



Universidade Federal  
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ELVIS LUAN DE ANDRADE COSTA

# **MODELAGEM DOS GERADORES DE INDUÇÃO E DO COMPENSADOR SVC, ESTRUTURAS EÓLICAS E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO**

Campina Grande, Paraíba  
Fevereiro de 2017

ELVIS LUAN DE ANDRADE COSTA

**MODELAGEM DOS GERADORES DE INDUÇÃO E DO  
COMPENSADOR SVC, ESTRUTURAS EÓLICAS E  
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração : Geração de Energia Eólica

Orientador: Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero

Campina Grande, Paraíba

Fevereiro de 2017

ELVIS LUAN DE ANDRADE COSTA

# MODELAGEM DOS GERADORES DE INDUÇÃO E DO COMPENSADOR SVC, ESTRUTURAS EÓLICAS E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração : Geração de Energia Eólica

Aprovado em:    /    /

---

**Professor Avaliador**  
Avaliador

---

**Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero**  
Orientador, UFCG

Campina Grande, Paraíba  
Fevereiro de 2017

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus,  
por acreditar em mim antes que qualquer pessoa acreditasse,  
o que seria de mim sem a fé que eu tenho Nele.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado o dom da vida, por ter me dado uma família maravilhosa, por me proteger e ser meu porto seguro nos momentos mais difíceis em que passei durante este projeto Dele em minha vida. Sem Ele seria impossível chegar até aqui.

À minha MÃE, meu PAI e a minha AVÓ PATERNA não tenho nem como transmitir em palavras todo o apoio que me deram e todo o esforço que sempre despenderam para me proporcionar condições para enfrentar as dificuldades durante essa longa jornada, sendo responsáveis pela minha educação e formação de caráter e de ser humano. Tudo que fizeram por mim, jamais, em hipótese alguma, será esquecido. Vocês são meus heróis e meu inexpugnável exemplo de vida. Eu amo vocês.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida. A todos os meus amigos que me acompanharam durante essa jornada de cinco anos Kaydson Filho, Alynne Marla, João Paulo Moreno e Gabriel Cavalcanti, sempre me dando apoio e força. Aos amigos que nos encontramos no decorrer da trajetória Ruan Carlos Marques, Nayara Ingrid, Djair Guedes, Lucas Candeia, por terem sempre me ajudado quando precisei. Aos demais amigos que me fizeram ter alguns momentos de vida social, e que não me deixaram passar longos finais de semana apenas estudando.

Agradeço a essa Instituição, pela minha acolhida e pelas condições oferecidas que me permitiram concluir este trabalho, em especial ao professor Wamberto Queiroz que em muito me ajudou ao longo da graduação, como também nessa reta final para conclusão deste trabalho. Agradeço muito especial também ao meu professor e orientador, Luis Reyes, pela paciência, atenção, força de vontade, e por toda a ajuda dada a mim para elaboração deste relatório.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e me ajudaram a chegar nesse ponto tão especial de minha vida.

*“Nada poderá me abalar,  
nada poderá me derrotar,  
pois minha força e vitória  
tem um nome. É Jesus.”  
(Eliana Ribeiro).*

# RESUMO

Pretende-se modelar matematicamente os geradores de indução do tipo SCIG e DFIG, associados a sistemas de controle de tensão, que garantam o bom funcionamento - e portanto a estabilidade - do sistema mesmo diante de perturbações na rede, como é o caso do uso do compensador estático de reativos SVC no SCIG, e do conversor estático de potência no DFIG. Ao final, será proposto um algoritmo para o estudo da estabilidade de tensão por meio de simulações, baseado no modelo reduzido de sistema de potência, composto por um sistema barra infinita ligado a linha de transmissão e ao gerador de indução, tudo isto por meio do modelamento matemático desenvolvido.

**Palavras-chave:** Geradores de Indução SCIG e DFIG, SVC, Conversor Estático, Estabilidade de Tensão.

# ABSTRACT

It's intended to mathematically model the induction generators of the SCIG and DFIG type, associated to voltage control systems, which guarantee the proper functioning - and therefore the stability - of the system even in the presence of disturbances in the network, such as the use of the Static compensator SVC in the SCIG, and the static power converter in the DFIG. In the end, an algorithm will be proposed for the study of the voltage stability by using simulations, based on the reduced model of power system, composed by an infinite rod system connected with the transmission line and to the induction generator, all through the developed mathematical modeling.

**Keywords:** SCIG and DFIG Induction Generators, SVC, Static Converter, Voltage Stability.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geração Eólica por País. . . . .	15
Figura 2 – Potencial Eólico Nacional. . . . .	16
Figura 3 – Ilustração de uma (a) Turbina Eólica de Eixo Vertical e (b) das Principais Partes. . . . .	19
Figura 4 – Ilustração de uma (a) Turbina Eólica de Eixo Horizontal e (b) das Principais Partes. . . . .	20
Figura 5 – Esquema de uma turbina eólica com gerador do tipo de indução. . . . .	22
Figura 6 – Curvas $C_p$ por $W_m$ para diferentes velocidades do vento. . . . .	23
Figura 7 – Curvas $C_p$ por $\lambda_{opt}$ para velocidade ótima de rotação da turbina. . . . .	24
Figura 8 – Curva $P_m$ por $v_w$ . . . . .	25
Figura 9 – Arranjo Típico de uma Turbina de Velocidade Fixa. . . . .	26
Figura 10 – Arranjo Típico de uma Turbina de Velocidade Variável. . . . .	26
Figura 11 – Curva de Potência Típica de um Aerogerador com Controle Estol. . . . .	27
Figura 12 – Curva de Potência Típica de um Aerogerador com Controle de Passo. . . . .	27
Figura 13 – Topologia Velocidade Fixa para SCIG. . . . .	28
Figura 14 – Topologia Velocidade Variável para DFIG. . . . .	29
Figura 15 – Topologia Velocidade Variável para WRIG. . . . .	29
Figura 16 – Topologia Velocidade Variável para PMSG. . . . .	30
Figura 17 – Conexão do SCIG com a Rede. . . . .	31
Figura 18 – Conexão do DFIG com a Rede. . . . .	31
Figura 19 – Diagrama Esquemático dos Enrolamentos de uma Máquina de Indução. . . . .	32
Figura 20 – Ilustração do SCIG (a) Circuito Equivalente (b) Diagrama Fasorial. . . . .	38
Figura 21 – Ilustração do SCIG (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Elétrico. . . . .	42
Figura 22 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra durante o transitório. . . . .	43
Figura 23 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra em regime permanente. . . . .	45
Figura 24 – Esquema elétrico do Static Var Compensator (SVC). . . . .	46
Figura 25 – Figuras (a) Modelo dinâmico do SVC e (b) Curva característica $V_t \times I_{SVC}$ do SVC. . . . .	46
Figura 26 – SCIG com compensador shunt SVC. . . . .	47
Figura 27 – Sistema equivalente com SVC. . . . .	48
Figura 28 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra simplificado. . . . .	50
Figura 29 – Curvas de potência transmitida com diferentes valores da tensão interna em função do ângulo $\theta$ . . . . .	50
Figura 30 – Sistema Gerador-Barra com TC e TP. . . . .	52
Figura 31 – Sistema Gerador-Barra com TC e TP. . . . .	53

Figura 32 – Tensão interna crítica em função da susceptância do SVC, com uma e duas linhas de transmissão. . . . .	54
Figura 33 – Ilustração do DFIG (a) Circuito Equivalente (b) Diagrama Fasorial. . .	57
Figura 34 – Ilustração do DFIG (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Elétrico. . . .	61
Figura 35 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra durante o transitório. . . . .	63
Figura 36 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra em regime permanente. . . . .	65
Figura 37 – Sistema de geração do gerador de indução tipo DFIG. . . . .	66
Figura 38 – Diagramas de blocos do sistema de controle (a) da Potência Reativa ou a Tensão Terminal (b) da Potência Ativa ou Velocidade Angular. . . .	68
Figura 39 – Princípio de funcionamento do DFIG. . . . .	69
Figura 40 – Ilustração do SCIG ligado a barra infinita pela L.T. (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Equivalente. . . . .	72
Figura 41 – Ilustração do DFIG ligado a barra infinita pela L.T. (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Equivalente. . . . .	72
Figura 42 – Diagrama de Blocos simplificado para análise e simulação dinâmica. . .	73
Figura 43 – Sistema CHESF - leste simplificado. . . . .	73
Figura 44 – Tensão Terminal no Gerador de Indução para um curto trifásico na barra 23 durante 150ms (a) SCIG e (b) DFIG. . . . .	74

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SCIG	Squirrel Cage Induction Machine
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
SVC	Static Var Compensator

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Cenário Internacional da Geração de Energia Eólica	15
1.2	Cenário Nacional da Geração de Energia Eólica	16
1.3	Questões Ambientais	17
1.4	Objetivos	17
1.5	Organização do Trabalho de Conclusão de Curso	18
<b>2</b>	<b>ASPECTOS TÉCNICOS DE FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO EÓLICA</b>	<b>19</b>
2.1	Turbina Eólica	19
2.2	Componentes de um Aerogerador de Eixo Horizontal	20
2.3	Potência da Turbina Eólica e a Modelagem Aerodinâmica	22
2.4	Velocidade de operação: Fixa ou Variável	25
2.4.1	Sistemas de Conversão Eólica de Velocidade Fixa	25
2.4.2	Sistemas de Conversão Eólica de Velocidade Variável	26
2.5	Sistemas de Controle de Potência	27
2.5.1	Controle Estol (Stall-Regulated)	27
2.5.2	Controle de Passo (Pitch Control)	27
2.5.3	Controle Estol Ativo (Active-Stall)	28
2.6	Topologia dos Aerogeradores	28
2.6.1	Velocidade Fixa	28
2.6.2	Velocidade Variável	29
2.6.2.1	Gerador de Indução de Dupla Alimentação (DFIG - Doubly Fed Induction Generator)	29
2.6.2.2	Gerador de Indução com Rotor Bobinado (WRIG - Wound Rotor Induction Generator)	29
2.6.2.3	Gerador Síncrono (PMSG - Permanent Magnet Synchronous Generator)	30
2.6.3	Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (SCIG)	30
2.6.4	Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG)	31
2.7	Modelo Matemático para o Gerador de Indução	32
<b>3</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR DE INDUÇÃO EM GAIOLA DE ESQUILO (SCIG – SQUIRREL CAGE INDUCTION GENERATOR)</b>	<b>36</b>
3.1	Modelagem Simples	36

3.2	<b>Equações que representam a variação da Tensão Interna <math>E'</math> dadas pelas suas componentes dq: <math>e'_d</math> e <math>e'_q</math></b> . . . . .	39
3.3	<b>Modelo dinâmico: SCIG - sist. de transmissão - barra infinita</b> . . . .	42
3.3.1	Modelo Gerador-Barra em regime transitório . . . . .	43
3.3.2	Modelo Gerador-Barra em regime permanente . . . . .	44
3.4	<b>Modelo dinâmico do SCIG com SVC - sist. de transmissão - barra infinita</b> . . . . .	46
3.4.1	Modelo Matemático da conexão do SCIG com o SVC . . . . .	47
3.5	<b>Estabilidade do SCIG por meio do monitoramento da Tensão Interna <math>E'</math></b> . . . . .	49
3.5.1	Estabilidade do gerador SCIG equipado com o SVC . . . . .	53
4	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG – DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR)</b> . . . . .	56
4.1	<b>Modelagem Simples</b> . . . . .	56
4.2	<b>Equações que representam a variação da Tensão Interna <math>E'</math> dadas pelas suas componentes dq: <math>e'_d</math> e <math>e'_q</math></b> . . . . .	58
4.3	<b>Modelo dinâmico: DFIG - sist. de transmissão - barra infinita</b> . . . .	61
4.3.1	Modelo Gerador-Barra em regime transitório . . . . .	62
4.3.2	Modelo Gerador-Barra em regime permanente . . . . .	64
4.4	<b>Estabilidade do DFIG por meio do monitoramento da Tensão Interna <math>E'</math> pelos Conversores</b> . . . . .	66
5	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	76

# 1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por eletricidade cresce rapidamente, mesmo considerando os impactos negativos que acompanham algumas formas de geração convencional, tais como a nuclear e a de combustível fóssil. Tudo isso conduziu à necessidade da geração de eletricidade alternativa, com os produtores considerando os recursos renováveis para suprir a demanda sem agregar poluição ambiental (ALDABÓ, R. 2002). Com o conceito de sustentabilidade e os avanços tecnológicos, o uso de fontes renováveis de energia tornou-se uma realidade. O seu uso está cada vez mais inserido na sociedade, levando-se em conta os ganhos ambientais que elas proporcionam e seu aumento de competitividade no mercado, tornando viável a sua utilização.

O combustível do sistema de energia eólica é o vento, movimento do ar na atmosfera terrestre. Esse movimento do ar é gerado principalmente pelo aquecimento da superfície da Terra nas regiões próximas ao Equador e pelo resfriamento nas regiões próximas aos pólos. Dessa forma, os ventos das superfícies frias circulam dos pólos em direção ao Equador para substituir o ar quente tropical que, por sua vez, desloca-se para os pólos (ALDABÓ, R. 2002). A energia eólica é uma fonte renovável e limpa para a produção de energia elétrica, a energia provinda do vento apresenta como vantagens associadas à sua utilização, menores custos operacionais e de manutenção, quando comparada com as fontes convencionais de conversão de energia elétrica (ANEEL, 2002), e ainda menor impacto ambiental, pois não exige a queima de combustíveis, nem a formação de grandes reservatórios de água.

O aproveitamento dessa fonte renovável pode ser feito em sistemas independentes de uma única turbina que fornecem energia para pequenas redes ou grandes parques formando um conjunto de várias turbinas, ligado a central de fornecimento de um estado ou mesmo de um país, que acontecem com a implantação das wind farms ou parques eólicos. Para viabilizar economicamente e tecnicamente um empreendimento de produção de energia eólica, é fundamental uma avaliação correta do potencial eólico da localidade, com isso é feita uma avaliação precisa do recurso de vento de uma determinada localidade, sendo assim necessário se obter os dados de vento deste local, para isso são geralmente instalados anemômetros e sensores em torres de medição com pelo menos dois níveis de alturas distintas, com isso é possível fazer uma extrapolação destes dados de ventos para a altura desejada, que é a posição do cubo do aerogerador, sabe-se que a velocidade de vento é influenciada por diversos fatores como efeitos de orografia, rugosidade do terreno e obstáculos em redor e é preciso ter em conta estes fatores na extrapolação de dados de vento entre locais diferentes, pois entre um local e outro existem mudanças topográficas do terreno que influenciam o vento.

A utilização dessa fonte de energia está em crescimento em todo o mundo - principalmente no Brasil e em especial no Nordeste - onde apenas na última década a capacidade eólica global instalada cresceu aproximadamente dez vezes e há uma previsão de que a capacidade global total instalada atualmente seja duplicada até 2017, a escolha desta fonte de energia está relacionada à queda de custo e ao aumento da potência dos aerogeradores. O Brasil é um país exemplo de uso de fontes renováveis, no ano de 2012, apresentou 42,4% de participação dessas fontes na sua matriz energética, mantendo-se entre as mais elevadas do mundo. Nos parques eólicos atuais, os geradores assíncronos mais utilizados são os geradores de indução em gaiola de esquilo ( SCIG – Squirrel Cage Induction Generator), e os geradores de indução de rotor bobinado duplamente alimentado (DFIG – Doubly Fed Induction Generator), esses geradores acoplados a turbinas formam o que se denomina Aerogeradores, que transformam a ação mecânica recebida da força dos ventos em energia elétrica para o sistema.

## 1.1 Cenário Internacional da Geração de Energia Eólica

Atualmente, os Estados Unidos apresentam a maior participação na geração eólica mundial, com 22,9%, mas a China, que está logo atrás com 22%, entretanto recentemente os países que mais contribuíram com o aumento da instalação de novas turbinas eólicas foram a China (41%), Alemanha (10%), Brasil (7%), Índia (6%) e Estados Unidos (5%), e as previsões são de que a china ultrapasse os Estados Unidos nos próximos anos. A energia eólica poderá responder por cerca de 20% de toda a eletricidade gerada no mundo até 2030, segundo a Global Wind Energy Council (GWEC), no cenário de 2030, estimulou o GWEC, a fonte eólica poderia chegar a 2.110 GW de capacidade instalada. Esse volume representaria atração de investimentos da ordem de 200 bilhões de euros, a estimativa é de que criaria 2,4 milhões de novos empregos e reduziria as emissões de mais de 3,3 bilhões de toneladas ao ano, no cenário mais avançado do GWEC a fonte eólica poderá alcançar 5.806 GW de capacidade instalada em 2050, o que seria um potencial de geração de mais de um terço da eletricidade mundial.

Figura 1 – Geração Eólica por País.

País	1980	1990	2000	2010	2012	2013	2014	2015
EUA	-	77,4	17,9	28,0	27,0	26,3	25,6	22,9
China	-	0,1	1,9	13,1	18,2	21,9	22,3	22,0
Alemanha	-	2,0	30,2	11,1	9,6	8,0	8,0	10,5
Espanha	-	0,4	15,0	12,9	9,4	8,4	7,3	5,9
Índia	-	0,8	5,0	5,8	5,7	5,2	5,2	4,9
Reino Unido	-	0,2	3,0	3,0	3,8	4,4	4,5	4,8
Canadá	-	0,1	0,8	2,5	2,6	2,6	1,6	2,9
Brasil	-	-	0,1	0,7	1,0	1,0	1,7	2,6
França	-	0,0	0,2	2,8	2,7	2,4	2,3	2,4
Suécia	-	0,2	1,5	1,0	1,4	1,5	1,6	2,0
Itália	-	0,1	1,8	2,7	2,5	2,3	2,1	1,7
Outros	100,0	18,8	22,5	16,6	16,1	15,9	17,9	17,4
<b>Mundo (%)</b>	<b>100,0</b>							
<b>Mundo (TWh)</b>	<b>0,011</b>	<b>3,6</b>	<b>31,5</b>	<b>341,5</b>	<b>526,5</b>	<b>643,7</b>	<b>716,5</b>	<b>841,2</b>
<b>%/total*</b>	<b>-</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>	<b>1,6</b>	<b>2,3</b>	<b>2,8</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>

\* % sobre a geração mundial de energia elétrica

Fonte: Juntos pela Água, 2016.

## 1.2 Cenário Nacional da Geração de Energia Eólica

Até 2006, a geração de eletricidade a partir da força do vento era praticamente nula no Brasil, uma década depois, o País acaba de saltar para a oitava posição no ranking mundial de geração de energia eólica e assumir a liderança no fator de capacidade, que significa produção efetiva e capacidade instalada.

O Brasil é privilegiado em termos de ventos por apresentar uma média duas vezes superior à média mundial e pela pouca alteração na velocidade dos ventos, sendo possível prever o volume a ser produzido, temos também que a velocidade do vento costuma ser maior em períodos de seca, sendo assim é possível utilizar as usinas eólicas em complementação com as usinas hidrelétricas, assim preservando a água nos reservatórios nos períodos de estiagem, "estocando" a energia elétrica provinda das Hidrelétricas. O atlas de potencial eólico brasileiro indica que ainda há grandes oportunidades de expansão dos parques eólicos, o potencial estimado é da ordem de 143 GW, o equivalente a 11 usinas de Itaipu. O maior potencial eólico no Brasil é localizado na região Nordeste, com 75 GW, em seguida temos o a região Sudeste, com 27,7 GW, a região sul está em terceiro lugar com uma produção de 22,8 GW.

Figura 2 – Potencial Eólico Nacional.



Fonte: Trabalho sobre Condicionamento de Energia, 2014.

Na América Latina, o Brasil é líder na capacidade instalada, representando cerca de 72% da capacidade total, com possibilidade para o abastecimento de cerca de 7,5 milhões de pessoas e corresponde a 2% da participação na matriz elétrica brasileira, ficando atrás das hidrelétricas e térmicas. Temos também que a melhoria na eficiência juntamente com a queda nos custos de produção e instalação das turbinas eólicas, vem tornando a utilização deste tipo de energia, competitivo no mercado, outro fator importante que cabe ressaltar é que o valor dessa energia é baixo, como se pôde analisar no segundo leilão de fontes de energia alternativas, organizado pela ANEEL em agosto de 2010, em que as fontes de energia eólica apresentaram os melhores preços, R\$ 134,23 por MWh, confirmando a tendência da redução dos preços por megawatt/hora para este tipo de energia.

Sendo assim, a geração de energia elétrica no âmbito nacional por meio de turbinas eólicas, apresenta uma alternativa para diversos tipos de demandas, em que as pequenas centrais podem suprir pequenas localidades distantes da rede e as centrais de grande porte tem potencial para atender uma parcela significativa do Sistema Interligado Nacional (SIN) com alguns benefícios:

- Contribuir para a redução da emissão de gases poluentes atmosféricos pelas usinas térmicas;
- Diminuir a construção de grandes reservatórios para centrais hidrelétricas, que causam um grande impacto ambiental;
- Complementaridade com as hidrelétricas, para épocas de estiagem, fornecendo a possibilidade de um armazenamento de água nos reservatórios.

### 1.3 Questões Ambientais

A energia eólica pode ser considerada ‘amiga’ do meio ambiente, contudo apesar de ela não emitir nenhuma poluição de forma direta, a produção de lâminas, nacelle, torre, entre outros equipamentos, e a exploração dos materiais e o transporte dos equipamentos acarreta o consumo de recursos naturais (ACKERMANN, 2005). Isso significa que as emissões são produzidas à medida que esses recursos são baseados em combustíveis fósseis, logo são consideradas de natureza indireta.

Além disso, o ruído, sombreamento e o impacto visual dos aerogeradores são importantes considerações à aceitação pública da energia eólica, especialmente para aerogeradores localizados próximos a áreas populosas. O ruído causado é reduzido por meio do avanço tecnológico, por exemplo, com o uso de rotor a velocidade variável ou velocidade de rotação reduzida. O impacto visual, assim como o ruído, também pode ser mitigado com a apropriada localização dos aerogeradores no local de implantação do parque (CUSTÓDIO, 2009).

### 1.4 Objetivos

O trabalho aqui proposto tem como interesse de estudo os principais sistemas dos aerogeradores mais utilizados na atualidade, dando ênfase ao modelamento matemático das características mecânicas, elétricas e dinâmicas. Pretende-se estudar os modelos dos circuitos equivalente dos geradores de indução SCIG e DFIG associados ao uso de controladores, com vista aos estudos dinâmicos e transitórios de sistemas de potência e estabilidade de tensão.

Ao final, será proposto um algoritmo para o estudo da estabilidade de tensão por meio de simulações, baseado no modelo reduzido de sistema de potência, composto por um sistema barra infinita ligado a linha de transmissão e ao gerador de indução, tudo isto por meio do modelamento matemático desenvolvido.

## 1.5 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso

Basicamente a maneira como foi dividido este trabalho, permite apresentar uma visão clara do que vem a ser abordado ao decorrer dos capítulos, onde o Capítulo 1 mostra a parte introdutória, motivações e objetivos.

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica dos aerogeradores como o conjunto mecânico e elétrico, e os tipos de máquinas elétricas utilizadas, uma apresentação geral das estruturas desses aerogeradores.

O Capítulo 3 descreve a modelagem matemática do gerador de indução em gaiola de esquilo (SCIG – Squirrel Cage Induction Generator), para a representação em estudos dinâmicos e transitórios de sistemas de potência, e como é efetuado e controle pelo SVC para fins de estabilidade de tensão, por meio de um sistema composto pela barra infinita ligada a linha de transmissão e ao gerador SCIG.

O Capítulo 4 descreve a modelagem matemática do rotor bobinado duplamente alimentado (DFIG – Doubly Fed Induction Generator), para a representação em estudos dinâmicos e transitórios de sistemas de potência, e como é efetuado e controle pelo conversor para fins de estabilidade de tensão, por meio de um sistema composto pela barra infinita ligada a linha de transmissão e ao gerador DFIG.

Finalmente no Capítulo 5, há a conclusão do trabalho onde será proposto um algoritmo para simulação digital do sistema de potência para fins de simulação e comprovação dos sistemas apresentados, enfatizando como os métodos analíticos propostos para o SCIG e DFIG são suficientemente precisos para avaliar o comportamento frente a perturbações nos sistemas, e como os controladores expostos garantem que aja a estabilidade de tensão nos geradores de indução.

## 2 ASPECTOS TÉCNICOS DE FUNCIONAMENTO DA GERAÇÃO EÓLICA

O princípio de funcionamento de um aerogerador consiste basicamente em duas fases de conversão, primeiro que rotor acionado pelas pás do aerogerador retira energia cinética do vento e a converte em conjugado mecânico, segundo que o gerador converte esse conjugado mecânico em eletricidade.

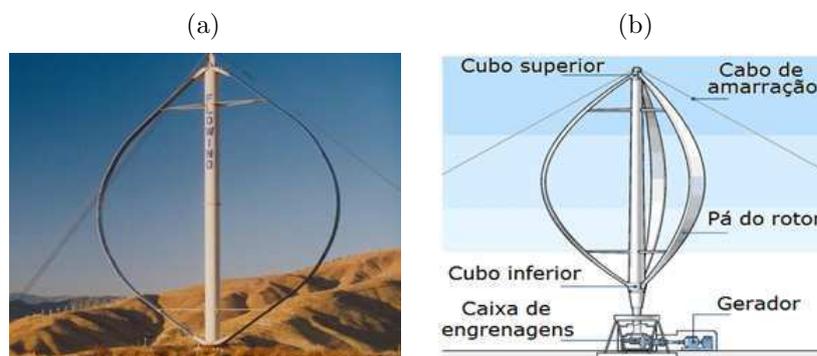
Os aerogeradores são formados basicamente pela turbina eólica, gerador elétrico e sistemas de controle, mas no conceito de turbina eólica entram elementos como as pás do rotor, nacele, cubo, eixo, freios, caixa multiplicadora, torre, entre outros componentes que serão abordados neste tópico (ALDABÓ, 2002).

### 2.1 Turbina Eólica

Atualmente são utilizados dois modelos principais de turbinas eólicas: Turbina eólica de eixo vertical e Turbina eólica de eixo horizontal, as figuras 3 e 4 expõem, respectivamente estes dois tipos de turbinas.

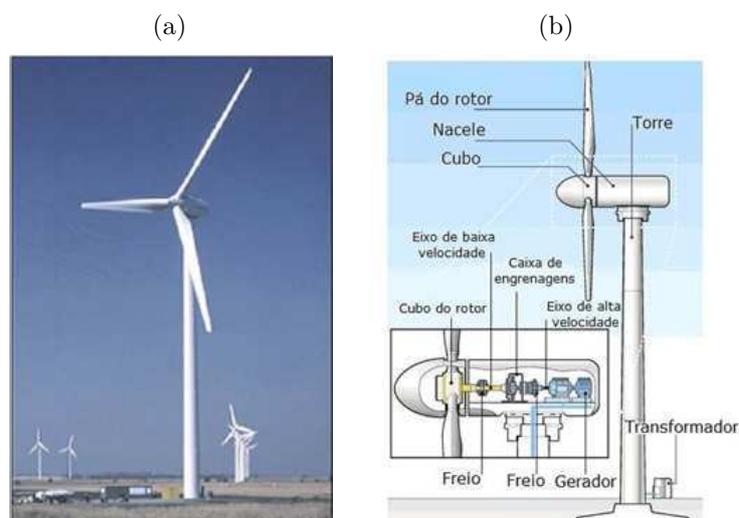
Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica no Brasil e no mundo são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) 1 ou 2 pás.

Figura 3 – Ilustração de uma (a) Turbina Eólica de Eixo Vertical e (b) das Principais Partes.



Fonte: 2º Anuário Brasileiro das Indústrias de Biomassa e Energias Renováveis, 2014.

Figura 4 – Ilustração de uma (a) Turbina Eólica de Eixo Horizontal e (b) das Principais Partes.



Fonte: Energia Eólica Princípios e Tecnologias, 2016.

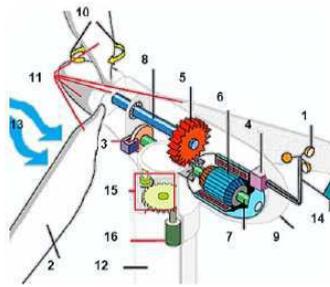
## 2.2 Componentes de um Aerogerador de Eixo Horizontal

Os aerogeradores são diferenciadas pelo tamanho e formato da nacele, pela presença ou não de uma caixa multiplicadora e pelo tipo de gerador utilizado (convencional ou multipolos), os principais componentes do aerogerador que são, de uma forma geral, a torre, a nacele e o rotor, abaixo temos uma lista dos demais componentes:

- [ 1 ] Anemômetro: mede a velocidade do vento;
- [ 2 ] Pá: capta a energia cinética do vento;
- [ 3 ] Freio da turbina eólica: Os freios detêm a rotação do eixo do rotor em caso de sobrecarga de energia ou algum outro tipo de falha do sistema. Esses freios podem ser acionados de maneira manual ou, mais comumente, pelos acionadores dos sistemas de controle (ALDABÓ, 2002).
- [ 4 ] Controlador de velocidade: Ou mesmo Controle de Potência, as turbinas são projetadas de maneira que atinjam e consigam manter a máxima potência nominal no maior intervalo de tempo possível, para isso, é necessário obter a mesma potência de saída para as diversas velocidades do vento possíveis na área em que foi instalado e com isso evitar esforços excessivos nos componentes mecânicos.

- [ 5 ] Caixa de engrenagem: O sistema de transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do cubo do rotor ao gerador. Como a velocidade angular dos rotores das turbinas varia entre 20 e 150 RPM, e os geradores têm velocidade nominal de operação entre 1200 e 1800 RPM. Um sistema de engrenagens é necessário para a multiplicação da velocidade entre os eixos do rotor e do gerador (ALDABÓ, 2002).
- [ 6 ] Gerador;
- [ 7 ] Eixo de alta velocidade: Ligado ao gerador;
- [ 8 ] Eixo de baixa velocidade: Ligado à turbina eólica;
- [ 9 ] Nacele: Nacele é a carcaça do aerogerador montada sobre a torre, e abriga as partes componentes do sistema de geração de energia como o gerador, a caixa multiplicadora, o eixo e os freios do sistema (WIKIPÉDIA, 2014).
- [ 10 ] Controle de Passo (Pitch): É um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido à um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal. Em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque e, conseqüentemente, reduzir a potência extraída do vento;
- [ 11 ] Turbina Eólica;
- [ 12 ] Torre;
- [ 13 ] Vento;
- [ 14 ] Medidor de direção do vento: Os aerogeradores de grande porte possuem um sistema de direcionamento que faz com que a nacele gire de acordo com a direção do vento. Para que isso ocorra, existem sensores que indicam a direção do vento e um sistema de engrenagens na ligação da torre com a nacele, a qual é movimentada por meio da ação de um atuador elétrico ou hidráulico (ALDABÓ, 2002);
- [ 15 ] Engrenagem de posicionamento da turbina eólica;
- [ 16 ] Motor da engrenagem.

Figura 5 – Esquema de uma turbina eólica com gerador do tipo de indução.



Fonte: Energia Eólica Princípios e Tecnologias, 2016.

## 2.3 Potência da Turbina Eólica e a Modelagem Aerodinâmica

De forma simplificada, o modelo aerodinâmico permite calcular o valor do conjugado mecânico (ou da potência mecânica) aplicado ao eixo do gerador elétrico, considerando diferentes velocidades do vento e diferentes posições do ângulo de passo das hélices.

Este modelo depende do tipo de turbina eólica a ser representado (eixo vertical ou horizontal, quantidade de hélices, controle de ângulo das pás, etc.), e independe do tipo de gerador elétrico escolhido ou do tipo de controle utilizado nos conversores, desta forma ele pode ser estudado utilizando diferentes tipos de geradores elétricos. As equações do conjugado mecânico (2.1) e da potência mecânica (2.2), que podem ser extraídos do vento, são dados respectivamente por

$$T_m = \frac{1}{2} A \rho v_w^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

$$P_m = \frac{1}{2} A \rho v_w^3 C_p(\lambda, \beta)$$

em que

1.  $T_m$  representa o Conjugado Mecânico (N.m);
2.  $P_m$  representa a Potência Mecânica (W);
3.  $A$  representa a Área varrida pelas hélices da turbina dada por  $\pi R^2$  (m<sup>2</sup>), onde  $R$  é o raio do rotor da turbina (m);
4.  $\rho$  representa a Densidade do Ar (kg/m<sup>3</sup>);
5.  $v_w$  representa a Velocidade do Vento (m/s);
6.  $C_p$  representa o Coeficiente de Potência;

7.  $\lambda$  representa a Relação Linear entre a velocidade do vento e a velocidade da ponta da hélice ( $W_m.R/V$ ), em que  $W_m$  é a velocidade angular da turbina (rad/s);
8.  $\beta$  representa o Ângulo de Passo das hélices da turbina (grau).

A potência do vento é a energia total disponível por unidade de tempo, e o coeficiente de potência ( $C_p$ ) indica a eficiência com que a turbina eólica transforma a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica girante. O valor ótimo para extração da potência contida no vento a partir da redução de sua velocidade foi primeiro descoberto pelo físico alemão Albert Betz em 1926, de acordo com Betz a máxima potência teórica que pode ser extraída do vento é dada por:

$$P_m = \frac{1}{2}A\rho v_w^3 C_{p,Betz} = \frac{1}{2}A\rho v_w^3 0,59 \quad (2.2)$$

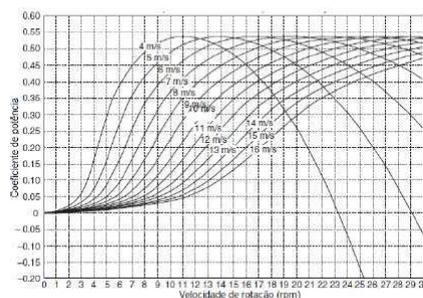
Logo, mesmo se a extração de potência sem perdas fosse possível, apenas 59% da potência do vento poderia ser utilizada pela turbina eólica, para comparação, modernas turbinas eólicas com três pás possuem um ótimo na faixa de 0.52 – 0.55 quando medido no hub da turbina. Usualmente, um conjunto de curvas  $C_p$ , relacionando  $\lambda$  e  $\beta$ , é obtido experimentalmente para cada modelo de turbina eólica, para o modelo geral fornecido por S. Heier, temos as seguintes equações que definem  $C_p$ :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5,0 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (2.3)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}}$$

Para turbinas com controle estol, as pás possuem uma posição angular fixa no hub, o que significa que o ângulo de pá  $\beta$  é constante ( $\beta_{const}$ ), com isso  $C_p$  varia apenas com  $\beta$ , assim, se a curva  $C_p \times \beta$  é conhecida para uma turbina eólica específica com raio de rotor da turbina  $R$ , é fácil construir a curva de  $C_p$  com a velocidade de rotação  $W_m$  para qualquer velocidade de vento  $V_w$ , uma vez que são conhecidas as grandezas de área e densidade do ar.

Figura 6 – Curvas  $C_p$  por  $W_m$  para diferentes velocidades do vento.



Fonte: ACKERMANN, 2005.

A velocidade de rotação é expressa por:

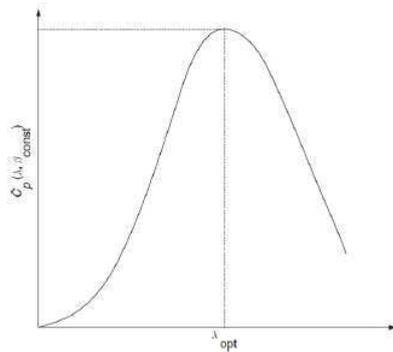
$$W_m = \frac{V_w R}{\lambda} \quad (2.4)$$

O ponto operacional ótimo da turbina eólica numa dada velocidade de vento é determinado pela velocidade do rotor para  $\lambda_{opt}$ , reescrevendo a equação 2.6 acima temos a velocidade ótima de rotação da turbina  $W_{m,opt}$  como:

$$W_{m,opt} = \frac{V_w R}{\lambda_{opt}} \quad (2.5)$$

Percebe-se que a velocidade de rotação ótima para uma velocidade de vento específica depende do raio da turbina, o qual aumenta com a potência nominal da turbina, logo quanto maior a potência nominal da turbina, menor a velocidade de rotação ótima.

Figura 7 – Curvas  $C_p$  por  $\lambda_{opt}$  para velocidade ótima de rotação da turbina.



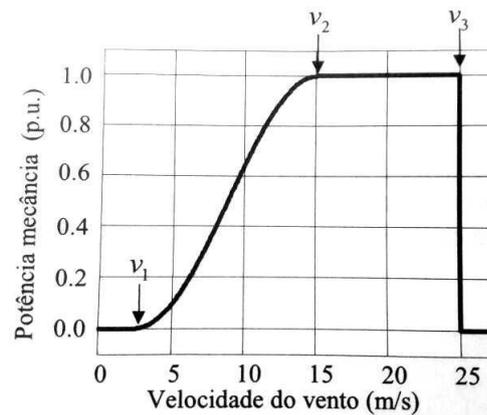
Fonte: ACKERMANN, 2005.

Uma maneira simplificada para se obter o comportamento da potência mecânica em função do tempo é feita utilizando as informações da velocidade do vento no intervalo considerado e os dados nominais da turbina fornecidos pelo fabricante (MOTA et al., 2004).

A partir da curva potência ( $P_m$ ) x velocidade do vento ( $v_w$ ) fornecida pelo fabricante identifica-se a velocidade do vento para início de operação da turbina  $v_1$ , a velocidade do vento na qual a turbina atinge a sua potência nominal  $v_2$  e a velocidade máxima de operação da turbina  $v_3$ . A equação da potência em função da velocidade do vento utilizando uma aproximação co-senoidal é dada por:

$$P_m(V_m) = 0,5 \left( 1 - \cos \left[ \frac{v_w - v_1}{v_2 - v_1} \pi \right] \right) \quad (2.6)$$

Portanto para qualquer instante  $t$  desejado é possível identificar a velocidade do vento ( $v_w$ ), se ( $v_w$ ) for menor ou igual a  $v_1$  temos que a potência é nula, se estiver entre  $v_1$  e  $v_2$  a potência mecânica é calculada pela equação 2.8, se estiver entre  $v_2$  e  $v_3$  temos valor unitário para a potência, e novamente valor nulo para  $v_w$  maior que  $v_3$  como pode ser visto no gráfico a seguir.

Figura 8 – Curva  $P_m$  por  $v_w$ .

Fonte: MOTA, 2006.

## 2.4 Velocidade de operação: Fixa ou Variável

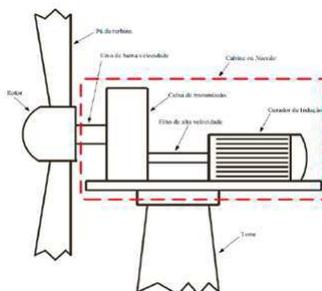
### 2.4.1 Sistemas de Conversão Eólica de Velocidade Fixa

Sistemas de conversão de energia eólica de velocidade fixa caracterizam-se por uma operação a velocidade praticamente constante, resultado de um acoplamento direto e rígido com a rede elétrica, o que significa que independentemente da velocidade do vento, a velocidade do rotor do gerador eólico é fixa e determinada pela frequência da rede elétrica ao qual está conectado.

Devido a esse tipo de acoplamento, os efeitos nas máquinas eólicas são transferidos também de forma direta para o sistema elétrico e, da mesma forma, perturbações na rede de potência tem reflexo direto no aerogerador. Assim sendo, flutuações no vento se traduzem em flutuações mecânicas e conseqüentemente em variações da potência elétrica injetada na rede de conexão, podendo vir a afetar os padrões de qualidade da energia elétrica.

Neste tipo de topologia, o gerador de indução é a opção mais usada pelos fabricantes de aerogeradores, aproveitando-se assim, sua maior simplicidade e robustez e, conseqüentemente, menor preço, por outro lado como desvantagens do gerador de indução, aponta-se a necessidade de troca de potência reativa com a rede, necessária à sua excitação e, portanto, a exigência de um equipamento adicional para correção do fator de potência.

Figura 9 – Arranjo Típico de uma Turbina de Velocidade Fixa.



Fonte: Trabalho sobre Condicionamento de Energia, 2014.

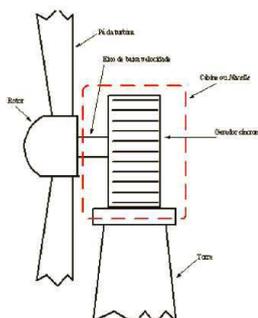
#### 2.4.2 Sistemas de Conversão Eólica de Velocidade Variável

Sistemas de conversão de energia eólica de velocidade variável caracterizam-se pela adaptação da velocidade rotacional da turbina (acelerando ou desacelerando) à velocidade do vento, então a relação de velocidade é mantida num valor predefinido constante, de maneira a alcançar uma velocidade tal que leve a um ponto de operação de máximo coeficiente de potência. Nos últimos anos as turbinas de velocidade variável têm-se tornado o tipo de tecnologia dominante na geração eólica.

A configuração típica dos sistemas de velocidade variável consiste de um gerador síncrono ou de indução com rotor bobinado conectado à rede elétrica assincronamente, por meio de um conversor de frequência formado por um conjunto retificador/inversor, logo a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação que varia em função da variação da rotação da turbina (ou seja, do vento), entretanto por meio do conversor a frequência fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico.

Contrariamente aos sistemas de velocidade fixa, o sistema de velocidade variável mantém o conjugado do gerador aproximadamente constante, então as variações de potência causadas por variações do vento são absorvidas principalmente por variações na velocidade do rotor do gerador e, conseqüentemente, da velocidade do rotor da turbina.

Figura 10 – Arranjo Típico de uma Turbina de Velocidade Variável.



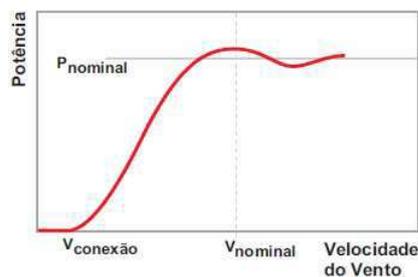
Fonte: Trabalho sobre Condicionamento de Energia, 2014.

## 2.5 Sistemas de Controle de Potência

### 2.5.1 Controle Estol (Stall-Regulated)

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento, as pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que para velocidades de vento superiores a velocidade nominal o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto, o que atua contra um aumento da potência do rotor.

Figura 11 – Curva de Potência Típica de um Aerogerador com Controle Estol.

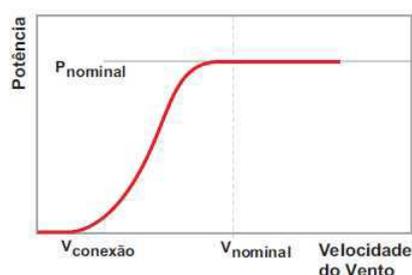


Fonte: Energia Eólica Princípios e Tecnologias, 2016.

### 2.5.2 Controle de Passo (Pitch Control)

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle, sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada devido à um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno de seu eixo longitudinal, em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque, diminuindo as forças aerodinâmicas atuantes e conseqüentemente a extração de potência do vento. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que o aerogerador produza apenas a potência nominal, tal ângulo varia numa faixa de 0 a 30 graus.

Figura 12 – Curva de Potência Típica de um Aerogerador com Controle de Passo.



Fonte: Energia Eólica Princípios e Tecnologias, 2016.

### 2.5.3 Controle Estol Ativo (Active-Stall)

Apenas nos dois últimos anos uma mistura de controle por estol e de passo apareceu, o chamado “estol ativo”, neste caso o passo da pá do rotor é girado na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento (menor sustentação) como é feito em sistema de passo normais, logo temos um grau de liberdade das pás bastante limitado, com o ângulo de ataque variando normalmente de 0 a 4 graus.

## 2.6 Topologia dos Aerogeradores

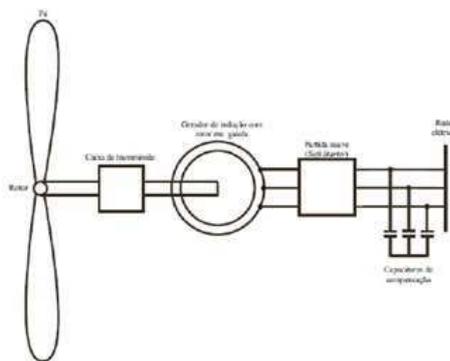
Os geradores de energia elétrica utilizados em aerogeradores podem ser síncronos ou assíncronos, ligados diretamente à rede elétrica ou por meio de conversores tipo back-to-back (AC-DC-AC), chama-se de alternador o gerador síncrono e o gerador assíncrono se designa indução. Em relação aos geradores de indução, essas máquinas têm a vantagem de serem de construção simples e barata, dispensando mecanismos de sincronismo, suas desvantagens são as altas correntes de partida e a demanda por potência reativa (ACKERMANN, 2005).

Basicamente, as principais topologias para os sistemas eólicos de acordo com o tipo de velocidade que caracteriza, sendo as outras versões existentes variações destes, são:

### 2.6.1 Velocidade Fixa

Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (SCIG - Squirrel Cage Induction Generator) acoplado diretamente à rede elétrica. Temos aqui o rotor da turbina conectado ao gerador elétrico através de uma caixa de transmissão de velocidade, a potência extraída do vento é limitada utilizando-se o método de controle estol, normalmente são conectados através de dispositivos de partida suave como o soft Starter, de maneira a suavizar os transitórios durante a fase de conexão com a rede elétrica, o banco de capacitores instalado destina-se a compensar a demanda de potência reativa do gerador de indução.

Figura 13 – Topologia Velocidade Fixa para SCIG.



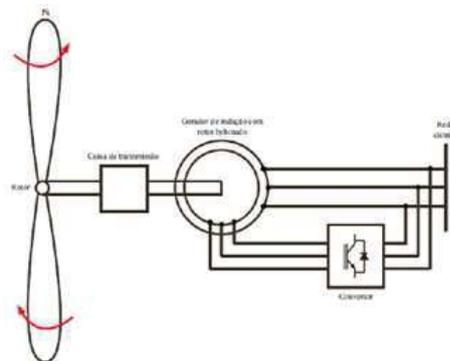
Fonte: Trabalho sobre Condicionamento de Energia, 2014.

## 2.6.2 Velocidade Variável

### 2.6.2.1 Gerador de Indução de Dupla Alimentação (DFIG - Doubly Fed Induction Generator)

É conectado à rede elétrica através de um conversor de frequência. Temos aqui o rotor é alimentado usando um conversor VSI (Voltage Sourced Imposed) back-to-back, o eixo (rotor) da turbina eólica está conectado ao gerador através da uma caixa de transmissão, entretanto nesta topologia é permitida a variação da velocidade numa faixa estreita, a potência extraída do vento é limitada utilizando-se o método de controle de passo.

Figura 14 – Topologia Velocidade Variável para DFIG.

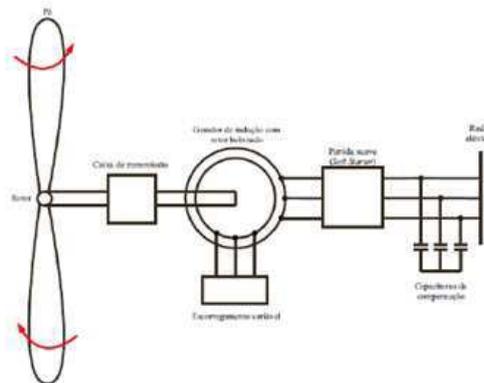


Fonte: Trabalho sobre Condicionamento de Energia, 2014.

### 2.6.2.2 Gerador de Indução com Rotor Bobinado (WRIG - Wound Rotor Induction Generator)

É conectado à rede elétrica através de um dispositivo para partida Suave (soft starter). Esse sistema utiliza um conversor controlado pelo qual a resistência do rotor do gerador pode ser manipulada pelo escorregamento podendo alcançar variações da ordem de até 10% da velocidade do gerador.

Figura 15 – Topologia Velocidade Variável para WRIG.

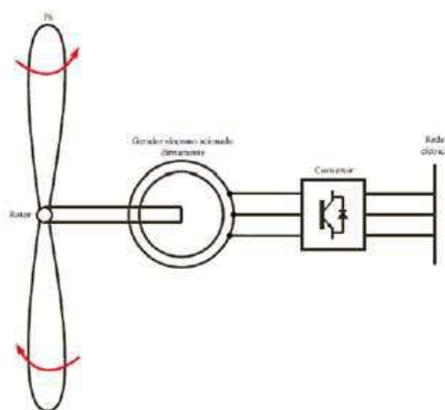


Fonte: Trabalho sobre Condicionamento de Energia, 2014.

### 2.6.2.3 Gerador Síncrono (PMSG - Permanent Magnet Synchronous Generator)

É conectado à rede elétrica através de conversor de frequência. Este gerador pode ter um rotor enrolado ou utilizar ímãs permanentes, o acoplamento desse gerador com o sistema elétrico pode ser feito através de um conversor VSI back-to-back ou um conversor composto de um retificador não controlado (ponte a diodos) e um inversor VSI (Voltage Sourced Imposed). O gerador síncrono utilizado neste tipo de arranjo é uma máquina especial, múltiplos de baixa velocidade, com um grande diâmetro o que torna dispensável o uso da caixa de transmissão, sendo esta uma grande vantagem deste conceito, além disso neste caso, a faixa de variação da velocidade permitida é ampla, uma vez que ocorre a retificação num primeiro momento e, em seguida a inversão, a potência extraída do vento é limitada pelo controle de Passo das pás do rotor em velocidades do vento elevadas.

Figura 16 – Topologia Velocidade Variável para PMSG.



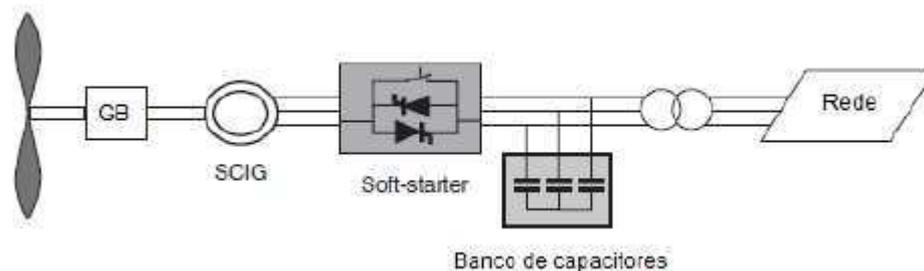
Fonte: Trabalho sobre Condicionamento de Energia, 2014.

### 2.6.3 Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (SCIG)

Nos anos 80 e 90 foi a tecnologia dominante e conhecida como “conceito dinamarquês”: velocidade fixa, controle estol, caixa de engrenagem de múltiplo estágio, geralmente sua velocidade angular está acima da velocidade síncrona  $W_s = 2\pi f$ , e gerador de indução em gaiola de esquilo (SCIG) conectado diretamente à rede através de um transformador. Para corresponder a velocidade da rede, o gerador pode ser ajustado através do seu número de par de pólos ou pela relação da caixa de engrenagens (multiplicador de velocidade).

Geradores de indução ligados diretamente à rede podem apresentar problemas na operação em redes com baixo nível de curto-circuito, devido ao elevado consumo de potência reativa em situações de subtensão. Ademais, as altas correntes de partida são mitigadas por tiristor de controle, de forma a controlar o instante de energização do gerador. Por fim, a demanda por energia reativa pode ser suprida pelo uso de auto-excitação (ACKERMANN, 2005).

Figura 17 – Conexão do SCIG com a Rede.

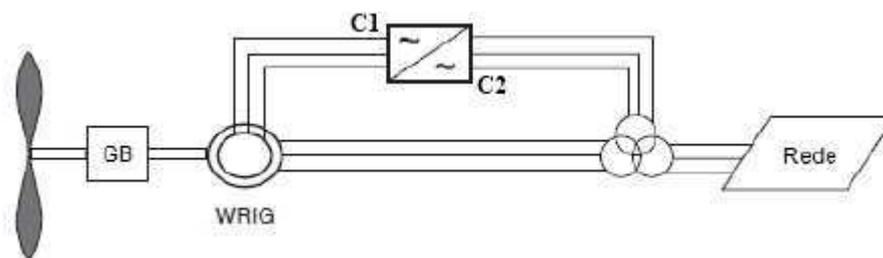


Fonte: ACKERMANN, 2005.

#### 2.6.4 Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG)

No caso de aerogeradores de grande porte, geralmente é utilizado o gerador de indução duplamente excitado (DFIG), neste esquema eólico o estator do gerador está conectado diretamente à rede elétrica enquanto que o rotor está conectado a um conversor estático, enquanto que a turbina eólica está acoplada ao gerador através da caixa de engrenagens multiplicadora de velocidades, os conversores estáticos do DFIG têm usualmente capacidade de 30% da sua potência nominal. Quando comparado ao sistema dinamarquês do SCIG, este sistema tem a desvantagem de ser mais caro, associado ao elevado custo do conversor de larga escala.

Figura 18 – Conexão do DFIG com a Rede.



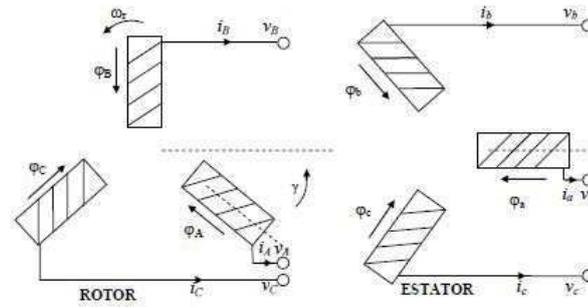
Fonte: ACKERMANN, 2005.

O conversor estático C1 interligado ao rotor do gerador funciona como fonte de tensão e corrente, controlando a velocidade e a tensão terminal do gerador (MÜLLER; DEICKE; DE DONCKER, 2002). O conversor estático C2 interligado à rede, funciona como uma fonte de tensão e corrente que controla a tensão no barramento “CC” e a potência ativa que o rotor troca com a rede. Um sistema de proteção “Crowbar” é utilizado para os conversores, prevenindo correntes elevadas que possam vir a danificar a integridade dos equipamentos (POLLER, 2003).

## 2.7 Modelo Matemático para o Gerador de Indução

Na figura abaixo é mostrada uma máquina de indução funcionando como gerador, considerando-se três enrolamentos na armadura (Estator): fases a, b, c; e três enrolamentos no rotor: A, B e C, aos quais se associam equações algébricas e diferenciais (MOTA, 2006).

Figura 19 – Diagrama Esquemático dos Enrolamentos de uma Máquina de Indução.



Fonte: MOTA, 2006.

Define-se então  $\gamma$  como sendo o ângulo de atraso entre a fase A do rotor e à fase a do estator, temos também que  $W_r$  é a velocidade angular do rotor em rad/s e que  $W_s$  é a velocidade angular do estator também em rad/s, então obtemos também o escorregamento da máquina.

$$s = \frac{W_s - W_r}{W_s} \quad (2.7)$$

$$\gamma = W_r t = (1 - s)W_s t \quad (2.8)$$

Com base na teoria e Circuitos Magnéticos Lineares Acoplados, obtemos as equações dos circuitos para cada enrolamento dadas por:

No Estator:

$$V_a = -R_s i_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \quad (2.9)$$

$$V_b = -R_s i_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \quad (2.10)$$

$$V_c = -R_s i_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \quad (2.11)$$

No Rotor:

$$V_A = -R_r i_A + \frac{d}{dt} \varphi_A \quad (2.12)$$

$$V_B = -R_r i_B + \frac{d}{dt} \varphi_B \quad (2.13)$$

$$V_C = -R_r i_C + \frac{d}{dt} \varphi_C \quad (2.14)$$

Onde  $R_s$ ,  $R_r$ ,  $\varphi_{a,b,c}$  e  $\varphi_{A,B,C}$  são as resistências e respectivos fluxos concatenados dos enrolamentos do estator e do rotor respectivamente. Considerando que o rotor possui estrutura simétrica, temos que apenas as indutâncias mútuas entre rotor e estator são funções da posição do rotor.

Logo temos que o fluxo concatenado para o estator  $\varphi_a$  é dado pela expressão a seguir, similarmente para os fluxos  $\varphi_b$  e  $\varphi_c$ .

$$\varphi_a = -L_{aa}i_a - L_{ab}(i_b + i_c) + L_{aA} [i_A \cos(\gamma) + i_B \cos(\gamma + 120^\circ) + i_C \cos(\gamma - 120^\circ)] \quad (2.15)$$

De maneira análoga para o fluxo concatenado do rotor  $\varphi_A$  temos a próxima expressão, que também é válida para os fluxos  $\varphi_B$  e  $\varphi_C$ .

$$\varphi_A = L_{AA}i_A + L_{AB}(i_B + i_C) + L_{aA} [i_a \cos(\gamma) + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma + 120^\circ)] \quad (2.16)$$

Considerando as condições de balanceamento necessárias, temos:

$$\begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0 \\ i_b + i_c &= -i_a \\ i_A + i_B + i_C &= 0 \\ i_B + i_C &= -i_A \end{aligned} \quad (2.17)$$

Então no Estator:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= -L_{aa}i_a - L_{ab}(-i_a) + L_{aA} [i_A \cos(\gamma) + i_B \cos(\gamma + 120^\circ) + i_C \cos(\gamma - 120^\circ)] \\ \varphi_a &= -(L_{aa} - L_{ab})i_a + L_{aA} [i_A \cos(\gamma) + i_B \cos(\gamma + 120^\circ) + i_C \cos(\gamma - 120^\circ)] \end{aligned}$$

Porém, temos que a indutância própria induzida no estator é dada por:

$$L_{ss} = L_{aa} - L_{ab} \quad (2.18)$$

Reescrevendo a equação da forma:

$$\varphi_a = -L_{ss}i_a + L_{aA} [i_A \cos(\gamma) + i_B \cos(\gamma + 120^\circ) + i_C \cos(\gamma - 120^\circ)]$$

Mas pela transformada de Park obtemos que:

$$L_m = \frac{3}{2}L_{aA} \quad (2.19)$$

$$i_a = i_{d_s}/q_s \quad (2.20)$$

$$i_A \cos(\gamma) + i_B \cos(\gamma + 120^\circ) + i_C \cos(\gamma - 120^\circ) = \frac{3}{2}i_{d_r/q_r} \quad (2.21)$$

Substituindo as formulas 2.22, 2.23 e 2.24, pode-se reescrever novamente a equação:

$$\begin{aligned}\varphi_{d_s/q_s} &= -L_{ss}i_{d_s/q_s} + L_{aA}\frac{3}{2}i_{d_r/q_r} \\ \varphi_{d_s/q_s} &= -L_{ss}i_{d_s/q_s} + L_m i_{d_r/q_r}\end{aligned}$$

Então realizando as substituições, a derivada no tempo e a utilização novamente da transformada de Park, obtêm-se para  $V_a$ :

$$v_{d_s/q_s} = -R_s i_{d_s/q_s} + -W_s \varphi_{d_s/q_s} + \varphi_{d_s/q_s} \dot{\quad} \quad (2.22)$$

Enquanto no Rotor:

$$\begin{aligned}\varphi_A &= L_{AA}i_A + L_{AB}(-i_A) + L_{aA} [i_a \cos(\gamma) + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma + 120^\circ)] \\ \varphi_A &= (L_{AA} - L_{AB})i_A + L_{aA} [i_a \cos(\gamma) + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma + 120^\circ)]\end{aligned}$$

Porém, temos que a indutância própria induzida no rotor é dada por:

$$L_{rr} = L_{AA} - L_{AB} \quad (2.23)$$

Reescrevendo a equação da forma:

$$\varphi_A = L_{rr}i_A + L_{aA} [i_a \cos(\gamma) + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma + 120^\circ)]$$

Mas pela transformada de Park obtemos que:

$$L_m = \frac{3}{2}L_{aA} \quad (2.24)$$

$$i_A = i_{d_r/q_r} \quad (2.25)$$

$$i_a \cos(\gamma) + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma + 120^\circ) = -\frac{3}{2}i_{d_s/q_s} \quad (2.26)$$

Substituindo as formulas 2.28, 2.29 e 2.30, pode-se reescrever novamente a equação:

$$\begin{aligned}\varphi_{d_r/q_r} &= L_{rr}i_{d_r/q_r} - L_{aA}\frac{3}{2}i_{d_s/q_s} \\ \varphi_{d_r/q_r} &= L_{rr}i_{d_r/q_r} - L_m i_{d_s/q_s}\end{aligned} \quad (2.27)$$

Então realizando as substituições, a derivada no tempo e a utilização novamente da transformada de Park, obtêm-se para  $V_a$ :

$$v_{d_r/q_r} = -R_r i_{d_r/q_r} + -sW_s \varphi_{d_r/q_r} + \varphi_{d_r/q_r} \dot{\quad} \quad (2.28)$$

O que nos da todas as formulas de fluxos concatenados e tensões tanto de eixo direto como também em quadratura, para assim modelar os dois geradores de indução em questão, o SCIG e o DFIG, as formulas detalhadas encontram-se a seguir:

Fluxos no Estator:

$$\varphi_{d_s} = -L_{ss}i_{d_s} + L_m i_{d_r} \quad (2.29)$$

$$\varphi_{q_s} = -L_{ss}i_{q_s} + L_m i_{q_r} \quad (2.30)$$

Tensões do Estator:

$$v_{d_s} = -R_s i_{d_s} - W_s \varphi_{q_s} + \dot{\varphi}_{d_s} \quad (2.31)$$

$$v_{q_s} = -R_s i_{q_s} + W_s \varphi_{d_s} + \dot{\varphi}_{q_s} \quad (2.32)$$

Fluxos no Rotor:

$$\varphi_{d_r} = L_{rr}i_{d_r} - L_m i_{d_s} \quad (2.33)$$

$$\varphi_{q_r} = L_{rr}i_{q_r} - L_m i_{q_s} \quad (2.34)$$

Tensões do Rotor:

$$v_{d_r} = -R_r i_{d_r} - sW_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r} \quad (2.35)$$

$$v_{q_r} = -R_r i_{q_r} + sW_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r} \quad (2.36)$$

Temos também outras equações que regem o comportamento dinâmico dos geradores de indução, são elas:

A Eq. de Oscilação do Rotor, com  $H$  sendo a constante de inércia,  $T_m$  e  $T_e$  sendo os torques mecânico e elétrico respectivamente.

$$\dot{W}_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e) \quad (2.37)$$

Onde o Torque Elétrico é dado por:

$$T_e = e'_q i_{q_s} + e'_d i_{d_s} \quad (2.38)$$

$$\text{ou } T_e = \frac{R_e(E' I_t)}{W_s} \quad (2.39)$$

E a Potência Elétrica pode ser dada por:

$$P_e = e_{d_s} i_{d_s} + e_{q_s} i_{q_s} \quad (2.40)$$

Onde  $e'_q$  e  $e'_d$  são as componentes de eixo direto e em quadratura da tensão interna atrás da reatância transitória do gerador de indução, fato que será mais bem exposto adiante. Uma vez determinadas as equações principais, podemos partir para a modelagem dos geradores assíncronos SCIG e DFIG, para que uma vez obtidas as equações matemáticas que representam os mesmos, possa ser feitas simulações que busquem se aproximar da realidade e assim verificar as condições de estabilidade de tensão que ambos oferecem frente a uma perturbação.

### 3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR DE INDUÇÃO EM GAIOLA DE ESQUILO (SCIG – SQUIRREL CAGE INDUCTION GENERATOR)

#### 3.1 Modelagem Simples

Para a modelagem do gerador tipo gaiola temos que os enrolamentos do rotor estão em curto o que nos fornece  $v_{d_r/q_r} = 0$ , como também despreza-se as variações dos fluxos na armadura então  $\dot{\varphi}_{d_s/q_s} = 0$ , portanto as equações que envolvem as tensões - 2.35, 2.36, 2.39 e 2.40 - são reescritas, enquanto que as demais equações que descrevem os fluxos permanecem inalteradas.

Tensões do Estator:

$$v_{d_s} = -R_s i_{d_s} - W_s \varphi_{q_s} \quad (3.1)$$

$$v_{q_s} = -R_s i_{q_s} + W_s \varphi_{d_s} \quad (3.2)$$

Tensões do Rotor:

$$0 = -R_r i_{d_r} - sW_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r} \quad (3.3)$$

$$0 = -R_r i_{q_r} + sW_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r} \quad (3.4)$$

Substituindo os fluxos concatenados  $\varphi_{q_s}$  e  $\varphi_{d_s}$  nas equações de tensão no estator dadas por 3.1 e 3.2 obtemos:

$$\begin{aligned} v_{d_s} &= -R_s i_{d_s} - W_s (-L_{ss} i_{q_s} + L_m i_{q_r}) \\ v_{d_s} &= -R_s i_{d_s} + W_s L_{ss} i_{q_s} - W_s L_m i_{q_r} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} v_{q_s} &= -R_s i_{q_s} + W_s (-L_{ss} i_{d_s} + L_m i_{d_r}) \\ v_{q_s} &= -R_s i_{q_s} - W_s L_{ss} i_{d_s} + W_s L_m i_{d_r} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Como  $R_s$ ,  $L_{ss}$  e  $L_m$  são constantes, temos  $v_{d_s}$  dependente das correntes em eixo direto e quadratura do estator e rotor, ou seja  $v_{d_s}(i_{d_s}, i_{q_s}, i_{q_r})$ , e deseja-se que a tensão não esteja em função da corrente do rotor  $i_{q_r}$ , ao invés disso a mesma ficará em função também do fluxo do rotor, em outras palavras a fim de referir o circuito à armadura, elimina-se a corrente do rotor e expressa-se a tensão de eixo direto em função do fluxo correspondente e das correntes do próprio estator.

$$\begin{aligned}\varphi_{q_r} &= L_{rr}i_{q_r} - L_m i_{q_s} \\ i_{q_r} &= \frac{\varphi_{q_r} + L_m i_{q_s}}{L_{rr}}\end{aligned}\quad (3.7)$$

Substituindo 3.7 em 3.5:

$$\begin{aligned}v_{d_s} &= -R_s i_{d_s} + W_s L_{ss} i_{q_s} - W_s L_m \left( \frac{\varphi_{q_r} + L_m i_{q_s}}{L_{rr}} \right) \\ v_{d_s} &= -R_s i_{d_s} + W_s L_{ss} i_{q_s} - \frac{W_s L_m \varphi_{q_r}}{L_{rr}} - \frac{W_s L_m^2 i_{q_s}}{L_{rr}} \\ v_{d_s} &= -R_s i_{d_s} + W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{q_s} - W_s \frac{L_m}{L_{rr}} \varphi_{q_r}\end{aligned}\quad (3.8)$$

De maneira análoga, temos  $R_s$ ,  $L_{ss}$  e  $L_m$  constantes e  $v_{q_s}$  dependente das correntes em eixo direto e quadratura do estator e rotor, ou seja  $v_{q_s}(i_{d_s}, i_{q_s}, i_{d_r})$ , e novamente para que a tensão encontre-se em função do fluxo do rotor e não da corrente do rotor dada por  $i_{d_r}$ , elimina-se a corrente do rotor e expressa-se a tensão de eixo em quadratura em função do fluxo correspondente e das correntes do próprio estator.

$$\begin{aligned}\varphi_{d_r} &= L_{rr}i_{d_r} - L_m i_{d_s} \\ i_{d_r} &= \frac{\varphi_{d_r} + L_m i_{d_s}}{L_{rr}}\end{aligned}\quad (3.9)$$

Substituindo 3.7 em 3.5:

$$\begin{aligned}v_{q_s} &= -R_s i_{q_s} - W_s L_{ss} i_{d_s} + W_s L_m \left( \frac{\varphi_{d_r} + L_m i_{d_s}}{L_{rr}} \right) \\ v_{q_s} &= -R_s i_{q_s} - W_s L_{ss} i_{d_s} + \frac{W_s L_m \varphi_{d_r}}{L_{rr}} + \frac{W_s L_m^2 i_{d_s}}{L_{rr}} \\ v_{q_s} &= -R_s i_{q_s} - W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{d_s} + W_s \frac{L_m}{L_{rr}} \varphi_{d_r}\end{aligned}\quad (3.10)$$

O termo em comum para  $e_{d_s}$  e  $e_{q_s}$  dado por  $W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right)$  é chamado de reatância transitória do gerador de indução, e é dado por:

$$X'_s = W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right)\quad (3.11)$$

Enquanto que, as tensões internas do gerador provenientes do fluxo do rotor e referidas ao estator são dadas por:

$$e'_d = -W_s \frac{L_m}{L_{rr}} \varphi_{q_r} \quad (3.12)$$

$$e'_q = +W_s \frac{L_m}{L_{rr}} \varphi_{d_r} \quad (3.13)$$

Substituindo as variáveis  $X'_s$ ,  $e'_d$  e  $e'_q$ , simplifica-se as equações 3.8 e 3.10 obtendo o resultado abaixo dado por:

$$v_{d_s} = -R_s i_{d_s} + X'_s i_{q_s} + e'_d \quad (3.14)$$

$$v_{q_s} = -R_s i_{q_s} - X'_s i_{d_s} + e'_q \quad (3.15)$$

Somando-se as componentes de tensão e corrente dos eixos direto e em quadratura fasorialmente encontra-se:

$$V_t = v_{d_s} + jv_{q_s} \quad (3.16)$$

$$I_t = i_{d_s} + ji_{q_s} \quad (3.17)$$

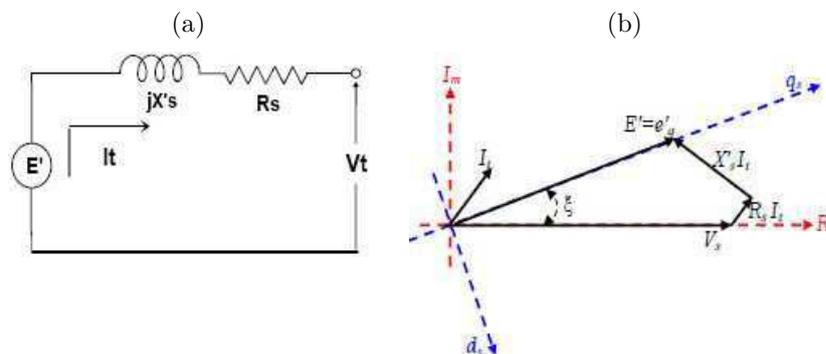
$$E' = e'_d + je'_q \quad (3.18)$$

Somando-se as equações 3.14 e 3.15 referentes a tensão terminal do gerador SCIG, e de acordo com as equações 3.16, 3.17 e 3.18 que descrevem fasorialmente as variáveis, encontra-se a equação que descreve o modelo mais simples para representar o circuito do gerador de indução referido ao estator para fins de estudo de estabilidade.

$$V_t = -R_s I_t + jX'_s I_t + E' \quad (3.19)$$

Abaixo segue o circuito descrito pela equação 3.19 bem como seu diagrama fasorial.

Figura 20 – Ilustração do SCIG (a) Circuito Equivalente (b) Diagrama Fasorial.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

## 3.2 Equações que representam a variação da Tensão Interna $E'$ dadas pelas suas componentes dq: $e'_d$ e $e'_q$

Da mesma forma que se referenciou o circuito ao estator para o caso do desenvolvimento das formulas de tensão no eixos dq para o estator, o mesmo deve ser feito para o desenvolvimento das formulas de tensão dq agora do rotor, para análise da estabilidade por meio da tensão interna  $E'$ .

Inicialmente determina-se a equação para o eixo em quadratura, substituindo-se  $i_{d_r} = \frac{\varphi_{d_r} + L_m i_{d_s}}{L_{rr}}$  na equação da tensão de eixo direto do rotor dada por  $0 = R_r i_{d_r} - s W_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r}$ , obtendo:

$$\begin{aligned} 0 &= R_r \left( \frac{\varphi_{d_r} + L_m i_{d_s}}{L_{rr}} \right) - s W_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r} \\ 0 &= \frac{R_r}{L_{rr}} \varphi_{d_r} + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{d_s} - s W_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r} \end{aligned}$$

Ainda temos que:

$$\begin{aligned} e'_q &= W_s \frac{L_m}{L_{rr}} \varphi_{d_r} \\ \varphi_{d_r} &= \frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_q \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} e'_d &= -W_s \frac{L_m}{L_{rr}} \varphi_{q_r} \\ \varphi_{q_r} &= -\frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_d \end{aligned} \quad (3.21)$$

Logo:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{R_r}{L_{rr}} \left( \frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_q \right) + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{d_s} - s W_s \left( -\frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_d \right) + \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_q \\ 0 &= \frac{R_r}{L_m W_s} e'_q + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{d_s} + \frac{s L_{rr}}{L_m} e'_d + \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_q \end{aligned}$$

Multiplicando toda a equação por  $\frac{L_m W_s}{L_{rr}}$  de modo a isolar  $e'_q$ :

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{R_r}{L_m W_s} e'_q + \frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{d_s} + \frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{s L_{rr}}{L_m} e'_d + \frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_q \\ 0 &= \frac{R_r}{L_{rr}} e'_q + \frac{R_r L_m^2 W_s}{L_{rr}^2} i_{d_s} + s W_s e'_d + \dot{e}'_q \\ \dot{e}'_q &= -\frac{R_r}{L_{rr}} e'_q - W_s \frac{R_r L_m^2}{L_{rr}^2} i_{d_s} - s W_s e'_d \end{aligned} \quad (3.22)$$

Agrupando  $\frac{R_r}{L_{rr}}$  temos:

$$\dot{e}'_q = -\frac{R_r}{L_{rr}} \left( e'_q + \frac{W_s L_m^2}{L_{rr}} i_{d_s} \right) - s W_s e'_d$$

Utilizando-se de um artifício matemático ao adicionar o termo  $W_s L_{ss} - W_s L_{ss}$ :

$$\begin{aligned} \dot{e}'_q &= -\frac{R_r}{L_{rr}} \left( e'_q + \left( W_s L_{ss} - W_s L_{ss} + \frac{W_s L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{d_s} \right) - s W_s e'_d \\ \dot{e}'_q &= -\frac{R_r}{L_{rr}} \left( e'_q + \left( W_s L_{ss} - W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) \right) i_{d_s} \right) - s W_s e'_d \\ \dot{e}'_q &= -\frac{1}{\frac{R_r}{L_{rr}}} \left( e'_q + \left( W_s L_{ss} - W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) \right) i_{d_s} \right) - s W_s e'_d \end{aligned}$$

Substituindo os termos pelas variáveis correspondentes, sendo uma delas a reatância transitória do gerador  $X'_s = W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right)$  (eq. 3.11), temos ainda a constante transitória de circuito aberto  $T'_0$  e a reatância de dispersão do estator  $X_s$  dados por:

$$T'_0 = \frac{L_{rr}}{R_r} \quad (3.23)$$

$$X_s = W_s L_{ss} \quad (3.24)$$

O que resume a equação de  $e'_q$  há:

$$\dot{e}'_q = -\frac{1}{T'_0} \left( e'_q + (X_s - X'_s) i_{d_s} \right) - s W_s e'_d \quad (3.25)$$

Então, de maneira análoga ao que foi feito para o eixo em quadratura, determina-se a equação do eixo direto substituindo-se  $i_{q_r} = \frac{\varphi_{q_r} + L_m i_{q_s}}{L_{rr}}$  (eq. 3.7) na equação da tensão de eixo em quadratura do rotor dada por  $0 = R_r i_{q_r} + s W_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r}$  (eq. 3.4), obtemos:

$$\begin{aligned} 0 &= R_r \left( \frac{\varphi_{q_r} + L_m i_{q_s}}{L_{rr}} \right) + s W_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r} \\ 0 &= \frac{R_r}{L_{rr}} \varphi_{q_r} + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{q_s} + s W_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r} \end{aligned}$$

Das equações  $\varphi_{d_r} = \frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_q$  (eq. 3.20) e  $\varphi_{q_r} = -\frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_d$  (eq. 3.21), temos que:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{R_r}{L_{rr}} \left( -\frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_d \right) + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{q_s} + s W_s \left( \frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_q \right) - \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_q \\ 0 &= -\frac{R_r}{L_m W_s} e'_d + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{q_s} + \frac{s L_{rr}}{L_m} e'_q - \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_q \end{aligned}$$

Multiplicando toda a equação por  $\frac{L_m W_s}{L_{rr}}$  de modo a isolar  $e'_d$ :

$$0 = -\frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{R_r}{L_m W_s} e'_d + \frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{q_s} + \frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{s L_{rr}}{L_m} e'_q - \frac{L_m W_s}{L_{rr}} \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_d$$

$$\begin{aligned}
 0 &= -\frac{R_r}{L_{rr}}e'_d + \frac{R_r L_m^2 W_s}{L_{rr}^2}i_{qs} + sW_s e'_q + \dot{e}'_d \\
 \dot{e}'_d &= -\frac{R_r}{L_{rr}}e'_d + W_s \frac{R_r L_m^2}{L_{rr}^2}i_{qs} + sW_s e'_q
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Agrupando  $\frac{R_r}{L_{rr}}$  temos:

$$\dot{e}'_d = -\frac{R_r}{L_{rr}} \left( e'_d - \frac{W_s L_m^2}{L_{rr}} i_{qs} \right) + sW_s e'_q$$

Utilizando-se do artifício matemático já utilizado, adicionando-se o termo  $W_s L_{ss} - W_s L_{ss}$ :

$$\begin{aligned}
 \dot{e}'_d &= -\frac{R_r}{L_{rr}} \left( e'_d - \left( W_s L_{ss} - W_s L_{ss} + \frac{W_s L_m^2}{L_{rr}} \right) i_{qs} \right) + sW_s e'_q \\
 \dot{e}'_d &= -\frac{R_r}{L_{rr}} \left( e'_d - \left( W_s L_{ss} - W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) \right) i_{qs} \right) + sW_s e'_d \\
 \dot{e}'_d &= -\frac{1}{\frac{R_r}{L_{rr}}} \left( e'_d - \left( W_s L_{ss} - W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) \right) i_{qs} \right) + sW_s e'_d
 \end{aligned}$$

Substituindo os termos pelas variáveis correspondentes a reatância transitória do gerador  $X'_s = W_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right)$  (eq. 3.11), a constante transitória de circuito aberto  $T'_0 = \frac{L_{rr}}{R_r}$  (eq. 3.23), e a a reatância de dispersão do estator  $X_s = W_s L_{ss}$  (eq. 3.24), a equação  $\dot{e}'_d$  se resume há:

$$\dot{e}'_d = -\frac{1}{T'_0} (e'_d - (X_s - X'_s) i_{qs}) + sW_s e'_q \tag{3.27}$$

Portanto tanto as equações 3.22 e 3.25 como as equações 3.26 e 3.27, descrevem as equações de eixo em quadratura e de eixo direto do rotor referenciadas para o estator, uma vez que se tenha obtido essas equações, é possível fazer a a análise da estabilidade da tensão interna  $E'$ .

Em relação as correntes dq,  $i_d$  e  $i_q$  do estator e rotor, temos que substituindo os respectivos fluxos obtidos das tensões internas do gerador  $\varphi_{dr} = \frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_q$  (eq. 3.20) e  $\varphi_{qr} = -\frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_d$  (eq. 3.21) nas formulas de fluxos do rotor  $\varphi_{dr} = L_{rr} i_{dr} - L_m i_{ds}$  (eq. 3.27) e  $\varphi_{qr} = L_{rr} i_{qr} - L_m i_{qs}$  (eq. 3.28), obtemos:

$$\begin{aligned}
 \frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_q &= L_{rr} i_{dr} - L_m i_{ds} \\
 -\frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_d &= L_{rr} i_{qr} - L_m i_{qs}
 \end{aligned}$$

Reorganizando as equações acima, consegue-se obter os valores das correntes dq tanto do estator como do rotor, uma vez que os valores de  $W_s$ ,  $L_m$  e  $L_{rr}$  são constantes, e conhecidos os valores das tensões internas  $e'_d$  e  $e'_q$ , as equações se resumem as correntes dq do estator e rotor:

Para o Estator:

$$i_{d_s} = -\frac{L_{rr}}{L_m^2 W_s} e'_q + \frac{L_{rr}}{L_m} i_{d_r} \quad (3.28)$$

$$i_{q_s} = \frac{L_{rr}}{L_m^2 W_s} e'_d + \frac{L_{rr}}{L_m} i_{q_r} \quad (3.29)$$

Para o Rotor:

$$i_{d_r} = \frac{1}{L_m W_s} e'_q + \frac{L_m}{L_{rr}} i_{d_s} \quad (3.30)$$

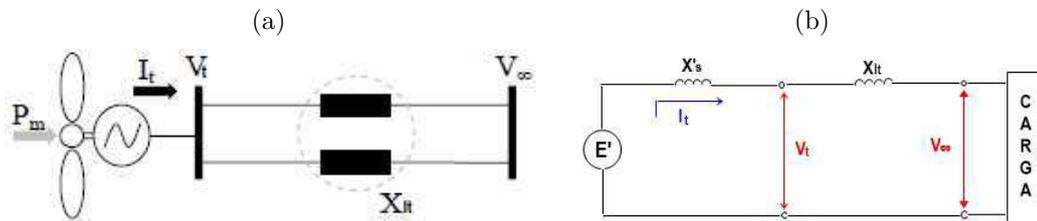
$$i_{q_r} = -\frac{1}{L_m W_s} e'_d + \frac{L_m}{L_{rr}} i_{q_s} \quad (3.31)$$

Portanto, se conhecidas os valores das correntes do rotor consegue-se obter os valores das correntes do estator de acordo com as equações 3.28 e 3.29, e da mesma forma, se conhecidas os valores das correntes do estator consegue-se obter os valores das correntes do rotor de acordo com as equações 3.30 e 3.31.

### 3.3 Modelo dinâmico: SCIG - sist. de transmissão - barra infinita

Considera-se uma máquina de indução do tipo gaiola de esquilo (SCIG) conectada à uma grande carga representada por uma barra infinita através do um sistema de linha de transmissão, como apresenta o diagrama unifilar e o circuito elétrico abaixo.

Figura 21 – Ilustração do SCIG (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Elétrico.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

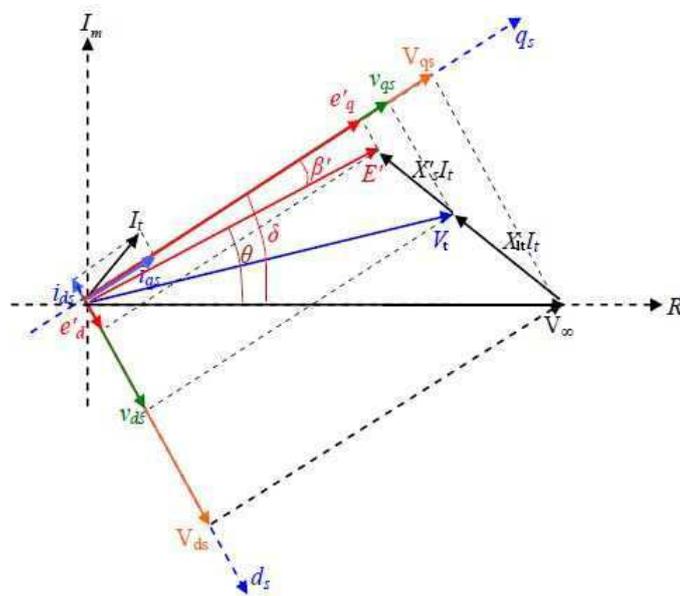
Para análise desconsidera-se as resistências do estator da máquina e da Linha de Transmissão (LT), justamente por serem valores pequenos quando comparados aos valores das reatâncias do sistema como um todo.

Algumas observações a serem feitas é de que a máquina assíncrona de gaiola de esquilo esta sendo representada pelo modelo de terceira ordem imposto pelas equações dinâmicas das derivadas das tensões internas dq, e que o sistema de transmissão é representado pelo modelo mais simples que é o caso de linhas curtas, pois não há reatâncias shunt em derivação que é o caso do modelo  $\pi$  para linhas longas de transmissão.

### 3.3.1 Modelo Gerador-Barra em regime transitório

Abaixo segue diagrama fasorial do circuito em que se avaliam as condições do gerador SCIG conectado ao barramento infinito por meio da linha de transmissão durante um transitório do sistema.

Figura 22 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra durante o transitório.



Fonte: Zamperin (2011).

Temos que de acordo com o diagrama fasorial:

$$\begin{aligned} V_{\infty} &= V_t - jX_l I_t \\ V_{\infty} &= (E' - jX'_s I_t) - jX_l I_t \end{aligned}$$

Sendo  $I_t = i_{d_s} + j i_{q_s}$ :

$$\begin{aligned} V_{\infty} &= E' - jX'_s (i_{d_s} + j i_{q_s}) - jX_l (i_{d_s} + j i_{q_s}) \\ V_{\infty} &= E' - jX'_s i_{d_s} + X'_s i_{q_s} - jX_l i_{d_s} + X_l i_{q_s} \end{aligned}$$

Tendo ainda que  $E' = e'_d + j e'_q$ :

$$V_{\infty} = (e'_d + X'_s i_{q_s} + X_l i_{q_s}) + j (e'_q - X'_s i_{d_s} - X_l i_{d_s}) \quad (3.32)$$

Logo:

$$V_{\infty} \cos \theta = e'_q - (X_l + X'_s) i_{d_s} = V_{q_s} \quad (3.33)$$

$$V_{\infty} \sin \theta = e'_d + (X_l + X'_s) i_{q_s} = V_{d_s} \quad (3.34)$$

As equações anteriores determinam o ponto de operação da máquina, tirando-se  $i_{d_s}$  e  $i_{q_s}$  em função do ângulo  $\theta$  de defasagem entre  $V_{\infty}$  e  $E'$  obtemos:

$$i_{d_s} = \frac{e'_q - V_{\infty} \cos \theta}{X_l + X'_s} \quad (3.35)$$

$$i_{q_s} = \frac{V_{\infty} \sin \theta - e'_d}{X_l + X'_s} \quad (3.36)$$

Uma vez que tenham sido obtidas as equações de tensão e corrente para o circuito gerador-barra em regime permanente, o modulo da potência elétrica pode ser escrito como:

$$P_e = \frac{E' V_{\infty}}{X_l + X'_s} \sin (\theta - \beta') \quad (3.37)$$

Sendo:  $E' = \sqrt{e'^2_d + e'^2_q}$ .

O ângulo  $\beta'$  surge durante o período transitório no sistema pelo movimento das equações  $e'_d$  e  $e'_q$  e é dado por:

$$\beta' = \arctan \left( \frac{e'_d}{e'_q} \right) \quad (3.38)$$

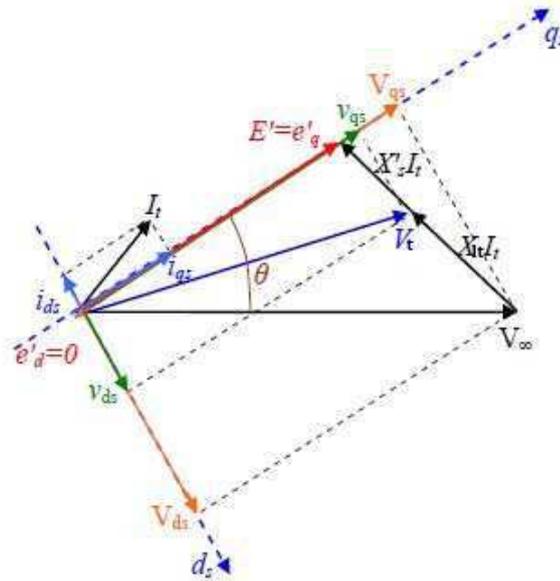
Define-se  $\theta = \delta - \beta'$ , como o ângulo  $\beta'$  surge apenas durante o transitório - considerando que o sistema estava em equilíbrio inicialmente e houve um desbalanceamento - então inicialmente  $\beta'$  é zero e  $\theta^0 = \delta^0$ , então  $\Delta \theta = -\Delta \beta'$  como será visto no modelo do gerador-barra em regime permanente.

### 3.3.2 Modelo Gerador-Barra em regime permanente

Já em regime permanente  $\beta'$  é anulado e o sistema encontra-se em equilíbrio, nesse caso as derivadas temporais também são nulas, de forma que  $e'_d = e'_q = \dot{W}_r = 0$ , temos então que  $0 = \frac{1}{2H}(T_m - T_e)$  o que fornece  $T_m = T_e$ .

O torque líquido atuante é dado pela diferença entre o torque mecânico proveniente da hélice e o torque elétrico fornecido pelo gerador  $T_l = T_m - T_e$ , então em regime permanente  $T_l = 0$  e com isso temos a expressão mostrada acima em que os torques se igualam, temos também que em p.u. o torque e a potência são iguais, de maneira que temos as potências mecânica e elétrica também se igualando e fornecendo  $P_m = P_l$ . Abaixo segue diagrama fasorial do circuito gerador-barra para o caso em regime permanente.

Figura 23 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra em regime permanente.



Fonte: Zamperin (2011).

Na condição de equilíbrio, uma vez que  $\beta'$  seja nulo e consequentemente  $e'_d = 0$ , temos que as equações de tensão interna e potência elétrica podem ser reescritas da seguinte forma.

$$\begin{aligned} E' &= j e'_q \\ |E'| &= |e'_q| \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$P_e = \frac{E' V_\infty}{X_l + X'_s} \text{sen} \theta \quad (3.40)$$

Então como discutido na seção anterior em que o sistema encontrava-se em regime permanente e logo após houve um desbalanceamento e o sistema passou para o regime transitório, como inicialmente  $e'_d = 0$  e  $\beta'^0 = 0$  então  $\theta^0 = \delta^0$ , enquanto que o resultado dessa perturbação sofrida gera essa variação do ângulo  $\Delta\theta$  que corresponde exatamente a um valor negativo de  $\beta'$ , e fornece um novo valor de  $\theta$  dado por  $\theta = \delta - \beta'$ .

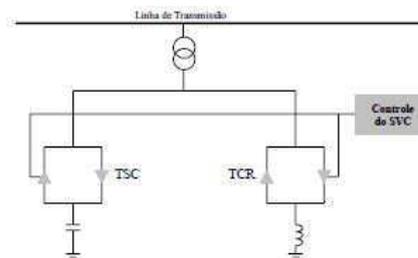
Vale salientar que na condição de regime permanente a corrente do estator de eixo direto não sofre alteração na sua magnitude, enquanto que a corrente do estator de eixo em quadratura sofre uma mudança no valor da sua magnitude, uma vez que  $e'_d$  é anulado.

$$i_{q_s} = \frac{V_\infty \text{sen} \theta}{X_l + X'_s} \quad (3.41)$$

### 3.4 Modelo dinâmico do SCIG com SVC - sist. de transmissão - barra infinita

O SVC é um dispositivo composto por uma combinação de reatores controlados por tiristores (TCRs – Thyristor Controlled Reactor) e capacitores chaveados por tiristores (TSCs – Thyristor Switched Capacitor), conectados em derivação na rede elétrica via transformador de acoplamento como mostrado na figura abaixo, onde a troca de potência reativa com o sistema, injeção ou absorção de reativos, é controlada variando-se o valor da reatância equivalente a fim de manter a tensão da barra do sistema na qual está conectado em torno de um valor especificado.

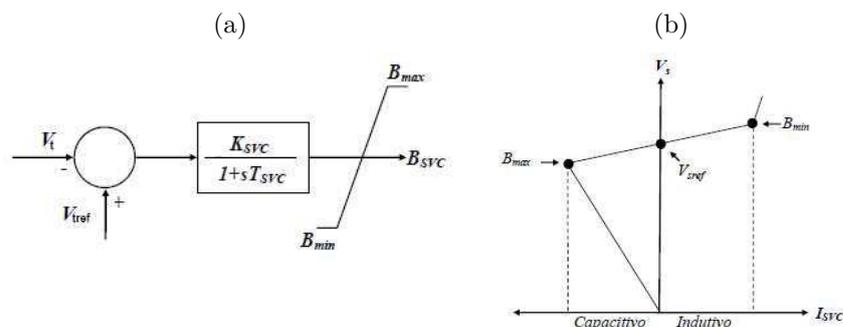
Figura 24 – Esquema elétrico do Static Var Compensator (SVC).



Fonte: Zamperin (2011).

O regulador PI é responsável por controlar a tensão terminal por meio da troca de potência reativa com a rede, há figura a seguir mostra o diagrama de blocos do modelo dinâmico que representa o controle de tensão do SVC, como também é apresentada a curva da tensão terminal pela corrente injetada pelo SVC ( $V_t \times I_{SVC}$ ), em que  $V_t$  é o valor rms (root mean square) trifásico da tensão terminal;  $K_{SVC}$  é a constante de ganho;  $T_{SVC}$  é a constante de tempo;  $B_{SVC}$  é a susceptância equivalente desejada;  $B_{max/min}$  representam os limites capacitivo e indutivo do equipamento de mais ou menos 5%, para evitar um comportamento oscilatório.

Figura 25 – Figuras (a) Modelo dinâmico do SVC e (b) Curva característica  $V_t \times I_{SVC}$  do SVC.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

De acordo com o modelo acima, a susceptância do SVC  $B_{SVC}$  é ajustada através da função de transferência de primeira ordem com ganho  $K_{SVC}$  e constante de tempo  $T_{SVC}$  que representa o atraso do circuito de disparo dos tiristores geralmente muito pequeno, e  $B_{max/min}$  limitam o resultado do controlador para o valor da susceptância de modo a controlar a tensão da barra.

De acordo com Akhmatov (2004) e Nassif (2004) a potência reativa que o SVC troca com o sistema é diretamente proporcional ao valor da sua susceptância e ao quadrado da tensão da barra.

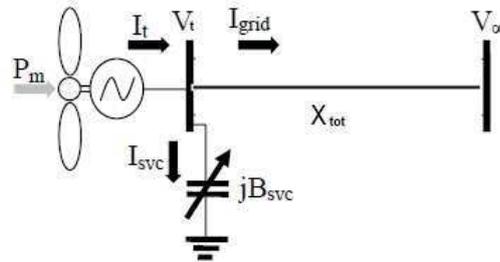
$$Q_{SVC} = B_{SVC}V_t^2 \quad (3.42)$$

É importante ressaltar que ao se atingir o limite de operação do modo capacitivo ( $B_{max}$ ), a corrente que o SVC injeta no sistema diminui linearmente com a tensão da barra na qual ele está conectado, e conseqüentemente o fornecimento de reativos do equipamento dada pela equação acima, diminui com o quadrado dessa tensão.

### 3.4.1 Modelo Matemático da conexão do SCIG com o SVC

Na figura abaixo temos a representação do acoplamento do compensador estático de reativos SVC nos terminais do gerador SCIG, da linha de transmissão e da carga dada pela barra infinita.

Figura 26 – SCIG com compensador shunt SVC.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

A reatância equivalente  $X_{tot}$  inclui a reatância do transformador  $X_{trafo}$  e a reatância da linha de transmissão  $X_{lt}$ , a tensão terminal do gerador representada por  $V_t$ ,  $V_\infty$  a tensão na barra infinita,  $I_{grid}$  sendo a corrente total fornecida a rede,  $I_t$  é a corrente nos terminais do gerado e por fim  $I_{SVC}$  que é a corrente do SVC.

Da configuração anterior temos:

$$V_t = V_\infty + jX_l I_{grid} \quad (3.43)$$

Mas :

$$I_{grid} = I_t - I_{SVC} \quad (3.44)$$

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_t \quad (3.45)$$

Substituindo 3.45 em 3.45 obtêm-se:

$$I_{grid} = I_t - jB_{SVC}V_t \quad (3.46)$$

Novamente substituindo 3.46 na equação que rege o sistema 3.43:

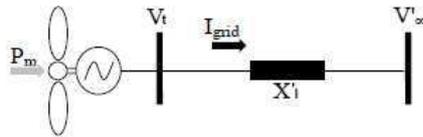
$$\begin{aligned} V_t &= V_\infty + jX_l(I_t - jB_{SVC}V_t) \\ V_t &= V_\infty + jX_lI_t + X_lB_{SVC}V_t \\ V_t(1 - X_lB_{SVC}) &= V_\infty + jX_lI_t \\ V_t &= \frac{V_\infty}{1 - X_lB_{SVC}} + j\frac{X_l}{1 - X_lB_{SVC}}I_t \end{aligned} \quad (3.47)$$

Do circuito gerador-barra sem o SVC temos que a equação que rege o sistema é dada por  $V_t = V_\infty + jX_lI_t$ , então quando comparadas as equações que regem o sistema para os casos sem e com a presença do SVC, obtemos uma equivalência - considerando uma linha de transmissão equivalente - da tensão do novo barramento infinito em que esta a carga, como também da nova reatância que é estabelecida ao longo da L.T., dadas pelas equações a seguir como podem ser vistas simplificadas na figura abaixo:

$$V'_\infty = \frac{V_\infty}{1 - X_lB_{SVC}} \quad (3.48)$$

$$X'_l = \frac{X_l}{1 - X_lB_{SVC}} \quad (3.49)$$

Figura 27 – Sistema equivalente com SVC.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

Com a inclusão das equivalências  $V'_\infty$  e  $X'_l$  nas equações das correntes do eixo direto e do eixo em quadratura, obtemos os cálculos com a inclusão do dispositivo SVC.

$$i_{dsSVC} = \frac{e'_q - \frac{V_\infty \cos \theta}{1 - X_lB_{SVC}}}{\frac{X_l}{1 - X_lB_{SVC}} + X'_s} \quad (3.50)$$

$$i_{qsSVC} = \frac{\frac{V_\infty \sin \theta}{1 - X_lB_{SVC}} - ed'}{\frac{X_l}{1 - X_lB_{SVC}} + X'_s} \quad (3.51)$$

Substituindo  $V_t = v_{ds} + jv_{qs}$  e  $I_t = i_{ds} + ji_{qs}$  na equação 3.47 temos:

$$v_{ds} + jv_{qs} = \frac{V_\infty}{1 - X_lB_{SVC}} + j\frac{X_l}{1 - X_lB_{SVC}}(i_{ds} + ji_{qs})$$

$$v_{ds} + jv_{qs} = \frac{V_\infty}{1 - X_lB_{SVC}} + j\frac{X_l}{1 - X_lB_{SVC}}i_{ds} - \frac{X_l}{1 - X_lB_{SVC}}i_{qs}$$

Então separando as tensões do eixo real e imaginário do estator, obtemos as componentes dq da tensão terminal do SCIG com a atuação do SVC:

$$v_{ds} = \frac{V_{\infty}}{1 - X_l B_{SVC}} \sin\theta - \frac{X_l}{1 - X_l B_{SVC}} i_{qs_{SVC}} \quad (3.52)$$

$$v_{qs} = \frac{V_{\infty}}{1 - X_l B_{SVC}} \cos\theta + \frac{X_l}{1 - X_l B_{SVC}} i_{ds_{SVC}} \quad (3.53)$$

Uma observação relevante para o presente estudo é de que a interpretação física das grandezas do sistema com o SVC é a mesma do sistema sem o SVC, bastando para reproduzir o original, considerar que a susceptância do SVC seja zero ( $B_{SVC} = 0$ ) nas equações correspondentes.

### 3.5 Estabilidade do SCIG por meio do monitoramento da Tensão Interna E'

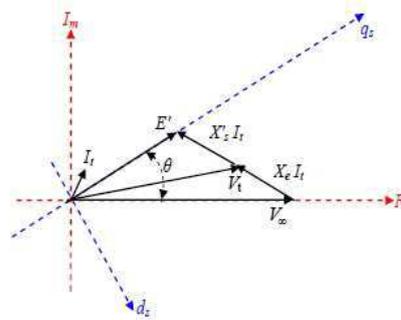
A origem da instabilidade do gerador de indução SCIG é definida pela tensão interna da máquina, e a principal causa dessa instabilidade é a desmagnetização do gerador. Esta afirmação parte da equação de oscilação da máquina que como discutido na seção anterior para o sistema em regime permanente pode ser dada por  $\dot{W}_r = \frac{1}{2H}(P_m - P_e)$ , então qualquer variação de potência elétrica gera uma variação da velocidade, uma vez que as demais grandezas são constantes e não mudam o valor da velocidade angular.

Observando a equação também anteriormente citada para o caso do sistema em regime permanente  $P_e = \frac{E'V_{\infty}}{X_l + X'_s} \sin\theta$  a qual representa a potência elétrica transmitida do gerador para a carga, e focando na máxima potência transmitida (ou capacidade de transmissão  $\theta = 90^\circ$ ) têm-se as seguintes grandezas invariáveis: tensão da barra infinita ( $V_{\infty}$ ), reatância total ( $X_l + X'_s$ ) e a única não constante que é a tensão interna E', o que nos diz que essa grandeza é a única responsável pelas variações da velocidade ditadas pela equação de oscilação.

Considerando o exposto, caso o sistema sofra uma perturbação dinâmica ou transitória que possa levar o sistema à perda de estabilidade, este fato se deve à redução ou eventualmente à total anulação da capacidade de transmissão de potência decorrente da degeneração da tensão interna originada pela desmagnetização da máquina, o que ocorre nessa situação é que 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, então o excesso de energia produzida será convertida em energia cinética resultando no aumento da velocidade do gerador.

Nesta seção, pretende-se desenvolver um método analítico para a estabilidade dos geradores de indução do tipo SCIG por meio da observação da tensão interna  $E'$ . Na figura abaixo temos o diagrama fasorial do sistema em equilíbrio simplificado, sabe-se que a SCIG absorve potência reativa do sistema, portanto a corrente nos terminais ( $I_t$ ) está adiantada em relação à tensão terminal ( $V_s$ ).

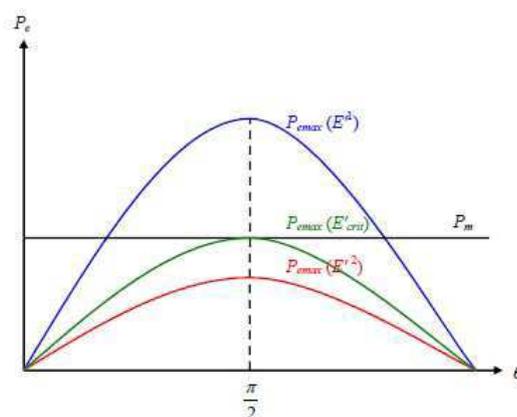
Figura 28 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra simplificado.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

A Figura abaixo evidencia três situações de potência elétrica transmitida, com  $E'^1 > E'_{crit}$ ,  $E'^1 = E'_{crit}$  e  $E'^2 < E'_{crit}$ . A primeira traçada com  $E'^1 > E'_{crit}$  apresenta capacidade de transmissão superior à potência mecânica aplicada no eixo da máquina, portanto apresentando possibilidade de operação estável, caracterizada pela existência de torque restaurativo do equilíbrio. A segunda com  $E'^1 = E'_{crit}$ , tangenciando o valor da potência aplicada ao eixo, caracteriza a situação limite, com a capacidade de transmissão justamente igual à potência no eixo da máquina. A terceira, com  $E'^2 < E'_{crit}$  apresenta capacidade de transmissão inferior, manifestada pela deterioração da tensão interna originada da desmagnetização do SCIG sendo impossível que toda a potência injetada no eixo da máquina seja transmitida para a carga.

Figura 29 – Curvas de potência transmitida com diferentes valores da tensão interna em função do ângulo  $\theta$ .



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

Então é de interesse determinar o valor crítico da tensão interna, para assim usar como um apontador de criticidade - um valor limite - durante o transitório do gerador assíncrono. A expressão que define a tensão interna crítica ( $E'_{crit}$ ) é obtida a partir da equação que fornece a máxima potência transferida pelo gerador para a carga quando o ângulo  $\theta = 90^0$ , rearrumando a equação consegue-se obter o o ponto onde a curva de potência elétrica tangencia a superfície da potência mecânica, ou seja, o ponto máximo no vértice da parábola.

$$P_e = \frac{E'V_\infty}{X_l + X'_s} \quad (3.54)$$

$$E'_{crit} = \frac{P_e (X_l + X'_s)}{V_\infty} \quad (3.55)$$

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  $E'_{crit}$  (ZAMPERIN; COLVARA, 2010).

Imaginando a ocorrência de um curto-circuito trifásico próximo aos terminais do gerador, durante o período em que a falta está ocorrendo o fornecimento de potência elétrica é interrompido, o que ocasiona a queda da tensão interna e a aceleração do rotor devido ao desbalanço das potências, uma vez que toda a potência mecânica é convertida em energia cinética acelerando o gerador. Eliminando a falta e restaurando conseqüentemente a magnetização da máquina, o fornecimento da potência elétrica é restabelecido e o sistema começa a evoluir para uma situação de regime de operação estável ou para a instabilidade de velocidade. A estabilidade se caracteriza pela evolução da tensão interna da máquina para valor acima do valor crítico, o que assegura a capacidade de transmissão suficiente para entregar ao sistema a potência que a máquina recebe no eixo, podendo-se estabelecer o equilíbrio. Se por outro lado a tensão interna cai abaixo do valor crítico, a capacidade de transmissão é prejudicada de modo a não ser possível entregar ao sistema a potência recebida no eixo e o rotor acelera, caracterizando a instabilidade de velocidade, assim temos as condições:

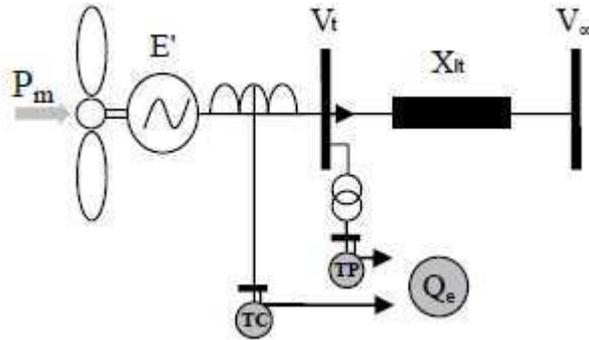
- Estabilidade de Velocidade:  $P_{e_{max}} > P_m$
- Instabilidade de Velocidade:  $P_{e_{max}} < P_m$

Porém como evidenciado nas equações que regem a tensão interna no eixo real e imaginário  $e'_d$  e  $e'_q$  apresentadas anteriormente, a tensão interna  $E'$  é governada pela constante transitória de circuito aberto  $T'_0$  que não admite variações bruscas, de modo que após a eliminação da falta mesmo nos casos evidentemente estáveis, é necessário um intervalo de tempo de regeneração do sistema.

Nesse intervalo de tempo, se aplicado o critério da tensão  $E'$  o resultado pode conduzir a um erro, apontando instabilidade uma vez que o sistema ainda não se definiu, então para 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  $E'$ . Da observação dos resultados das simulações, considera-se a aplicação do critério da mínima tensão interna após transcorrido o intervalo equivalente a  $\frac{T'_0}{3}$  a partir da eliminação da falta como razoável, este instante é denominado como intervalo de partida da aplicação do critério da mínima tensão interna (PACMTI).

A tensão interna  $E'$  não pode ser medida diretamente, o que se faz é medi-la indiretamente sem dificuldade por meio do emprego de transformadores de corrente e potencial (TC's e TP's) nos terminais do gerador, como mostrado na figura abaixo.

Figura 30 – Sistema Gerador-Barra com TC e TP.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

Têm-se então as seguintes medidas: Tensão ( $V_t$ ) e a corrente ( $I_t$ ) nos terminais do gerador, e a potência reativa ( $Q_e$ ) consumida do sistema pelo gerador. Assim, considerando a potência reativa obtemos:

$$Q_e = V_s I_t \sin \phi \quad (3.56)$$

$$\phi = \arcsin \left( \frac{Q_e}{V_t I_t} \right) \quad (3.57)$$

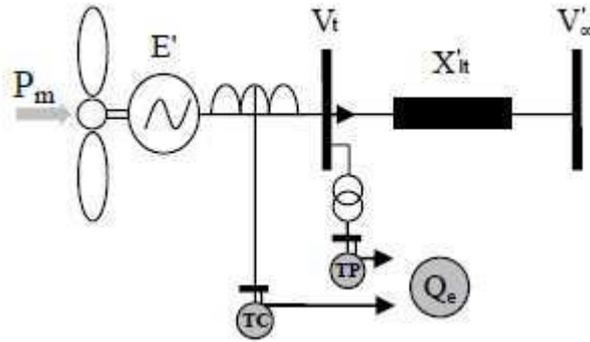
Ou mesmo pelo fator de potência no gerador ( $\phi = \arccos (FP)$ ), ou pela equação da potência elétrica ( $\phi = \arccos \left( \frac{P_e}{V_t I_t} \right)$ ), se consegue obter o ângulo de defasagem entre  $V_t$  e  $I_t$  dado por  $\phi$ , de maneira a determinar a tensão interna do gerador fasorialmente, uma vez que todas as variáveis envolvidas para obtenção de  $E'$  são constantes, com o valor de  $\phi$  dado de acordo com a necessidade de reativos do gerador no momento da análise.

$$\tilde{E}' = \tilde{V}_t + j X'_s I_t \angle \phi \quad (3.58)$$

### 3.5.1 Estabilidade do gerador SCIG equipado com o SVC

O critério da tensão interna se aplica ao caso do gerador equipado com o SVC de maneira equivalente ao caso em que o gerador se encontra sem o compensador de reativos, com o detalhe que agora o valor crítico da tensão interna passa a acompanhar a dinâmica da susceptância ( $B_{SVC}$ ) do SVC de modo que novos limites de operação são definidos a cada movimento do sistema e do dispositivo. Fazendo as devidas alterações, temos abaixo o sistema gerador-barra com o SVC e os transformadores de instrumento.

Figura 31 – Sistema Gerador-Barra com TC e TP.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

De acordo com as equações equivalentes  $X'_l = \frac{X_l}{1-X_l B_{SVC}}$  e  $V'_\infty = \frac{V_\infty}{1-X_l B_{SVC}}$  que redefinem o sistema com a conexão do SVC, estabelece-se a nova expressão para tensão interna crítica considerando o dispositivo SVC :

$$E'_{crit_{SVC}} = \frac{P_m}{V'_\infty} (X'_l + X'_s) \quad (3.59)$$

Fazendo as substituições:

$$\begin{aligned} E'_{crit_{SVC}} &= \frac{P_m}{\frac{V_\infty}{1-X_l B_{SVC}}} \left[ \frac{X_l}{1-X_l B_{SVC}} + X'_s \right] \\ E'_{crit_{SVC}} &= \frac{P_m}{V_\infty} (1 - X_l B_{SVC}) \left[ \frac{X_l}{1-X_l B_{SVC}} + X'_s \right] \\ E'_{crit_{SVC}} &= \frac{P_m}{V_\infty} (1 - X_l B_{SVC}) \left[ \frac{X_s - X'_s X_l B_{SVC} + X_l}{1-X_l B_{SVC}} \right] \\ E'_{crit_{SVC}} &= \frac{P_m}{V_\infty} (X'_s - X'_s X_l B_{SVC} + X_l) \end{aligned} \quad (3.60)$$

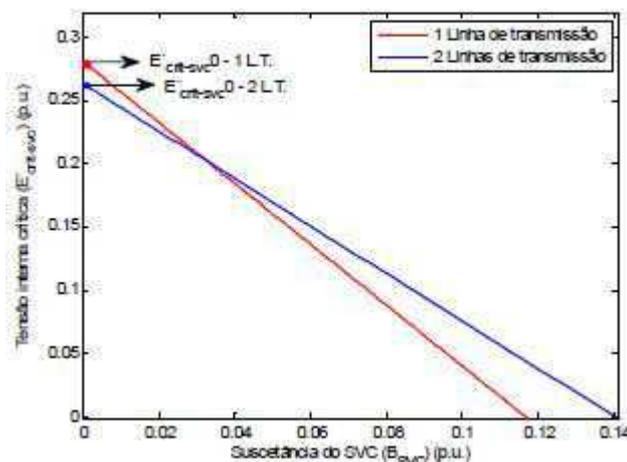
A equação 3.60 nos fornece com exatidão o valor de tensão interna crítica para o caso do gerador equipado com o compensador de reativos, porém alguns livros utilizam outra definição de equação que deriva desta apenas fazendo uma organização dos termos envolvidos.

Portanto, adicionando-se um termo unitário na equação acima, obtemos:

$$\begin{aligned}
 E'_{crit_{SVC}} &= \frac{P_m}{V_\infty} \left( X'_s - X'_s X_l B_{SVC} \left[ \frac{X_l + X'_s}{X_l + X'_s} \right] + X_l \right) \\
 E'_{crit_{SVC}} &= \frac{P_m}{V_\infty} \left( X'_s - \frac{X'_s X_l^2 B_{SVC}}{X_l + X'_s} - \frac{X_s'^2 X_l B_{SVC}}{X_l + X'_s} + X_l \right) \\
 E'_{crit_{SVC}} &= \frac{P_m}{V_\infty} (X_l + X'_s) \left[ 1 - \frac{X_l X'_s}{X_l + X'_s} B_{SVC} \right]
 \end{aligned} \tag{3.61}$$

Considerando o aspecto estático, o valor mínimo da tensão interna se modifica quando o SVC estiver conectado no sistema, passando a definir um novo valor crítico para a tensão interna e conseqüentemente tornando o sistema mais confiável com a atuação do dispositivo, uma vez que o aumento da susceptância do SVC não só diminui o valor crítico da mínima tensão interna como também aumenta o tempo crítico de eliminação da falta, em outras palavras o fato de reduzir o valor da tensão interna crítica aumenta o limite de estabilidade do sistema, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 32 – Tensão interna crítica em função da susceptância do SVC, com uma e duas linhas de transmissão.



Fonte: Zamperin (2011).

Têm-se então duas configurações do sistema a serem analisadas, para uma e duas linhas de transmissão. O valor " $E'_{crit_{SVC}} - 2L.T.$ " indica o valor crítico inicial da mínima tensão interna na condição de operação do sistema com duas linhas de transmissão, uma característica de sistema forte por ter uma baixa impedância, enquanto que o " $E'_{crit_{SVC}} - 1L.T.$ " indica o valor crítico inicial da mínima tensão interna na condição de operação do sistema com apenas uma linha de transmissão (ZAMPERIN; COLVARA, 2010).

Observando a inclinação da reta, chega-se a conclusão de que quanto mais fraco o sistema, maior será a dependência da tensão interna  $E'_{crit}$  em relação ao SVC, isto evidenciado pela maior declividade da reta, o que está em perfeito acordo com o fato conhecido de que a compensação é mais necessária em sistemas de transmissão mais fracos.

Analisando duas situações extremas consegue-se estabelecer princípios importantes no estudo da estabilidade do SVC acoplado ao SCIG. No primeiro caso o gerador está conectado diretamente à barra infinita, então a tensão terminal é fixada pela barra infinita constante e o valor de  $E'_{crit}$  é definido exclusivamente pelos parâmetros do gerador com valores constantes, como evidenciado fazendo  $X_l = 0$  tanto na equação 3.60 como na equação 3.61. Por outro lado, temos o segundo caso quando o gerador está desconectado do sistema (em aberto), obtendo  $X_l = \infty$  e conseqüentemente a partir das equações 3.60 e 3.61  $E'_{crit} = \infty$ , concluindo-se que não há possibilidade de estabilidade. Na prática, o gerador não está conectado diretamente a barra infinita como também não está desconectado do sistema, portanto os valores de  $X_l$  são limitados a valores constantes e diferentes de zero, e conseqüentemente o mesmo ocorre para os valores de  $E'_{crit}$ , portanto é de interesse do controlador atuar em cima dos valores da susceptância ( $B_{SVC}$ ) do SVC de maneira tal que limite os valores da tensão interna a valores correspondentes ao devido controle de tensão e portanto de velocidade do gerador.

# 4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG – DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR)

## 4.1 Modelagem Simples

Diferentemente do gerador do tipo esquilo o qual possui o rotor em curto circuito, para a modelagem do gerador do tipo duplamente alimentado temos que a tensão alternada é aplicada nos terminais do rotor oriunda do conversor do lado do rotor, o que nos fornece  $v_{d_r/q_r} \neq 0$ , mas de maneira idêntica ao SCIG as variações dos fluxos na armadura são desprezadas  $\dot{\varphi}_{d_s/q_s} = 0$ , portanto as equações 2.35 e 2.36 que envolvem as tensões no estator se mantem, enquanto que as equações 2.39 e 2.40 que envolvem as tensões no rotor são reescritas, enquanto que as demais equações que descrevem os fluxos permanecem inalteradas.

Tensões do Estator:

$$\begin{aligned} v_{d_s} &= -R_s i_{d_s} - W_s \varphi_{q_s} \\ v_{q_s} &= -R_s i_{q_s} + W_s \varphi_{d_s} \end{aligned}$$

Tensões do Rotor:

$$\begin{aligned} v_{d_r} &= -R_r i_{d_r} - sW_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r} \\ v_{q_r} &= -R_r i_{q_r} + sW_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r} \end{aligned}$$

Como as equações para o estator não foram alteradas, ao desenvolver as tensões para o DFIG vamos ter o mesmo resultado que para o SCIG dadas por:

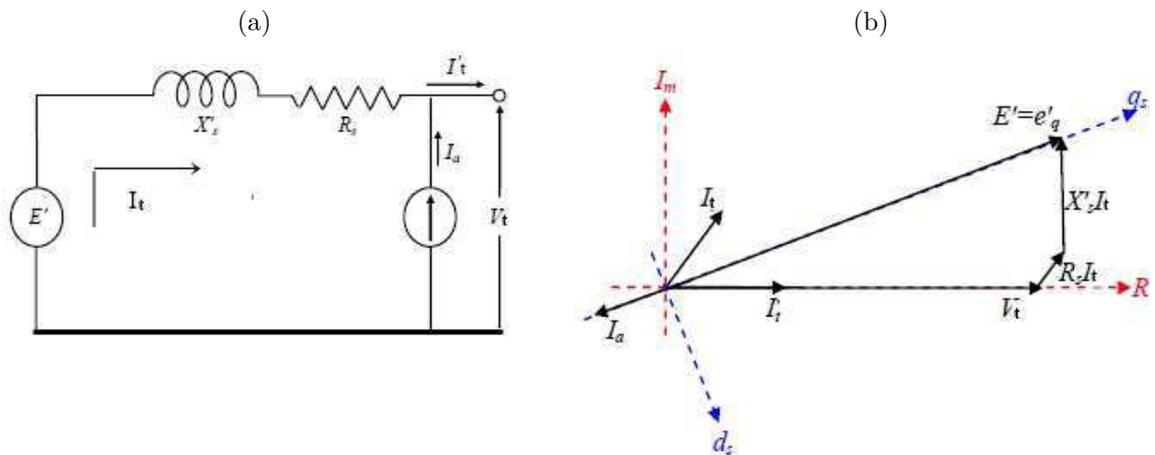
$$\begin{aligned} v_{d_s} &= -R_s i_{d_s} + X'_s i_{q_s} + e'_d \\ v_{q_s} &= -R_s i_{q_s} - X'_s i_{d_s} + e'_q \end{aligned}$$

Que somando-se novamente as equações acima referentes a tensão terminal agora do gerador DFIG, encontra-se a equação que descreve o modelo mais simples para representar o circuito do gerador de indução referido ao estator para fins de estudo de estabilidade.

$$V_t = -R_s I_t + jX'_s I_t + E'$$

De forma que se pode representar o gerador de indução DFIG referido ao estator pelo diagrama fasorial e circuito equivalente mostrado abaixo para interligação com a rede.

Figura 33 – Ilustração do DFIG (a) Circuito Equivalente (b) Diagrama Fasorial.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

A inclusão da fonte de corrente  $I_a$  se dá pelo fato do rotor estar ligado ao sistema por um conversor, o que não acontece para o gerador SCIG e que será mais bem visto adiante.

O modelamento da máquina de indução duplamente alimentada tem por base o modelo do gerador de indução em gaiola de esquilo, com a diferença básica residindo nas tensões do rotor que neste caso não são nulas, uma vez que o rotor não se encontra curto-circuitado. E novamente as configurações das componentes de tensão e corrente dos eixos direto e em quadratura vistas para o SCIG que são  $V_t$ ,  $I_t$  e  $E'$  são válidas para o DFIG, com inclusão da componente de corrente  $I'_t$ .

$$\begin{aligned} V_t &= v_{d_s} + jv_{q_s} \\ I_t &= i_{d_s} + ji_{q_s} \\ E' &= e'_d + je'_q \end{aligned}$$

$$I'_t = I_t + I_a \tag{4.1}$$

## 4.2 Equações que representam a variação da Tensão Interna $E'$ dadas pelas suas componentes dq: $e'_d$ e $e'_q$

Da maneira análoga ao que foi feito para o SCIG partindo das equações  $v_{d_r}$  e  $v_{q_r}$ , mas agora sem zerar a componente de tensão, pretende-se novamente obter um circuito referenciado ao estator trocando  $i_{d_r}$  e  $v_{q_r}$  pelas variáveis do fluxo no rotor e corrente no estator, desenvolvendo as formulas de tensão dq do rotor para o gerador DFIG, para assim realizar a análise da estabilidade por meio da tensão interna  $E'$ .

Inicialmente determina-se a equação para o eixo em quadratura, substituindo-se  $i_{d_r} = \frac{\varphi_{d_r} + L_m i_{d_s}}{L_{rr}}$  na equação da tensão de eixo direto do rotor dada por  $v_{d_r} = R_r i_{d_r} - sW_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r}$ , obtendo:

$$\begin{aligned} v_{d_r} &= R_r \left( \frac{\varphi_{d_r} + L_m i_{d_s}}{L_{rr}} \right) - sW_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r} \\ v_{d_r} &= \frac{R_r}{L_{rr}} \varphi_{d_r} + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{d_s} - sW_s \varphi_{q_r} + \dot{\varphi}_{d_r} \end{aligned}$$

Como:

$$\begin{aligned} \varphi_{d_r} &= \frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_q \\ \varphi_{q_r} &= -\frac{L_{rr}}{L_m W_s} e'_d \end{aligned}$$

Então:

$$\begin{aligned} v_{d_r} &= \frac{R_r}{L_m W_s} e'_d + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{d_s} + \frac{sL_{rr}}{L_m} e'_d + \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_q \\ \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_q &= -\frac{R_r}{L_m W_s} e'_d - \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{d_s} - \frac{sL_{rr}}{L_m} e'_d + v_{d_r} \end{aligned}$$

Multiplicando novamente toda a equação por  $\frac{L_m W_s}{L_{rr}}$  de modo a isolar  $e'_q$ :

$$\dot{e}'_q = -\frac{R_r}{L_{rr}} e'_d - W_s \frac{R_r L_m^2}{L_{rr}^2} i_{d_s} - sW_s e'_d + \frac{L_m W_s}{L_{rr}} v_{d_r} \quad (4.2)$$

Fazendo as mesmas manipulações matemáticas adicionando o termo  $W_s L_{ss} - W_s L_{ss}$ , a equação de  $e'_q$  se resume há:

$$\dot{e}'_q = -\frac{1}{T'_0} \left( e'_q + (X_s - X'_s) i_{d_s} \right) - sW_s e'_d + W_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{d_r} \quad (4.3)$$

Comparando as equações de  $e'_q$  para os dois geradores trabalhados, percebe-se que no caso do DFIG aparece um termo a mais dado por  $W_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{d_r}$ , esse termo aparece devido ao efeito da aplicação do conversor.

Então substituindo o termo pela variável correspondente da tensão alternada (CA) aplicada no rotor oriunda do conversor do lado do rotor e referida ao circuito do estator dada por  $U_d$ :

$$U_d = \frac{L_m}{L_{rr}} v_{d_r} \quad (4.4)$$

A equação que representa a variação da tensão interna no eixo em quadratura pode ser reescrita da forma:

$$\dot{e}'_q = -\frac{1}{T'_0} \left( e'_q + (X_s - X'_s) i_{d_s} \right) - sW_s e'_d + W_s U_d \quad (4.5)$$

Então, de maneira análoga ao que foi feito para o eixo em quadratura, determina-se a equação do eixo direto substituindo-se  $i_{q_r} = \frac{\varphi_{q_r} + L_m i_{q_s}}{L_{rr}}$  (eq. 3.7) na equação da tensão de eixo em quadratura do rotor dada por  $v_{q_r} = R_r i_{q_r} + sW_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r}$  (eq. 3.4), obtemos:

$$\begin{aligned} v_{q_r} &= R_r \left( \frac{\varphi_{q_r} + L_m i_{q_s}}{L_{rr}} \right) + sW_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r} \\ v_{q_r} &= \frac{R_r}{L_{rr}} \varphi_{q_r} + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{q_s} + sW_s \varphi_{d_r} + \dot{\varphi}_{q_r} \end{aligned}$$

E novamente substituindo  $\varphi_{d_r}$  e  $\varphi_{q_r}$  chegamos há:

$$\begin{aligned} v_{q_r} &= -\frac{R_r}{L_m W_s} e'_d + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{q_s} + \frac{sL_{rr}}{L_m} e'_q - \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_d \\ \frac{L_{rr}}{L_m W_s} \dot{e}'_d &= -\frac{R_r}{L_m W_s} e'_d + \frac{R_r L_m}{L_{rr}} i_{q_s} + \frac{sL_{rr}}{L_m} e'_q - v_{q_r} \end{aligned}$$

Multiplicando novamente toda a equação por  $\frac{L_m W_s}{L_{rr}}$  de modo a isolar  $\dot{e}'_d$ :

$$\dot{e}'_d = -\frac{R_r}{L_{rr}} e'_d + W_s \frac{R_r L_m^2}{L_{rr}^2} i_{q_s} + sW_s e'_q - \frac{L_m W_s}{L_{rr}} v_{q_r} \quad (4.6)$$

Fazendo as mesmas manipulações matemáticas adicionando o termo  $W_s L_{ss} - W_s L_{ss}$ , a equação de  $\dot{e}'_d$  se resume há:

$$\dot{e}'_d = -\frac{1}{T'_0} \left( e'_d - (X_s - X'_s) i_{q_s} \right) + sW_s e'_q - W_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{q_r} \quad (4.7)$$

Comparando mais uma vez as equações que representam a variação da tensão interna para o eixo direto  $\dot{e}'_d$  para os casos dos dois geradores estudados SCIG e DFIG, percebe-se que no caso do gerador duplamente alimentado aparece um termo a mais dado por  $W_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{q_r}$ , esse termo aparece devido ao efeito da aplicação do conversor. Então substituindo o termo pela variável correspondente da tensão alternada (CA) aplicada no rotor oriunda do conversor do lado do rotor e referida ao circuito do estator dada por  $U_q$ :

$$U_q = \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \quad (4.8)$$

A equação que representa a variação da tensão interna no eixo direto pode ser reescrita da forma:

$$\dot{e}'_d = -\frac{1}{T'_0} (e'_d - (X_s - X'_s) i_{q_s}) + sW_s e'_q - W_s U_q \quad (4.9)$$

Portanto as equações 4.5 e 4.9 descrevem as equações de eixo em quadratura e de eixo direto do rotor referenciadas para o estator, uma vez que se tenha obtido essas equações, é possível fazer a análise da estabilidade da tensão interna  $E'$ . Os termos adicionados as essas equações  $U_d$  e  $U_q$  como mencionado, são as componentes da tensão em corrente alternada aplicadas no rotor pelo conversor e referidas ao circuito do estator, basicamente trata-se da fonte de tensão controlada oriunda do conversor que esta do lado do rotor, então:

$$\bar{U} = U_d + jU_q \quad (4.10)$$

Da mesma forma que foi feito para o SCIG, temos que as correntes dq  $i_d$  e  $i_q$  do estator e rotor podem ser dadas por:

Para o Estator:

$$i_{d_s} = -\frac{L_{rr}}{L_m^2 W_s} e'_q + \frac{L_{rr}}{L_m} i_{d_r} \quad (4.11)$$

$$i_{q_s} = \frac{L_{rr}}{L_m^2 W_s} e'_d + \frac{L_{rr}}{L_m} i_{q_r} \quad (4.12)$$

Para o Rotor:

$$i_{d_r} = \frac{1}{L_m W_s} e'_q + \frac{L_m}{L_{rr}} i_{d_s} \quad (4.13)$$

$$i_{q_r} = -\frac{1}{L_m W_s} e'_d + \frac{L_m}{L_{rr}} i_{q_s} \quad (4.14)$$

Os valores das correntes dq tanto do estator como do rotor podem ser obtidas facilmente, uma vez que os valores de  $W_s$ ,  $L_m$  e  $L_{rr}$  são constantes, e conhecidos os valores das tensões internas  $e'_d$  e  $e'_q$ . Portanto, se conhecidas os valores das correntes do rotor consegue-se obter os valores das correntes do estator e vice-versa.

As potências do estator e rotor são dadas por:

$$P_s = v_{d_s} i_{d_s} + v_{q_s} i_{q_s} \quad (4.15)$$

$$Q_s = v_{q_s} i_{d_s} - v_{d_s} i_{q_s} \quad (4.16)$$

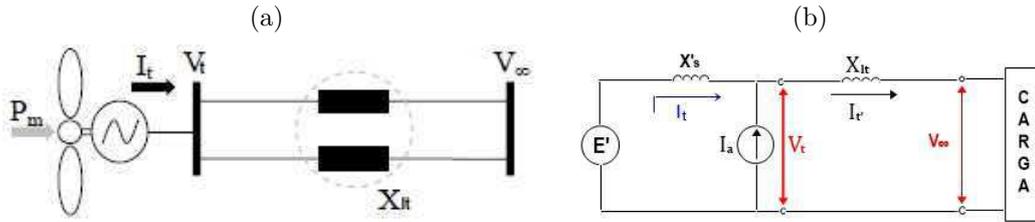
$$P_r = v_{d_r} i_{d_r} + v_{q_r} i_{q_r} \quad (4.17)$$

$$Q_r = v_{q_r} i_{d_r} - v_{d_r} i_{q_r} \quad (4.18)$$

### 4.3 Modelo dinâmico: DFIG - sist. de transmissão - barra infinita

Considera-se uma máquina de indução do tipo duplamente alimentada (DFIG) conectada à uma grande carga representada por uma barra infinita através de um sistema de linha de transmissão, como apresenta o diagrama unifilar e o circuito elétrico abaixo.

Figura 34 – Ilustração do DFIG (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Elétrico.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

Para análise desconsidera-se as resistências do estator da máquina e da Linha de Transmissão (LT), justamente por serem valores pequenos quando comparados aos valores das reatâncias do sistema como um todo. Algumas observações a serem feitas é de que a máquina assíncrona duplamente alimentada esta sendo representada pelo modelo de terceira ordem imposto pelas equações dinâmicas das derivadas das tensões internas  $dq$ , e que o sistema de transmissão é representado pelo modelo mais simples que é o caso de linhas curtas, pois não há reatâncias shunt em derivação que é o caso do modelo  $\pi$  para linhas longas de transmissão.

A corrente  $I_a$  pode ser descrita pelas componentes de potência ativa e reativa que o gerador entrega à rede pelo conversor do lado da rede (POLLER, 2003).

$$I_a = \frac{P_r - jQ_r}{V_t^*} \quad (4.19)$$

A potência ativa nos terminais do rotor depende do escorregamento e da potência ativa nos terminais do estator, como mencionado por Müller, Deicke e De Doncker (2002):

$$P_r = -sP_s \quad (4.20)$$

Como a potência reativa que o rotor troca com a rede é nula ( $Q_r = 0$ ), como as potências do rotor e estator podem ser dadas por  $P_r = sP_s$  e  $P_s = V_t i_{q_s}$ , e a tensão terminal por  $V_t = v_{d_s} + jv_{q_s}$ , temos que:

$$V_t^* = v_{d_s} - jv_{q_s} \quad (4.21)$$

$$P_r = sV_t i_{q_s} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} P_r &= s(v_{d_s} + jv_{q_s})i_{q_s} \\ P_r &= sv_{d_s}i_{q_s} + jsv_{q_s}i_{q_s} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Então:

$$I_a = \frac{sv_{d_s}i_{q_s} + jsv_{q_s}i_{q_s}}{v_{d_s} - jv_{q_s}} \quad (4.24)$$

Portanto fazendo as devidas manipulações matemáticas, encontramos a fonte de corrente  $I_a$  em função das componentes dq de tensão e corrente do estator uma vez que todo o circuito é referenciado ao estator, então obtemos:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{sv_{d_s}i_{q_s} + jsv_{q_s}i_{q_s}}{v_{d_s} - jv_{q_s}} \frac{v_{d_s} + jv_{q_s}}{v_{d_s} + jv_{q_s}} \\ &= \frac{sv_{d_s}^2 i_{q_s} + 2jsv_{d_s}v_{q_s}i_{q_s} - sv_{q_s}^2 i_{q_s}}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} \\ &= s \frac{v_{d_s}^2 + 2jv_{d_s}v_{q_s} - v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} \\ I_a &= s \frac{(-v_{d_s} + jv_{q_s})^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Uma vez que se tenha as componentes  $I_t$  e também  $I_a$ , resta determinar para análise a componente  $I'_t$  ja que  $I'_t = I_t + I_a$ .

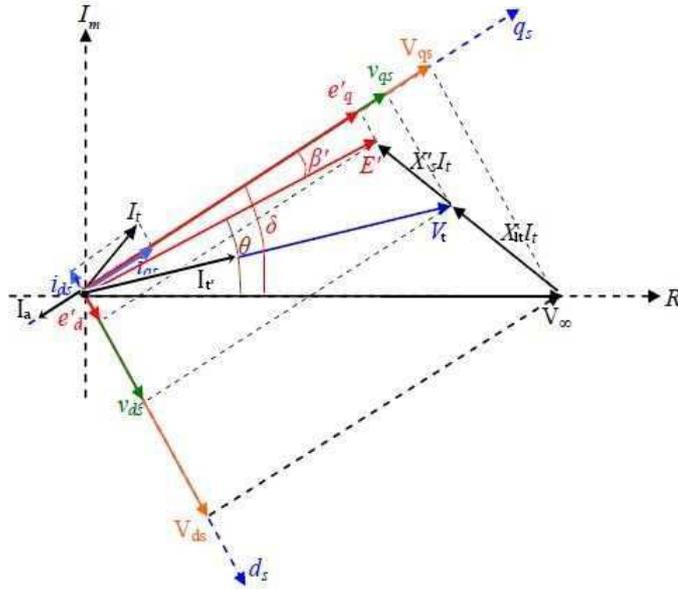
$$\begin{aligned} I'_t &= (i_{d_s} + ji_{q_s}) + \left( s \frac{(-v_{d_s} + jv_{q_s})^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} \right) \\ &= i_{d_s} + ji_{q_s} + s \frac{(v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2)}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} + j2s \frac{v_{d_s}v_{q_s}}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} \\ &= s \frac{(v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2)}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} + i_{d_s} + j \left[ 2s \frac{v_{d_s}v_{q_s}}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} + 1 \right] i_{q_s} \\ I'_t &= s \frac{(v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2)}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} + i_{d_s} + j \left[ \frac{2sv_{d_s}v_{q_s} + v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} \right] i_{q_s} \end{aligned}$$

Portanto, temos que o controle do fluxo de potência ativa que o rotor troca com a rede depende basicamente das componentes dos eixos dq de tensão e corrente do estator, como também do escorregamento  $s$ , o que simplifica as componentes acima dadas por  $I_a$  e  $I'_t$ .

### 4.3.1 Modelo Gerador-Barra em regime transitório

Abaixo segue diagrama fasorial do circuito em que se avaliam as condições do gerador DFIG conectado ao barramento infinito por meio da linha de transmissão durante um transitório do sistema.

Figura 35 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra durante o transitório.



Fonte: Zamperin (2011).

Temos que de acordo com o diagrama fasorial:

$$\begin{aligned} V_\infty &= V_t - jX_l I'_t \\ &= (E' - jX'_s I_t) - jX_l I'_t \end{aligned}$$

Uma vez que conhecemos a componente  $I'_t$ , e sendo  $I_t = i_{d_s} + j i_{q_s}$ :

$$\begin{aligned} V_\infty &= E' - jX'_s (i_{d_s} + j i_{q_s}) - jX_l \left( s \frac{(v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2)}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} + i_{d_s} + j \left[ \frac{2s v_{d_s} v_{q_s} + v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} \right] i_{q_s} \right) \\ &= E' - jX'_s i_{d_s} + X'_s i_{q_s} - j \left[ sX_l \frac{(v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2)}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} + X_l i_{d_s} \right] + X_l \frac{2s v_{d_s} v_{q_s} + v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} \end{aligned}$$

Tendo ainda que  $E' = e'_d + j e'_q$ :

$$\begin{aligned} V_\infty &= \left[ e'_d + X'_s i_{q_s} + X_l \frac{2s v_{d_s} v_{q_s} + v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} \right] \\ &\quad + j \left[ e'_q - (X'_s + X_l) i_{d_s} - sX_l \frac{v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} \right] \end{aligned} \quad (4.26)$$

Logo:

$$V_\infty \cos \theta = e'_q - (X'_s + X_l) i_{d_s} - sX_l \frac{v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} i_{q_s} = V_{q_s} \quad (4.27)$$

$$V_\infty \sin \theta = e'_d + \left( X'_s + X_l \frac{2s v_{d_s} v_{q_s} + v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2} \right) i_{q_s} = V_{d_s} \quad (4.28)$$

As equações anteriores determinam o ponto de operação da máquina, percebe-se a diferença do SCIG para o DFIG pela inclusão da fonte controlada  $I_a$  no estator do gerador, tirando-se  $i_{d_s}$  e  $i_{q_s}$  por superposição, em função do ângulo  $\theta$  de defasagem entre  $V_\infty$  e  $E'$  obtemos:

$$i_{d_s} = \frac{e'_q - V_\infty \cos \theta}{X_l + X'_s} \quad (4.29)$$

$$i_{q_s} = \frac{-V_\infty \cos \theta + e'_q}{sX_l \frac{v_{d_s}^2 - v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}} \quad (4.30)$$

$$i_{q_s} = \frac{e}{X'_s + X_l \frac{2sv_{d_s}v_{q_s} + v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}{v_{d_s}^2 + v_{q_s}^2}}$$

Uma vez que tenham sido obtidas as equações de tensão e corrente para o circuito gerador-barra em regime permanente, o modulo da potência elétrica pode ser mais uma vez dado por:

$$P_e = \frac{E'V_\infty}{X_l + X'_s} \text{sen}(\theta - \beta') \quad (4.31)$$

$$\text{Sendo: } E' = \sqrt{e_d'^2 + e_q'^2}.$$

O ângulo  $\beta'$  surge durante o período transitório no sistema pelo movimento das equações  $e'_d$  e  $e'_q$  e é dado por:

$$\beta' = \arctan\left(\frac{e'_d}{e'_q}\right) \quad (4.32)$$

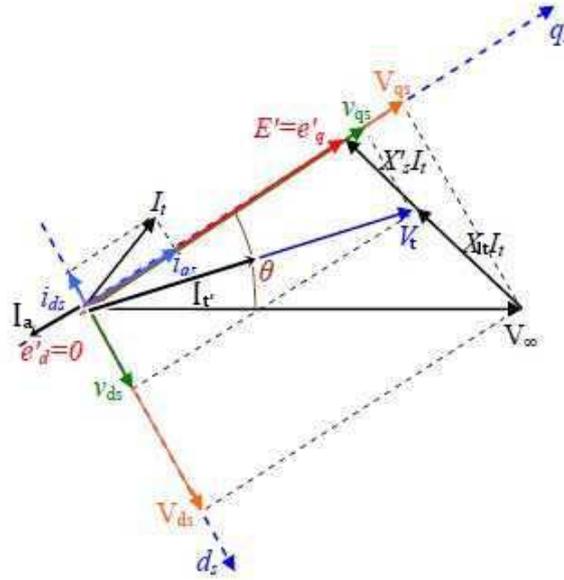
Define-se  $\theta = \delta - \beta'$ , como o ângulo  $\beta'$  surge apenas durante o transitório - considerando que o sistema estava em equilíbrio inicialmente e houve um desbalanceamento - então inicialmente  $\beta'$  é zero e  $\theta^0 = \delta^0$ , então  $\Delta\theta = -\Delta\beta'$  como será visto no modelo do gerador-barra em regime permanente.

### 4.3.2 Modelo Gerador-Barra em regime permanente

Já em regime permanente  $\beta'$  é novamente anulado e o sistema encontra-se em equilíbrio, então as derivadas temporais são anuladas, de forma que  $e'_d = e'_q = \dot{W}_r = 0$ , temos então que  $0 = \frac{1}{2H}(T_m - T_e)$  o que fornece  $T_m = T_e$ .

Como ja mencionado, o torque líquido atuante é dado pela diferença entre o torque mecânico proveniente da hélice e o torque elétrico fornecido pelo gerador  $T_l = T_m - T_e$ , como em regime permanente  $T_l = 0$ , temos que os torques se igualam, e que em p.u., o torque e a potência são iguais, de maneira que temos as potências mecânica e elétrica também se igualando e fornecendo  $P_m = P_l$ . Abaixo segue diagrama fasorial do circuito gerador-barra para o caso em regime permanente do gerador DFIG.

Figura 36 – Diagrama Fasorial do Gerador-Barra em regime permanente.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

Na condição de equilíbrio, uma vez que  $\beta'$  seja nulo e consequentemente  $e'_d = 0$ , temos que as equações de tensão interna e potência elétrica podem ser reescritas da seguinte forma.

$$\begin{aligned} E' &= j e'_q \\ |E'| &= |e'_q| \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$P_e = \frac{E' V_\infty}{X_l + X'_s} \text{sen} \theta \quad (4.34)$$

Então como já discutido para o SCIG e que também vale para o DFIG, o sistema encontrava-se em regime permanente e logo após houve um desbalanceamento e o sistema passou para o regime transitório, como inicialmente  $e_d^0 = 0$  e  $\beta^0 = 0$  então  $\theta^0 = \delta^0$ , enquanto que o resultado dessa perturbação sofrida gera essa variação do ângulo  $\Delta\theta$  que corresponde exatamente a um valor negativo de  $\beta'$ , e fornece um novo valor de  $\theta$  dado por  $\theta = \delta - \beta'$ .

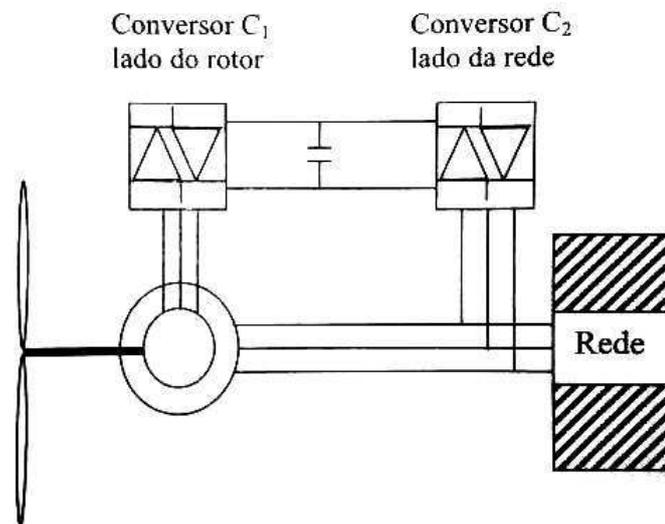
Vale salientar que na condição de regime permanente a corrente do estator de eixo direto não sofre alteração na sua magnitude, enquanto que a corrente do estator de eixo em quadratura sofre uma mudança no valor da sua magnitude, uma vez que  $e'_d$  é anulado.

$$\begin{aligned} i_{qs} &= \frac{-V_\infty \cos \theta + e'_q}{s X_l} \\ &e \\ i_{qs} &= \frac{V_\infty \text{sen} \theta}{X'_s + X_l} \end{aligned} \quad (4.35)$$

## 4.4 Estabilidade do DFIG por meio do monitoramento da Tensão Interna $E'$ pelos Conversores

O gerador de indução duplamente alimentado é equipado com dois conversores estáticos como descrito a seguir e que serão demonstrados mais adiante. O conversor C1 interligado aos enrolamentos do rotor é equivalente a uma fonte de tensão controlada que tem por função controlar a velocidade do rotor e a potência ativa do estator, bem como a tensão terminal do gerador e a potência reativa do estator injetada ou consumida pelo gerador através do estator. Como evidenciado na seção anterior por meio das componentes da tensão em corrente alternada aplicadas no rotor pelo conversor e referidas ao circuito do estator  $U_d$  e  $U_q$ , temos que a fonte de tensão controlada foi exposta por  $\bar{U} = U_d + jU_q$ . O conversor C2 conectado à rede funciona como uma fonte de corrente controlada  $I_a$ , cujo controle possibilita não somente impor valores de correntes desejadas permitindo assim o controle do fluxo de potência ativa que o rotor troca com a rede, como também, o controle da tensão no barramento CC. Os conversores C1 e C2 estão interligados através de um elo CC (POLLER, 2003).

Figura 37 – Sistema de geração do gerador de indução tipo DFIG.



Fonte: MOTA, 2006.

A estratégia de controle para o conversor C1 parte da consideração de que o eixo direto do estator  $d_s$  está sincronizado com o fluxo do estator  $\varphi_s$  de forma que  $v_{d_s} = 0$ , uma vez que a tensão interna do eixo direto do estator seja nula, a tensão terminal  $V_t = v_{d_s} + jv_{q_s}$  se resume ao termo imaginário que esta no eixo em quadratura do estator dado por  $V_t = jv_{q_s}$ , resumindo as tensões e os fluxos do estator há:

$$|v_{d_s}| = 0 \quad (4.36)$$

$$|v_{q_s}| = |V_t| \quad (4.37)$$

E com isso  $\varphi_{q_s} = 0$ , mas o fluxo é dado por  $\varphi_{q_s} = -L_{ss}iq_s + L_miq_r$ , então:

$$\begin{aligned} 0 &= -L_{ss}iq_s + L_miq_r \\ iq_s &= \frac{L_miq_r}{L_{ss}} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Enquanto que  $\varphi_{d_s}$  continua da mesma forma como apresentado anteriormente  $\varphi_{d_s} = -L_{ss}id_s + L_mid_r$ , nos fornecendo a mesma equação de corrente de eixo direto para o estator antes vista.

$$id_s = \frac{-\varphi_{d_s} + L_mid_r}{L_{ss}}$$

As equações apresentadas na seção anterior correspondentes as potências ativa e reativa do estator, também sofrem mudanças devida a variável  $v_{d_s}$  ser nula e  $|v_{q_s}| = |V_t|$  como discutido anteriormente, portanto essas equações são reescritas da forma:

$$P_s = V_t i_{q_s} \quad (4.39)$$

$$Q_s = V_t i_{d_s} \quad (4.40)$$

Substituindo  $i_{q_s}$  e  $i_{d_s}$ , se obtêm as equações de potências ativa e reativa que se necessita para o estudo de estabilidade de tensão do gerador duplamente alimentado em função das correntes de eixo dq do rotor como segue:

$$P_s = V_t \frac{L_m}{L_{ss}} iq_r \quad (4.41)$$

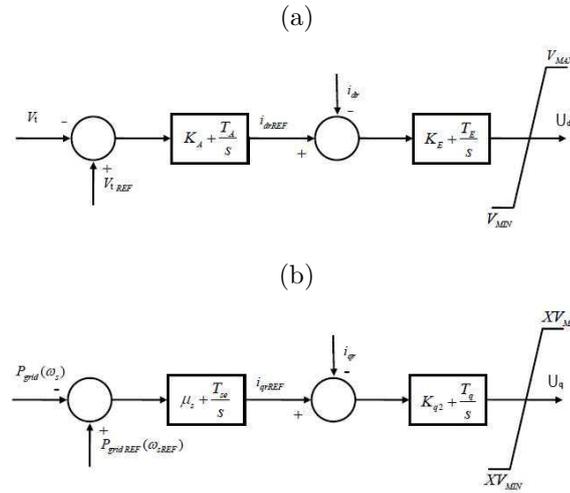
$$\begin{aligned} Q_s &= V_t \left( \frac{-\varphi_{d_s} + L_mid_r}{L_{ss}} \right) \\ Q_s &= -V_t \frac{\varphi_{d_s}}{L_{ss}} + V_t \frac{L_m}{L_{ss}} id_r \end{aligned} \quad (4.42)$$

A equação de potência reativa também pode ser expressa em função do quadrado da tensão terminal segundo Lopes e Almeida (2004), na forma:

$$Q_s = -V_t^2 \frac{1}{L_{ss}W_s} + V_t \frac{L_m}{L_{ss}} id_r \quad (4.43)$$

Para evitar a utilização de soluções complexas optou-se por utilizar controladores do tipo PI (proporcional integral), no qual os ganhos e constante de tempo são ajustados por tentativa e erro, até proporcionarem a resposta desejada, o sistema no qual se implementa esses controladores nos conversores pode ser visto na figura abaixo.

Figura 38 – Diagramas de blocos do sistema de controle (a) da Potência Reativa ou a Tensão Terminal (b) da Potência Ativa ou Velocidade Angular.



Fonte: POLLER (2003).

Temos que por meio do sistema de controle descrito acima, a malha de controle (a) controla a potência reativa do estator ou a tensão terminal gerando o sinal de  $U_d$  que é proporcional a  $v_{d_r}$ , enquanto que a malha de controle (b) controla a potência ativa do estator ou a velocidade gerando o sinal de  $U_q$  que é proporcional a  $v_{q_r}$ . Essas afirmações se baseiam do fato das potências poderem ser escritas em função das correntes do rotor (LOPES; ALMEIDA, 2004; MOTA, 2006; ALMEIDA, 2006). Uma vez como já citado que as potências reativa e ativa são dadas sequencialmente por  $Q_s = -V_t \frac{\varphi_{d_s}}{L_{s_s}} + V_t \frac{L_m}{L_{s_s}} i_{d_r}$  e  $P_s = V_t \frac{L_m}{L_{s_s}} i_{q_r}$ .

Analisando agora o conversor C2 do lado da rede, temos que é possível realizar o controle do fluxo de potência ativa que o rotor troca com a rede, como também o controle de tensão CC do capacitor, tudo isto por meio dos valores impostos pela fonte de corrente controlada  $I_a$ . Alternativamente, por simplificação, as constantes de tempo muito rápidas associadas ao circuito em corrente contínua (CC) intermediário dos conversores - barramento CC - poderão ser completamente desprezadas, nesse caso a tensão CC é mantida constante no capacitor, sendo o conversor C2 e seus controles modelados por uma fonte de corrente em regime permanente sem dinâmica associada (MOTA, 2006).

A potência ativa do DFIG entregue a rede é dada por:

$$P_{grid} = P_s + P_r \quad (4.44)$$

A potência reativa do DFIG trocada com a rede também é composta parte do rotor e parte do estator  $Q_{grid} = Q_s + Q_r$ , porém como citado anteriormente, a potência reativa que o rotor troca com a rede é nula ( $Q_r = 0$ ), portanto:

$$Q_{grid} = Q_s \quad (4.45)$$

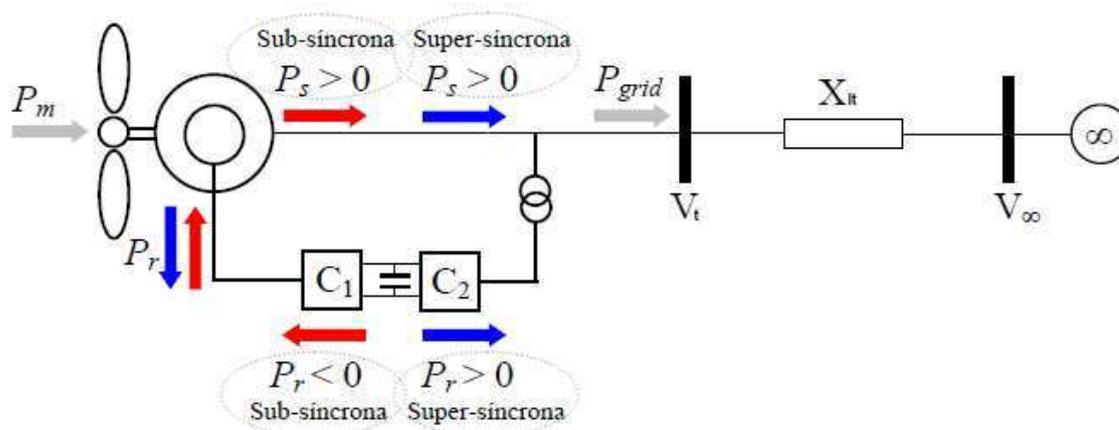
De acordo com a equação acima, a potência reativa que a máquina entrega ao sistema será fornecida apenas pelo estator do gerador, ou seja, o conversor C2 não troca potência reativa com a rede, desta forma, o conversor interligado à rede funciona com fator de potência unitário, comum nas redes fracas (NUNES, 2003).

A injeção dessa tensão alternada no rotor pela fonte de tensão controlada  $\bar{U}$  do conversor C1, permite a operação do gerador com velocidade variável, o DFIG entrega potência ativa à rede em duas regiões de velocidade:

- Sub-síncrona: Quando a velocidade do rotor da máquina é menor que a velocidade síncrona da rede, o escorregamento é positivo ( $s > 0$ ), o fluxo da potência será da rede para o rotor. Desta forma, ( $P_{rotor} < 0$ ) indica que o rotor está absorvendo potência da rede.
- Super-síncrona: Quando a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona da rede, o escorregamento é negativo ( $s < 0$ ), a potência será fornecida à rede simultaneamente pelo rotor através dos conversores e pelo estator, de acordo com a Figura 3.10. Deste modo, ( $P_{rotor} > 0$ ) indica o fornecimento de potência à rede através do rotor.

Com base no discutido acima, temos que o gerador duplamente alimentado pode fornecer energia elétrica para a rede com a máquina trabalhando abaixo, acima e inclusive, na velocidade síncrona (HANSEN et al., 2001), caso não possível para as máquinas de indução equipadas com rotor em gaiola de esquilo, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 39 – Princípio de funcionamento do DFIG.



Fonte: Zamperin (2011), alterado pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

Uma vez que tenham sido estudados ambos os modelos mais empregados de aerogeradores de indução ou assíncronos, que foram os geradores com rotor em gaiola de esquilo (SCIG - Squirrel Cage Induction Generator) e o duplamente alimentado (DFIG - Doubly Fed Induction Generator) tratados neste trabalho, consegue-se propor um algoritmo que permita então as simulações desses aerogeradores conectados a rede como ilustrados nas seções anteriores no modelo gerador-barra empregado, de modo a avaliar a estabilidade dos mesmos perante uma perturbação do sistema verificando assim a eficiência na geração de energia eólica.

Para simulação e análise do comportamento dinâmico do sistema de potência, o gerador é interligado por meio do circuito equivalente de tensão interna atrás de uma reatância que foi o circuito proposto, em que o valor da tensão interna varia de acordo com o modelo de gerador assíncrono escolhido.

Previamente, necessita-se da leitura de dados concisos do sistema que se deseja simular, como dados de fluxo de cargas afim de calcular as condições iniciais do sistema, a potência mecânica do vento associada as hélices do aerogerador, o tipo de controle implementado, e por fim, todos os parâmetros da rede em que se deseja simular como os valores das impedâncias do gerador e da LT, e o tempo de duração do distúrbio no sistema.

De posse dos dados prévios, calcula-se as condições iniciais do sistema, no qual o fluxo de cargas fornece a tensão e potências para cada barramento na referência do sistema, obtendo-se assim as componentes iniciais de corrente dos terminais  $I_t$  e a tensão interna  $E'$ , já que as equações que determinam essas variáveis são os mesmos para o SCIG e DFIG.

$$I_{t_0} = \frac{P_g - jQ_g}{V_{t_0}^*} \quad (5.1)$$

$$E'_0 = V_{t_0} + R_s I_{t_0} - jX_s I_{t_0} \quad (5.2)$$

Para a construção da matriz de rede (matriz impedância de barra), considera-se os geradores representados pelo circuito equivalente, a linha de transmissão, e a barra infinita que é representada pela fonte de tensão e frequência invariáveis, portanto a rede pode ser descrita pela equação matricial que relaciona as correntes injetadas nos nós 1 e 2 com as tensões da matriz admitância de barra  $Y_{barra}$ , vale salientar que aqui o sistema encontra-se em regime permanente e portanto usa-se os valores iniciais de tensão interna e corrente, como também o valor da barra infinita é fixo em  $1\angle 0$  p.u., o que nos fornece

$$I = Y_{barra} V. \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} I_t \\ I_\infty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E' \\ V_\infty \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Após ter elaborado a matriz de rede e ter calculado todas as variáveis envolvidas de tensão e corrente nas barras 1 e 2, pode-se então realizar a simulação do distúrbio na rede de transmissão por meio da modificação da matriz admitância de barra, como exemplo a simulação de um curto circuito trifásico aplicado em uma das barras (nós) representado por uma impedância, o que irá alterar os valores de tensão e corrente do sistema.

O próximo passo é o projeto da excitação e controle do modelo do gerador de indução utilizado, se usado o gerador em gaiola de esquilo será empregado o compensador estático SVC (Static var Compensator) que por meio do controlador PI apresentado irá regular a susceptância equivalente  $B_{SVC}$ , se usado o gerador duplamente alimentado será empregado então os conversores de potência C1 e C2 que por meio dos controladores PI também apresentados para este caso, irão regular as fontes controladas de tensão e corrente, ambos os casos irão alterar a matriz da rede de modo a realizar o contínuo monitoramento da tensão interna com o objetivo de garantir a estabilidade frente a perturbações do sistema.

O aspecto dinâmico do sistema parte da combinação do modelo do gerador de indução utilizado e das hélices empregadas, do sistema de excitação e controle, que afetam a potência entregue a rede por meio da tensão interna da máquina e da equação de oscilação pela potência mecânica. Cada um desses equipamentos é caracterizado por um conjunto de equações diferenciais de estado, o que ocorre é que em regime permanente todas as derivadas são nulas e os estados permanecem constantes como foi visto, mas após a ocorrência de uma perturbação é estabelecido um período transitório no qual o sistema se move do seu estado inicial para um regime permanente final estável ou não, e a forma dessa variação dos estados é a resposta transitória do sistema, para efeito de simulação e simplificação, pode-se utilizar apenas as equações diferenciais de estado desenvolvidas dadas por  $e'_d$  e  $e'_q$ , pois já engloba o modelo do gerador, o sistema de excitação e controle.

Uma vez que se tenha solucionado as equações diferenciais e o sistema tenha atingido o regime permanente, é necessário o cálculo da nova tensão interna do gerador  $E'_{novo}$  por meio dos novos dados de fluxo de cargas, para assim comparar com a tensão crítica  $E'_{crit}$  de modo que haja a mínima transferência de potência sem que o sistema perca a estabilidade.

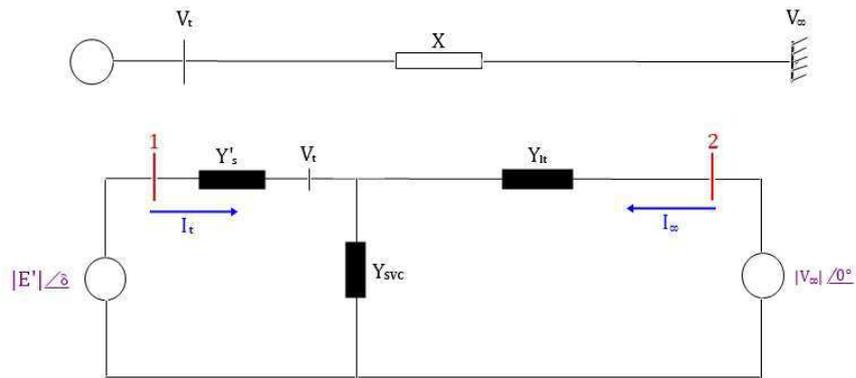
Por fim, caso a comparação entre  $E'_{novo}$  e  $E'_{crit}$  seja satisfatória para que o sistema não entre em instabilidade, será efetuado a solução da rede pelo cálculo das correntes terminais do gerador  $I_{t_{novo}}$  e da tensão na barra infinita  $V_{\infty_{novo}}$ , manipulando-se a matriz de rede por meio de álgebra matricial, consegue-se obter uma nova matriz que fornecera a solução da rede para assim realizar o cálculo final da potência ativa que é transmitida da geração até a carga.

Caso a comparação não seja satisfatória, os dados serão apurados e será realizado novamente o projeto de excitação e controle do gerador, e logo após serão solucionadas mais uma vez as equações diferenciais de estado que reiniciará o ciclo para posterior análise de estabilidade, se depois de feitas todas as alterações cabíveis o sistema não apresentar soluções satisfatórias, o sistema gerador-barra utilizado não conseguirá voltar a estabilidade frente aquele distúrbio após o tempo transitório decorrido, o que caracterizará a instabilidade no sistema.

$$\begin{bmatrix} I_t \\ V_\infty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^{-1} & -Y_{11}^{-1}Y_{12} \\ Y_{21}Y_{11}^{-1} & -Y_{22}Y_{21}Y_{11}^{-1}Y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E' \\ I_\infty \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

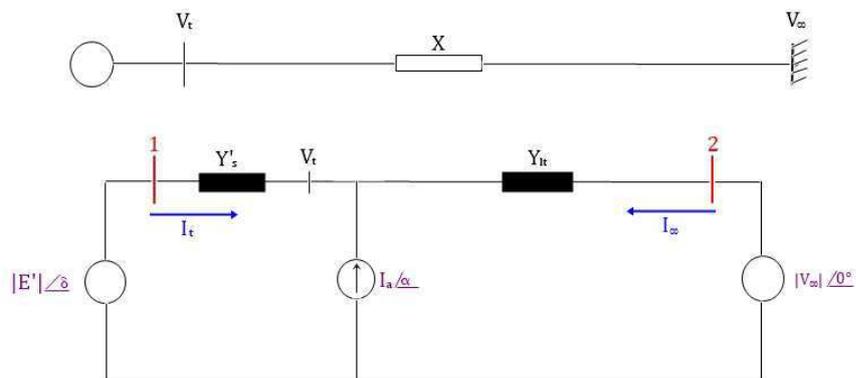
Segue o modelo discutido para os dois casos estudados do gerador de indução o SCIG e o DFIG, como também o diagrama de blocos simplificado.

Figura 40 – Ilustração do SCIG ligado a barra infinita pela L.T. (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Equivalente.



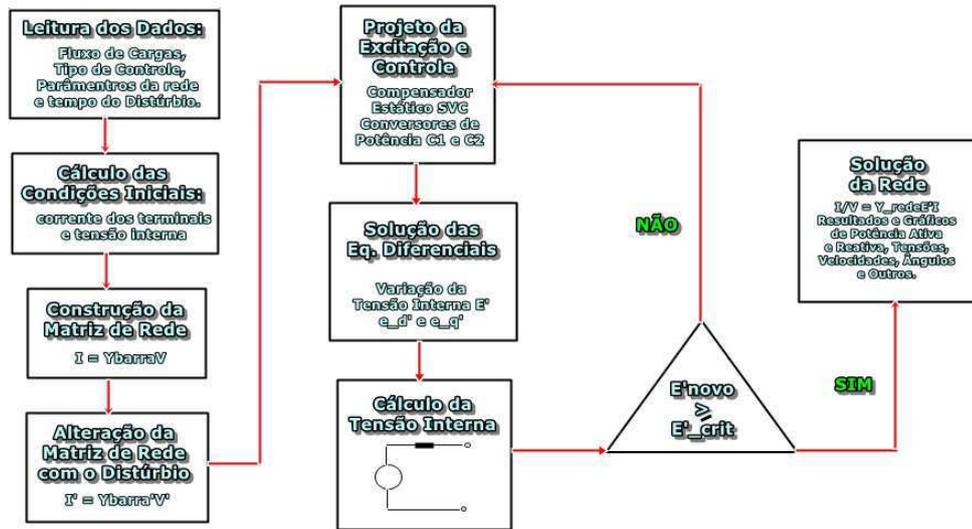
Fonte: Feito pelo autor.

Figura 41 – Ilustração do DFIG ligado a barra infinita pela L.T. (a) Diagrama Unifilar (b) Circuito Equivalente.



Fonte: Feito pelo autor.

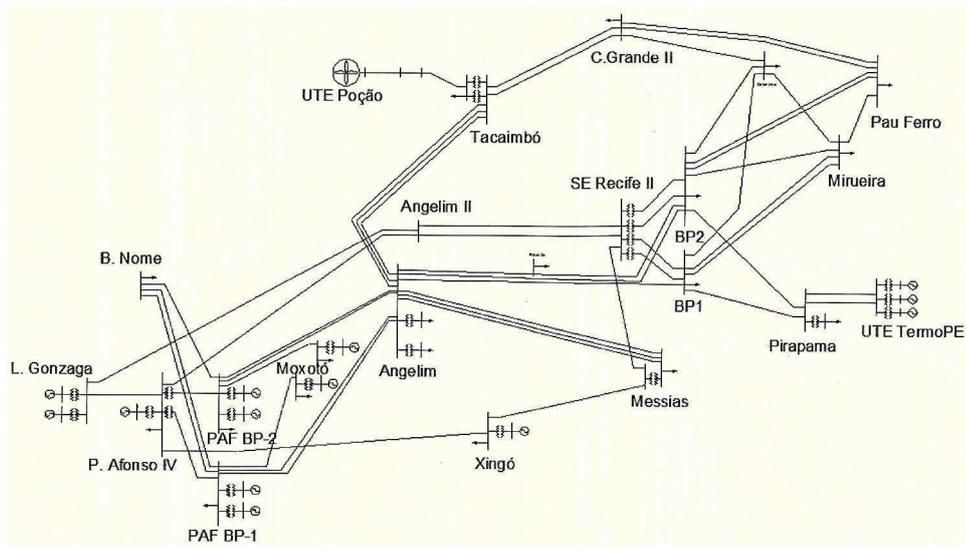
Figura 42 – Diagrama de Blocos simplificado para análise e simulação dinâmica.



Fonte: Feito pelo autor.

Para fins ilustrativos e facilidade de implementação da simulação dinâmica foram considerados dados da ONS, do qual foi elaborado um sistema regional simplificado, onde as gerações do sistema foram representados por modelos clássicos, apenas a geração local do Parque Eólico de 38,4MW em Poção-PE foi simulado com uma modelagem detalhada. o sistema foi então submetido à aplicação de um curto-circuito trifásico auto-extinto na barra 23 (Tacaimbo 69KV) durante 150ms, seguido de rejeição de carga (MOTA, 2006), os sistemas foram simulados pelo programa de Estabilidade Transitória (MOTA, 2002), o sistema pode ser visto na figura abaixo.

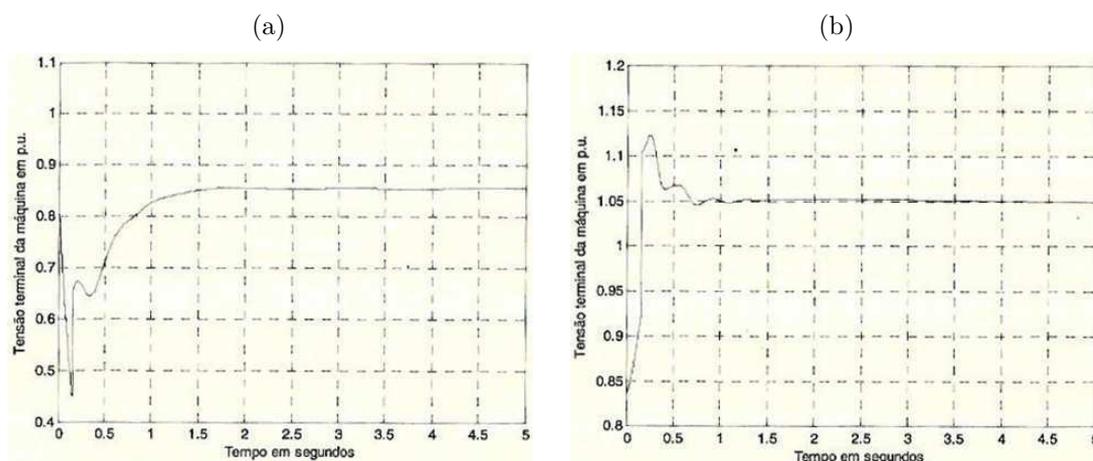
Figura 43 – Sistema CHESF - leste simplificado.



Fonte: MOTA, 2006.

Foi simulado os dois tipos de geradores, SCIG e DFIG, considerando o mesmo distúrbio e analisou-se a tensão terminal de ambos os geradores após a retirada do curto. Percebe-se que o gerador assíncrono de dupla alimentação tem condições de fornecer reativos necessários para manter a tensão nominal em seus terminais, enquanto que o gerador assíncrono em gaiola de esquilo terá um afundamento da tensão nominal, uma vez que esse valor está fixado em 1 p.u. como é mostrado a seguir.

Figura 44 – Tensão Terminal no Gerador de Indução para um curto trifásico na barra 23 durante 150ms (a) SCIG e (b) DFIG.



Fonte: MOTA, 2006.

Como foi visto, o Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (SCIG - Squirrel Cage Induction Generator) possui o rotor curto-circuitado enquanto o estator está acoplado diretamente à rede elétrica, a turbina eólica está acoplada ao gerador através da caixa de engrenagens multiplicadora de velocidades, e se caracteriza por ser um sistema de conversão de energia eólica de velocidade fixa cuja operação é a velocidade constante, o que significa que independentemente da velocidade do vento, a velocidade do rotor do gerador eólico é fixa e determinada pela frequência da rede elétrica ao qual está conectado, uma vez que o rotor da turbina é conectado ao gerador elétrico através de uma caixa de transmissão de velocidade e onde se utiliza o compensador estático de reativos SVC com o objetivo de compensar a demanda de potência reativa do gerador de indução, como também de manter o valor da tensão interna do gerador a um valor padrão que garanta a mínima capacidade de transmissão de potência ativa sem a perda da estabilidade. Também foi visto que pela forma de acoplamento à rede rígido, os efeitos na máquina são transferidos de forma direta para o sistema elétrico e, da mesma forma, as perturbações na rede de potência tem reflexo direto no aerogerador, assim sendo, flutuações no vento se traduzem em flutuações mecânicas e conseqüentemente em variações da potência elétrica injetada na rede.

Foi visto também que o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG – Doubly Fed Induction Generator) possui o rotor conectado a rede por meio de um conversor estático enquanto o estator está acoplado à rede elétrica diretamente, a turbina eólica está acoplada ao gerador através da caixa de engrenagens multiplicadora de velocidades, e se caracteriza por ser um sistema de conversão de energia eólica de velocidade variável, o que significa que têm-se uma adaptação da velocidade rotacional da turbina (acelerando ou desacelerando) à velocidade do vento, então a relação de velocidade é mantida num valor predefinido constante, de maneira a alcançar uma velocidade tal que leve a um ponto de operação de máximo coeficiente de potência, portanto a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação que varia em função da variação da rotação da turbina (ou seja, do vento), entretanto por meio do conversor a frequência fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico, onde o conversor empregado irá compensar a demanda de potência reativa do gerador de indução como também manterá o valor da tensão interna do gerador a um valor padrão que garanta a mínima capacidade de transmissão de potência ativa sem a perda da estabilidade. Também foi visto que contrariamente ao sistema de velocidade fixa utilizado no SCIG, o sistema de velocidade variável possui um acoplamento a rede flexível, portanto os efeitos na máquina não são transferidos de forma direta para o sistema elétrico e, da mesma forma, as perturbações na rede de potência não tem reflexo direto no aerogerador uma vez que se mantém o conjugado do gerador aproximadamente constante, assim sendo, então as variações de potência causadas por variações do vento são absorvidas principalmente por variações na velocidade do rotor do gerador e, conseqüentemente, da velocidade do rotor da turbina.

Geradores de indução ligados diretamente à rede como no caso em estudo o SCIG, podem apresentar problemas na operação em redes com baixo nível de curto-circuito, devido ao elevado consumo de potência reativa em situações de subtensão. No caso de aerogeradores de grande porte, geralmente é utilizado o DFIG que, quando comparado ao sistema dinamarquês do SCIG tem a desvantagem de ser mais caro associado ao elevado custo do conversor de larga escala, porém além da vantagem de absorver as variações de potência causadas pelas variações do vento garantindo sempre a máxima conversão de energia a frequência da rede, o DFIG possui uma maior facilidade de se estabilizar quando frente a perturbações no sistema elétrico devido ao acoplamento com o conversor.

De posse dessas informações, buscou-se neste trabalho de modelar matematicamente ambos geradores de indução, com o propósito de realizar uma maior análise, como também simulação, do sistema de excitação e controle de estabilidade pelo monitoramento da tensão interna, uma vez que o gerador seja SCIG ou DFIG foi aqui representado por uma tensão interna  $E'$  atrás de uma reatância transitória  $X'_g$  variando de um para outro sua configuração seja pelo compensador estático SVC e sua susceptância equivalente ou pelos conversores estáticos C1 e C2 e suas fontes de tensão e corrente controladas, ficando evidente a contribuição do presente estudo para a geração renovável de energia elétrica.

# REFERÊNCIAS

- A. B. Nassif and M. S. Castro and V. F. Da Costa and L. C. P. Silva. New Jersey, EUA: [s.n.]. Citado na página 14.
- AKHMATOV, V.; SØBRINK, K. A Static VAR Compensator Model for Improved Ride-Through Capability of Wind Farms. *Wind Engineering*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 6, p. 715–727, 2004. Citado na página 14.
- BRUM, L. et al. Geração Eólica de Energia Elétrica. *Universidade Federal de Itajubá*, v. 1, p. 11, 1986. Citado na página 14.
- CUSTÓDIO, R. *Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, Brasil: Eletrobras, 2009. 295 p. Citado na página 14.
- HANSEN, L. H. et al. Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines. In: IEEE. *Industrial Electronics Society, 2001. IECON'01. The 27-th Annual Conference of the IEEE*. [S.l.], 2001. v. 3, p. 2000–2005. Citado na página 14.
- HART, D. W. *Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos*. New York, EUA: McGraw Hill - ARTMED, 2012. Citado na página 14.
- JENKINS, N.; HOLDSWORTH, L.; WU, X. Dynamic and Stead-State Modelling of the Doubly-Fed Induction Machine (DFIM) for Wind Turbine Applications. *Internal MCEE UMIST*, 2002. Citado na página 14.
- LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. Panorama do Setor de Energia Eólica. *Revista do BNDES, Rio de Janeiro*, n. 39, p. 183–205, 2013. Citado na página 14.
- LOPEZ, R. A. *Energia Eólica*. São Paulo, Brasil: Editora Artliber Ltda, 2002. Citado na página 14.
- MOTA, W. S. *Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência*. Campina Grande, Brasil: EPGRAF, 2006. 368 p. Citado na página 14.
- MULLER, S.; DEICKE, M.; DONCKER, R. W. de. Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines. *IEEE Industry applications magazine*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 26–33, 2002. Citado na página 14.
- NASSIF, A. B. et al. Comparação do PSS, SVC e STATCOM no Amortecimento de Oscilações de Modo Local em Sistemas de Potência. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 15, p. 1–6. Citado na página 14.
- POLLER, M. A. Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms. In: IEEE. *Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna*. [S.l.], 2003. v. 3, p. 6–pp. Citado na página 14.
- SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC Transmission System - FACTS*. Londres, Reino Unido: The Institute of Electrical Engineers, 1999. 592 p. Citado na página 14.

ZAMPERIN, J. L. B. *Método Analítico para Análise da Estabilidade do Gerador Assíncrono Através do Monitoramento da Tensão*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2011. Citado na página 14.

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Estudo da Estabilidade do Gerador Eólico Assíncrono Através da Tensão Interna. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 18, p. 432–438. Citado na página 14.

sadfasdf