modeling new forms of generation and storage Tf 38.01.1. [S. l.: s. n.], 2000.

CONSUMO de eletricidade acelera no 3. tri: 3,9%. **Resenha**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 73, p. 1-4, 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20131030_1.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2013.

EKANAYAKE, J. B.; HOLDSWORTH, L.; WU, X. G.; JENKINS, N. Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines. **IEEE Trans. Power Systems**, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 803–809, 2003a.

EKANAYAKE, J. B.; HOLDSWORTH, L.; JENKINS, N. Comparison of 5th Order and 3rd Order Machine Models for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbines. **Elect. Power Systems Res.**, Lausanne, v. 67, p. 207–215, 2003b.

EKANAYAKE, J.; JENKINS, N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v. 19, n. 4, p. 800-802, 2004.

ERLICH, I. et al. Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 22, n. 3, p. 909-919, 2007.

FEIJÓO, A.; CIDRAS, J.; CARRILLO, C. A third order model for the doubly fed induction machine. **Electric Power System Research**, Amsterdam, v. 56, p. 121-127, 2000.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. New York: McGraw-Hill Book, 2006.

FREITAS, W.; VIEIRA, J. C. M.; MORELATO, A.; SILVA, L. C. P. da.; COSTA, V. F.; LEMOS, F. A. B. Comparative analysis between synchronous and induction machines for distributed generation applications. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 21, n. 1, p. 301-311, 2006.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC. **Global statistics**. Brussels, 2012. Disponível em: <<http://www.gwec.net/contact/contact-us/>>. Acesso em: 01 nov. 2013.

GOMEZ, S. A.; AMENEDO, J. L. R. Grid synchronisation of doubly fed induction generators using direct torque control. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 28., 2002, Sevilla. **Proceedings...** Sevilla: IECON, 2002. p. 3338-43.

GRILO, A. P.; MOTA ,A.; MOTA, L. T. M; FREITAS, W. An Analytical method for analysis of large-disturbance stability of induction generators. **IEEE Transaction on Power Systems**, Piscataway, v. 22, n. 4, p. 1861- 1869, 2007.

HANSEN, L. H.; MADSEN, P. H.; BLOABJERG, F.; CHRISTENSEN, H. C.; LINDAHARD, U.; ESKILDSEN, K. Generators and power electronics technology for wind turbines. In: ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONIC SOCIETY, 27., 2001, Denver. **Proceedings...** Denver: IECON, 2001. p. 2000-2005.

HANSEN, A. D.; HANSEN, L. H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004). **Wind Energy**, Chichester, v. 10, n. 1, p. 81-97, 2007.

HOLDWORTH, L.; WU, X. G.; EKANAYAKE, J. B.; JENKINS, N. Comparison of fixed speed and doubly fed induction wind turbine during power system disturbances. **IET Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 150, n. 3, p. 343-352, 2003.

HOLDSWORTH, L.; EKANAYAKE, J. B.; JENKINS, N. Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generators based wind turbines. **Wind Energy**, Chichester, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2004.

HU, J.; HE, Y. Modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions. **Electric Power System Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 273-281, 2009.

IGLESIAS, R. L.; ARANTEGUI, R. L.; ALONSO, M. A. Power electronics evolution in wind turbines: a market-based analysis. **Renewable and sustained Energy Reviews**, Kidlington, v. 15, n. 9, p. 4982-4993, 2011.

JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P.; KIRSCHEN D.; STRBAC, G. **Embedded Generation**. London: IEE Power & Energy Series, 2000.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p.

LEDESMA, P.; USAOLA, J. Effect of neglecting transient in doubly fed induction generators model. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v.19, n. 2, p. 459-461, 2004.

LEDESMA, P.; USAOLA, J. **Doubly fed induction generator model for transient stability analysis**. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 388-397, 2005.

LI, H.; CHEN, Z. Overview of different wind generator systems and their comparisons. **IET Renewable Power Generation**, Stevenage, v. 2, n. 2, p. 123-138, 2008.

MACHOWSKI, J.; BIALEK, J. W.; BUMBY, J. R. **Power system dynamics: stability and control**. 2. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2008.

MORREN, J.; HAAN, S. W. H. de. Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator during a voltage dip. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 435-441, 2005.

MORREN, J; HAAN, S. W. H. de. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 174–180, 2007.

MOTA, W. S. **Simulação de transitórios eletromecânicos em sistema de potência**. Campina Grande: EPGRAF, 2006. 368 p.

MÜLLER, S.; DEICK, M.; DONCKER, R. W. de. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. **IEEE industry Applications Magazine**, Piscataway, p. 26-33, 2002.

NUNES, M. V. A.; BEZERRA, U. H.; ZÜRN H. H. Transient stability margin of variable versus fixed speed wind systems in electrical grids. In: IEEE POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. **Proceedings...** Bologna: [s. n.], 2003. p. 1-7.

NUNES, M. V .A.; ZURN, H. H.; BEZERRA,U. H.; PEÇAS LOPES, J. A.; ALMEIDA, R. G. Influence of the variable speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v. 19, n. 4, p. 692–701, 2004.

PEÇAS LOPES, J. A. **Modelos de geradores eólicos de indução duplamente alimentados-DFIM: trabalho de consultoria para o operador nacional do Sistema do Brasil – NOS**. [S. l.: s. n.], 2004.

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. **IET Electric Power Applications**, Stevenage, v. 143, n. 3, p. 231-41, 1996.

PERDANA, A.; CARLSON, O.; PERSSON, J. **Dynamic response of grid-connected wind turbine with doubly fed induction generator during disturbances**. Norway: Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2004.

PETERSSON, A.; LUNDBERG, S.; THIRINGER, T. A DFIG wind turbine ride through system Influence on the energy production. **Wind Energy**, Chichester, v. 8, n. 3, p. 251-63, 2005a.

PETERSSON, A.; THIRINGER, T.; HARNEFORS, L.; PETRU, T. Modeling and experimental verification of grid interaction of a dfig wind turbine. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v. 4, n. 4, p. 878-886, 2005b.

POLINDER, H.. et al. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 3, p. 725-733, 2006.

PÖLLER, M. A. Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms. In: IEEE POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. **Proceedings...** Bologna: IEEE, 2003. p. 1-6.

RODRÍGUEZ, J. M.; FERNÁNDEZ, J. L.; BEATO, D.; ITURBE, R.; USUOLA, J.; LESDEMA, P.; WITHELMI J. R. Incidence on power system dynamic of high

penetration of fixed speed and doubly fed wind energy systems: study of spanish case. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 17, n. 4, p. 1089-1095, 2002.

SALLES, M. B. C. **Modelagem e análises de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica. tese de doutorado.** São Paulo: USP, 2009.

SALLES, M. B. C.; HAMEYER, K.; CARDOSO, J. R.; GRILO, A, P.; RAHMANN, C. Crowbar System in Doubly Fed Induction Wind Generator. **Energies**, Rondebosch, v. 3, n. 4, p. 738-753, 2010.

SALMAN, S. K.; TEO, A. L. J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 793-802, 2003.

SAMUELSSON, O.; LINDAHL, S. On speed stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1179–1180, 2005.

SLOOTWEG, J. G.; POLINDER, H.; KLING, W. L. Dynamic modeling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, New York, v. 1, p. 664-649, 2001.

SLOOTWEG, J. G.; KLING, W. L. Modelling and analyzing impacts of wind power on transient stability of power systems. **Wind Energy**, Chichester, v. 26, n. 1, p. 3–20, 2002.

SLOOTWEG, J. G. Wind power: modeling and impact on power system dynamic. 2003. 206 f. Ph.D. Dissertation (Ph.D. Electrical Engineering) - Tech. Univ. Delft, Delft, 2003a.

SLOOTWEG, J. G.; KLING, W. L. the impact of large scale wind power generation on power system oscillations. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 9-20, 2003b.

SLOOTWEG, J. G.; POLINDER, H.; KLING, W. L. Representing wind turbine electric generating system in fundamental frequency simulations. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v. 18, n. 1, p. 516-524, 2003c.

SLOOTWEG, J. G.; KLING, W. L. Aggregated modeling of wind park in power system dynamic simulation. In: **IEEE POWER TECH CONFERENCE**, 23., 2003, Bologna. **Proceedings...** Bologna: IEEE, 2003. p. 1-6.d

SUN, T.; CHEN, Z.; BLAABJERG, F. Transient stability of DFIG wind turbines at an external short-circuit fault. **Wind Energy**, Chichester, v. 8, n. 3, p. 345-60, 2005.

TAPIA, A.; TAPIA, G.; OSTOLAZA, J. X.; SAENZ, J. R.; CRIADO, R.; BEOSATEGUI, J. L. Reactive power control of a wind farm made up with doubly fed induction generator (I). In: **IEEE PORTO POWER TECH CONFERENCE**, 10., 2001, Porto. **Proceedings...** Porto: IEEE, 2001. P. 1-6.a

TAPIA, A., TAPIA, G., OSTOLAZA, J. X., SAENZ, J. R. SAENZ, CRIADO, R. BEOSATEGUI, J. L. "Reactive Power Control of a Wind Farm Made up with Doubly Fed Induction Generator (II)". In: IEEE PORTO POWER TECH CONFERENCE, 10., 2001, Porto. **Proceedings...** Porto: IEEE, 2001. P. 1-6.b

TLEIS, N. D. **Power systems modelling and fault analysis**. Newnes: [s. n.], 2008. 650 p.

VIEIRA, J. P.A. **Otimização de controladores utilizando algoritmos genéticos para melhoria da capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão de aerogeradores de indução duplamente excitados**. 2009. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

XU, L.; WANG, Y. Dynamic modeling and control of DFIG based wind turbines under unbalanced network conditions. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 314-323, 2007.

XU, L. Coordinated Control of DFIG's Rotor and Grid Side converters during networks unbalance. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Piscataway, v. 23, n.3, p1041-1049, 2008.

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Estudo da estabilidade do gerador eólico assíncrono através da tensão interna. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 18., 2010, Bonito. **Anais...** Bonito: CBA, 2010. p. 432-438

ZAMPERIN, J. L. B. **Método Analítico para Análise da Estabilidade do Gerador de Assíncrono através do Monitoramento da Tensão**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UNESP Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2011. (a)

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Estudo da estabilidade transitória do gerador de indução com compensação de reativo por meio de um critério analítico. In: LATIN-AMERICAN CONGRESSO ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE, 9., 2011, Mar del Plata-Argentina. **Anales...** Mar del Plata-Argentina: [s. n.], 2011. p. 1-6.

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Análise da Estabilidade Transitória do Gerador de Indução pelo Monitoramento da Tensão Interna após um Curto-Circuito: em condições de carregamento leve e pesado. In: IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION LATIN AMERICA CONFERENCE, 2012, Montevideo. **Proceedings...** Montevideo: IEEE, 2012.

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Investigação da Estabilidade do Gerador de Indução Através de um Método Analítico Considerando o Dispositivo SVC. In: Latin-American Congresso on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, 10., 2013, Viña del Mar. **Proceedings...** Viña del Mar: [s. n.], 2013. p. 1-6.

WU, B.; LANG, Y.; ZARGARI, N.; KOURO, S. **Power conversion and control of wind energy systems**. [S. l.]: Wiley & IEEE Press, 2011. 453 p.

YAMAMOTO, M.; MOTOYOSHI, O. Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Piscataway, v. 6, n. 4, p. 624–629, 1991.

APÊNDICE A - Artigos Publicados

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Estudo da estabilidade transitória do gerador de indução com compensação de reativo por meio de um critério analítico. In: LATIN-AMERICAN CONGRESSO ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE, 9., 2011, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: [s. n.], 2011. p. 1-6.

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Análise da estabilidade transitória do gerador de indução pelo monitoramento da tensão interna após um curto-circuito: em condições de carregamento leve e pesado. IEEE PES T&D LA 2012, Setembro 3-5, 2012, Montevideo. **Anais...** Montevideo [s.n], 2012. p.

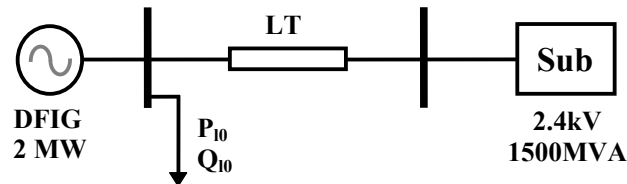
ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Investigação da estabilidade do gerador de indução através de um método analítico considerando o dispositivo SVC. In: LATIN-AMERICAN CONGRESSO ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE, 10., 2013, Viña del Mar. **Anais...** Viña del Mar: [s. n.], 2013. p.1-6.

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Investigação da estabilidade transitória do gerador scig por meio do critério da tensão interna considerando os dispositivos SVC e TCSC no Sistema Barra Infinita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 24. 2014, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s. n.], 2014. p. 2408-2413.

ANEXO A - Dados do sistema teste

A.1. Dados do sistema teste do capítulo 3.

Figura 51 – Sistema teste para o estudo da estabilidade do DFIG (SALLES, 2009).



Fonte: Salles (2009).

Tabela 7 – Dados da rede elétrica e da carga do sistema teste.

V_s (kV)	R_l (pu)	X_l (pu)	P_{10} (MW)	fp
2,4	0,043	0,054	0,60	0,94

Fonte: SALLES (2009).

Tabela 8 – Dados do gerador de indução duplamente alimentado.

P_g (MW)	R_s (pu)	X_s (pu)	R_r (pu)	X_r (pu)	X_m (pu)	H(s)	P_m (pu)	V_{dr} (pu)	V_{qr} (pu)	p
2	0,01	0,1	0,0140	0,0980	3,5	1,5	1	0	-0.0068	2

Fonte: SALLES (2009).

A.2. Dados do sistema teste do capítulo 5.

Considere o sistema-teste da Figura 33, cujos dados se encontram nas próximas tabelas. Dados do gerador de 660kW

Tabela 9 – Dados do gerador assíncrono.

P_n (kW)	V_n (kV)	R_s (p.u.)	X_s (p.u.)	R_r (p.u.)	X_r (p.u.)	X_m (p.u.)	H (s)
660	0.69	0,001941	0,131695	0,00804	0,0070145	3,2107	4

Fonte: MOTA (2006).

Tabela 10 – Dados dos reguladores PI's dos conversor RSC para controle de tensão do DFIG.

K_1	T_1	K_2	T_2
0.1	11.29	7,96	12.50

Fonte: MOTA (2006).

Tabela 11 – Dados dos reguladores PI's dos conversor RSC para controle da máquina do DFIG.

K_3	T_3	K_4	T_4
1.76	13.76	1	1

Fonte: MOTA (2006).