

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MANUEL RICARDO VARGAS ÁVILA

**MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE UM GERADOR
TIPO DFIG EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Porto Alegre

2014

MANUEL RICARDO VARGAS ÁVILA

**MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE UM GERADOR
TIPO DFIG EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Flavio Antonio Becon Lemos

Porto Alegre

2014

MANUEL RICARDO VARGAS ÁVILA

**MODELAGEM DINÂMICA E CONTROLE DE UM GERADOR
TIPO DFIG EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,
Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Gotemburgo, Suécia.

Prof. Dra. Lucíola Campestrini, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande Do sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Romeu Reginatto, UNIOESTE

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, maio de 2014

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis do mestrado.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

À minha família, em especial à minha esposa Nataly Parga, por acreditarem nos meus sonhos e pela motivação dada nos momentos mais difíceis que passei durante o mestrado.

Ao Bazanella, o meu orientador, a quem agradeço todo o apoio, as discussões e aprendizagem.

O conhecimento e experiência que levo do trabalho com ele é inestimável.

Ao Flávio, o meu co-orientador, a quem agradeço por sua ajuda nos momentos que precisei alguma dica no trabalho.

Aos colegas com quem tive a oportunidade de estudar durante o período do mestrado e todas as demais pessoas que ajudaram, não atrapalharam e se mostraram interessadas neste trabalho.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Neste momento o Brasil possui uma das mais renováveis matrizes energéticas do mundo, mas o desafio de reduzir os níveis de emissão, permitir o crescimento econômico e atender a aproximadamente um milhão de pessoas sem energia elétrica no país, requer a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a utilização de fontes limpas e sustentáveis de energia, como é a energia eólica. A energia eólica é considerada, entre as alternativas renováveis existentes, a mais viável no mercado de energia, devido à baixa relação custo/benefício de exploração, tendo apresentado um crescimento exponencial ao longo dos anos. Os principais sistemas eólicos classificam-se de acordo com sua operação em dois tipos: sistemas com operação a velocidade fixa e sistemas com operação a velocidade variável. Durante muitos anos a liderança do mercado foi para os geradores que operam a velocidade fixa, sendo a máquina mais usada o gerador de indução de rotor em gaiola (SCIG). A partir do ano 2000, a supremacia no mercado passou a ser para o gerador de velocidade variável. Hoje, tem-se dois tipos de geradores amplamente utilizados em sistemas eólicos que operam a velocidade variável: o gerador síncrono e o gerador de indução com rotor bobinado. Neste trabalho será estudada uma das máquinas que operam a velocidade variável e utilizam geradores de indução com rotor bobinado: o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG). Sua importância é principalmente o controle independente da potência ativa e da potência reativa fornecida para a rede elétrica, e à operação com máxima eficiência na conversão de energia. Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise comparativa de um sistema de geração utilizando máquinas do tipo DFIG com quatro estratégias de controle: controle da potência ativa e da tensão nos terminais da máquina, controle da potência reativa e da tensão nos terminais da máquina, controle da velocidade de rotação e da tensão nos terminais da máquina, controle da potência ativa e da potência reativa fornecidas pela máquina ao sistema. Esta análise é feita comparando o comportamento do sistema quando sujeito a diversas situações, tais como: variações da demanda de potência da carga elétrica, variações do torque mecânico e ocorrência de uma falta trifásica. O desempenho de sistemas de geração eólica com SCIG também é incluído nesta análise para ilustrar de maneira quantitativa os ganhos obtidos com o uso do DFIG. Os resultados obtidos ilustram as virtudes de cada uma das diferentes possibilidades de modos de operação do DFIG em um sistema de distribuição e permitem uma melhor compreensão da vantagem do desempenho do DFIG em relação à utilização do SCIG.

Palavras-chaves: Energia Eólica, Gerador de indução Duplamente Alimentado, Gerador de Indução de Rotor em Gaiola, Desempenho transitório de SEP'S, Estratégias de Controle.

ABSTRACT

At present Brazil has one of the most renewable energy matrices in the world, but the challenge of reducing emission levels, allowing the economic growth, and helping about 1 million people without electric energy in the country, requires research and development of new technologies that enable the use of clean and sustainable energy sources, such as wind power. Wind energy is considered among the existing renewable alternatives the more viable in the energy market, due to the low cost / benefit ratio of exploitation, having experienced exponential growth over the years. The wind system are classified according to their operation into two types: operating systems with fixed speed and systems with variable speed operation. For many years the leadership in the market was for fixed speed generator, being the most used machine, the induction generator rotor cage (SCIG). From 2000, the leadership in the market was for variable speed wind turbine. Today, there are two types of wind generators widely used in systems that operate at variable speed: synchronous generator and generator with wound rotor induction. In this work we will study one of the machines that operate at variable speed and use induction generators with wound rotor: the doubly-fed induction generator (DFIG). Its importance is mainly the independent control of active power and reactive power supplied to the grid, and operating at maximum efficiency in energy conversion. In this context, this work presents a comparative analysis of a generation system using DFIG type machines with four control strategies: control of active power and voltage at the terminals of the machine, control of reactive power and voltage at the machine terminals, control the rotational speed and tension in the machine terminals, control of active power and reactive power supplied by the machine. This analysis is done by comparing the behavior of the system when subjected to various situations, such as variations in power demand of electric load, changes in the mechanical torque and the occurrence of a three-phase fault. The performance of wind power generation systems with SCIG is also included in this analysis to illustrate quantitatively the gains obtained using DFIG. The results illustrate the virtues of each of the different possible operating modes of the DFIG in a distribution system and allow a better understanding of the performance advantage of the machine DFIG over the use of the machine SCIG.

Keywords: Wind Energy, Doubly-Fed Induction Generator, Squirrel Cage Induction Generator, Transient performance of SEP's. and Control Strategies.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS	13
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 A geração eólica atual	15
1.1.1 Tecnologias de aerogeradores	17
1.2 Objetivos da dissertação	22
1.3 Estrutura da dissertação	23
2 MODELAGEM	25
2.1 Introdução	25
2.2 Sistema de geração DFIG	25
2.2.1 Modos de operação	26
2.3 Modelagem dinâmica do sistema de geração	28
2.3.1 Modelagem dinâmica da máquina assíncrona	29
2.3.2 Modelagem dinâmica do sistema MBI	32
2.3.3 Modelagem do conversor bidirecional	35
2.4 Linearização do sistema MBI	38
2.4.1 Método indireto de Lyapunov	39
2.4.2 Definição do ponto de equilíbrio	39
2.4.3 Implementação do método indireto de Lyapunov	40
2.5 Considerações finais	43
3 CONTROLE DO DFIG	44
3.1 Introdução	44
3.2 Projeto de controle do conversor lado rotor	45
3.2.1 Estratégia de controle de potência ativa e tensão nos terminais	45
3.2.2 Estratégia de controle de potência reativa e tensão nos terminais	51
3.2.3 Estratégia de controle de velocidade de rotação e tensão nos terminais	54
3.2.4 Estratégia de controle de potência ativa e potência reativa.	57
3.3 Considerações finais	58
4 SIMULAÇÕES	60
4.1 Introdução	60
4.2 Avaliação do desempenho dos reguladores projetados para cada estratégia de controle implementada no DFIG	61

4.3	Avaliação do desempenho do sistema de geração com as máquinas DFIG e SCIG para diferentes demandas de potência da carga	66
4.4	Efeito da variação do vento no desempenho das máquinas SCIG e DFIG ligadas ao sistema de geração apresentado na Figura 31.....	68
4.5	Avaliação do comportamento transitório das máquinas SCIG e DFIG.....	72
4.6	Considerações finais	75
5	CONCLUSÕES FINAIS	77
5.1	Sugestão de trabalhos futuros	80
	REFERÊNCIAS	81
APENDICE A	PARÂMETROS DO SISTEMA DE GERAÇÃO	85
APENDICE B	MODELO LINEARIZADO.....	87
APENDICE C	PARÂMETROS DOS CONTROLADORES.....	89
APENDICE D	MODELO IMPLEMENTADO NO SIMPOWERSYSTEM.....	90

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Potência eólica anual instalada no mundo (GWEC, 2012)	15
Figura 2	Potência eólica acumulativa instalada no mundo (GWEC, 2012)	15
Figura 3	Evolução da capacidade eólica total instalada no Brasil (GWEC, 2012).	17
Figura 4	Aerogerador de velocidade fixa, equipado com gerador de indução de rotor em gaiola, diretamente conectado na rede elétrica	19
Figura 5	Aerogerador de velocidade variável, equipado com gerador de indução com rotor bobinado, controladas com resistências externas no rotor.....	20
Figura 6	Aerogerador de velocidade variável, equipado com gerador de indução com rotor bobinado duplamente alimentado	20
Figura 7	Aerogerador de velocidade variável, equipado com gerador excitado eletricamente ou excitado por ímã permanente	20
Figura 8	Energia eólica anual instalada para diferentes tecnologias de geração eólica	21
Figura 9	Gerador de indução duplamente alimentado -DFIG.....	26
Figura 10	Fluxo de potência ativa do DFIG no modo de operação velocidade subsíncrona. .	27
Figura 11	Fluxo de potência ativa do DFIG no modo de operação velocidade supersíncrona	27
Figura 12	Topologia máquina-barra infinita.	33
Figura 13	Modelo do DFIG ligado à rede de distribuição.	33
Figura 14	Circuito equivalente do DFIG ligado à rede de distribuição.	34
Figura 15	Circuito básico do conversor bidirecional ligado ao rotor do DFIG.	36
Figura 16	Modelos dos conversores implementados no <i>SimPowerSystem</i>	36
Figura 17	Esquema geral do sistema implementado com controle PI.	42
Figura 18	Esquema geral do sistema implementado com estratégia de controle de potência ativa e tensão nos terminais	45
Figura 19	Lugar das raízes.....	47
Figura 20	Zoom lugar das raízes	47
Figura 21	Lugar das raízes com especificação dos parâmetros t_s e M_p	48
Figura 22	Lugar das raízes.....	49
Figura 23	Lugar das raízes com relação ao parâmetro $-K_p$	50
Figura 24	Lugar das raízes com especificação dos parâmetros t_s e M_p	50
Figura 25	Esquema geral do sistema implementado com estratégia de controle de potência reativa e tensão nos terminais.	51
Figura 26	Lugar das raízes.....	53
Figura 27	Lugar das raízes com especificação dos parâmetros t_s e M_p	53
Figura 28	Esquema geral do sistema implementado com estratégia de controle da velocidade de rotação e tensão nos terminais.	54
Figura 29	Lugar das raízes.....	56
Figura 30	Lugar das raízes com especificação dos parâmetros t_s e M_p	56
Figura 31	Esquema geral do sistema implementado com estratégia de controle de potência ativa e potência reativa	57

Figura 32 Sistema de geração eólica estudado com MATLAB/Simulink	60
Figura 33 Esquema geral implementado do sistema linearizado com os controladores PI.....	62
Figura 34 Tensão nos terminais do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável	62
Figura 35 Potência ativa do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável	63
Figura 36 Fator de potência do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável	64
Figura 37 Velocidade de rotação do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável	65
Figura 38 Potência ativa vs Tensão nos terminais da carga do sistema de geração com SCIG para diferentes demandas de potência da carga	67
Figura 39 Degrau da demanda de potência da carga	67
Figura 40 Tensão nos terminais da carga do sistema de geração eólica com DFIG e SCIG, em variação da demanda de potência da carga apresentada na figura 40.....	68
Figura 41 Variação do Torque mecânico	69
Figura 42 DC link Capacitor voltage.....	69
Figura 43 Tensão nos terminais da carga do sistema de geração eólica com as máquinas DFIG e SCIG, em variação do T_m apresentado na Figura 42.	70
Figura 44 Potência ativa gerada pelas máquinas DFIG e SCIG ligadas ao sistema geração eólica, em variação do T_m apresentado na Figura 42.....	71
Figura 45 Fator de potência das máquinas DFIG e SCIG ligadas ao sistema teste.....	71
Figura 46 Velocidade de rotação das máquinas DFIG e SCIG, em variação do T_m apresentado na Figura 42.	72
Figura 47 Comportamento dinâmico da potência ativa gerada pelas máquinas SCIG e DFIG quando é aplicada uma falta trifásica (duração de 90ms) próxima à subestação de 25kV	73
Figura 48 Modelo implementado do sistema de geração no <i>SimPowerSystem</i>	90
Figura 49 Modelo do subsistema Parque Eólico 3MW	90
Figura 50 Parâmetros da máscara Gerador de Indução	91
Figura 51 Modelo do subsistema DFIG	92
Figura 52 Modelo do subsistema Máquina de indução	92
Figura 53 Modelo do subsistema Controle.....	92
Figura 54 Conversor Lado Rede (Crede)	93
Figura 55 Modelo do subsistema Conversor Lado Rede (Crede)	93
Figura 56 Conversor Lado Rotor (Crotor).....	93
Figura 57 Modelo do subsistema Conversor Lado Rotor (Crotor).....	94
Figura 58 Filtro RL.....	94
Figura 59 Modelo do subsistema Filtro RL.....	95
Figura 60 Elo CC.....	95
Figura 61 Modelo do subsistema Elo CC.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Sistema de referência.....	31
Tabela 2 Avaliação do desempenho da resposta temporal da tensão nos terminais.	63
Tabela 3 Avaliação do desempenho da resposta temporal da potência ativa.....	64
Tabela 4 Avaliação do desempenho da resposta temporal do fator de potência.	65
Tabela 5 Avaliação do desempenho da resposta temporal da velocidade de rotação.	66
Tabela 6 Avaliação do comportamento dinâmico da potência ativa.	74
Tabela 7 TCF em <i>ms</i> em função da potência gerada pela máquinas SCIG e DFIG.....	74
Tabela 8 Parâmetros do gerador – 3MW.....	85
Tabela 9 Parâmetros Three-Phase PI Section Line	86
Tabela 10 Parâmetros do transformador trifásico 575V/25kV (T1).....	86
Tabela 11 Parâmetros do transformador trifásico 25V/120kV (T2).....	86
Tabela 12 Parâmetros dos controladores implementado no conversor lado rotor (Crotor).....	89
Tabela 13 Parâmetros do controlador implementado no conversor lado rede (Crede)	89

LISTA DE ABREVIATURAS

MBI	Máquina Barramento Infinito
pu	Por unidade (relativo ao sistema por unidade)
TCF	Tempo Crítico de eliminação da Falta
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia eólica
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
GWEC	Global Wind Energy Council
PDE	Plano Nacional de Expansão de Energia
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
DOIG	Dual Out Induction Generator
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
WRSG	Wound Rotor Synchronous Generator
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
C_{rotor}	Conversor lado rotor
C_{grid}	Conversor lado rede

1 INTRODUÇÃO

O desafio energético mundial hoje é suprir a crescente demanda de energia e proteger o meio ambiente. A preocupação com o esgotamento das fontes de energia e seu impacto negativo no meio ambiente faz necessárias a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a utilização de fontes de energia alternativas e renováveis. O sol, o vento, a água e a biomassa são hoje as fontes mais promissoras de energia, mas a fonte de energia verde e limpa, que vem despontando como a mais promissora no mundo, é a energia eólica.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (**ABEEólica**) o Brasil tem hoje 148 turbinas eólicas instaladas com capacidade de 4500 MW e uma redução de CO_2 de 3.858.813 (T/ano), mas, de acordo com a ONG ambientalista Greenpeace o Brasil tem potencial para chegar ao ano de 2050 possuindo uma matriz energética com 66.5% de participação de fontes renováveis, sendo 47% maior do que a usada atualmente (GREENPEACE, 2010).

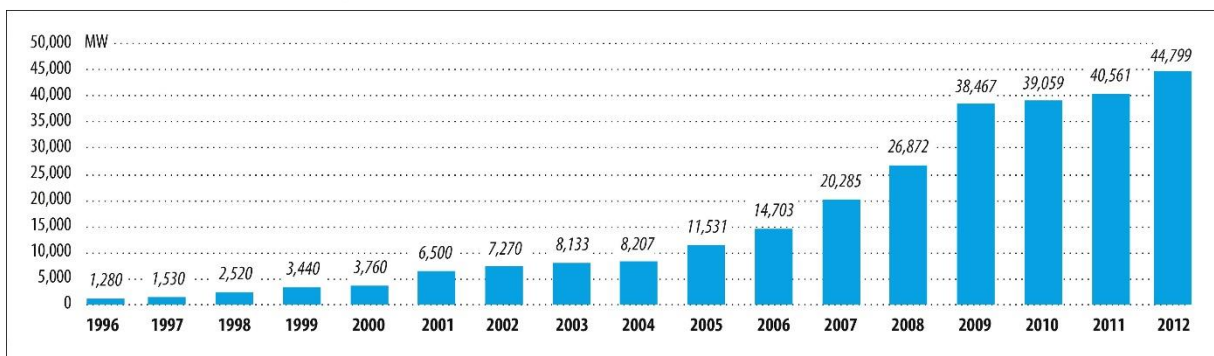
Tradicionalmente, os geradores são ligados na rede de transmissão, mas a integração da energia eólica na rede de distribuição está entrando numa era emergente de rápida expansão e comercialização. O uso da geração eólica é uma realidade na matriz energética mundial, especialmente nos países que trabalham seriamente em implementar um plano de integração destas fontes no sistema elétrico, mas a utilização desse tipo de energia na rede elétrica apresenta alguns problemas de ordem elétrica em relação a estabilidade, flutuações e qualidade. É necessário realizar análises de interconexão para determinar o impacto na rede e melhorar a qualidade da energia.

As próximas seções apresentam um panorama da geração eólica atual e introduzem as tecnologias de geradores mais usadas. Na Seção a seguir são apresentadas as contribuições e objetivos deste trabalho e a parte final é dedicada à apresentação da estrutura da dissertação.

1.1 A geração eólica atual

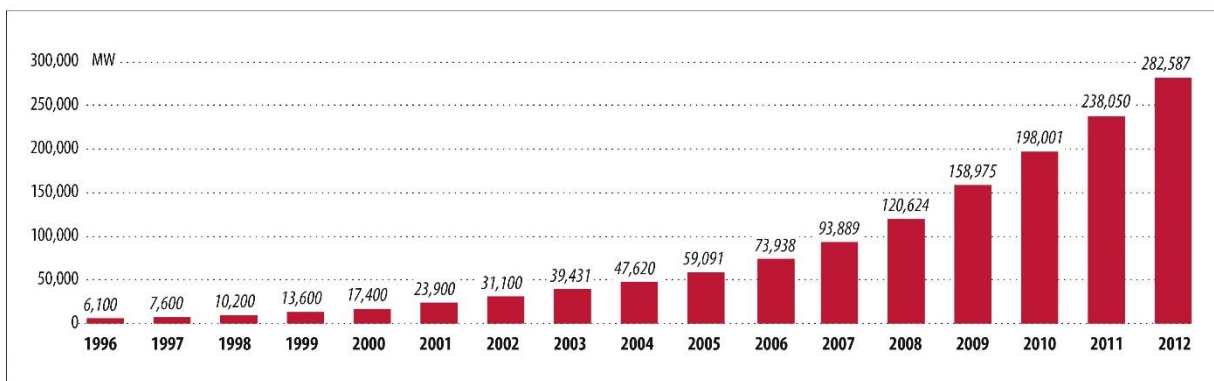
No Brasil, existem diversas organizações como a Associação Brasileira de Energia eólica – ABEEólica e a ONG ambientalista Greenpeace entre outras, que promovem a produção de energia elétrica a partir da força dos ventos como fonte complementar da matriz energética nacional. A ideia é fazer o setor eólico mais competitivo e consolidado, levando as empresas e os governos a abandonar pouco a pouco as fontes fósseis de geração de energia, como o petróleo e o carvão, e substituí-las pelas novas fontes renováveis, como eólica, solar ou biomassa.

As Figuras 1 e 2 mostram a evolução da potência eólica instalada no mundo até o ano 2012.



Source: GWEC

Figura 1. Potência eólica anual instalada no mundo (GWEC, 2012).



Source: GWEC

Figura 2. Potência eólica acumulativa instalada no mundo (GWEC, 2012).

A energia eólica é considerada a alternativa econômica mais viável atualmente, devido à baixa relação custo/benefício de exploração em relação a outras fontes de energia renovável existentes, tendo apresentado um crescimento exponencial ao longo dos anos (GWEC, 2012). De acordo ao Conselho Global de Energia Eólica (Global Wind Energy Council), até o ano de 2012 aproximadamente 282,587 GW foram instalados no mundo, representando uma taxa de crescimento superior a 30% nos últimos 5 anos. Desse aumento na capacidade acumulada instalada no mundo, 71.8% corresponde aos dez países com maior capacidade instalada, a saber: China (26.7%), USA (21.2%), Alemanha (11.1%), Espanha (8.1%), Índia (6.5%), Reino Unido (3.0%), Itália (2.9%), França (2.7%), Canadá (2.2%) e Portugal (1.6%) (GWEC, 2012).

O total de parques eólicos instalados ao redor do mundo no ano de 2012 totalizou uma capacidade instalada de 44,799 GW, representando um aumento de 18% na capacidade global instalada que atualmente é de 322,4 GW. Deste aumento, 70% corresponde aos seguintes países: Estados Unidos (29.3%), China (28.9%), Alemanha (5.4%), Índia (5.2%), Reino Unido (4.2%), Itália (2.8%), Espanha (2.5%), Brasil (2.4%), Canadá (2.1%) e Romênia (2.1%) (GWEC, 2012).

No final de 2012, o Brasil tinha 2,5 GW de capacidade eólica total instalada, mas o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2021) estabelece uma meta de 16 GW de capacidade eólica instalada a ser alcançada até 2021, o que representa 9% do consumo nacional de eletricidade (GWEC, 2012). Atualmente, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica –ABEEólica o Brasil tem uma capacidade eólica total instalada de 4,500 GW, representando um aumento aproximadamente de 36% com respeito a 2012. Na Figura 3 é apresentada a evolução da capacidade eólica instalada no Brasil até o ano de 2012 (GWEC, 2012).

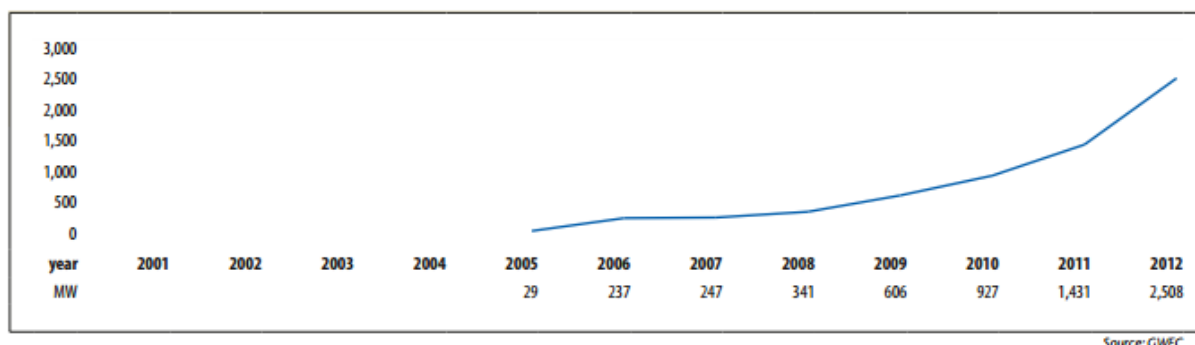


Figura 3. Evolução da capacidade eólica total instalada no Brasil (GWEC, 2012).

De acordo com o Conselho Global de Energia Eólica (GWEC), a recente evolução da indústria de energia eólica no Brasil pode ser explicada por diversos fatores importantes:

- Progresso tecnológico alcançado pela indústria eólica
- Riqueza de recursos eólicos no país
- Leilões regularmente competitivos no mercado
- Políticas de financiamento benéficas para o setor eólico

Esses fatores levam ao Brasil a estar em uma excelente posição para ser o líder regional na geração e desenvolvimento da energia eólica.

1.1.1 Tecnologia de aerogeradores

Os geradores são dispositivos responsáveis por converter a energia mecânica obtida pela turbina eólica em energia elétrica. Um fato interessante dos geradores utilizados é a variedade de tecnologias que são empregadas. Os principais sistemas eólicos classificam-se quanto à forma de operação em dois tipos (HEIER, 1998): sistema com operação de velocidade fixa ou velocidade variável. Os aerogeradores que operam a velocidade fixa caracterizam-se pelo funcionamento em velocidade constante, independente da velocidade do vento. A configuração mais usada para tal operação consiste de um gerador de indução de rotor em gaiola conectado ao eixo da turbina por meio de uma caixa de transmissão mecânica (SCIG) (TIPO A). Neste tipo de tecnologia, o estator é diretamente conectado na rede, dispensando assim a utilização

de eletrônica de potência, proporcionando baixo custo inicial de instalação e facilidade operacional (NUNES, 2003). Porém, devido à falta de controle do consumo de potência reativa e à necessidade de maior manutenção pelo estresse dinâmico presente nas partes mecânicas da caixa de transmissão, este tipo de tecnologia foi substituída ao longo dos anos por sistema eólicos que operam a velocidade variável. Esta tendência foi apresentada por Hansen e Hansen (2006) e Wang e Gerber (2012).

Os aerogeradores que operam a velocidade variável apresentam muitas vantagens em comparação com os aerogeradores que operam a velocidade fixa (MANWELL et al., 2009). Primeiramente, os sistemas a velocidade variável apresentam investimentos iniciais mais elevados, mas tem possibilidade de controle da potência ativa e reativa fornecida para a rede elétrica (TANG; XU, 1995). Adicionalmente, tem-se a redução do estresse dinâmico nas partes mecânicas da caixa de transmissão, implicando menor manutenção (TAPIA; TAPIA, 2005). Este tipo de aerogerador também apresenta uma melhor regulação da potência fornecida para a rede, para velocidades de vento acima da velocidade nominal (NUNES, 2003).

No mundo, existem dois tipos de geradores amplamente usados em sistemas eólicos que operam a velocidade variável: gerador de indução com rotor bobinado e o gerador síncrono (HANSEN; HANSEN, 2006; WANG; GERBER, 2012).

Duas diferentes tecnologias com operação a velocidade variável utilizam geradores de indução com rotor bobinado (TIPO B e TIPO C). A primeira delas é conhecida na literatura por gerador de indução de dupla saída (DOIG) (ÇADIRCI; ERMIS, 1992) ou gerador de indução controlado com resistência externa no rotor (HANSEN; HANSEN, 2006). Nesta tecnologia, a presença de resistências externas no rotor, dinamicamente controladas, resulta numa variação de velocidade rotacional reduzida acima da velocidade síncrona, variando normalmente de 0 a 10%. (AKHMATOV, 2003). A segunda tecnologia é conhecida na literatura por gerador de indução com dupla alimentação (DFIG) (NUNES et al., 2007; VIEIRA; NUNES; BEZERRA,

2009; VIEIRA; NUNES et al., 2004). Nesta tecnologia, o gerador é projetado para trabalhar com variação de velocidade em um intervalo restrito (normalmente, $\pm 30\%$ em relação à velocidade síncrona), buscando operar com máxima eficiência para conversão de energia (TARNOWSKI, 2006). Esta tecnologia será estudada posteriormente nesta dissertação.

Duas diferentes tecnologias com operação a velocidade variável utilizam geradores síncronos (TIPO D). Uma delas tem o rotor alimentado eletricamente (WRSG ou WRIG) e outra por ímãs permanentes (PMSG) (HANSEN; HANSEN, 2006). O uso deste tipo de gerador é justificado pela possibilidade de aplicação de retificadores a comutação natural consideravelmente mais baratos (GRAUERS, 1996), bem como pelo alto número de polos, o que permite operação com uma baixa velocidade rotacional mecânica (CHEN; SPOONER, 1995), implicando na eliminação da caixa de transmissão (PINHEIRO, 2004). Nas seguintes figuras, são apresentadas as quatro tecnologias de aerogeradores mencionadas anteriormente:

TIPO A:

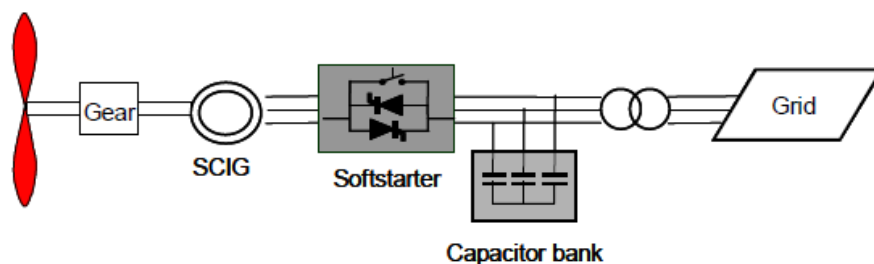


Figura 4. Aerogerador de velocidade fixa, equipado com gerador de indução de rotor em gaiola, diretamente conectado na rede elétrica

TIPO B:

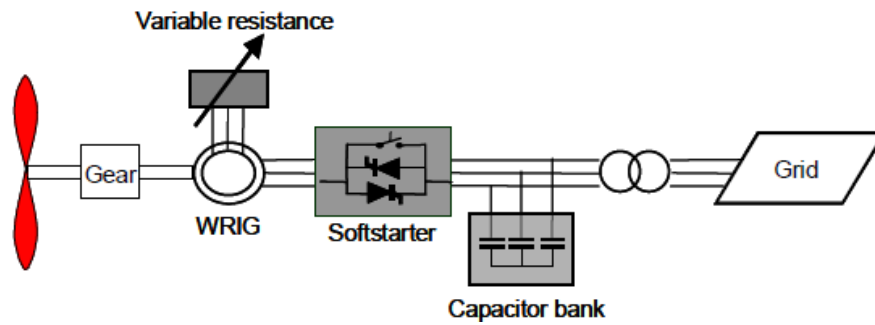


Figura 5. Aerogerador de velocidade variável, equipado com gerador de indução com rotor bobinado, controladas com resistências externas no rotor.

Tipo C:

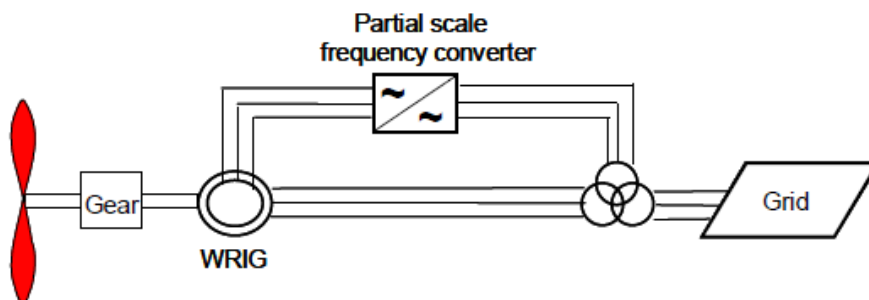


Figura 6. Aerogerador de velocidade variável, equipado com gerador de indução com rotor bobinado duplamente alimentado.

Tipo D:

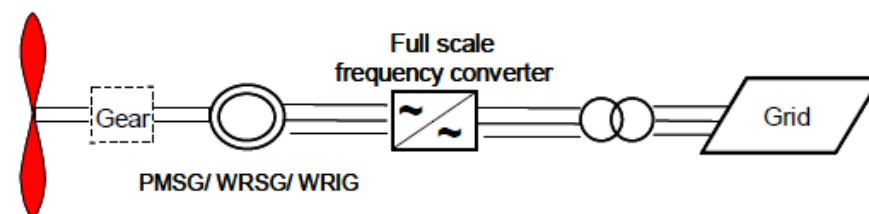


Figura 7. Aerogerador de velocidade variável, equipado com gerador excitado eletricamente ou excitado por imã permanente

Uma comparação entre as quatro tecnologias de geração eólica em relação à energia anual instalada no mundo é apresentada na Figura 8 (HANSEN; HANSEN, 2006; WANG; GERBER,

2013), destacando a porcentagem de novos sistemas eólicos instalados no mundo, durante o período de 1995 até 2010.

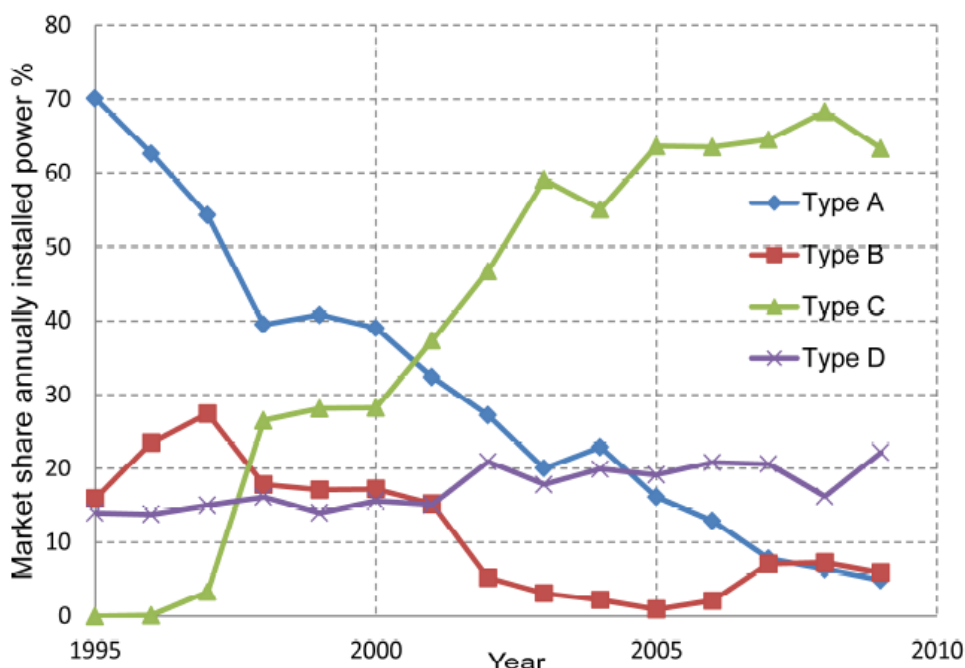


Figura 8. Energia eólica anual instalada para diferentes tecnologias de geração eólica (HANSEN; HANSEN, 2006; WANG; GERBER, 2013)

Nesta figura, observa-se que a tecnologia TIPO A (SCIG) foi, durante muitos anos, a principal tecnologia utilizada pelos fabricantes de turbinas eólicas por se tratarem de máquinas robustas, mas a utilização desta tecnologia teve um drástico declínio, devido ao aumento de aerogeradores que operam a velocidade variável. A tecnologia que se manteve ao longo dos anos é a tecnologia de aerogerador de velocidade variável que utiliza um conversor com potência igual à potência nominal do gerador, onde são empregados usualmente geradores excitados eletricamente (WRIG ou WRSG) ou excitados por ímã permanente (PMSG). A partir do ano 2000, a supremacia no mercado eólico foi para o DFIG, com uma tendência de crescimento muito forte. Esse fato está diretamente relacionado com a flexibilidade do controle oferecido pelos conversores estáticos, que possibilitam manter a tensão terminal constante quando a máquina opera em velocidade variável, permitindo o controle independente da

potência ativa e reativa que a máquina troca com a rede elétrica, com a máxima eficiência no aproveitamento da energia eólica (VIEIRA; NUNES, 2006).

O controle implementado no conversor do DFIG é projetado por controladores PI (NUNES; VIERIA; BEZERRA, 2008; NUNES et al, 2007; QIAO; HARLEY, 2008; HOLDSWORTH et al., 2003; ANAYA et al., 2006; TAPIA; TAPIA, 2005). Diferentes estratégias de controle têm sido estudadas: Controle da velocidade de rotação e tensão nos terminais (NUNES et al, 2007; NUNES et al., 2004), Controle da velocidade de rotação e potência reativa (HOLDSWORTH et al., 2003), Controle da potência ativa e velocidade de rotação (QIAO; HARLEY, 2008), Controle da potência reativa e tensão nos terminais (QIAO; HARLEY, 2008), Controle do torque eletromagnético e velocidade de rotação (HOLDSWORTH et al., 2003), Controle da potência reativa e torque eletromagnético (WONG; HO; CHENG, 2008), Controle do fator de potência e tensão nos terminais (HOLDSWORTH et al., 2003), Controle de potência ativa e tensão nos terminais (NUNES; VIEIRA; BEZERRA, 2008).

Nesta dissertação são estudadas quatro estratégias de controle: Controle de potência ativa e tensão nos terminais, controle de potência reativa e tensão nos terminais, controle da velocidade de rotação e tensão nos terminais e controle de potência ativa e potência reativa. O projeto de controle de cada estratégia implementada é feito independentemente através do Método do Lugar Geométrico das Raízes (LGR).

1.2 Objetivos da dissertação

A presente dissertação tem como objetivos:

- Apresentar uma análise comparativa de um sistema de geração utilizando máquinas do tipo DFIG com quatro estratégias de controle, abordando diversas situações tais como: variações da demanda, variações do torque mecânico e ocorrência de uma falta trifásica.

- Realçar a necessidade da escolha adequada da estratégia de controle através das simulações dinâmicas apresentadas.
- Ilustrar de maneira quantitativa os ganhos obtidos do gerador tipo DFIG com as quatro estratégias de controle frente ao gerador tipo SCIG.

1.3 Estrutura da dissertação

Este texto é composto por 5 capítulos. Inicialmente, o Capítulo 1 apresenta uma visão geral da geração eólica atual e mostra uma análise da energia eólica anual instalada no mundo para diferentes tecnologias de geração eólica. Também são resumidas as contribuições e objetivos deste trabalho.

No capítulo 2 é introduzido o gerador de indução duplamente alimentado e seus modos de operação. Logo, é apresentada a modelagem dinâmica do sistema de geração dividido em três subsistemas: Modelagem dinâmica da máquina de indução, modelagem dinâmica da máquina de indução junto ao barramento infinito (MBI) e a modelagem do conversor. Finalmente, é obtido o modelo em variáveis de estado do sistema MBI e um modelo linearizado em torno de um ponto de operação. Na modelagem dinâmica do sistema de geração não foi considerada a turbina eólica, porém, nas simulações apresentadas ela foi representada através de variações do torque mecânico.

No capítulo 3 consta o projeto de controle do gerador de indução duplamente alimentado. Neste capítulo, são apresentadas as quatro estratégias de controle (Controle de potência ativa e tensão nos terminais, Controle de potência reativa e tensão nos terminais, Controle de velocidade de rotação e tensão nos terminais, Controle de potência ativa e potência reativa) aplicadas ao conversor estático interligado ao rotor do DFIG. O controle de cada variável de saída do aerogerador é projetado independentemente por controladores proporcionais e integrais (PI) através do método lugar das raízes.

No capítulo 4 é avaliado o desempenho dos reguladores projetados através de variações dos sinais de referência. No mesmo capítulo é avaliado o desempenho do sistema de geração utilizando a máquina tipo DFIG com as quatro estratégias de controle e o tipo SCIG através da variação do torque mecânico, variação da demanda e ocorrência de uma falta trifásica. Os indicadores de análises utilizados foram: o tempo de acomodação, a taxa de amortecimento e o tempo crítico de eliminação da falta. Os resultados obtidos tornam claras as vantagens da aplicação de máquinas DFIG em sistemas de geração eólica, bem como realçam a necessidade da escolha adequada da estratégia de controle.

O capítulo 5 tem por objetivo agrupar todas as conclusões parciais presentes ao final dos capítulos e apresentar uma visão geral da escolha adequada da estratégia de controle no DFIG e da vantagem de utilizar o gerador tipo DFIG do que o SCIG. Finalmente, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, referências bibliográficas e apêndices.

2 MODELAGEM

2.1 Introdução

O capítulo de modelagem tem por objetivo apresentar os modelos matemáticos dos componentes do sistema de geração utilizado nesta dissertação.

Na seção 2.2 é apresentado o gerador de indução duplamente alimentado e seus modos de operação, com o objetivo de entender o funcionamento desta tecnologia. Na seção 2.3 é mostrada a modelagem dinâmica do sistema de geração dividido em três partes: Modelagem dinâmica da máquina de indução, modelagem dinâmica da máquina de indução junto ao barramento infinito (MBI) e modelagem do conversor bidirecional. Na seção 2.4 é mostrado o modelo em espaço de estados do sistema MBI. A última seção consiste das considerações finais do capítulo.

2.2 Sistema de geração DFIG

A Figura 9 corresponde ao DFIG conectado na rede elétrica. Ele está integrado por uma máquina de indução duplamente alimentada e dois conversores de potência ligados back-to-back. Esta estrutura consiste de dois conversores (AC-DC-AC) de tensão regulados em corrente conectados por um link DC (PENA; CLARE; ASHER, 1996). O conversor C_{rotor} controla a magnitude, ângulo e frequência da tensão do rotor, sendo responsável pelo controle indireto da potência ativa e reativa do gerador. O conversor C_{grid} , que liga o sistema elétrico ao link DC, tem o objetivo de manter a tensão DC constante. Os dois conversores C_{rotor} e C_{rede} usam transistores IGBTs para sintetizar uma tensão alternada a partir de uma fonte de tensão DC. Um condensador ligado no lado CC funciona como a fonte de tensão DC. Um indutor de

acoplamento L é usado para ligar o conversor C_{rede} na rede. O rotor do gerador é ligado ao conversor C_{rotor} pelos anéis escorregantes, e o estator é diretamente conectado à rede elétrica. A potência capturada pela turbina eólica é convertida em energia elétrica através do gerador de indução e é transmitida para a rede pelo estator e os enrolamentos do rotor. O sistema de controle gera os sinais de comando de tensão V_g e V_r , a fim de controlar a tensão do barramento CC, a potência ativa, potência reativa ou a tensão nos terminais da rede.

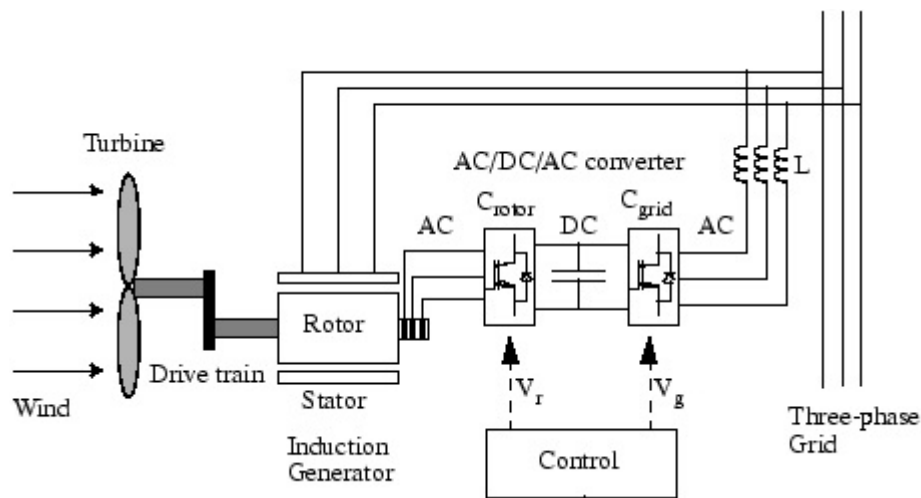


Figura 9. Gerador de indução duplamente alimentado – DFIG (SimPowerSystem)

2.2.1 Modos de operação

A configuração dos conversores conectados back-to-back permite que o fluxo de potência seja bidirecional, habilitando o gerador a trabalhar em dois modos: Modo de operação em velocidade subsíncrona (modo motor) e modo de operação em velocidade supersíncrona (modo gerador) (DA COSTA et al, 2006). Nas seguintes figuras, P_m representa a potência mecânica fornecida pela turbina eólica, P_N representa a potência ativa total fornecida para a rede elétrica, e P_s e P_r são as parcelas de potência ativa do estator e rotor do gerador.

No modo de operação em velocidade subsíncrona, a velocidade do rotor é menor que a velocidade síncrona da máquina. Nesta região, o escorregamento (s) é positivo, portanto a operação da máquina é no modo motor. A operação no modo motor é possível pelo

fornecimento controlado de potência ativa ao circuito do rotor ($P_r < 0$), indicando que o rotor está absorvendo potência ativa da rede (SILVA et al, 2005). Para este modo de operação, o fluxo de potência é apresentado na Figura 10.

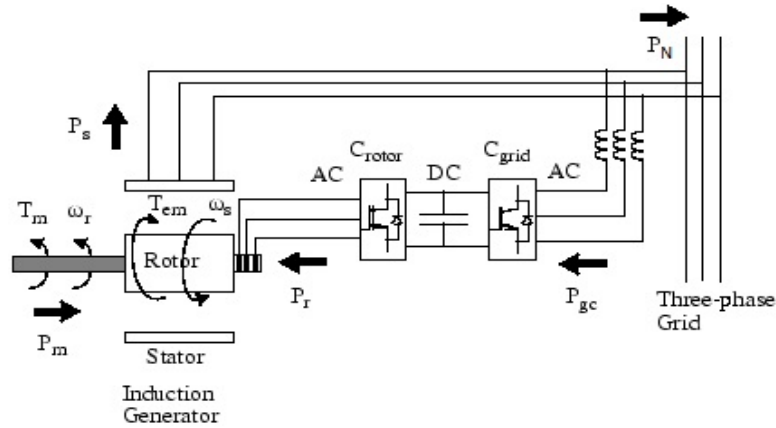


Figura 10. Fluxo de potência ativa do DFIG no modo de operação em velocidade subsíncrona (SimPowerSystem)

No modo de operação em velocidade supersíncrona, a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona da máquina. Nesta região, o escorregamento (s) é negativo, portanto a operação da máquina é no modo gerador. O circuito do rotor passa a fornecer potência ativa para a rede elétrica ($P_r > 0$). Para este modo de operação, o fluxo de potência é apresentado na Figura 11.

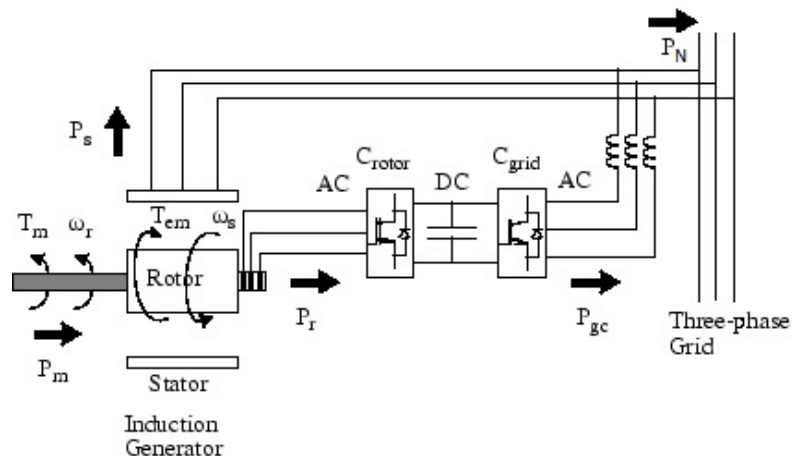


Figura 11. Fluxo de potência ativa do DFIG no modo de operação em velocidade supersíncrona (SimPowerSystem)

De acordo com as figuras 10 e 11 o circuito de estator sempre fornece potência ativa e o circuito do rotor apresenta um fluxo bidirecional de potência ativa controlado pelo conversor Crotor da máquina. A potência ativa fornecida para a rede (P_N) pode ser descrita pela seguinte equação em função da potência ativa do estator (P_s) e da potência ativa do rotor (P_r):

$$P_N = P_s + P_r \quad (1)$$

A potência ativa do rotor é determinada pela seguinte equação em função do escorregamento da máquina (s) e da potência ativa do estator (P_s):

$$P_r = -sP_s \quad (2)$$

Substituindo a equação (2) em (1), obtém-se a equação geral que permite o cálculo da potência ativa (para qualquer ponto de operação) fornecida pelo DFIG para a rede:

$$P_N = (1 - s)P_s \quad (3)$$

2.3 Modelagem dinâmica do sistema de geração

Nesta seção é desenvolvida a modelagem dinâmica da máquina de indução. O modelo da máquina de indução de dupla alimentação é apresentado pelo modelo de quinta ordem, expresso em termos das derivadas do fluxo magnético de estator e do rotor, no sistema de coordenadas dq e no referencial síncrono em pu com todas as variáveis do rotor referenciadas ao circuito do estator (KRAUSE, 2002). A modelagem do sistema de geração estudado neste trabalho é dividida em três partes. A primeira parte corresponde à modelagem dinâmica da máquina assíncrona, a segunda à modelagem dinâmica do sistema MBI e por último à modelagem do conversor.

2.3.1 Modelagem dinâmica da máquina assíncrona

O modelo dinâmico da máquina assíncrona apresentado neste trabalho é expresso como um conjunto de equações algébrico-diferenciais em função das tensões, correntes e fluxo magnético de estator e de rotor no sistema de coordenadas dq e a velocidade elétrica do rotor.

A tensão e corrente do estator e rotor no sistema de coordenadas dq são definidas pelas seguintes equações:

Tensão do estator (pu):

$$\overrightarrow{V_{dqs}} = V_{ds} + jV_{qs} \quad (4)$$

Tensão do rotor (pu):

$$\overrightarrow{V_{dqr}} = V_{dr} + jV_{qr} \quad (5)$$

Corrente do estator (pu):

$$\overrightarrow{I_{dqs}} = I_{ds} + jI_{qs} \quad (6)$$

Corrente do rotor (pu):

$$\overrightarrow{I_{dqr}} = I_{dr} + jI_{qr} \quad (7)$$

O seguinte conjunto de equações diferenciais representa o modelo dinâmico de 5ª ordem da máquina assíncrona, em função dos fluxos magnéticos de estator e de rotor e da velocidade de rotação do rotor. Todas as grandezas estão em unidades (pu), com exceção da constante de inércia do gerador H que está em segundos e da frequência base ω_b que está em rad/s (REGINATTO, 2006; KRAUSE; WASYNCZUK; SUDHOFF, 2002; REGINATTO, 1993; PEREIRA, 2004).

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = \omega_b (V_{qs} - W_x \varphi_{ds} - R_s I_{qs}) \quad (8)$$

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = \omega_b (V_{ds} + W_x \varphi_{qs} - R_s I_{ds}) \quad (9)$$

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \omega_b (V_{qr} - (W_x - W_r) \varphi_{dr} - R_r I_{qr}) \quad (10)$$

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = \omega_b (V_{dr} + (W_x - W_r) \varphi_{qr} - R_r I_{dr}) \quad (11)$$

$$\frac{dW_r}{dt} = \frac{\omega_b}{2H} (T_e - T_m - F W_r) \quad (12)$$

Onde:

R_s = Resistência do estator;

R_r = Resistência do rotor;

T_e = Torque eletromagnético;

T_m = Torque mecânico aplicado ao eixo do rotor;

H = Momento de inércia do gerador (s);

F = Coeficiente de fricção (pu);

ω_b = Frequência base do sistema (rad/s);

ω_r = Frequência elétrica do rotor (pu);

ω_x = Frequência de referência do sistema (pu);

V_{qs} = Tensão de eixo de quadratura do estator (pu);

V_{ds} = Tensão de eixo direto do estator (pu);

V_{qr} = Tensão de eixo de quadratura do rotor (pu);

V_{dr} = Tensão de eixo direto do rotor (pu);

I_{qs} = Corrente de eixo de quadratura do estator (pu);

I_{ds} = Corrente de eixo direto do estator (pu);

I_{qr} = Corrente de eixo de quadratura do rotor (pu);

I_{dr} = Corrente de eixo direto do rotor (pu);

φ_{qs} = Fluxo magnético de eixo de quadratura do estator;

φ_{ds} = Fluxo magnético de eixo direto do estator;

φ_{qr} = Fluxo magnético de eixo de quadratura do rotor;

φ_{dr} = Fluxo magnético de eixo direto do rotor;

A velocidade \mathbf{W}_x é determinada pelo sistema de referência escolhido, (Tabela 1).

Tabela 1 Sistema de referência

\mathbf{W}_x	Sistema de referência
$\mathbf{W}_x = \mathbf{0}$	Estacionário
$\mathbf{W}_x = \mathbf{W}_r$	Móvel
$\mathbf{W}_x = \mathbf{W}_s$	Síncrono

O sistema de referência escolhido é o síncrono.

$$\mathbf{W}_x = \mathbf{W}_s \quad (13)$$

Tendo o modelo da máquina assíncrona em unidades pu , é conveniente expressar os fluxos em termos de suas reatâncias:

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = X_s I_{qs} - X_m I_{qr} \\ \varphi_{ds} = X_s I_{ds} - X_m I_{dr} \\ \varphi_{qr} = X_m I_{qr} - X_r I_{qs} \\ \varphi_{dr} = X_m I_{dr} - X_r I_{ds} \end{cases} \quad (14)$$

O torque eletromagnético e as correntes do estator e rotor são definidos em função do fluxo magnético de eixo direto e de quadratura do estator e rotor através das seguintes expressões:

$$\mathbf{T}_e = B_m \varphi_{dr} \varphi_{qs} - B_m \varphi_{ds} \varphi_{qr} \quad (15)$$

$$\begin{cases} I_{qs} = B_r \varphi_{qs} - B_m \varphi_{qr} \\ I_{ds} = B_r \varphi_{ds} - B_m \varphi_{dr} \\ I_{qr} = B_s \varphi_{qr} - B_m \varphi_{qs} \\ I_{dr} = B_s \varphi_{dr} - B_m \varphi_{ds} \end{cases} \quad (16)$$

Onde:

$$\begin{cases} B_s = \frac{X_s}{D} \\ B_r = \frac{X_r}{D} \\ B_m = \frac{X_m}{D} \\ D = X_s X_r - X_m^2 \\ X_s = X_m + X_{ls} \\ X_r = X_m + X_{lr} \end{cases} \quad (17)$$

Substituindo as equações do torque eletromagnético e da corrente de eixo direto e de quadratura do estator e rotor definidas por (15) -(16) nas Equações (8) -(12), tem-se o modelo de 5ª ordem da máquina de indução apenas em função do fluxo magnético de estator e de rotor e a velocidade de rotação do rotor.

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = W_b(V_{qs} - W_s\varphi_{ds} - R_s B_r \varphi_{qs} + R_s B_m \varphi_{qr}) \quad (18)$$

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = W_b(V_{ds} + W_s\varphi_{qs} - R_s B_r \varphi_{ds} + R_s B_m \varphi_{dr}) \quad (19)$$

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = W_b(V_{qr} - (W_s - W_r)\varphi_{dr} + R_r B_m \varphi_{qs} - R_r B_s \varphi_{qr}) \quad (20)$$

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = W_b(V_{dr} + (W_s - W_r)\varphi_{qr} + R_r B_m \varphi_{ds} - R_r B_s \varphi_{dr}) \quad (21)$$

$$\frac{dW_r}{dt} = \frac{W_b}{2H} ((B_m \varphi_{dr} \varphi_{qs} - B_m \varphi_{ds} \varphi_{qr}) - T_m - F W_r) \quad (22)$$

De acordo as equações (18) – (22) tem-se que o modelo do DFIG utiliza as mesmas equações de um gerador de indução de rotor em gaiola, mas no caso do DFIG as tensões nos enrolamentos do rotor V_{qr} e V_{dr} não são nulas porque são aplicadas e controladas pelo conversor do rotor.

2.3.2 Modelagem dinâmica do sistema MBI

Na seção anterior foi apresentada a modelagem dinâmica apenas da máquina assíncrona. Nesta seção é apresentado o sistema de geração como um todo. Para representar a máquina assíncrona ligada à rede elétrica, utiliza-se a topologia máquina-barra infinita, ilustrada na Figura 12. Nesta topologia a rede elétrica é substituída pelo seu equivalente de Thévenin composto de uma linha e uma fonte de tensão de módulo e frequência constante (REGINATTO; BAZANELLA; ZANCHETTIN, 2008; OLIVEIRA, 2007; HOLDSWORTH et al, 2003).

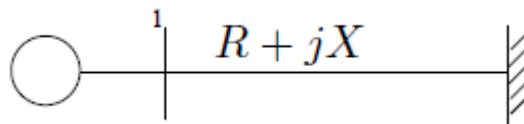


Figura 12. Topologia máquina-barra infinita

Na Figura 13 é apresentado o modelo implementado do DFIG ligado à rede. Nesta figura, um DFIG de 3.3 MVA e 575V é ligado a um sistema de distribuição de energia de 25kV entregando potência na rede de 120kV através de uma linha de distribuição de 30km.

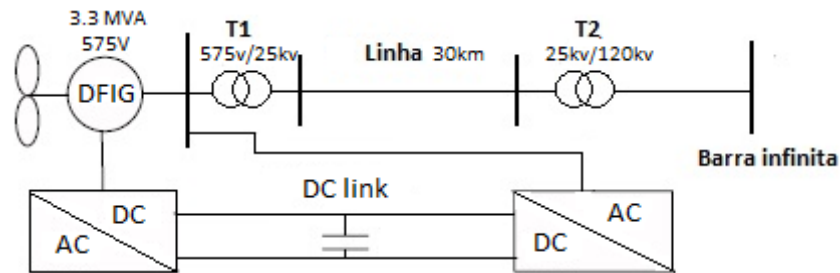


Figura 13. Modelo do DFIG ligado à rede

O modelo da Figura 13 pode ser definido pelo circuito equivalente ilustrado na Figura 14, onde são considerados apenas os parâmetros da linha (resistência e reatância) e cada um dos transformadores é representado por sua reatância equivalente.

De acordo com a Figura 14 tem-se que:

\vec{V}_G = Tensão nos terminais do estator do gerador

\vec{V}_∞ = Tensão nos terminais do Thévenin da rede

\vec{I}_G = Corrente nos terminais do estator do gerador

\vec{I}_∞ = Corrente nos terminais do Thévenin da rede

X_{PT} = Reatância equivalente do transformador

R_L e X_L = Resistência e reatância da linha

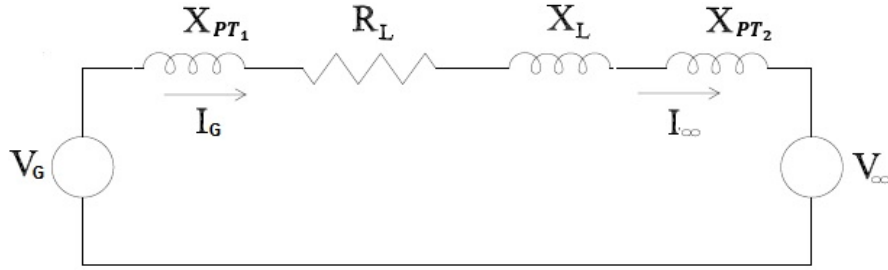


Figura 14. Circuito equivalente do DFIG ligado à rede de distribuição

Aplicando a lei das malhas ao circuito equivalente dado pela Figura 14, a tensão nos terminais do gerador é definida pela seguinte expressão:

$$\vec{V}_G = -Z_T \vec{I}_G + \vec{V}_\infty \quad (23)$$

Onde:

$$Z_T = R_L + \overbrace{(X_{PT1} + X_L + X_{PT2})}^{X_T} j \quad (24)$$

$$\vec{V}_\infty = V_{d\infty} + V_{q\infty} j \quad (25)$$

A tensão ABC nos terminais do estator é definida por (26) em função da tensão do eixo direto e de quadratura do estator:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{GA} \\ \vec{V}_{GB} \\ \vec{V}_{GC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{2\pi j}{3}} & 0 \\ 0 & 0 & -(1 + e^{-\frac{2\pi j}{3}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dqs} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Substituindo (26) em (23) tem-se V_{dqs} através da seguinte expressão:

$$\vec{V}_{dqs} = -(Z_T) \vec{I}_{dqs} + \vec{V}_\infty \quad (27)$$

Substituindo as Equações (24) -(25) em (27), tem-se a tensão de eixo direto e quadratura do estator:

$$V_{ds} = V_{d\infty} - R_L I_{ds} + X_T I_{qs} \quad (28)$$

$$V_{qs} = V_{q\infty} - R_L I_{qs} - X_T I_{ds} \quad (29)$$

Agora, substituindo a corrente de eixo direto e quadratura do estator e rotor definida por (16) nas Equações (28) e (29), tem-se a tensão do eixo direto e quadratura do estator em função apenas dos fluxos de eixo direto e quadratura do estator e rotor:

$$\mathbf{V}_{ds} = V_{d\infty} - R_L(B_r\varphi_{ds} - B_m\varphi_{dr}) + X_T(B_r\varphi_{qs} - B_m\varphi_{qr}) \quad (30)$$

$$\mathbf{V}_{qs} = V_{q\infty} - R_L(B_r\varphi_{qs} - B_m\varphi_{qr}) - X_T(B_r\varphi_{ds} - B_m\varphi_{dr}) \quad (31)$$

Substituindo as Equações (30) - (31) nas Equações (18) - (22), tem-se o modelo de 5ª ordem da máquina de indução junto ao barramento infinito (**MBI**):

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = W_b(V_{q\infty} - B_r(R_L + R_s)\mathbf{X}_1 + B_m(R_L + R_s)\mathbf{X}_3 - B_rX_T\mathbf{X}_2 + B_mX_T\mathbf{X}_4 - W_s\mathbf{X}_2) \quad (32)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_2 = W_b(V_{d\infty} - B_r(R_L + R_s)\mathbf{X}_2 + B_m(R_L + R_s)\mathbf{X}_4 + B_rX_T\mathbf{X}_1 - B_mX_T\mathbf{X}_3 + W_s\mathbf{X}_1) \quad (33)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_3 = W_b(V_{qr} + R_rB_m\mathbf{X}_1 - R_rB_s\mathbf{X}_3 - W_s\mathbf{X}_4 + \mathbf{X}_5\mathbf{X}_4) \quad (34)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_4 = W_b(V_{dr} + R_rB_m\mathbf{X}_2 - R_rB_s\mathbf{X}_4 + W_s\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_5\mathbf{X}_3) \quad (35)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_5 = \frac{W_b}{2H} \left(\underbrace{(B_m\mathbf{X}_4\mathbf{X}_1 - B_m\mathbf{X}_2\mathbf{X}_3)}_{T_e} - T_m - F\mathbf{X}_5 \right) \quad (36)$$

Onde:

\mathbf{V}_{qr} e \mathbf{V}_{dr} = Entradas de controle

$\mathbf{V}_{d\infty}$ e $\mathbf{V}_{q\infty}$ = Tensão do eixo direto e quadratura do equivalente do Thévenin da rede

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \\ \mathbf{X}_4 \\ \mathbf{X}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \\ W_r \end{bmatrix} = \text{Estados do sistema} \quad (37)$$

2.3.3 Modelagem do conversor bidirecional

Para a modelagem dos conversores, assume-se que os mesmos são ideais e que a tensão no link CC é constante (NUNES et al, 2007). Os conversores lado rotor e lado rede são modelados

como uma fonte de tensão variável. O conversor C_{rotor} controla magnitude, ângulo e frequência da tensão do rotor, sendo responsável pelo controle indireto da potência ativa e reativa do gerador. O conversor C_{grid} , que liga o sistema elétrico ao link DC, tem como objetivo manter a tensão DC constante.

A Figura 15 apresenta o circuito básico do conversor bidirecional ligado ao rotor do DFIG.

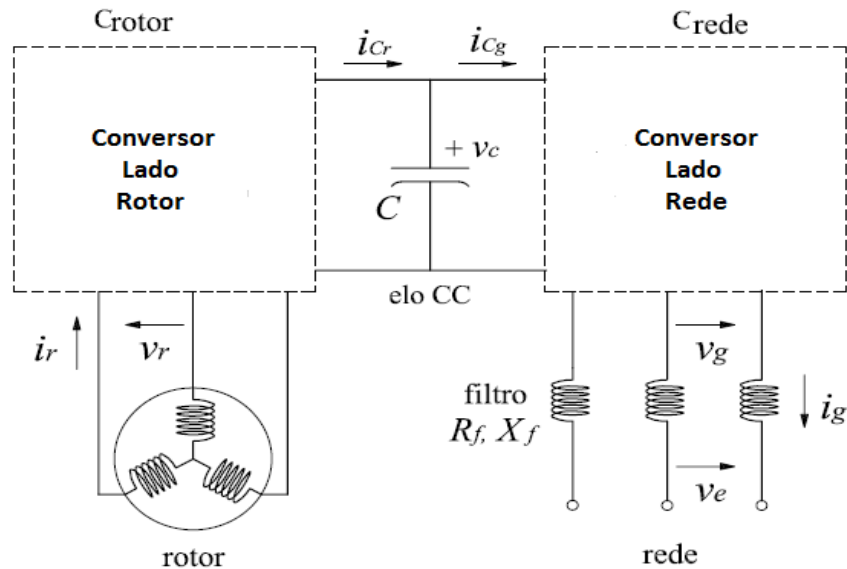


Figura 15. Circuito básico do conversor bidirecional ligado ao rotor do DFIG

A Figura 16 apresenta o modelo dos conversores implementado no *SimPowerSystem*.

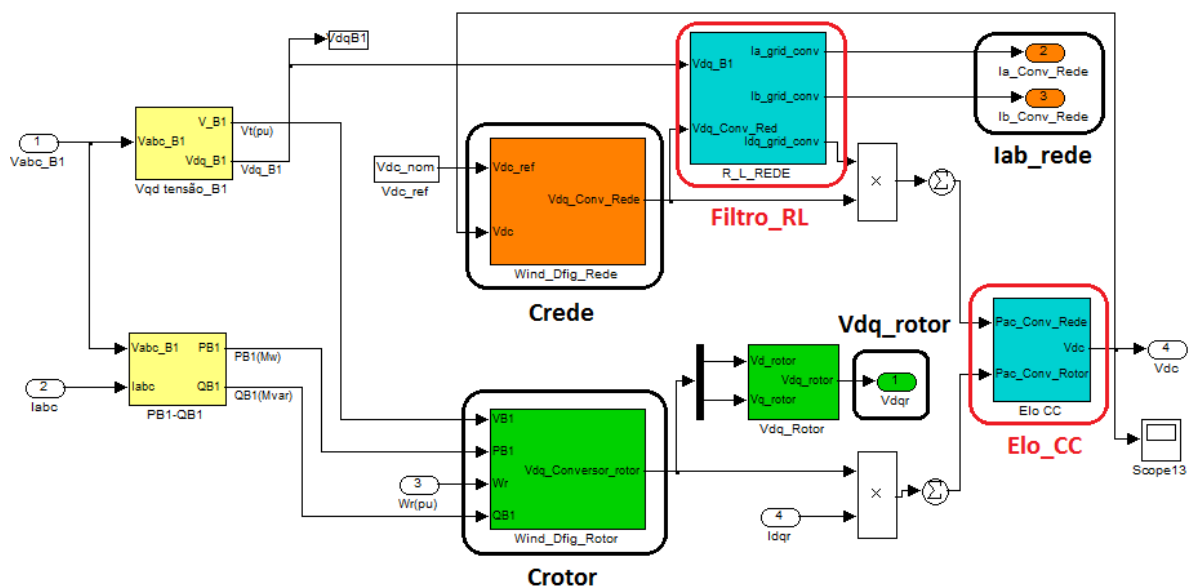


Figura 16. Modelo dos conversores implementados no *SimPowerSystem*

Para o controle do conversor Crede, considera-se a dinâmica do filtro RL e a dinâmica da tensão do capacitor do elo CC.

- **Filtro**

Considerando-se positiva a potência injetada na rede, a equação do filtro, na forma vetorial, em referencial fixo é definida por (TARNOWSKI, 2006; LIU, 2011):

$$\vec{V}_e - \vec{V}_g = R_f \vec{i}_g + j\omega_e L_f \vec{i}_g + L_f \frac{d}{dt}(\vec{i}_g) \quad (38)$$

Onde:

$$\vec{V}_g = V_{dg} + jV_{qg} = \text{Tensão nos terminais do conversor Crede tensão na rede B1}$$

$$\vec{V}_e = V_{de} + jV_{qe} = \text{Tensão na rede B1}$$

$$\vec{i}_g = i_{dg} + ji_{qg} = \text{Corrente nos terminais da rede}$$

$$\omega_e = 2\pi F_{nom} = \text{Frequência elétrica da rede (estator) em pu}$$

$$R_f \text{ e } L_f = \text{Resistência e indutância do filtro em pu}$$

Reescrevendo (38) tem-se:

$$V_{qg} = R_f i_{qg} + \omega_e L_f i_{dg} + V_{qe} + L_f \frac{d}{dt}(i_{qg}) \quad (39)$$

$$V_{dg} = R_f i_{dg} - \omega_e L_f i_{qg} + V_{de} + L_f \frac{d}{dt}(i_{dg}) \quad (40)$$

Reescrevendo (39) e (40) em espaço de estados, tem-se o modelo dinâmico do filtro:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{qg} \\ \dot{i}_{dg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\omega_e \\ \omega_e & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qg} \\ i_{dg} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{qg} \\ V_{dg} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{qe} \\ V_{de} \end{bmatrix} \quad (41)$$

- **Elo CC**

Da figura 15, tem-se que a dinâmica da tensão do capacitor do elo CC, é dada por (TARNOWSKI, 2006; ZANCHETTIN, 2012):

$$\dot{V}_c = \frac{1}{C}(i_{cr} - i_{cg}) \quad (42)$$

Sendo V_c a tensão no capacitor, C a capacitância do capacitor, i_{cr} a corrente que flui pelo conversor no lado rotor e i_{cg} a corrente que flui pelo conversor no lado rede.

Multiplicando (42) por V_c , é possível escrever a dinâmica da tensão do elo CC em função da variação de potência ativa do conversor lado rotor e lado rede.

$$\dot{V}_c = \frac{1}{V_c C} (P_r - P_g) \quad (43)$$

Onde:

$$P_r = V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} = \text{Potência ativa do conversor lado rotor}$$

$$P_g = V_{dg}I_{dg} + V_{qg}I_{qg} = \text{Potência ativa do conversor lado rede}$$

Reescrevendo (43), tem-se o modelo dinâmico do elo CC em função do fluxo de potência ativa entre os conversores:

$$\dot{V}_c = \frac{1}{V_c C} (V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} - V_{dg}I_{dg} - V_{qg}I_{qg}) \quad (44)$$

Onde:

$$V_{dqr} = \text{Tensão do eixo direto e quadratura do conversor lado rotor}$$

$$I_{dqr} = \text{Corrente do eixo direto e quadratura do conversor lado rotor}$$

$$V_{dqg} = \text{Tensão do eixo direto e quadratura do conversor lado rede}$$

$$I_{dqg} = \text{Corrente do eixo direto e quadratura do conversor lado rede}$$

2.4 Linearização do sistema MBI

Para fins de ajuste dos controladores, um modelo linearizado do sistema será utilizado. Este é obtido pela linearização das equações (32) -(36). Primeiramente, é apresentado o método

indireto de Lyapunov. O ponto de equilíbrio usado para a linearização do sistema MBI é obtido através do método Newton-Raphson.

2.4.1 Método indireto de Lyapunov

O método indireto de Lyapunov é definido como no seguinte teorema (KHALIL, 1996).

Teorema 1: *Seja $x = 0$ um ponto de equilíbrio do sistema não linear dado por (32) - (36) onde $f: D \rightarrow \mathfrak{R}^n$, com $D \subset \mathfrak{R}^n$. Seja a matriz jacobiana*

$$A = \frac{\partial f}{\partial X}(X)|_{x=0} \quad (45)$$

Então, descrevendo com λ_i os autovalores de A , é possível concluir que:

- *A origem é **assintoticamente estável** se $\Re_e\{\lambda_i\} < 0$, para todo λ_i de (45). (Autovalores negativos)*
- *A origem é **instável** se $\Re_e\{\lambda_i\} > 0$, para algum λ_i de (45). (Autovalores positivos)*

Este teorema proporciona um método simples para determinar a estabilidade do equilíbrio de um sistema não linear.

2.4.2 Definição do ponto de equilíbrio

Para determinar um ponto de equilíbrio que seja assintoticamente estável de acordo ao teorema de Lyapunov, deve-se solucionar o conjunto de equações não lineares (32) –(36).

Existem diversos métodos numéricos para a solução de equações não lineares, tais como: método das bissecções, método do ponto fixo, método da secante e o método de Newton-Raphson (ROSLONIEC, 2008). O método numérico escolhido para determinar o ponto de equilíbrio do sistema MBI é o método **Newton-Raphson**.

2.4.3 Implementação do Método indireto de Lyapunov

A representação de estados do modelo linearizado é da forma:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \mathbf{A}X + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}X + \mathbf{D}u\end{aligned}\quad (46)$$

O vetor de entradas u é definido pela tensão de eixo direto e quadratura do rotor.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}\quad (47)$$

As matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} são definidas através do teorema 1.

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \frac{\partial f}{\partial X}(X)|_{X_e} \\ \mathbf{B} = \frac{\partial f}{\partial U}(X)|_{X_e} \\ \mathbf{C} = \frac{\partial f}{\partial X}(X)|_{X_e} \\ \mathbf{D} = \frac{\partial f}{\partial U}(X)|_{X_e} \end{cases}\quad (48)$$

Portanto, tem-se que:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -B_r(R_L + R_s)W_b & -(B_rX_T + W_s)W_b & B_m(R_L + R_s)W_b & B_mX_TW_b & 0 \\ (B_rX_T + W_s)W_b & -B_r(R_L + R_s)W_b & -B_mX_TW_b & B_m(R_L + R_s)W_b & 0 \\ R_rB_mW_b & 0 & -R_rB_sW_b & (X_5 - W_s)W_b & X_4W_b \\ 0 & R_rB_mW_b & (X_5 - W_s)W_b & -R_rB_sW_b & -X_3W_b \\ \frac{B_mX_4W_b}{2H} & \frac{-B_mX_3W_b}{2H} & \frac{-B_mX_2W_b}{2H} & \frac{B_mX_1W_b}{2H} & \frac{-FW_b}{2H} \end{bmatrix}_{X_e} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{X_e} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} saida_1 \\ saida_2 \end{bmatrix}_{X_e} \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{X_e} \end{aligned} \right.$$

Reagrupando tem-se o seguinte modelo linear:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{qs} \\ \dot{\varphi}_{ds} \\ \dot{\varphi}_{qr} \\ \dot{\varphi}_{dr} \\ \dot{W}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_r(R_L + R_s)W_b & -(B_r X_T + W_s)W_b & B_m(R_L + R_s)W_b & B_m X_T W_b & 0 \\ (B_r X_T + W_s)W_b & -B_r(R_L + R_s)W_b & -B_m X_T W_b & B_m(R_L + R_s)W_b & 0 \\ R_r B_m W_b & 0 & -R_r B_s W_b & (X_5 - W_s)W_b & X_4 W_b \\ 0 & R_r B_m W_b & (X_5 - W_s)W_b & -R_r B_s W_b & -X_3 W_b \\ \frac{B_m X_4 W_b}{2H} & \frac{-B_m X_3 W_b}{2H} & \frac{-B_m X_2 W_b}{2H} & \frac{B_m X_1 W_b}{2H} & \frac{-F W_b}{2H} \end{bmatrix}_{x_e} \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \\ W_r \end{bmatrix}_{x_e} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{x_e} \begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}_u \quad (49)$$

$$y = \begin{bmatrix} c \\ \text{saida}_1 \\ \text{saida}_2 \end{bmatrix}_{x_e} \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \\ W_r \end{bmatrix}_{x_e} + \begin{bmatrix} D \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}_u$$

A matriz C é definida pela linearização de cada uma das variáveis de saída. Como variáveis de saída têm-se:

- **Potência ativa do gerador:**

$$P_e = T_e W_r \quad (50)$$

Ela é definida em função dos estados através da seguinte equação:

$$P_e = B_m(X_4 X_1 - X_2 X_3) X_5 \quad (51)$$

- **Potência reativa do gerador:**

$$Q_r = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \quad (52)$$

Ela é definida em função dos estados através da seguinte equação:

$$Q_r = E_q(B_r X_2 - B_m X_4) - E_d(B_r X_1 - B_m X_3) - X_T(B_r X_2 - B_m X_4)^2 - X_T(B_r X_1 - B_m X_3)^2 \quad (53)$$

- **Velocidade de rotação elétrica do gerador:**

$$W_r = X_5 \quad (54)$$

- **Tensão nos terminais do gerador:**

$$|V_t^*| = \sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2} \quad (55)$$

Ela é definida em função dos estados através da seguinte equação:

$$|\mathbf{V}_t^*| = \sqrt{\frac{(E_q - R_L(B_r\mathbf{X}_1 - B_m\mathbf{X}_3) - X_T(B_r\mathbf{X}_2 - B_m\mathbf{X}_4))^2 + (E_d - R_L(B_r\mathbf{X}_2 - B_m\mathbf{X}_4) + X_T(B_r\mathbf{X}_1 - B_m\mathbf{X}_3))^2}{}} \quad (56)$$

O sistema estudado nesta dissertação tem duas entradas (\mathbf{V}_{qr} e \mathbf{V}_{dr}) e duas saídas que dependem da estratégia de controle escolhida ($\mathbf{P}_e - \mathbf{V}_t$, $\mathbf{Q}_r - \mathbf{V}_t$, $\mathbf{W}_r - \mathbf{V}_t$, $\mathbf{P}_e - \mathbf{Q}_r$). Portanto, a função de transferência que define o modelo linearizado do sistema é definida por uma matriz 2x2:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Saída}_1(s) \\ \mathbf{Saída}_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{qr}(s) \\ \mathbf{V}_{dr}(s) \end{bmatrix} \quad (57)$$

Na figura 17, é apresentado o esquema geral do modelo de projeto para os controladores PI.

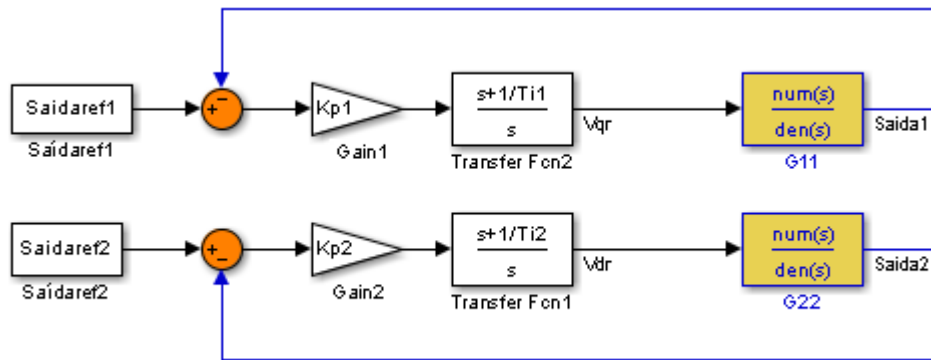


Figura 17. Esquema geral do modelo de projeto para os controladores PI

Há uma relação direta entre as variáveis controladas e manipuladas do sistema. Esta relação indica que a variável de **saída**₁ é controlada com a tensão de eixo em quadratura do rotor \mathbf{V}_{qr} , e a variável de **saída**₂ é controlada com a tensão de eixo direto do rotor \mathbf{V}_{dr} . Por tanto, reescrevendo (52) tem-se que:

$$\mathbf{Saída}_1(s) = G_{11}(s)\mathbf{V}_{qr}(s) \quad (53)$$

$$\mathbf{Saída}_2(s) = G_{22}(s)\mathbf{V}_{dr}(s) \quad (54)$$

2.5 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se a modelagem dinâmica dos principais componentes do sistema de geração eólica implementados no software *SimPowerSystem* (*Toolbox* do ambiente *Matlab/Simulink*).

O gerador de indução duplamente alimentado e seus modos de operação foram introduzidos. A modelagem do sistema de geração estudado neste trabalho foi apresentado em três partes: modelagem dinâmica da máquina assíncrona, modelagem dinâmica da máquina assíncrona junto ao barramento infinito e modelagem do conversor.

A modelagem dinâmica da máquina assíncrona foi apresentada como um conjunto de equações algébrico-diferenciais de 5ª ordem em função dos fluxos magnéticos de estator e de rotor e da velocidade de rotação do rotor.

Para a modelagem dinâmica do sistema MBI, utilizou-se a topologia máquina-barramento infinita. Nesta topologia a rede elétrica é substituída pelo seu equivalente de Thévenin composto de uma linha e uma fonte de tensão de módulo e frequência constante.

Para a modelagem dos conversores, assume-se que os mesmos são ideais e que a tensão no link CC é constante. Os conversores lado rotor (Crotor) e lado rede (Crede) são modelados como uma fonte de tensão variável.

Para fins de ajuste dos controladores, um modelo linearizado do sistema é utilizado. Este é obtido pela linearização do sistema MBI apresentado na seção 2.3.2.

3. CONTROLE DO DFIG

3.1 Introdução

O controle do DFIG é feito através dos conversores Crotor e Crede. Neste capítulo, são apresentadas quatro estratégias de controle aplicadas ao conversor estático interligado ao rotor do gerador de indução duplamente alimentado. As estratégias de controle implementadas são: controle de potência ativa e tensão nos terminais, controle de potência reativa e tensão nos terminais, controle da velocidade de rotação e tensão nos terminais e controle de potência ativa e potência reativa. O controle de cada variável de saída do DFIG é projetado independentemente por controladores proporcionais e integrais (PI) através do método lugar das raízes (BAZANELLA; GOMES DA SILVA, 2005).

Na seção 3.2 são apresentadas as diferentes estratégias de controle implementadas no conversor estático interligado ao rotor do DFIG. Primeiramente, é apresentado o esquema geral de cada estratégia de controle e as funções de transferência obtidas a partir do modelo linearizado definido no capítulo anterior. Depois, o controle de cada variável de saída é projetado independentemente por controladores proporcionais e integrais (PI). Na seção 3.3 são apresentadas as considerações finais do capítulo.

3.2 Projeto de controle

3.2.1 Estratégia de Controle de potência ativa e tensão nos terminais

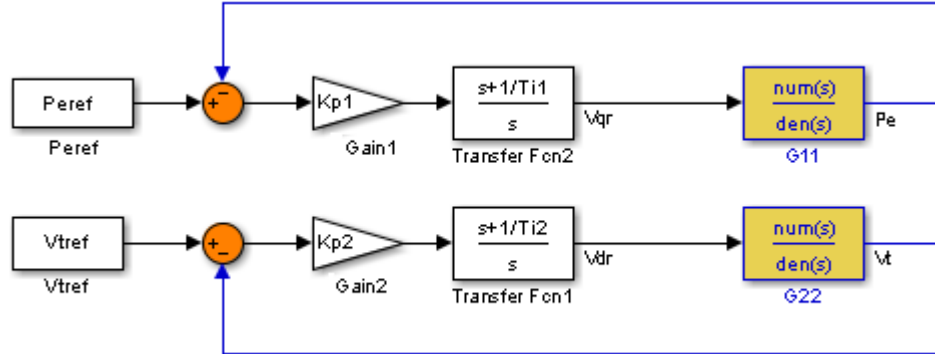


Figura 18. Estratégia de controle potência ativa e tensão nos terminais

Na Figura 18 é apresentado o controle PI descentralizado no sistema não linear. A relação entre as variáveis manipuladas e controladas está definida pelas seguintes expressões:

$$P_e(s) = G_{11}(s)V_{qr}(s) \quad (55)$$

$$V_t(s) = G_{22}(s)V_{dr}(s) \quad (56)$$

As funções de transferência são obtidas a partir do modelo linearizado apresentado no Apêndice B. Como funções de transferência $G_{11}(s)$ e $G_{22}(s)$ tem-se:

$$G_{11}(s) = \frac{1.96(s + 3.848)(s^2 + 8.68s + 93.06)(s^2 + 42.22s + 2.332 \times 10^5)}{(s + 4.0132)(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (57)$$

$$G_{22}(s) = \frac{-0.21209(s^2 + 5.022s + 82.31)(s^2 - 67.63s + 1.888 \times 10^5)}{(s + 4.0132)(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (58)$$

- *Projeto de controle de potência ativa*

O controle da potência ativa é projetado de forma a cumprir as seguintes especificações de desempenho:

$$\begin{aligned}
 t_{s(2\%)}(\text{Tempo de acomodação}) &\leq 2s \\
 M_p(\text{Máximo sobrepasso}) &= 0\% \\
 e_p(\text{Erro de posição}) &= 0
 \end{aligned} \tag{59}$$

Um controlador PI é escolhido para fornecer o desempenho estacionário e transitório desejado. O controlador tem dois parâmetros a ajustar: A posição do zero do controlador ($z = \frac{1}{T_i}$) e o ganho proporcional (K_p). A função de transferência de malha é definida por:

$$G_{11}(s)G_c(s) = \frac{K_p(s+z)(1.96(s+3.849)(s^2+8.66s+93.06)(s^2+42.21s+2.33 \times 10^5))}{s(s+4.0132)(s^2+4.618s+89.33)(s^2+41.54s+2.336 \times 10^5)} \tag{60}$$

Para projetar o controlador, é utilizado o método do lugar das raízes. Uma escolha que simplifica a análise é alocar o zero do controlador na mesma posição do polo dominante do processo, de forma a cancelá-lo (BAZANELLA; GOMEZ DA SILVA, 2005). Substituindo a localização escolhida do zero do controlador em (60), tem-se:

$$G_{11}(s)G_c(s) = \frac{K_p(1.96(s+3.849)(s^2+8.66s+93.06)(s^2+42.21s+2.33 \times 10^5))}{s(s^2+4.618s+89.33)(s^2+41.54s+2.336 \times 10^5)} \tag{61}$$

De acordo com (61) a equação característica do sistema em malha fechada é definida por:

$$\begin{aligned}
 s(s^2+4.618s+89.33)(s^2+41.54s+2.336 \times 10^5) + K_p(1.96(s+3.849)(s^2+8.66s+ \\
 93.06)(s^2+42.21s+2.33 \times 10^5)) = 0
 \end{aligned} \tag{62}$$

Na Figura 19 é apresentado o traçado do lugar das raízes:

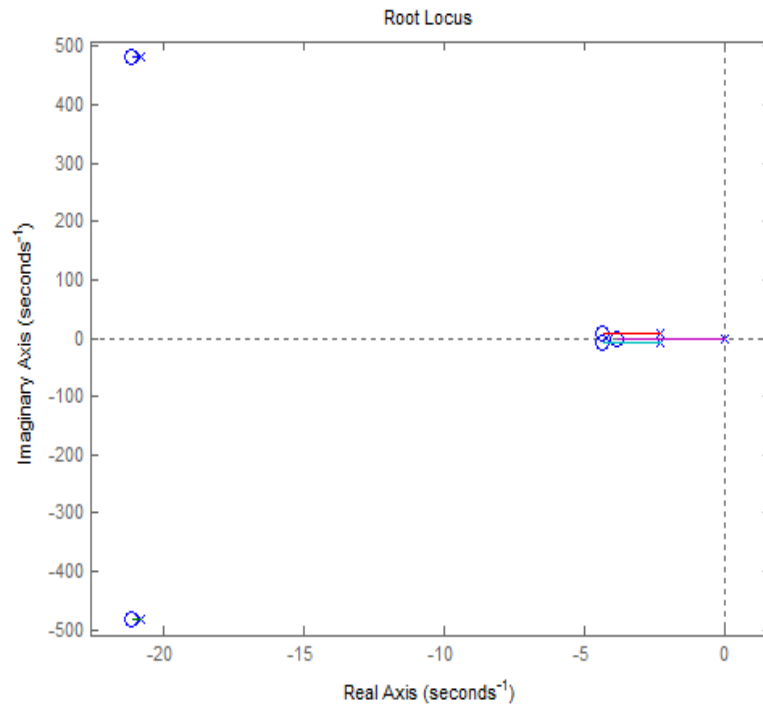


Figura 19. Lugar das raízes

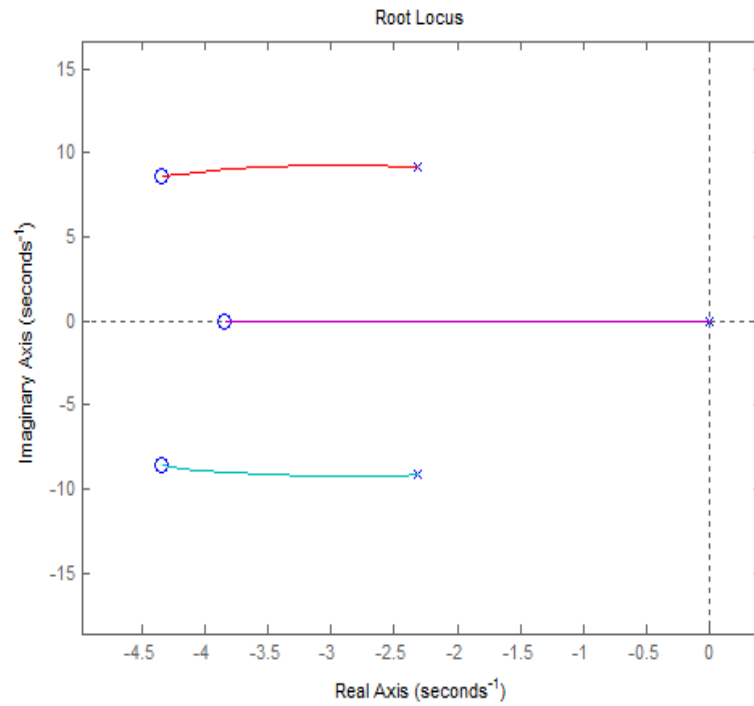


Figura 20. Zoom lugar das raízes

De acordo ao traço do lugar das raízes apresentado na figura 20, tem-se que os polos dominantes do sistema em MF estão localizados em $s = -2.3$, por tanto a região dos polos dominantes definida pelas especificações de desempenho dadas por (59) é limitada pela especificação de $t_s \leq 1.74s$.

Na Figura 21 é apresentado o traçado do lugar das raízes com a especificação da região dos polos dominantes que cumprem com as especificações de desempenho.

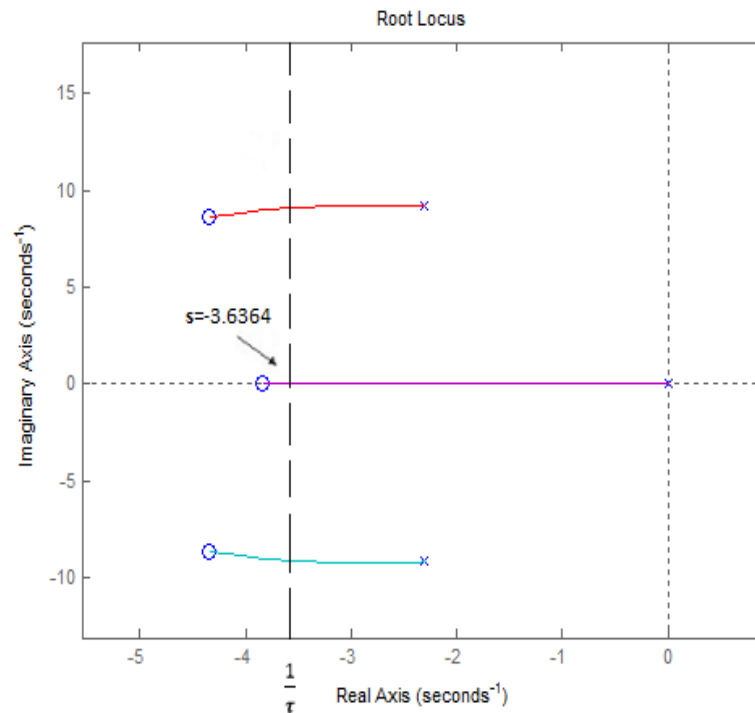


Figura 21. Lugar das raízes com especificação dos parâmetros t_s e M_p

Assumindo $s = -3.6364$ como raiz da equação característica dada por (62) e substituindo, tem-se o valor do ganho proporcional:

$$K_{p1} = 10.0850$$

A função de transferência do controlador PI resulta:

$$G_c(s) = K_{p1} \left(\frac{s + z}{s} \right) = 10.0850 \left(\frac{s + 4.0132}{s} \right) \quad (63)$$

- *Projeto de controle de tensão nos terminais*

O controle de tensão nos terminais é projetado de forma a cumprir as seguintes especificações de desempenho:

$$t_{s(2\%)}(\text{Tempo de acomodação}) \leq 2s$$

$$M_p(\text{Máximo sobrepasso}) = 0\% \quad (64)$$

$$e_p(\text{Erro de posição}) = 0$$

Primeiramente é apresentada a função de transferência de malha, a qual é definida por:

$$G_{22}(s)G_c(s) = \frac{K_p(s+z)(-0.21209(s^2 + 5.022s + 82.31)(s^2 - 67.63s + 1.888 \times 10^5))}{s(s+4.013)(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (65)$$

De acordo com (65) o polo dominante está localizado em $s = -4.0132$. Portanto, o zero de controlador é alocado em $z = -4.0132$. Agora, substituindo a localização escolhida do zero do controlador em (65), tem-se a seguinte função de transferência de malha:

$$G_{22}(s)G_c(s) = \frac{K_p(-0.21209(s^2 + 5.022s + 82.31)(s^2 - 67.63s + 1.888 \times 10^5))}{s(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (66)$$

De acordo com (66) a equação característica do sistema em malha fechada é definida por:

$$s(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5) + K_p(-0.21209(s^2 + 5.022s + 82.31)(s^2 - 67.63s + 1.888 \times 10^5)) = 0 \quad (67)$$

Na Figura 22 é apresentado o traçado do lugar das raízes:

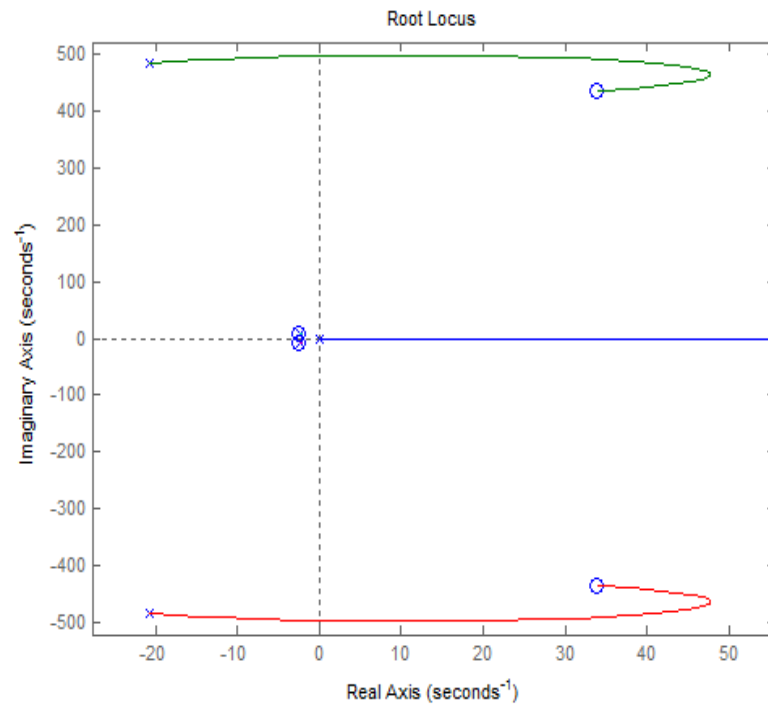


Figura 22. Lugar das raízes

De acordo ao lugar das raízes dado pela Figura 22, o sistema torna-se instável para variações positivas de K_p . Porém, para variações negativas de K_p , o lugar das raízes resulta:

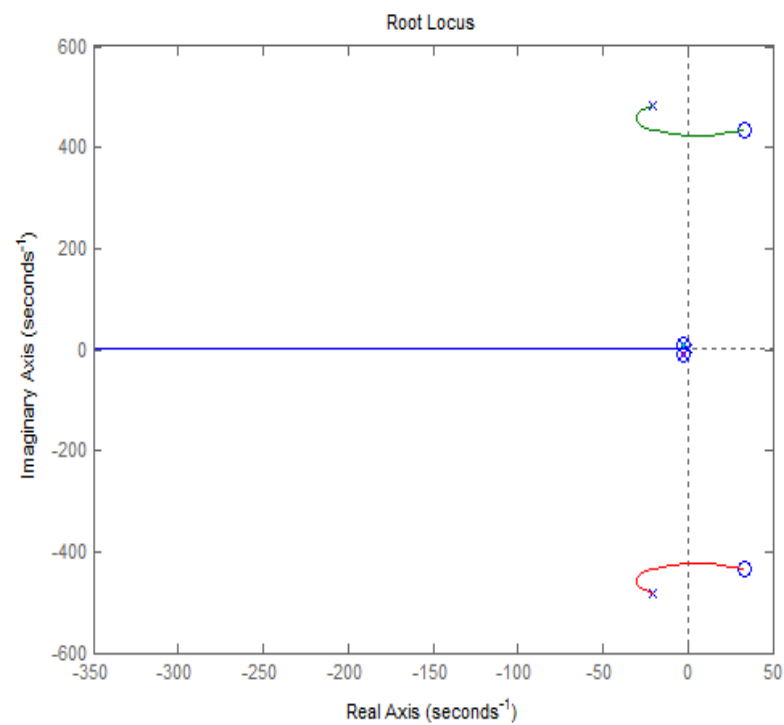


Figura 23. Lugar das raízes com relação ao parâmetro $-K_p$

Na Figura 24 é apresentado o traçado do lugar das raízes com a especificação da região dos polos dominantes (64).

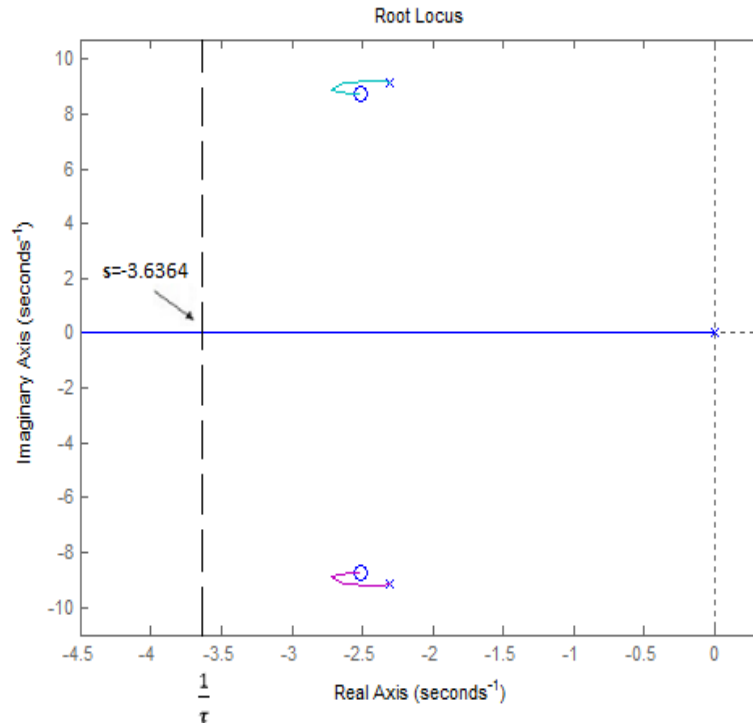


Figura 24. Lugar das raízes com especificação do t_s e M_p

De acordo ao traço do lugar das raízes apresentado na figura 24, tem-se que os polos dominantes do sistema em MF estão localizados em $s = -2.3$, por tanto a região dos polos dominantes definida pelas especificações de desempenho dadas por (64) é limitada pela especificação de $t_s \leq 1.74s$.

Assumindo $s = -3.6364$ como raiz da equação característica dada por (67) e substituindo, tem-se o valor do ganho proporcional:

$$K_{p2} = -23.4984$$

A função de transferência do controlador PI resulta:

$$G_c(s) = K_{p2} \left(\frac{s + z}{s} \right) = -23.4984 \left(\frac{s + 4.0132}{s} \right) \quad (68)$$

3.2.2 Estratégia de Controle de potência reativa e tensão nos terminais

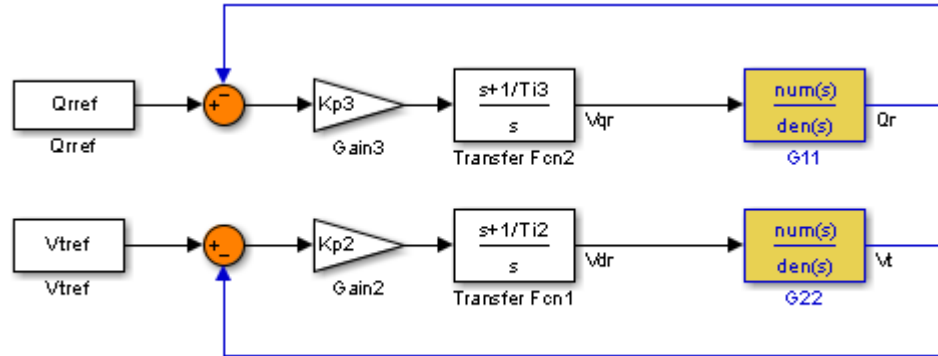


Figura 25. Estratégia de controle potência reativa e tensão nos terminais

Na Figura 25 é apresentado o controle PI descentralizado no sistema não linear. A relação entre as variáveis manipuladas e controladas está definida pelas seguintes expressões:

$$Q_r(s) = G_{11}(s)V_{qr}(s) \quad (69)$$

$$V_t(s) = G_{22}(s)V_{dr}(s) \quad (70)$$

As funções de transferência são obtidas a partir do modelo linearizado apresentado no Apêndice B. Como funções de transferência $G_{11}(s)$ e $G_{22}(s)$ tem-se:

$$G_{11}(s) = \frac{1.7804 (s^2 + 2.795s + 116.3) (s^2 + 169.8s + 1.714 \times 10^5)}{(s + 4.013) (s^2 + 4.618s + 89.33) (s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (71)$$

$$G_{22}(s) = \frac{-0.21209 (s^2 + 5.022s + 82.31) (s^2 - 67.63s + 1.888 \times 10^5)}{(s + 4.013) (s^2 + 4.618s + 89.33) (s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (72)$$

- *Projeto de controle de potência reativa*

O controle de potência reativa é projetado de forma a cumprir as seguintes especificações de desempenho:

$$\begin{aligned}
t_{s(2\%)}(\text{Tempo de acomodação}) &\leq 1.6s \\
M_p(\text{Máximo sobrepasso}) &= 0\% \\
e_p(\text{Erro de posição}) &= 0
\end{aligned} \tag{73}$$

Primeiramente é apresentada a função de transferência de malha, a qual é definida por:

$$G_{11}(s)G_c(s) = \frac{K_p(s+z)(1.7804(s^2 + 2.795s + 116.3)(s^2 + 169.8s + 1.714 \times 10^5))}{s(s + 4.0132)(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \tag{74}$$

De acordo com (74) o polo dominante está localizado em $s = -4.0132$. Portanto, o zero de controlador é alocado em $z = -4.0132$. Agora, substituindo a localização escolhida do zero do controlador em (74), tem-se a seguinte função de transferência de malha:

$$G_{11}(s)G_c(s) = \frac{K_p(1.7804(s^2 + 2.795s + 116.3)(s^2 + 169.8s + 1.714 \times 10^5))}{s(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \tag{75}$$

De acordo com (75) a equação característica do sistema em malha fechada é definida por:

$$s(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5) + K_p(1.7804(s^2 + 2.795s + 116.3)(s^2 + 169.8s + 1.714 \times 10^5)) = 0 \tag{76}$$

Na seguinte figura é apresentado o traçado do lugar das raízes:

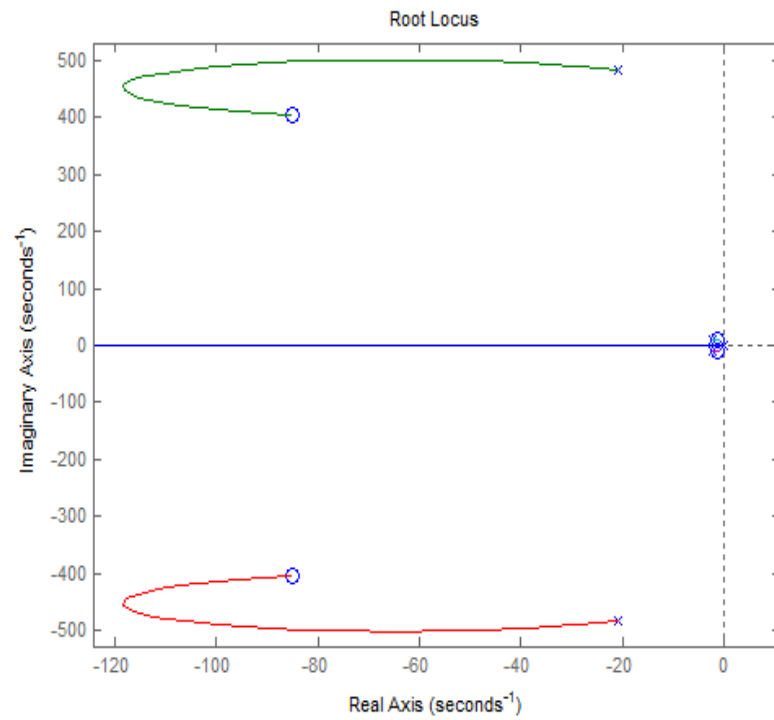


Figura 26. Lugar das raízes

Na Figura 27 é apresentado o traçado do lugar das raízes com a especificação da região dos polos dominantes que cumprem com as especificações de desempenho dadas por (73).

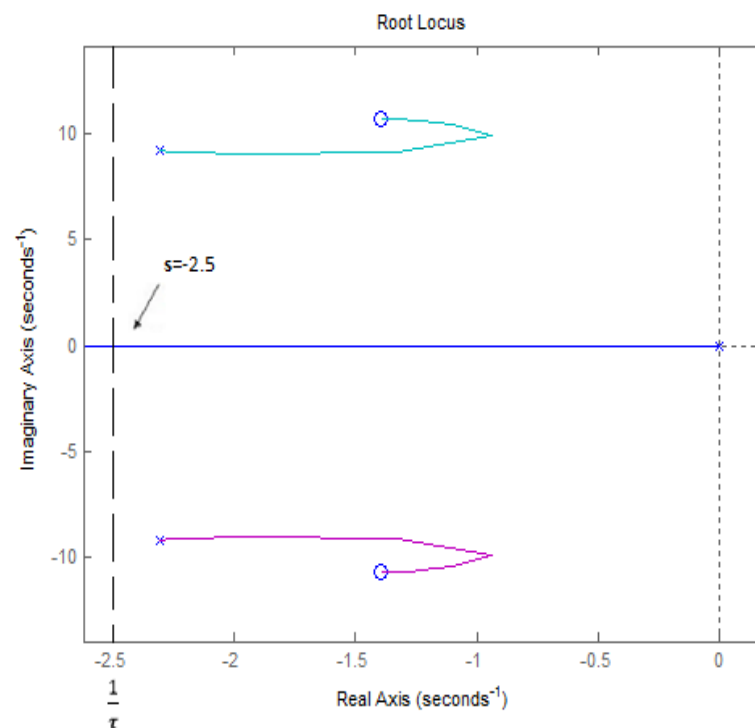


Figura 27. Lugar das raízes com especificação dos parâmetros t_s e M_p

Assumindo $s = -2.5$ como raiz da equação característica dada por (76) e substituindo, tem-se o valor do ganho proporcional:

$$K_{p3} = 2.0060$$

A função de transferência do controlador PI resulta:

$$G_c(s) = K_{p3} \left(\frac{s + z}{s} \right) = 2.0060 \left(\frac{s + 4.0132}{s} \right) \quad (77)$$

3.2.3 Estratégia de Controle de velocidade de rotação e tensão nos terminais

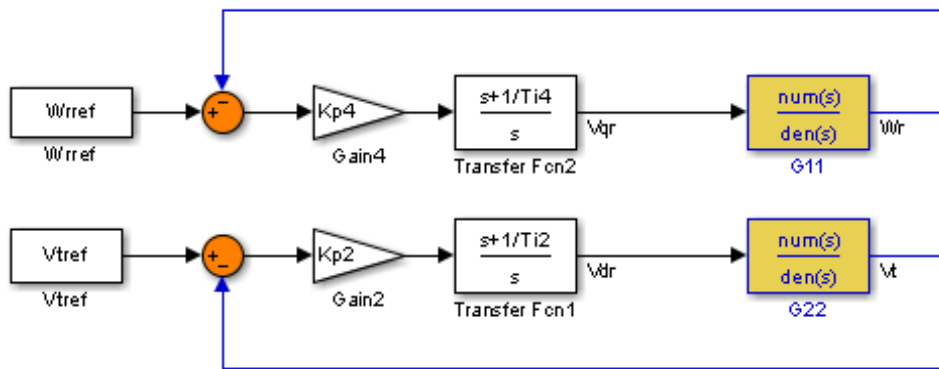


Figura 28. Estratégia de controle velocidade de rotação e tensão nos terminais

Na Figura 28 é apresentado o controle PI descentralizado no sistema não linear. A relação entre as variáveis manipuladas e controladas está definida pelas seguintes expressões:

$$W_r(s) = G_{11}(s)V_{qr}(s) \quad (78)$$

$$V_t(s) = G_{22}(s)V_{dr}(s) \quad (79)$$

As funções de transferência são obtidas a partir do modelo linearizado apresentado no Apêndice B. Como funções de transferência $G_{11}(s)$ e $G_{22}(s)$ tem-se:

$$G_{11}(s) = \frac{0.2683(s + 4.787)(s^2 - 57.08s + 1.982 \times 10^5)}{(s + 4.013)(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (80)$$

$$G_{22}(s) = \frac{-0.21209(s^2 + 5.022s + 82.31)(s^2 - 67.63s + 1.888 \times 10^5)}{(s + 4.013)(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (81)$$

- *Projeto de controle da velocidade de rotação*

O controle da velocidade de rotação é projetado de forma a cumprir as seguintes especificações de desempenho:

$$\begin{aligned} t_{s(2\%)}(\text{Tempo de acomodação}) &\leq 2s \\ M_p(\text{Máximo sobrepasso}) &= 0\% \\ e_p(\text{Erro de posição}) &= 0 \end{aligned} \quad (82)$$

Primeiramente é apresentada a função de transferência de malha, a qual é definida por:

$$G_{11}(s)G_c(s) = \frac{K_p(s+z)(0.26827(s+4.787)(s^2 - 57.08s + 1.982 \times 10^5))}{s(s+4.0132)(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (83)$$

De acordo com (83) o polo dominante está localizado em $s = -4.0132$. Portanto, o zero de controlador é alocado em $z = -4.0132$. Agora, substituindo a localização escolhida do zero do controlador tem-se a seguinte função de transferência de malha:

$$G_{11}(s)G_c(s) = \frac{K_p(0.26827(s+4.787)(s^2 - 57.08s + 1.982 \times 10^5))}{s(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (84)$$

De acordo com (84) a equação característica do sistema em malha fechada é definida por:

$$s(s^2 + 4.618s + 89.33)(s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5) + K_p(0.26827(s+4.787)(s^2 - 57.08s + 1.982 \times 10^5)) = 0 \quad (85)$$

Na Figura 29 é apresentado o traçado do lugar das raízes:

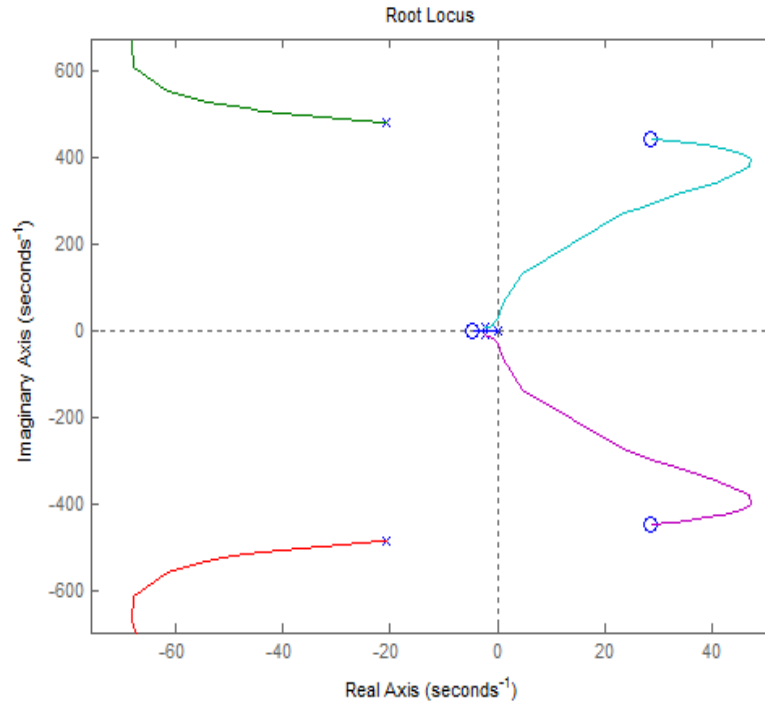


Figura 29. Lugar das raízes

Na Figura 30 é apresentado o traçado do lugar das raízes com a especificação da região dos polos dominantes que cumprem com as especificações de desempenho dadas por (82).

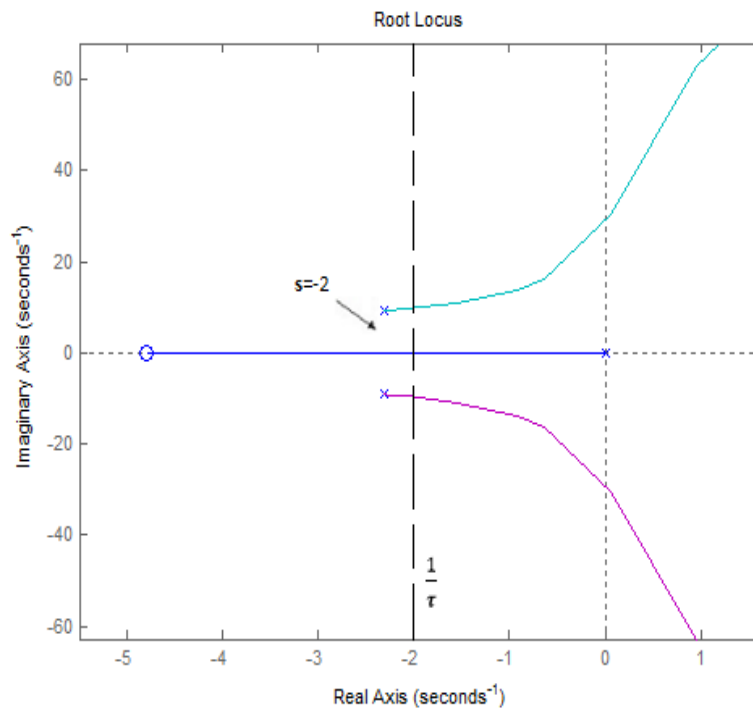


Figura 30. Lugar das raízes com especificação dos parâmetros t_s e O_v

Assumindo $s = -2$ como raiz da equação característica dada por (85) e substituindo, tem-se o valor do ganho proporcional:

$$K_{p4} = 26.9455$$

A função de transferência do controlador PI resulta:

$$G_c(s) = K_{p4} \left(\frac{s + z}{s} \right) = 26.9455 \left(\frac{s + 4.0132}{s} \right) \quad (86)$$

3.2.4 Estratégia de Controle de potência ativa e potência reativa

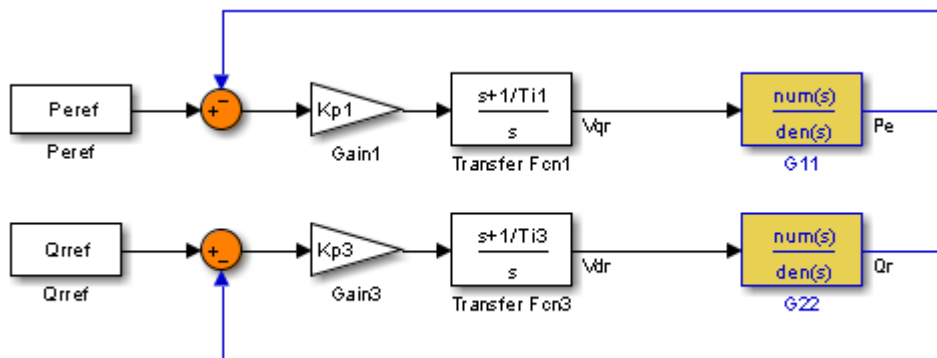


Figura 31. Estratégia de controle potência ativa e potência reativa

Na Figura 31 é apresentado o controle PI descentralizado no sistema não linear. A relação entre as variáveis manipuladas e controladas está definida pelas seguintes expressões:

$$P_e(s) = G_{11}(s)V_{qr}(s) \quad (87)$$

$$Q_r(s) = G_{22}(s)V_{dr}(s) \quad (88)$$

As funções de transferência são obtidas a partir do modelo linearizado apresentado no Apêndice B. Como funções de transferência $\mathbf{G}_{11}(s)$ e $\mathbf{G}_{22}(s)$ tem-se:

$$\mathbf{G}_{11}(s) = \frac{1.96(s + 3.848) (s^2 + 8.68s + 93.06) (s^2 + 42.22s + 2.332 \times 10^5)}{(s + 4.0132) (s^2 + 4.618s + 89.33) (s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (89)$$

$$\mathbf{G}_{22}(s) = \frac{1.7804 (s^2 + 2.795s + 116.3) (s^2 + 169.8s + 1.714 \times 10^5)}{(s + 4.013) (s^2 + 4.618s + 89.33) (s^2 + 41.54s + 2.336 \times 10^5)} \quad (90)$$

O controlador PI projetado para a controle da potência ativa é definido por (63) e o controlador PI projetado para o controle da potência reativa é definido por (77).

3.3 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se o projeto de controle de cada estratégia implementada ao conversor estático interligado ao rotor do DFIG, tais como controle de: potência ativa e tensão nos terminais, potência reativa e tensão nos terminais, velocidade de rotação e tensão nos terminais e potência ativa e potência reativa.

Primeiramente, foi apresentado o esquema geral de cada estratégia de controle. O objetivo da apresentação do esquema foi definir a relação entre as variáveis manipuladas e controladas.

O modelo linearizado do sistema MBI com cada estratégia de controle implementada é definido pelo ponto de equilíbrio obtido a partir do ponto de operação $T_m = -0.6pu$. A partir do modelo linearizado são obtidas as funções de transferência apresentadas neste capítulo para cada estratégia.

O projeto de controle para cada estratégia foi realizado de maneira independente por controladores proporcionais e integrais (PI) através do método lugar das raízes. Com este método foi possível analisar a influência da variação do ganho proporcional do controlador sobre o desempenho transitório do sistema.

Após a realização da sintonia dos controladores PI das estratégias de controle, no capítulo seguinte será apresentada uma análise comparativa do sistema de geração utilizando máquinas do tipo DFIG com as quatro estratégias. Essa análise será feita comparando o comportamento do sistema quando sujeito a diversas situações, tais como: variações da demanda de potência da carga elétrica, variações do torque mecânico e ocorrência de uma falta trifásica. Igualmente o comportamento do SCIG é incluído nesta análise para ilustrar de maneira quantitativa os ganhos obtidos com o uso do DFIG.

4. SIMULAÇÕES

4.1 Introdução

Na Figura 32 é apresentado o sistema de geração eólica usado neste estudo. Ele foi implementado no *SimPowerSystem* (*Toolbox* do ambiente *Matlab/Simulink*).

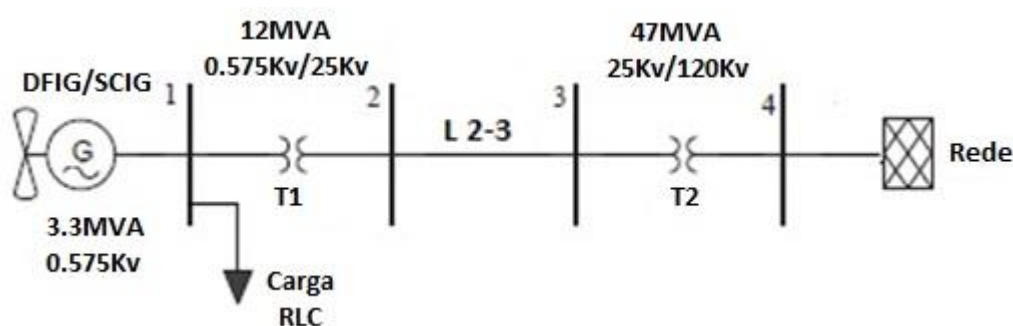


Figura 32. Sistema de geração eólica estudado com MATLAB/Simulink

O sistema de geração é constituído de um gerador de indução de 3MW e 575V, ligado a um sistema de distribuição de energia de 25kV entregando potência na rede de 120kV através de uma linha de 30Km. Perto da subestação de distribuição tem ligado uma carga RLC trifásica. Os dados da máquina de indução e da linha de distribuição são aqueles apresentados nos seguintes artigos (MASAUD; SEN, 2012; POKHAREL; GAO, 2010; TREMBLAY et al., 2006).

Na seção 4.2 é avaliado o desempenho dos reguladores de cada estratégia de controle projetados no capítulo anterior através de variações dos sinais de referência. O desempenho é medido pelo valor das grandezas de máximo sobrepasso e tempo de acomodação.

Para permitir uma análise adequada do desempenho do sistema de geração com as máquinas DFIG e SCIG, serão realizadas 3 tipos de avaliação.

Na seção 4.3, é avaliado o desempenho do sistema de geração utilizando DFIG com as quatro estratégias de controle e a máquina SCIG para diferentes demandas de potência da carga.

Na seção 4.4, é avaliado o efeito da variação do vento no desempenho das máquinas SCIG e DFIG com as quatro estratégias de controle ligadas ao sistema de geração apresentado na Figura 31.

Na seção 4.5, é avaliado o comportamento transitório das máquinas SCIG e DFIG com as quatro estratégias de controle através da taxa de amortecimento e o tempo de estabelecimento. Para as simulações realizadas foi aplicado um curto-circuito trifásico sólido próximo à subestação de 25 kV no instante $t = 1.0s$, com duração de 90ms. Para avaliar o tempo crítico de eliminação da falta (TCF) para cada estratégia de controle, foram realizadas várias simulações, até determinar o maior tempo de falta aplicável ao sistema sem a perda de sincronismo da unidade geradora de energia eólica.

4.2 Avaliação do desempenho dos reguladores projetados para cada estratégia de controle implementada no DFIG

Nesta parte do capítulo é avaliado o desempenho dos reguladores projetados para cada estratégia de controle implementada no conversor estático interligado ao rotor do DFIG, através de variações dos sinais de referência. O desempenho é medido pelo valor das grandezas de máximo sobrepasso e tempo de acomodação. A figura 33 corresponde ao esquema implementado do DFIG com os controladores PI projetados para a estratégia de controle escolhida.

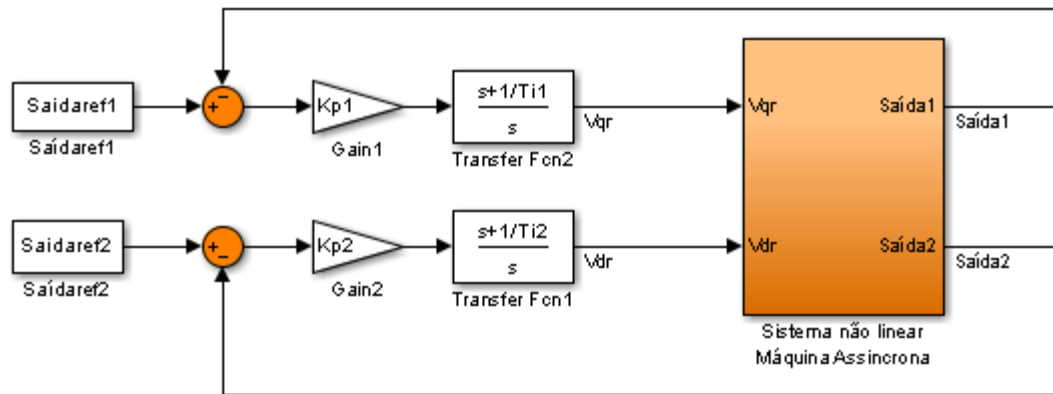


Figura 33. Esquema geral implementado da máquina assíncrona com os controladores PI

Nas seguintes figuras é avaliado o desempenho dos reguladores projetados. Observa-se que a mudança da estratégia de controle tem influência nos critérios de desempenho do DFIG.

A Figura 34 apresenta o comportamento da tensão nos terminais da carga do sistema de geração eólica utilizando a máquina tipo DFIG com quatro estratégias de controle ante um degrau do sinal de referência ($V_{tref} = 1pu - 1.05pu$) e sim demanda de potência da carga.

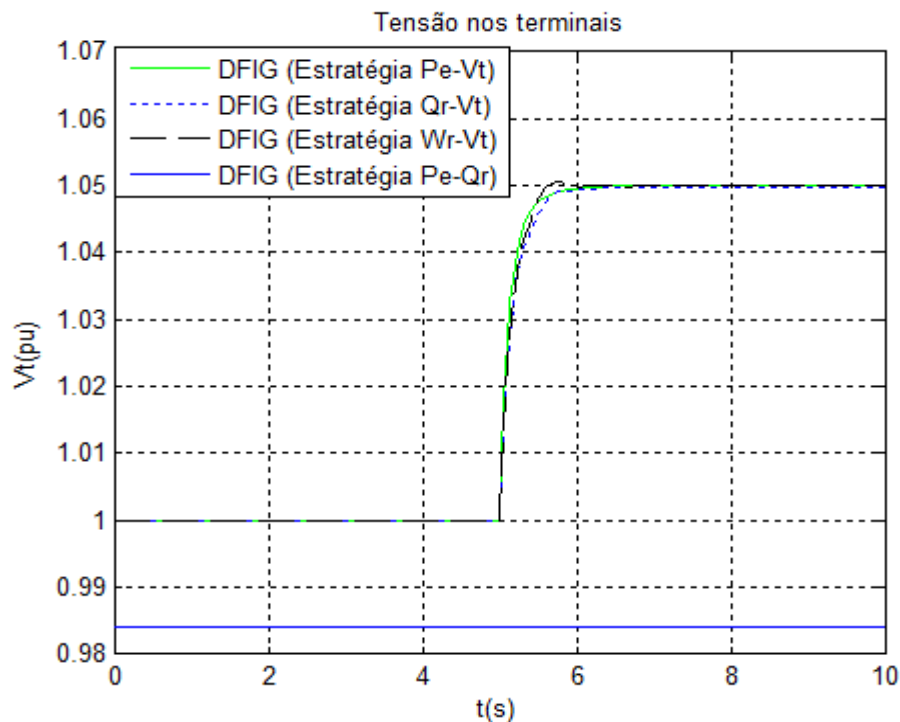


Figura 34. Tensão nos terminais do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável

Na seguinte tabela é avaliado o desempenho da tensão nos terminais da carga em termos da resposta temporal para a estratégia de controle (Pe –Vt), (Qr –Vt) e (Wr –Vt) com respeito aos critérios de desempenho definidos por (64).

Tabela 2 Avaliação do desempenho da resposta temporal da tensão nos terminais

	$T_{s(2\%)}(s)$	$M_p(\%)$
Critérios de desempenho do projeto	≤ 1.1	0
Estratégia de controle Pe-Vt	1.03	0
Estratégia de controle Qr-Vt	1.07	0
Estratégia de controle Wr-Vt	1.09	0.0476

A Figura 35 apresenta o comportamento da potência ativa gerada pelo DFIG com as quatro estratégias de controle ante um degrau do sinal de referência ($P_{ref} = 1.9609Mw - 2.13Mw$) e carga $0Kw$.

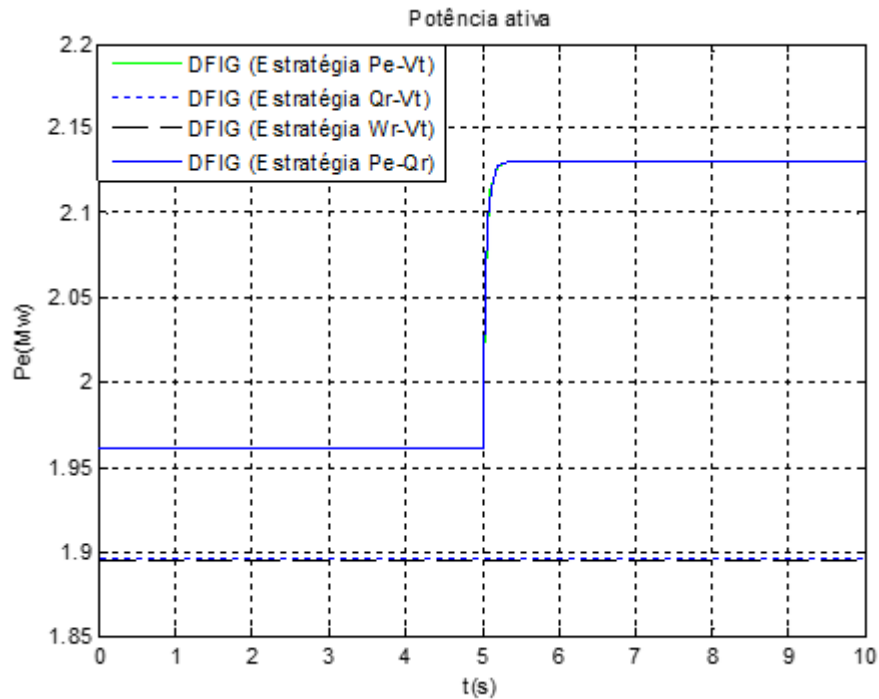


Figura 35. Potência ativa do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável

Na seguinte tabela é avaliado o desempenho da potência ativa em termos da resposta temporal para a estratégia de controle (Pe -Vt) e (Pe -Qr) com respeito aos critérios de desempenho definidos por (59).

Tabela 3 Avaliação do desempenho da resposta temporal da potência ativa

	$T_{s(2\%)}(s)$	$M_p(\%)$
Critérios de desempenho do projeto	≤ 1.1	0
Estratégia de controle Pe-Vt	0.6	0
Estratégia de controle Pe-Qr	0.67	0

A Figura 36 apresenta o comportamento da potência reativa consumida pelas máquinas DFIG com as quatro estratégias de controle ante um degrau do sinal de referência ($F_{pref} = 1 - 0.9749$) e carga 0Kw.

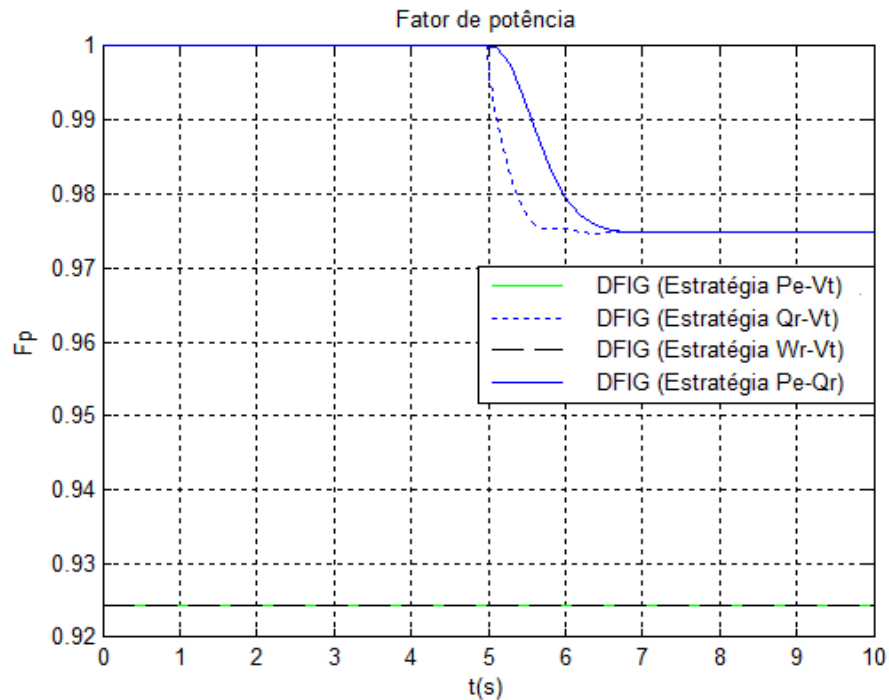


Figura 36. Fator de potência do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável

Na seguinte tabela é avaliado o desempenho do fator de potência em termos da resposta temporal para a estratégia de controle (Qr -Vt) e (Pe -Qr) com respeito aos critérios de desempenho definidos por (73).

Tabela 4 Avaliação do desempenho da resposta temporal do fator de potência

	$T_{s(2\%)}(s)$	$M_p(\%)$
Critérios de desempenho do projeto	≤ 1.6	0
Estratégia de controle Qr-Vt	1.52	0
Estratégia de controle Pe-Qr	1.58	0

A Figura 37 apresenta o comportamento da velocidade de rotação do DFIG com as quatro estratégias de controle ante um degrau do sinal de referência ($W_{ref} = 1.003pu - 1.004pu$) e carga 0Kw.

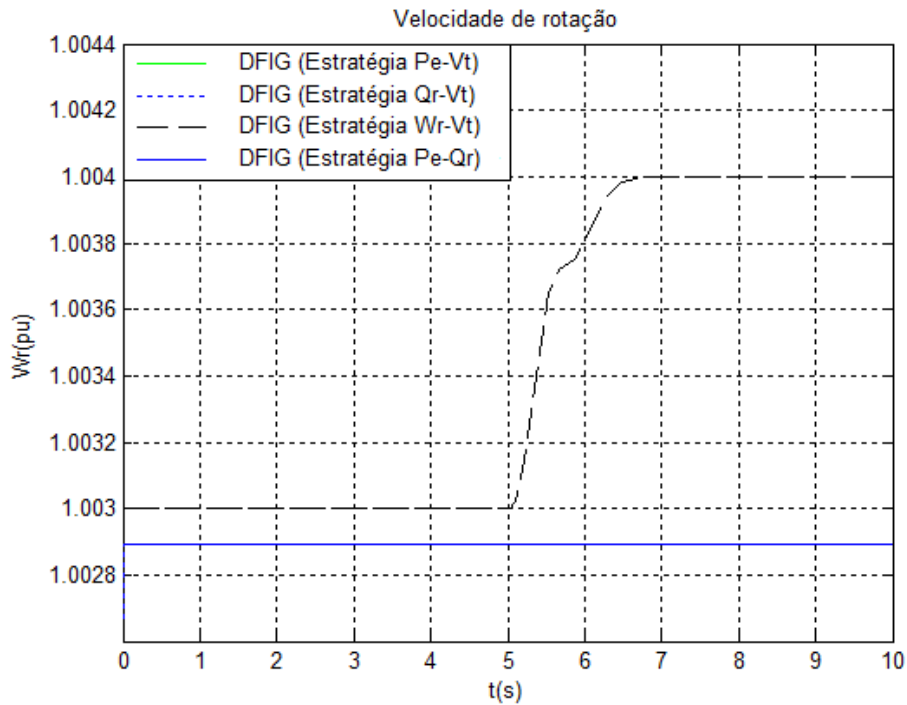


Figura 37. Velocidade de rotação do DFIG ante variação da estratégia de controle, ponto de operação constante e sinal de referência variável

Na seguinte tabela é avaliado o desempenho da velocidade de rotação em termos da resposta temporal para a estratégia de controle $W_r - V_t$ com respeito aos critérios de desempenho definidos por (82).

Tabela 5 Avaliação do desempenho da resposta temporal da velocidade de rotação

	$T_{s(2\%)}(s)$	$M_p(\%)$
Critérios de desempenho do projeto de controle	≤ 2	0
Estratégia de controle $Q_r - V_t$	1.98	0

De acordo aos resultados apresentados nas tabelas 2, 3, 4 e 5 nota-se que o desempenho das quatro variáveis controladas é influenciado pela mudança da estratégia de controle implementada.

4.3 Avaliação do desempenho do sistema de geração com as máquinas DFIG e SCIG para diferentes demandas de potência da carga

A avaliação do desempenho do DFIG e SCIG nesta seção é realizada através de variações da demanda de potência da carga. Inicialmente é avaliado o desempenho das máquinas SCIG para demandas de potência fixas entre $0.0kW$ e $1800kW$. De acordo aos resultados apresentados na Figura 38, no sistema de geração com SCIG a tensão na carga é máxima quando a demanda de potência da carga é zero, e diminui gradualmente de acordo com o aumento da demanda de potência.

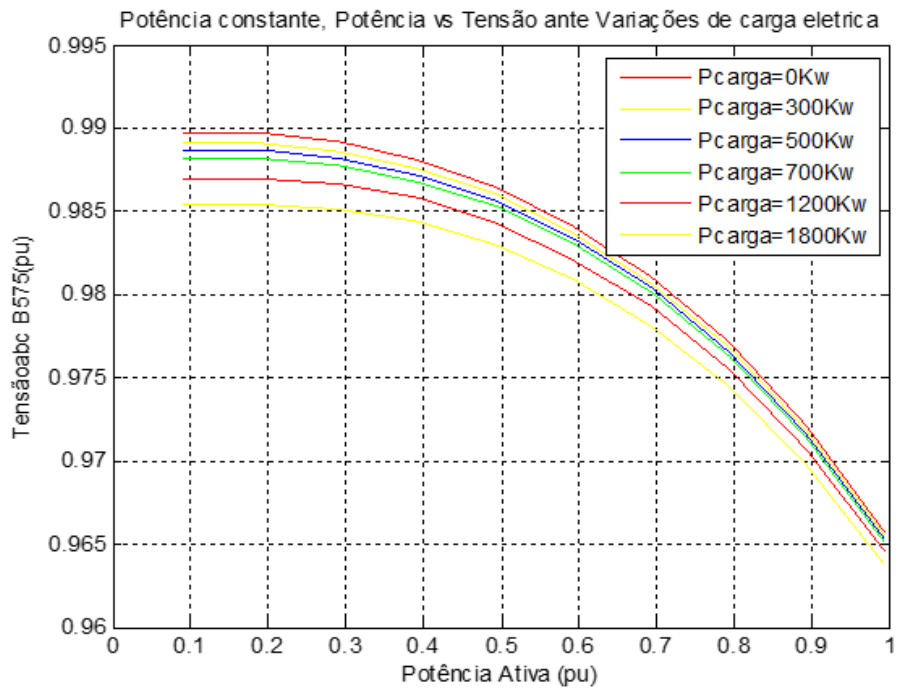


Figura 38. Potência ativa vs Tensão nos terminais da carga do sistema de geração com SCIG para diferentes demandas de potência da carga

Na segunda parte é avaliado o desempenho das máquinas SCIG e DFIG com as quatro estratégias de controle para um degrau na demanda de potência da carga apresentado na Figura 39.

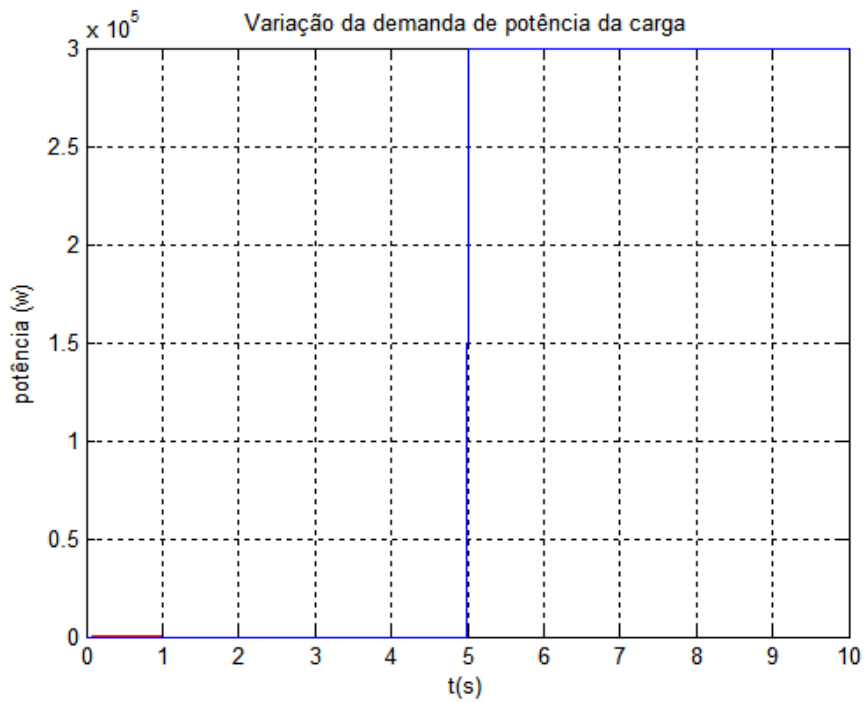


Figura 39. Degrau da demanda de potência da carga

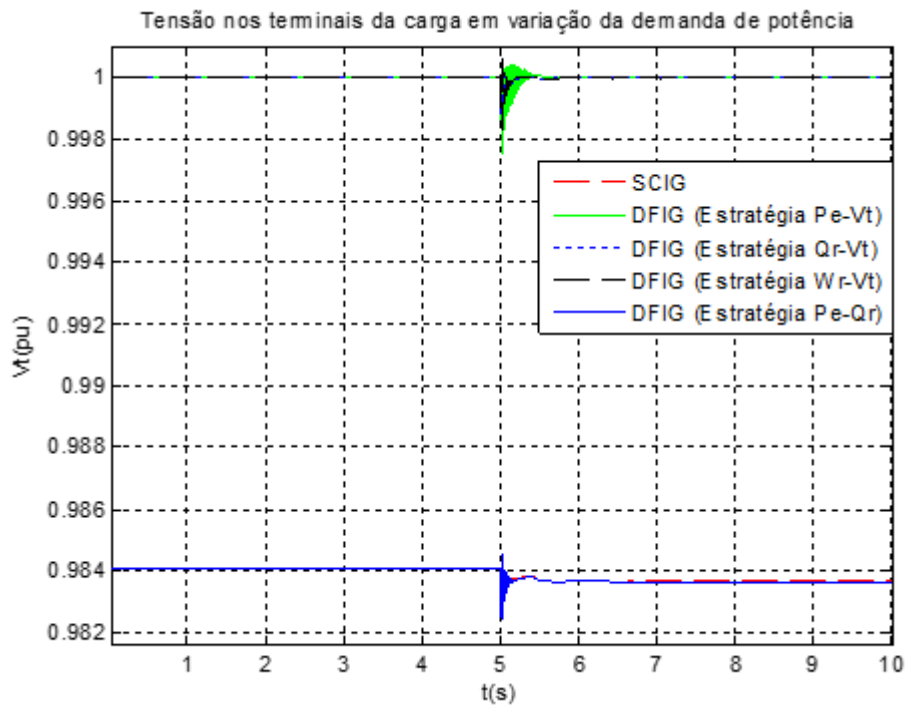


Figura 40. Tensão nos terminais da carga do sistema de geração eólica com DFIG e SCIG, em variação da demanda de potência da carga apresentada na figura 39

De acordo com as figuras 38 e 40, pode-se notar que quando não existe um controle de tensão, uma variação da demanda de potência da carga tem um impacto direto na tensão nos terminais da carga do sistema de geração com SCIG, bem como quando é utilizada a estratégia potência ativa e potência reativa no gerador DFIG. No sistema de geração implementado utilizando as máquinas DFIG e as 3 estratégias de controle de tensão, nota-se que ante uma variação da demanda de potência da carga o desempenho dinâmico da tensão nos terminais é adequado, pois o tempo de acomodação é menor que 1 segundo e a taxa de amortecimento é maior que 0.9.

4.4 Efeito da variação do vento no desempenho das máquinas SCIG e DFIG ligadas ao sistema de geração apresentado na Figura 31.

Nesta avaliação considera-se o efeito da variação do vento no desempenho das máquinas DFIG e SCIG. A variação do vento é apresentada através da variação do torque mecânico como mostra a Figura 41.

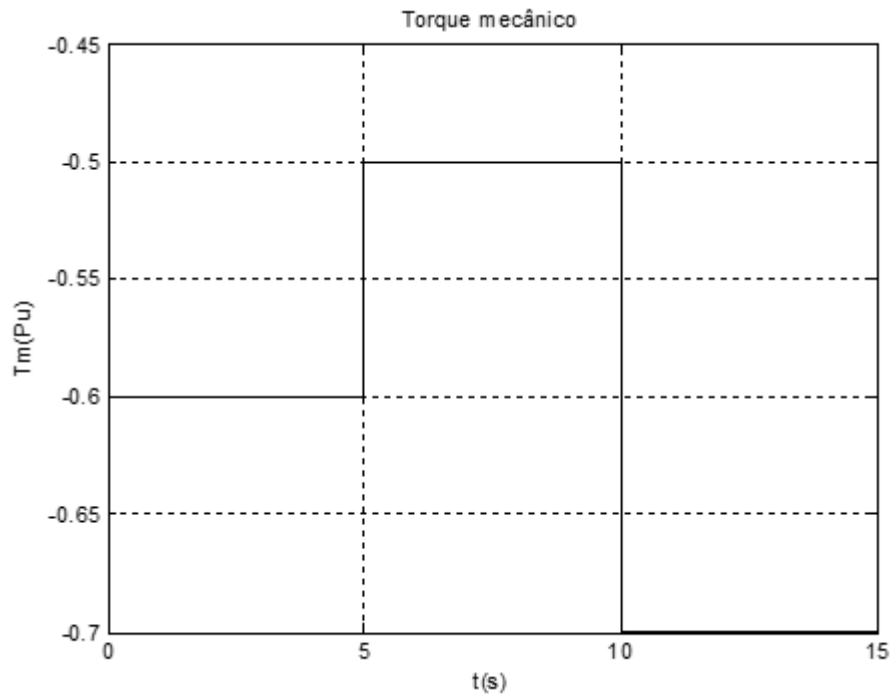


Figura 41. Variação do Torque mecânico

Na Figura 42, mostra-se que o desempenho da tensão DC no link do capacitor é adequada para as máquinas DFIG com as 4 estratégias de controle, como demonstram os resultados apresentados na Figura 42.

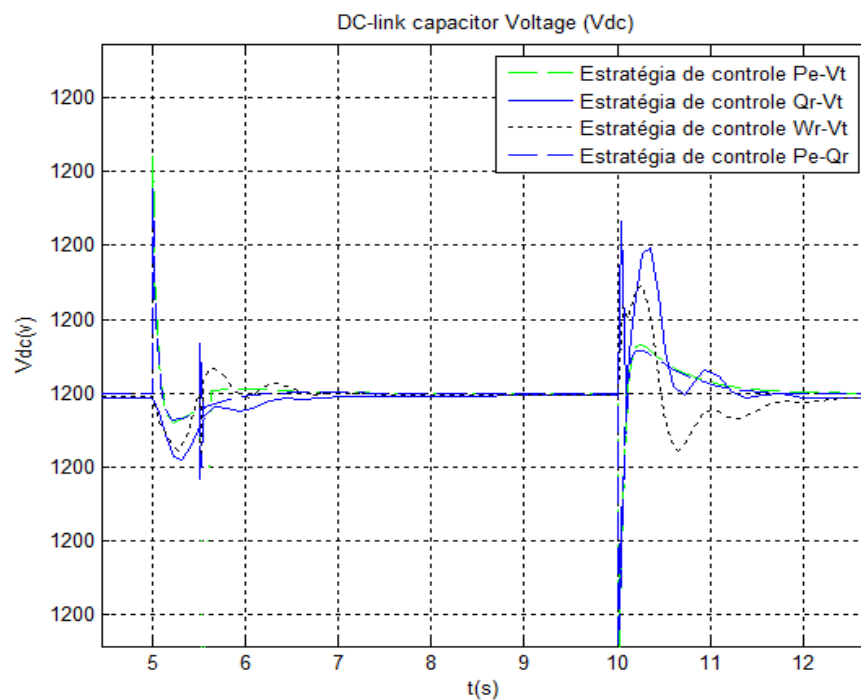


Figura 42. DC link Capacitor voltage

De acordo com a Figura 43, nota-se que a tensão nos terminais da carga do sistema de geração eólica com SCIG varia no sentido inverso ao T_m apresentado na Figura 42. Por outro lado, o desempenho dinâmico das máquinas DFIG com as estratégias de controle de tensão ($P_e - V_t, Q_r - V_t, W_r - V_t$) mostra-se adequado, pois o tempo de acomodação é menor a 2 segundos e a taxa de amortecimento é maior a 0.9, como demonstram os resultados apresentados na Figura 43.

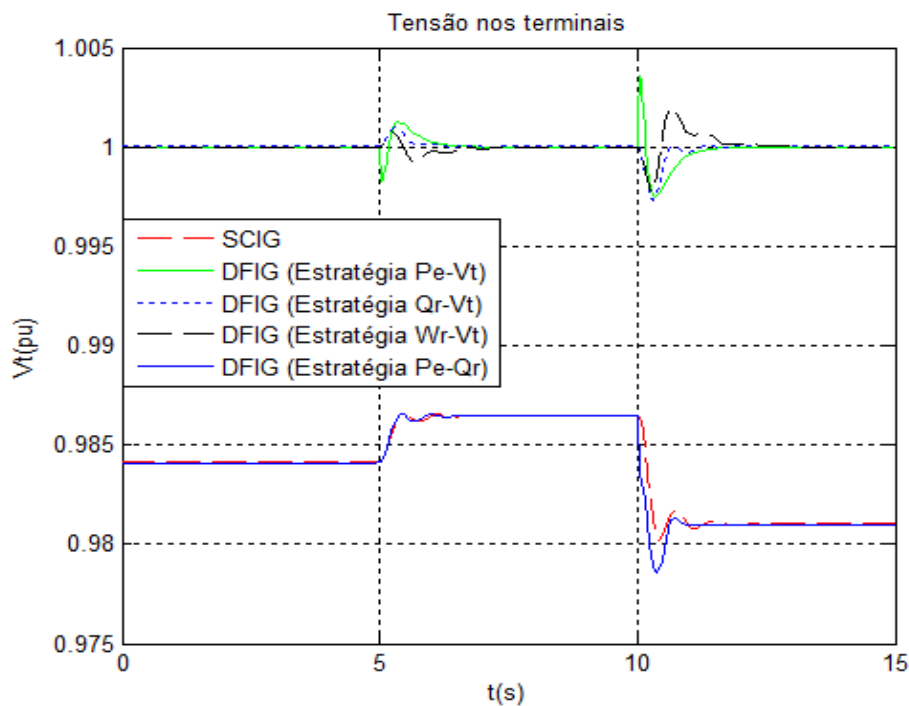


Figura 43. Tensão nos terminais da carga do sistema de geração eólica com as máquinas DFIG e SCIG, em variação do T_m apresentado na Figura 42.

Na Figura 44, observa-se que a potência ativa gerada pela máquina SCIG é diretamente proporcional ao T_m apresentado na Figura 42. Por outro lado, verifica-se que as máquinas DFIG operando com as estratégias de controle de potência ativa ($P_e - V_t, P_e - Q_r$), apresentam um comportamento dinâmico adequado, pois o tempo de acomodação é menor a 1 segundo e o sobrepasso é nulo, como demonstram os resultados apresentados na figura 44.

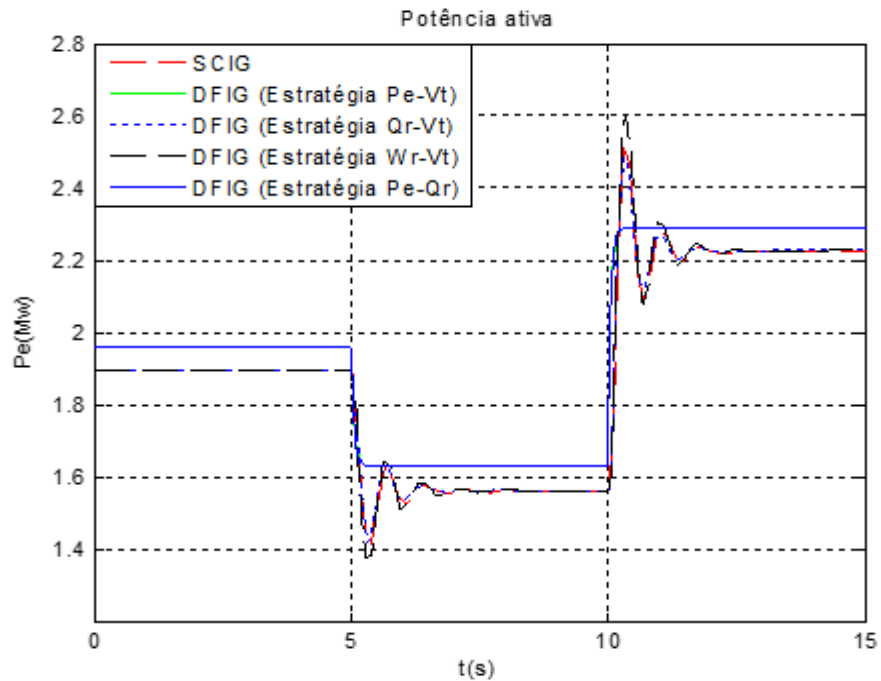


Figura 44. Potência ativa gerada pelas máquinas DFIG e SCIG ligadas ao sistema geração eólica, em variação do T_m apresentado na Figura 42.

Conforme à figura 45, nota-se que as máquinas DFIG operando com as quatro estratégias de controle implementadas apresentam um consumo menor de potência reativa da rede do que a máquina SCIG. Além disso, verifica-se que as máquinas DFIG operando com as estratégias de controle de potência reativa ($Q_r - V_t, P_e - Q_r$), apresentam um comportamento adequado, pois o tempo de acomodação é menor que 2 segundos e taxa de amortecimento é maior a 0.8, como demonstram os resultados apresentados na figura 45.

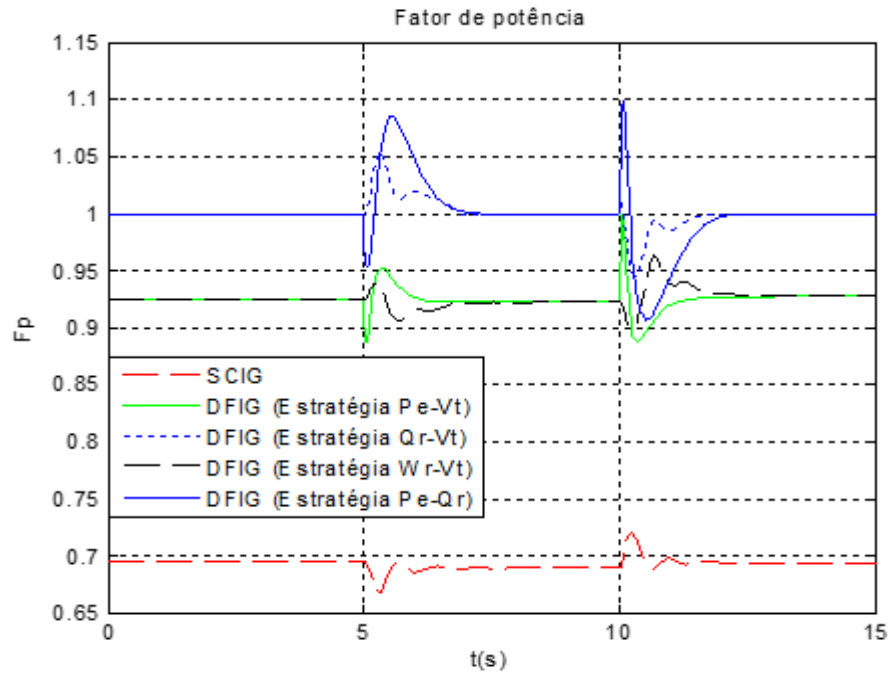


Figura 45. Fator de potência das máquinas DFIG e SCIG ligadas ao sistema de geração eólica

De acordo com a Figura 46, observa-se que a máquina DFIG operando com a estratégia de controle de velocidade de rotação ($W_r - V_t$), apresenta um comportamento apropriado, pois o tempo de acomodação é menor que 2 segundos e a taxa de amortecimento é maior a 0,9, como demonstram os resultados apresentados na figura 46.

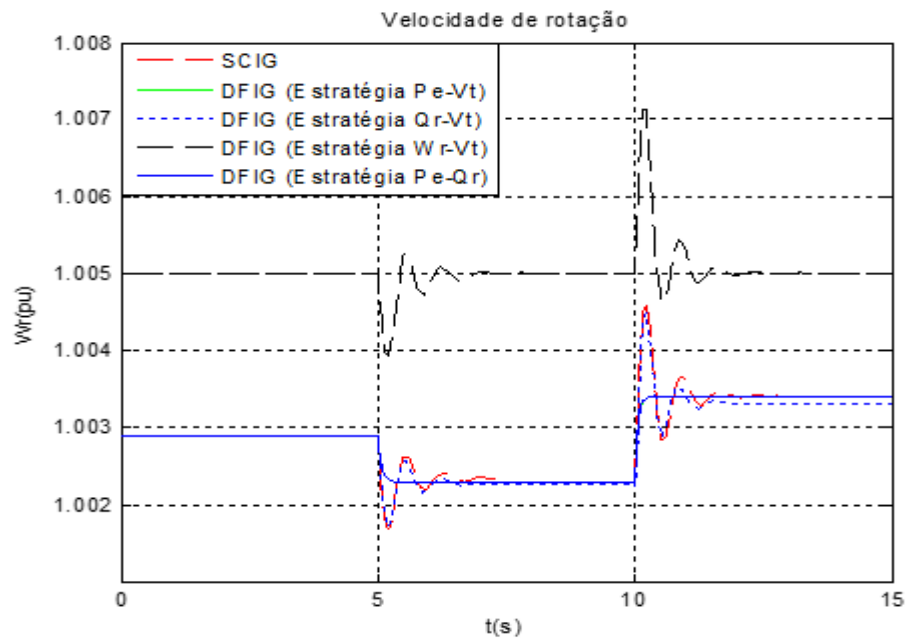


Figura 46. Velocidade de rotação das máquinas DFIG e SCIG, em variação do T_m apresentado na Figura 42.

4.5 Avaliação do Comportamento transitório das máquinas SCIG e DFIG

Nesta seção avalia-se o comportamento transitório da potência ativa gerada pelas máquinas SCIG e DFIG através da taxa de amortecimento e o tempo de acomodação, como apresentado na Figura 47. Para as simulações considera-se que o torque mecânico, $T_m = -0.6pu$, é constante, isto é, não há variação do vento. Para as simulações realizadas foi aplicado um curto-circuito trifásico sólido próximo à subestação de 25 kV no instante $t = 1.0s$, com duração de 90ms.

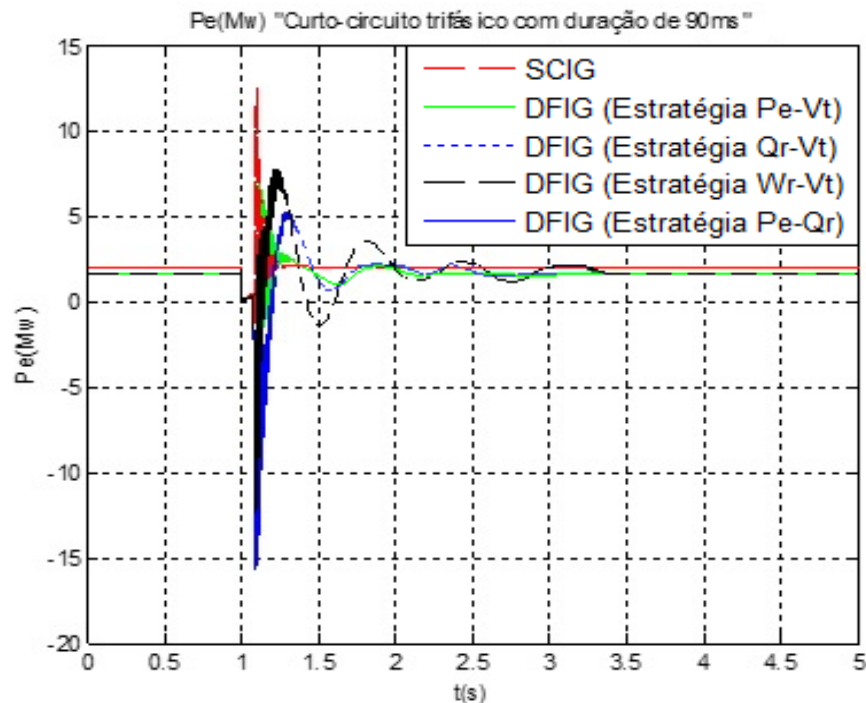


Figura 47. Comportamento transitório da potência ativa gerada pelas máquinas SCIG e DFIG quando é aplicada uma falta trifásica (duração de 90ms) próxima à subestação de 25kV

Na tabela 2 pode-se verificar os valores da taxa de amortecimento e tempo de acomodação para as 4 estratégias de controle do gerador DFIG. Para efeito de comparação são também apresentados os valores para um gerador tipo SCIG. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6, nota-se um melhor desempenho dinâmico quando o DFIG opera com as estratégias de potência ativa.

Tabela 6. Avaliação do comportamento transitório da potência ativa

Tecnologia de geração		Potência gerada (MW)	Taxa de amortecimento	$T_{s(2\%)}(s)$
DFIG	$P_e - V_t$	1.9609	0.90	0.50
	$Q_r - V_t$	1.8953	0.32	1.70
	$W_r - V_t$	1.8952	0.23	2.50
	$P_e - Q_r$	1.9609	0.90	0.51
SCIG		1.8951	0.65	1.40

Para avaliar o tempo crítico de eliminação da falta (TCF) para cada estratégia de controle, foram realizadas várias simulações. O objetivo é determinar o maior tempo de falta aplicável ao sistema sem a perda da estabilidade da unidade geradora de energia eólica. A semelhança do caso anterior, foi também avaliada a resposta de um gerador SCIG. De acordo com os resultados obtidos na Tabela 7, observa-se que o sistema de geração com DFIG operando com as estratégias de tensão apresentam o maior tempo crítico de eliminação da falta do que as máquinas DFIG operando no modo de controle de potência ativa.

Tabela 7. TCF em ms em função da potência gerada pelas máquinas SCIG e DFIG

Tecnologia de geração		Potência gerada (MW)	TCF(ms)
DFIG	$P_e - V_t$	1.9609	875
	$Q_r - V_t$	1.8953	984
	$W_r - V_t$	1.8952	987
	$P_e - Q_r$	1.9609	875
SCIG		1.8951	818

4.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados da avaliação do gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) e o gerador de indução de rotor em gaiola (SCIG) integrados no sistema de geração de energia apresentado na Figura 32 desde o ponto de vista de desempenho. O desempenho das duas tecnologias é avaliado através de: variações da carga elétrica, variações do torque mecânico e aplicação de uma falta trifásica.

Na seção 4.2 avaliou-se o desempenho dos reguladores projetados para cada estratégia de controle implementada no conversor estático interligado ao rotor do DFIG, através de variações dos sinais de referência. O desempenho é medido pelo valor das grandezas de máximo sobrepasso e tempo de acomodação. De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a mudança da estratégia de controle tem influência no critério de desempenho de tempo de acomodação. Mas o critério de desempenho de sobrepasso máximo permanece igual.

Na seção 4.3 apresentou-se a avaliação do desempenho do SCIG e o DFIG com as quatro estratégias de controle através de variações da demanda de potência da carga. Quatro estratégias de controle e torque mecânico fixo ($T_m = -0.6pu$) foram consideradas na análise. De acordo com os resultados obtidos, pode-se notar que o sistema de geração utilizando as máquinas DFIG e as 3 estratégias de controle de tensão apresenta um adequado desempenho do comportamento dinâmico da tensão nos terminais da carga. Porém, quando não existe um controle de tensão, uma variação da demanda de potência da carga tem um impacto direto na tensão nos terminais da carga do sistema de geração com SCIG, bem como quando é utilizada a estratégia potência ativa e potência reativa no gerador DFIG. Uma solução para mitigar as flutuações de tensão, tais como quedas, picos, perturbação transitória e regulação de tensão, é estudada em (POKHAREL; GAO, 2010; MASAUD; SEN, 2012) através da implementação de um compensador dinâmico de potência reativa conhecido na literatura como Static Synchronous Compensator (STATCOM).

Na seção 4.4 apresentou-se o efeito da variação do torque mecânico no desempenho do SCIG e o DFIG com as quatro estratégias de controle. O objetivo é realçar a necessidade da escolha adequada da estratégia de controle através das simulações dinâmicas apresentadas.

Na seção 4.5 avaliou-se o comportamento transitório da potência ativa do SCIG e o DFIG com as quatro estratégias de controle, no que se refere ao valor das grandezas de taxa de amortecimento e o tempo de acomodação do transitório. De acordo com os resultados obtidos, nota-se um melhor desempenho dinâmico quando o DFIG opera com as estratégias de potência ativa. Nesta seção também foi avaliado o tempo crítico de eliminação da falta (TCF). Várias simulações foram realizadas até determinar o maior tempo de falta aplicável ao sistema sem a perda da estabilidade. De acordo com os resultados obtidos, observa-se que o sistema de geração com DFIG operando com as estratégias de tensão apresentam um maior tempo crítico do que as máquinas DFIG operando no modo de controle de potência ativa.

5. CONCLUSÕES FINAIS

Nesta dissertação apresentou-se uma análise comparativa de um sistema de geração utilizando máquinas do tipo DFIG com quatro estratégias de controle. Para permitir a avaliação do desempenho de cada uma das estratégias foram simulados os seguintes eventos:

- Variações da demanda
- Variações do torque mecânico
- Ocorrência de uma falta trifásica.

Os indicadores de análises utilizados foram:

- Tempo de acomodação
- Taxa de amortecimento
- Tempo crítico de eliminação da falta.

O desempenho do sistema de geração com SCIG também foi apresentado para efeito de comparação.

Realizou-se uma modelagem dinâmica de 5ª ordem da máquina de indução em função do fluxo magnético de estator e de rotor e a velocidade de rotação do rotor. A partir do conjunto de equações algébrico-diferenciais obtidas, foi implementado o modelo da máquina de indução no *SimPowerSystem (Toolbox Matlab/Simulink)*. Na modelagem dinâmica do sistema de geração não foi considerada a turbina eólica, porém, nas simulações apresentadas ela foi representada através de variações do torque mecânico.

Apresentou-se o projeto de controle e suas estratégias aplicadas ao conversor estático interligado ao rotor do gerador de indução duplamente alimentado, tais como o controle de: potência ativa e tensão nos terminais; potência reativa e tensão nos terminais; velocidade de

rotação e tensão nos terminais; potência ativa e potência reativa. O projeto de controle de cada estratégia foi realizado de maneira independente por controladores proporcionais e integrais (PI) através do método lugar das raízes.

As conclusões obtidas estão resumidas a seguir:

- Em relação à avaliação do desempenho dos reguladores projetados para cada estratégia de controle implementada no DFIG, nota-se que a mudança da estratégia de controle tem influência no critério de desempenho de tempo de acomodação.
- No que concerne à avaliação do sistema de geração utilizando DFIG com as quatro estratégias de controle ($P_e - V_t, Q_r - V_t, W_r - V_t, P_e - Q_r$) e considerando a variação da demanda de potência da carga, nota-se que o controle implementado em cada máquina é adequado, pois o tempo de acomodação é menor que 1 segundo e a taxa de amortecimento é maior a 0.9.
- Em referência à avaliação do desempenho do sistema de geração com as máquinas DFIG através de variações do vento e sem variação da demanda da carga, observa-se que:
 1. O comportamento da tensão nos terminais da carga com as máquinas DFIG ($P_e - V_t, Q_r - V_t, W_r - V_t$) é apropriado, pois o tempo de acomodação é menor a 2 segundo e a taxa de amortecimento é maior a 0.9.
 2. O comportamento da potência ativa gerada pelas máquinas DFIG ($P_e - V_t, P_e - Q_r$) é adequado e similar, pois o tempo de acomodação é menor a 1 e o sobrepasso é nulo.
 3. O comportamento da potência reativa consumida pelas máquinas DFIG ($P_e - V_t, Q_r - V_t, W_r - V_t, P_e - Q_r$) é adequado, pois o tempo de acomodação é menor

a 2 segundos e a taxa de amortecimento é maior a 0.8. Além disso, o consumo de potência reativa por cada uma delas é inferior ao SCIG.

- Em relação ao comportamento transitório da potência ativa gerada pelas máquinas DFIG, com respeito ao valor das grandezas de taxa de amortecimento, tempo de acomodação do transitório e tempo crítico de eliminação da falta, nota-se um melhor desempenho dinâmico quando essas máquinas operam com as estratégias de controle $P_e - V_t$ e $P_e - Q_r$. Além disso, analisando o TCF, percebe-se que as máquinas DFIG operando em modo de controle de tensão, $Q_r - V_t, W_r - V_t$ apresentam um maior tempo crítico do que as máquinas DFIG operando no modo de controle de potência ativa, $P_e - V_t, P_e - Q_r$.

Fazendo uma análise comparativa entre as máquinas DFIG e SCIG, do ponto de vista de desempenho, pode-se concluir que:

- Quando é aplicada uma variação da demanda de potência da carga, a tensão nos terminais da carga do sistema de geração com SCIG apresenta uma pequena variação.
- O sistema de geração com SCIG apresenta um consumo substancialmente maior de potência reativa da rede.
- Em relação à ocorrência de uma falta trifásica no sistema de geração com SCIG, nota-se que o desempenho da potência gerada não é adequado aos critérios de desempenho, pois o tempo crítico de eliminação da falta apresentado pelo sistema de geração com SCIG é menor que as máquinas DFIG.

As conclusões apresentadas tornam claras as vantagens da aplicação de máquinas DFIG em sistemas de geração eólica, bem como realçam a necessidade da escolha adequada da estratégia de controle.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

Sugerem-se como trabalhos futuros:

- Inclusão do sistema de controle do ângulo de *pitch* e avaliação do seu efeito na questão do desempenho do sistema de geração eólica.
- Avaliar a influência dos parâmetros da rede na estabilidade da unidade de geração eólica.
- Avaliar o comportamento dinâmico do DFIG para faltas trifásicas aplicadas em outras distâncias da rede.
- Avaliar o comportamento dinâmico de um sistema multi-máquinas.

REFERÊNCIAS

ANAYA, O.; HUGUES, F. M.; JENKINS, N.; STRBAC, G. Contribution of DFIG-based Wind farms to power system short-term frequency regulation. **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, [s.l.], v.153, n.2, p.164-170, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Site ABEEólica**. Disponível em: < <http://www.portalabeeolica.org.br/> >. Acesso em: 1 julho. 2014.

AKHMATOV, V. **Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power**. 2003. 270p. Tese (Doutorado em eletrônica de potência) - Technical University of Denmark, Lyngby, 2003.

BAZANELLA, A. S.; GOMES DA SILVA, J. M. **Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

ÇADIRCI, I.; ERMIS, M. Doubly-output induction generator operating at subsynchronous and supersynchronous speeds: steady-state performance optimization and wind-energy recovery. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, [s.l.], v.139, n.5, p.429-442, 1992.

CHEN, Z.; SPOONER, E. A modular Permanente-magnet for variable speed Wind turbines. **IEE International Conference EMD-95**, Durham, n.412, p.453-457, 1995.

DA COSTA, J. P. et al. Comportamento dinâmico do gerador de indução com dupla alimentação orientado no fluxo estatórico. **Revista de Associação Brasileira de Eletrônica de Potência**, [s.l.], v.11, n.1, p.2104-2110, 2006.

DECENNIAL ENERGY PLAN (PDE 2021). **Plano decenal de expansão de energia 2021**. 80p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Sumario%20PDE%202021.pdf>>. Acesso em: 18 set.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC), **Technical report: Annual Market update**. 2012. 72p. Disponível em: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf>. Acesso em: 16 set.

GRAUERS, A. **Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines**. 1996. 133p. Tese (Doutorado) - Chalmers University of Technology, Gotemburgo, 1996.

GREENPEACE INTERNACIONAL, CONSELHO EUROPEU DE ENERGIA RENOVAVEL (EREC), **Revolução energética “A caminho do desenvolvimento limpo”**. 2010. 40p. Disponível em:

<<http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/report/2010/11/revolucaoenergeticadeslimpo.PDF>>. Acesso em: 15 set. 2013

HANSEN, A. D.; HANSEN, L. H. **Market penetration of wind turbine concepts over the years**. Technical report. Wind Energy Department. Roskilde: Riso National Laboratory, 2006.

HEIER, S. **Grid integration of wind energy conversion systems**. 2nd. ed. [s.l.]: John Wiley & Sons, 1998.

HOLDSWORTH, L. et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances. **IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, [s.l.], v.150, n.3, p.343-352, 2003.

KHALIL, H. K. **Nonlinear Systems**. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

KRAUSE, P. C. et al. **Analysis of electric machinery and drive systems**. 2nd ed. Piscataway: IEEE Press Power Engineering Society Sponsor, 2002.

LIU, S. Y. **Controle Direto de Potência em Gerador de Indução Duplamente Alimentado**. 2011. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2nd ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

MASAUD, T. M.; SEN, P.K. Study of the implementation of STATCOM on DFIG-Based Wind farm connected to a power system. **IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)**, Washington, p.1-7, 2012.

NUNES, M. V. A. **Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e variável Integrados em Redes Elétricas Fracas**. 2003. 224p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

NUNES, M. V. A.; VIEIRA, J. P. A.; BEZERRA, U. H. Design of optimal PI controllers for Doubly Fed Induction Generators in wind turbines using genetic algorithm. **IEEE Power & Energy Society General Meeting**, Pittsburgh, p.1-7, 2008.

NUNES, M. V. A.; VIEIRA, J. P. A.; BEZERRA, U. H. Improving the transient performance of doubly fed induction generators when submitted to voltage sags. **IEEE Power & Energy General Meeting**, Calgary, p.1-11, 2009.

NUNES, M. V. A. et al. Novas estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor do DFIG para melhoria da estabilidade transitória em sistema eólicos. **IEEE America transactions**, [s.l.], v.5, n.3, não paginado, 2007.

NUNES, M. V. A. et al. Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids. **IEEE Transactions on energy conversion**, [s.l.], v.19, n.4, p.692-701, 2004.

OLIVEIRA, D. **Análise da Estabilidade de Sistemas de Geração Eólica com Aerogeradores de Indução com Rotor de Gaiola**. 2007. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PENA, R.; CLARE, J. C.; ASHER, G. M. A doubly fed induction generator using back-to-back pwm converters supplying an isolated load from a variable speed Wind turbine. **IEE Proceedings Electric Power Applications**, [s.l.], v.143, n.5, p.380-387, 1996.

PEREIRA, M. P. **Um estudo do aerogerador de velocidade variável e sua aplicação para fornecimento de potência elétrica**. 2004. 98p. Dissertação (Mestre em ciências em Engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas gerais, 2004.

PINHEIRO, E. L. R. **Análise do Comportamento Dinâmico de Usinas Eólicas a Velocidade Variável Utilizando Atpdraw**. 2004. 139p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

POKHAREL, B.; GAO, W. Mitigation of disturbances in DFIG-based Wind farm connected to weak distribution system using STATCOM. **IEEE North American Power Symposium (NAPS)**, Arlington, p1-7, 2010.

QIAO, W.; HARLEY, R, G. Grid connection requirements and solutions for DFIG wind turbines. **IEEE Energy 2030 Conference**, Atlanta, p.1-8, 2008.

REGINATTO, R. **Relatório Técnico: Modelagem do motor de indução**. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

REGINATTO, R. **Controle por Campo Orientado do Motor de Indução com Adaptação de Parâmetros Via MRAC**. 1993. 145p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

REGINATTO, R.; BAZANELLA, A. S.; ZANCHETTIN, M. **Região de penetração segura de geração eólica com aerogeradores de indução**. Porto Alegre: [s.n.], 2008.

ROSLONIEC, S. **Fundamental Numerical Methods for Electrical Engineering**. [s.l.]: Springer, 2008.

SILVA, S. R. et al. Desenvolvimento de modelos e estratégias de controle para estudos de integração de sistema eólicos à rede elétrica. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 3. Florianópolis, 2005. **Anais...** [S.l.: s.n], 2005. Não paginado

TANG, Y.; XU, L. A Flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [s.l.], v.10, n.4, p.472-478, 1995.

TAPIA, G.; TAPIA, A. Wind generation optimization algorithm for a doubly fed induction generator. **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, [s.l.], v.152, n.2, p.253-263, 2005.

TARNOWSKI, G. C. **Metodologia de Regulação da Potência Ativa para Operação de Sistemas de Geração Eólica com Aerogeradores de Velocidade Variável**. 2006. 116p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TREMBLAY, E.; CHANDRA, A.; LAGACÉ, P.J. Grid-Side converter control of DFIG wind turbines to enhance power quality of distribution network. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, [Montreal], p.1-6, 2006.

VIEIRA, J. P. A.; NUNES, M. V. A.; BEZERRA, U. H. **Controllability Analysis of Wind Generators Connected to Real Electric Grid**. In: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Recife, v.1, p.1-6, 2006.

WANG, R.; GERBER, S. **Magnetically geared wind generators technologies: opportunities and challenges**. In: International Conference on Applied Energy (ICAE 2013). Pretoria, 2013.

WONG, K. C.; HO, S. L.; CHENG, K. W. E. Direct control algorithm for doubly fed induction generators in weak grids. **IET Electric Power Applications**, [s.l.], v.3, n.4, p.371-380, 2009.

ZANCHETTIN, M. G. **Análise da Inserção de Geração Eólica com Aerogeradores**. 2012. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguazu, 2012.

APÊNDICE A
PARÂMETROS DO SISTEMA DE GERAÇÃO

Tabela 8 Parâmetros do gerador – 3MW

Parâmetros	Valor	Unidade
Potência (P)	3	MW
Velocidade nominal (W_r)	1200	Rpm
Tensão nominal de estator (V_t)	575	V
Frequência	60	Hz
Pares de Polos	3	-
Resistência do estator (R_s)	0.00706	pu
Resistência do rotor (R_r)	0.005	pu
Indutância de dispersão do estator (L_{ls})	0.171	pu
Indutância de dispersão do rotor (L_{lr})	0.156	pu
Indutância de magnetização (L_m)	2.9	pu
Constante de inercia (H)	5.04	s
Coefficiente de fricção (F)	0.01	pu

Os parâmetros da linha trifásica utilizada para a obtenção dos resultados de simulações de simulação, apresentados neste trabalho são:

Tabela 9 Parâmetros Three-Phase PI Section Line

Parâmetros	Valor	Unidade
Resistência da linha (R_L)	0.1153	Ω/Km
Indutância da linha (H_L)	1.05	mH/Km
Capacitância da linha (C_L)	11.33	nF/Km

Tabela 10 Parâmetros do transformador trifásico 575v/25kV (T_1)

Parâmetros	Valor	Unidade
Potência nominal (P_n)	12	MVA
Frequência	60	Hz
Resistência Primário (R_1)	0.00083	pu
Resistência Secundário (R_2)	0.00083	pu
Reatância Primário (X_1)	0.025	pu
Reatância Secundário (X_2)	0.025	pu
Relação de transformação (a)	0.0230	-

Tabela 11 Parâmetros do transformador trifásico 25kV/120kV (T_2)

Parâmetros	Valor	Unidade
Potência nominal (P_n)	47	MVA
Frequência	60	Hz
Resistência Primário (R_1)	0.0027	pu
Resistência Secundário (R_2)	0.0027	pu
Reatância Primário (X_1)	0.08	pu
Reatância Secundário (X_2)	0.08	pu

APÊNDICE B

MODELO LINEARIZADO

O Ponto de equilíbrio utilizado para linearizar o sistema eólico apresentado na Figura 50 tendo como condição de operação T_m (*Torque mecânico*) = $-0.6pu$, foi escolhido a partir da definição do teorema de Lyapunov apresentado no capítulo 2.4.

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} x_{e1} \\ x_{e2} \\ x_{e3} \\ x_{e4} \\ x_{e5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5330 \\ -0.8307 \\ -0.6584 \\ -0.6861 \\ 1.0029 \end{bmatrix}$$

O modelo linearizado do sistema MBI é o seguinte:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{qs} \\ \dot{\varphi}_{ds} \\ \dot{\varphi}_{qr} \\ \dot{\varphi}_{dr} \\ \dot{W}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -19.6164 & -483.0663 & 19.1108 & 103.3413 & 0 \\ 483.0663 & -19.6164 & -103.3413 & 19.1108 & 0 \\ 5.3714 & 0 & -5.4704 & 1.0766 & -258.6621 \\ 0 & 5.3714 & -1.0766 & -5.4704 & 248.2017 \\ -0.2216 & 0.2126 & 0.2683 & -0.1721 & -9.9206e-04 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \\ W_r \end{bmatrix}_{x_e} - \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \\ W_r \end{bmatrix}_{x_e} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} Saída_1^* \\ Saída_2^* \end{bmatrix}_{x_e} - \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \\ W_r \end{bmatrix}_{x_e} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}$$

Onde V_{qr} e V_{dr} são as entradas de controle e $Saída_1$ e $Saída_2$ correspondem à linearização de cada uma das variáveis de saída apresentadas nas equações (46), (48), (49) e (51). Os Autovalores da matriz \mathbf{A} são:

$$\lambda_1 = -20.772 + 482.92i$$

$$\lambda_2 = -20.772 - 482.92i$$

$$\lambda_3 = -2.3089 + 9.1651i$$

$$\lambda_4 = -2.3089 - 9.1651i$$

$$\lambda_5 = -4.0131$$

Observa-se que todos tem parte real negativa, por tanto o ponto de equilíbrio escolhido é assintoticamente estável de acordo ao teorema de Lyapunov.

APÊNDICE C

PARÂMETROS DOS CONTROLADORES

Os parâmetros dos controladores PIs, utilizados para a obtenção dos resultados de simulações de simulação, apresentados neste trabalho são:

Tabela 12 Ganhos dos controladores utilizados no conversor lado rotor (Crotor)

Variáveis controladas	Parâmetros	Valores
Tensão nos terminais	K_p	-23.4984
	T_i	0.2491
Potência ativa	K_p	10.0850
	T_i	0.2491
Potência reativa	K_p	2.0060
	T_i	0.2491
Velocidade de rotação	K_p	26.945
	T_i	0.2491

Tabela 13 Ganhos dos controladores utilizados no conversor lado rede (Crede)

Variáveis controladas	Parâmetros	Valores
Tensão CC (V_{dc})	K_p	0.002
	K_i	0.04

APÊNDICE D

MODELO IMPLEMENTADO NO SIMPOWERSYSTEM

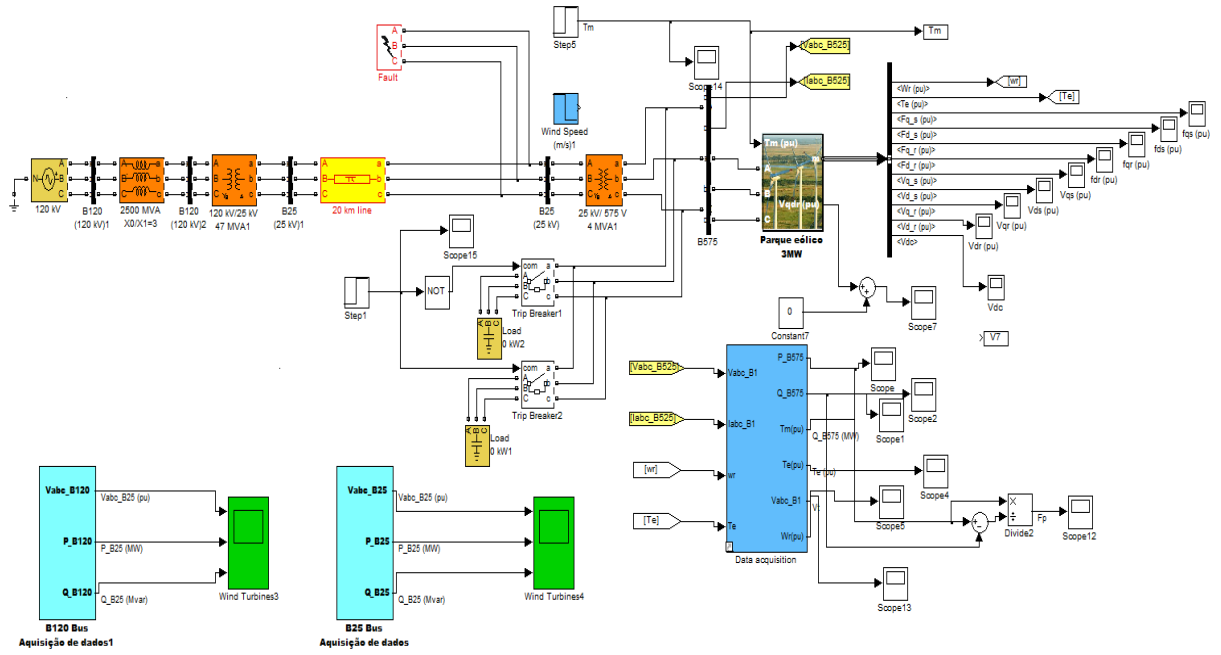


Figura 48. Modelo implementado do sistema de geração no SimPowerSystem

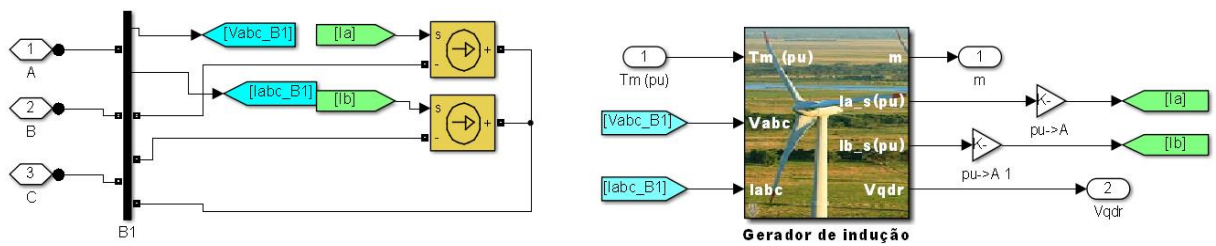
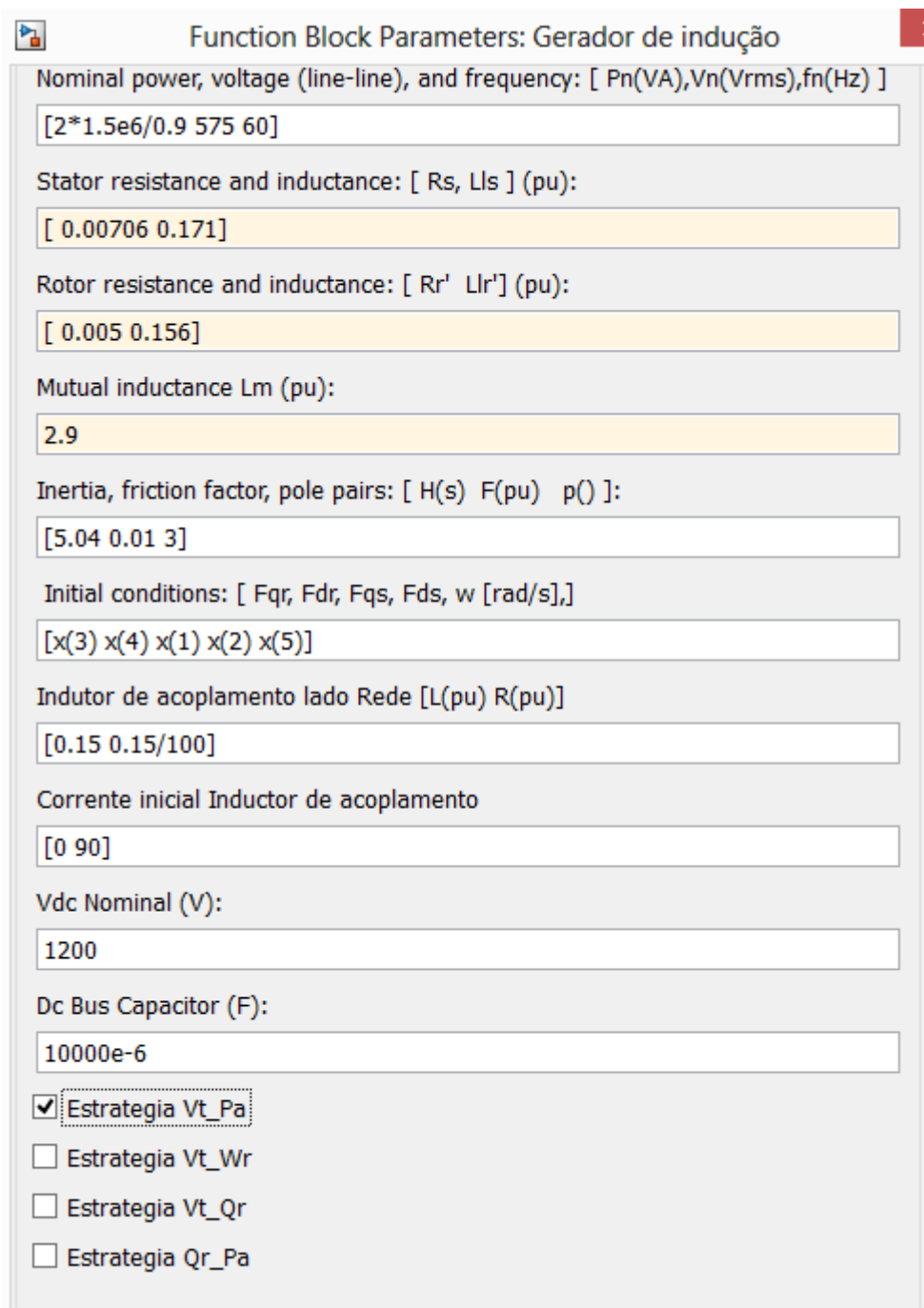


Figura 49. Modelo do subsistema Parque eólico 3MW



Function Block Parameters: Gerador de indução

Nominal power, voltage (line-line), and frequency: [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]
[2*1.5e6/0.9 575 60]

Stator resistance and inductance: [Rs, Lls] (pu):
[0.00706 0.171]

Rotor resistance and inductance: [Rr' Llr'] (pu):
[0.005 0.156]

Mutual inductance Lm (pu):
2.9

Inertia, friction factor, pole pairs: [H(s) F(pu) p()]:
[5.04 0.01 3]

Initial conditions: [Fqr, Fdr, Fqs, Fds, w [rad/s],]
[x(3) x(4) x(1) x(2) x(5)]

Indutor de acoplamento lado Rede [L(pu) R(pu)]
[0.15 0.15/100]

Corrente inicial Inductor de acoplamento
[0 90]

Vdc Nominal (V):
1200

Dc Bus Capacitor (F):
10000e-6

Estrategia Vt_Pa
 Estrategia Vt_Wr
 Estrategia Vt_Qr
 Estrategia Qr_Pa

Figura 50. Parâmetros da máscara Gerador de Indução

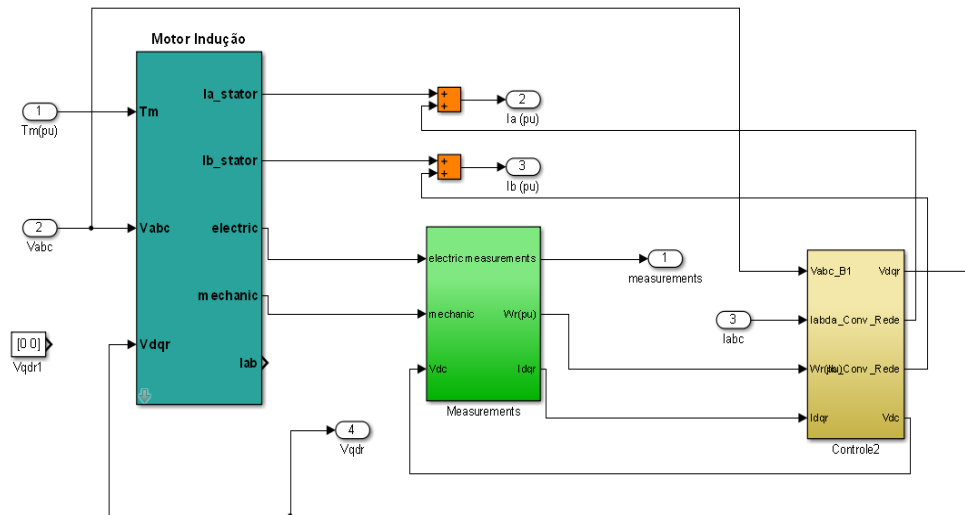


Figura 51. Modelo do subsistema DFIG

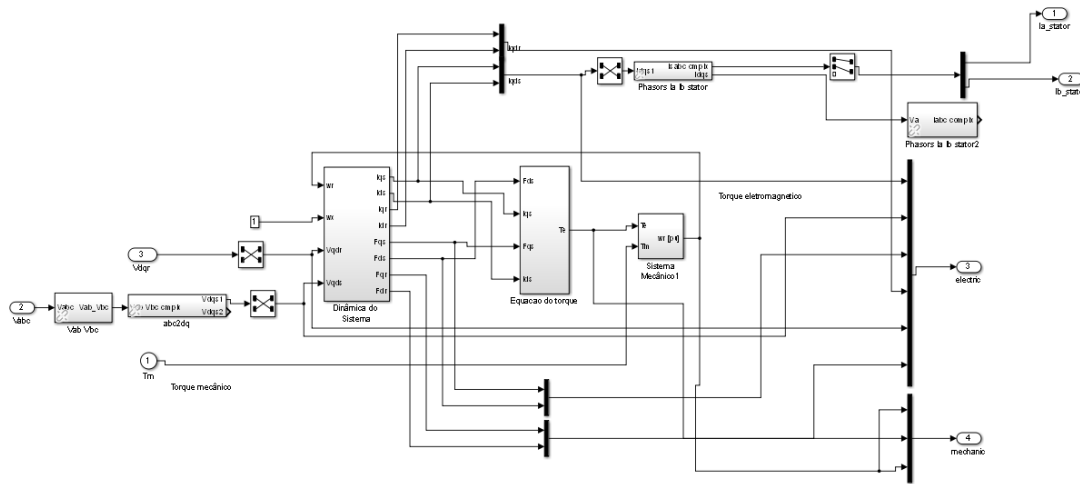


Figura 52. Modelo do subsistema Máquina de Indução

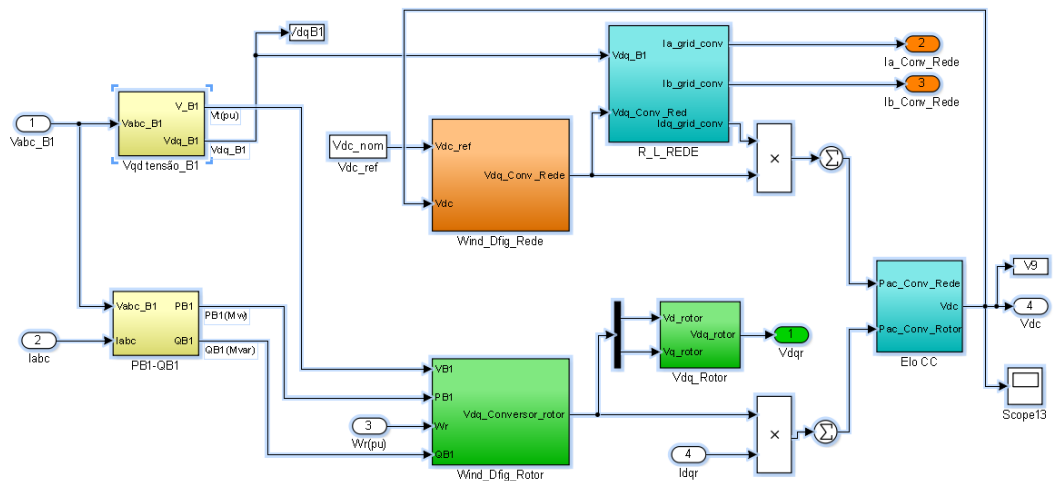


Figura 53. Modelo do subsistema Controle

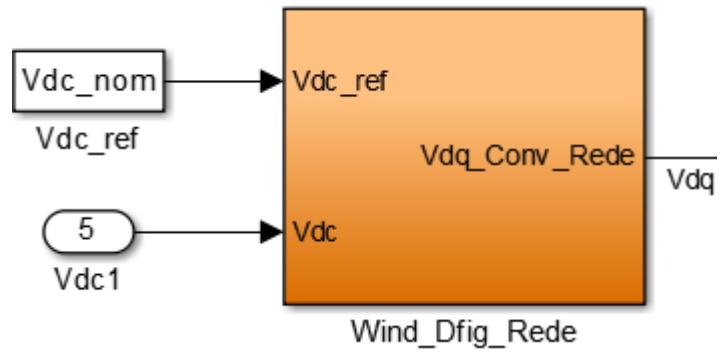


Figura 54. Conversor Lado Rede (Crede)

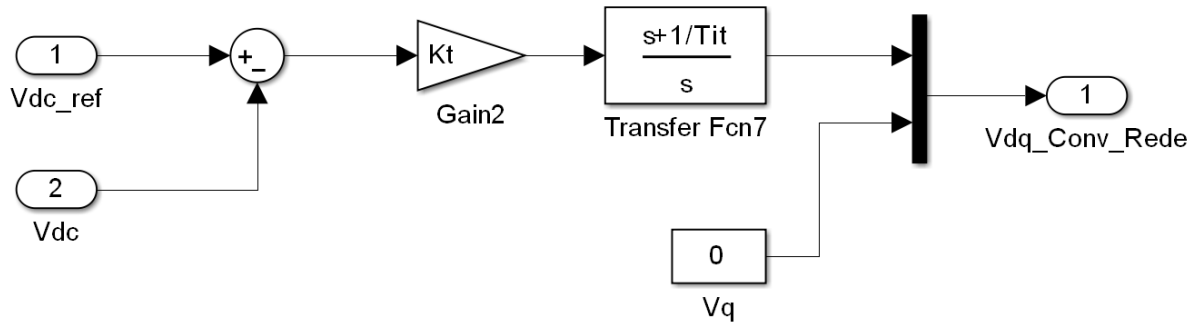


Figura 55. Modelo do subsistema Conversor Lado Rede

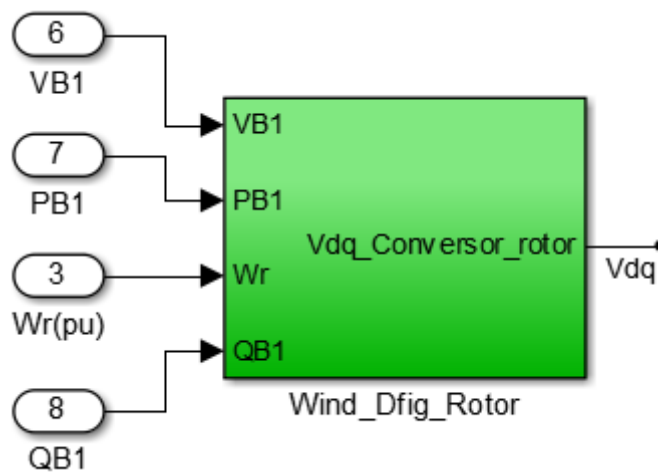


Figura 56. Conversor lado rotor (Crotor)

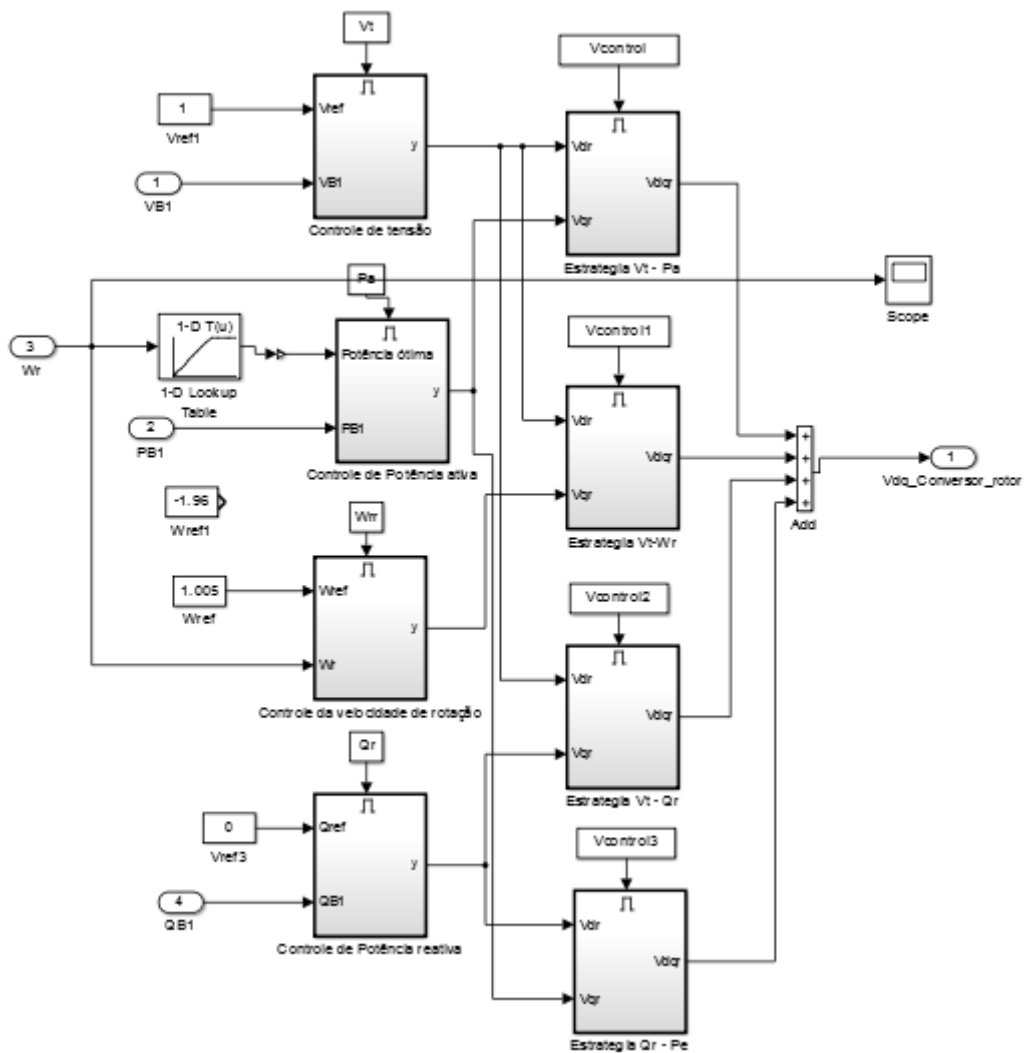


Figura 57. Modelo do subsistema Conversor lado rotor (Crotor)

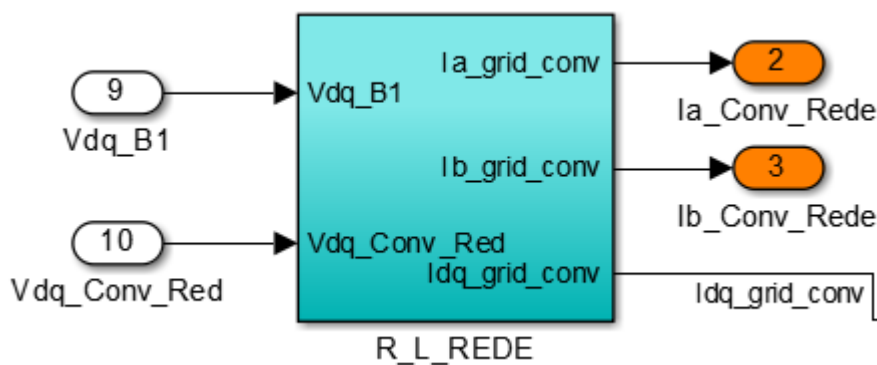


Figura 58. Filtro RL

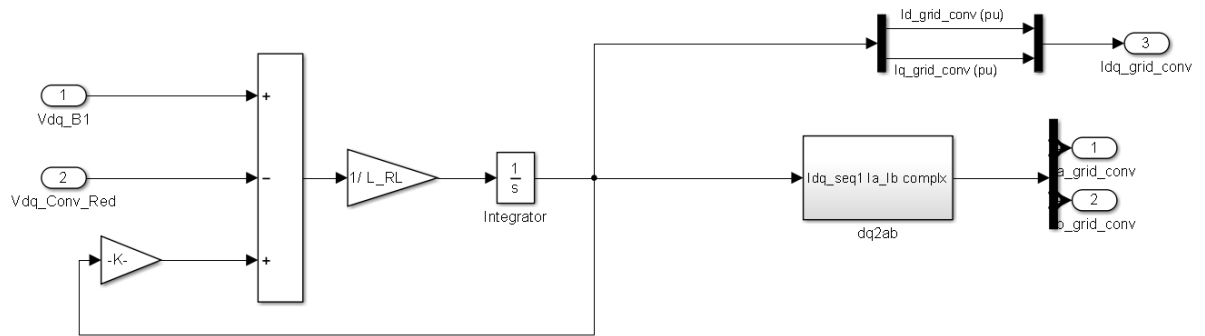


Figura 59. Modelo do subsistema Filtro RL

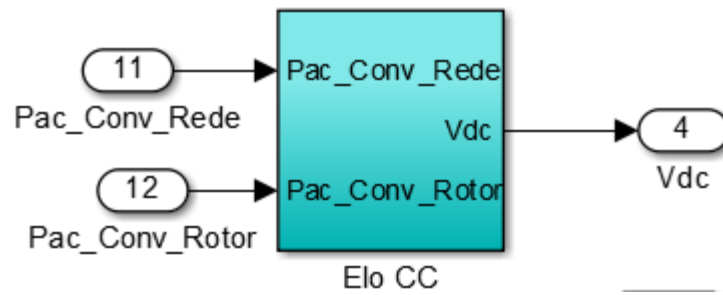


Figura 60. Elo CC

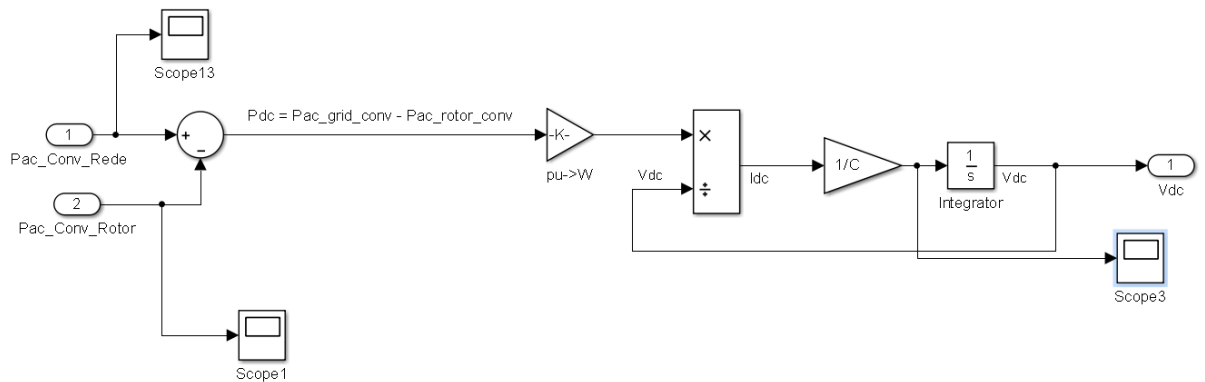


Figura 61. Modelo do subsistema Elo CC