

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JÚLIO VÍTOR KUNZLER JÚNIOR

**ANÁLISES TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO GERADOR
ASSÍNCRONO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO – O GEADA,
E CONTRIBUIÇÃO À SUA OPERAÇÃO**

Porto Alegre

2006

JÚLIO VÍTOR KUNZLER JÚNIOR

**ANÁLISES TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO GERADOR
ASSÍNCRONO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO – O GEADA,
E CONTRIBUIÇÃO À SUA OPERAÇÃO**

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

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica.

ORIENTADOR: Prof. PhD. Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2006

JÚLIO VÍTOR KUNZLER JÚNIOR

ANÁLISES TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO GERADOR
ASSÍNCRONO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO – O GEADA,
E CONTRIBUIÇÃO À SUA OPERAÇÃO

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. PhD. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS.

Doutor pela Cardiff School of Engineering, University of Wales,
Cardiff, País de Gales, Reino Unido.

Banca Examinadora:

Prof. PhD. Felix Alberto Farret,
Doutor pela Universidade de Londres, ICSTM, Grã-Bretanha.

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich,
Doutor pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas/SP,
Brasil.

Prof. Dr. Romeu Reginatto,
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis/SC,
Brasil.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Marcelo Soares Lubaszewski.

Porto Alegre, dezembro de 2006.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido núcleo familiar, Lizandra, Vítor Emmanuel e Arthur Gabriel, pela compreensão, dedicação e apoio em todos os momentos ao longo desta caminhada.

Também não se podem esquecer as gerações futuras que cada vez mais dependerão de um melhor aproveitamento das fontes de energia disponíveis na natureza.

AGRADECIMENTOS

Sem Deus nada é possível, e por isso agradeço a Ele toda a iluminação durante a minha vida.

Agradeço à minha esposa Lizandra pelo apoio, força, paciência e cumplicidade, e aos meus filhos, Vítor e Arthur, por acreditarem em mim e esperarem, impacientemente, pelo dia em que eu voltaria a ter mais tempo para com eles, e também aos meus pais, Júlio e Giselda, por mostrar a importância que o conhecimento tem na vida.

Agradeço ao Professor Ály pela acolhida e orientação ao longo de todos estes anos, pelo apoio e incentivo indispensáveis à conclusão deste trabalho, assim como aos demais professores e colegas do LMEAE.

Ao engenheiro Luis Gustavo Lauer, da SEW Eurodrive, agradeço pelo apoio na operação do inversor de frequência fornecido ao LMEAE e utilizado como conversor de frequência neste projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFRGS, agradeço pela oportunidade de realização do trabalho nesta área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE, agradeço pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e atividades da pesquisa.

A CEEE, Companhia Estadual de Energia Elétrica, da qual faço parte de seu quadro funcional, agradeço pela disponibilidade de recursos ao Projeto de P&D do qual este trabalho de mestrado faz parte.

Ao meu amigo e colega, engenheiro Marcus Vinícius Cerutti, agradeço pelo apoio na reta final do trabalho, tornando algumas tarefas mais fáceis.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise teórica e experimental do gerador assíncrono de dupla alimentação, denominado GEADA ao longo deste trabalho, operando em regime permanente com velocidade não fixa, mas com frequência da armadura constante. Compreende o escopo do trabalho a análise teórica a partir do circuito equivalente do gerador, a análise teórica e experimental da curva de magnetização do GEADA operando em frequência do rotor variável, uma proposta de adaptação da curva de capacidade aplicada na operação dos geradores síncronos para o GEADA e a sua análise considerando-o como máquina síncrona a partir dos seus terminais, os ensaios normalizados e complementares necessários para o levantamento dos parâmetros para este circuito equivalente e ensaios do GEADA operando com carga para verificação de seu desempenho. Os resultados obtidos permitem um melhor entendimento desse sistema de geração, de suas condições de operação e utilização em sistemas de geração de velocidade não fixa como, por exemplo, sistemas eólicos e hidrelétricos.

Palavras-chaves: Geração de energia elétrica. Gerador com velocidade variável. Gerador assíncrono de dupla alimentação. Curva de capacidade.

ABSTRACT

The study presents the theoretical and experimental analysis of the double fed asynchronous generator, called GEADA, operating in steady state with non-fixed speed but with constant armature frequency. It comprehends the theoretical analysis based on the equivalent circuit of this generator, the theoretical and experimental analysis of the curve of magnetization of the GEADA operating with variable rotor frequency. A proposal of adaptation of the capability curve applied in the operation of the synchronous generators for the GEADA is also presented, its analysis considering it as a synchronous machine from its terminals, the standard and complementary tests necessary for the calculation of the parameters for the equivalent circuit and the tests with the GEADA operating under on-load conditions to verify its performance. The achieved results allow a better understanding of this generation system, its operational conditions and applicability to the power generation systems based on variable speed, such as wind and hydroelectric power plants.

Keywords: Electric power generation. Doubly-fed asynchronous generator. Double fed induction generator, DFIG. Variable speed constant frequency asynchronous generator. Capability curve.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	MOTIVAÇÃO	23
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	PANORAMA GERAL	26
2.2	OS DIFERENTES TIPOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	29
2.3	BENEFÍCIOS DA GERAÇÃO COM VELOCIDADE VARIÁVEL	30
2.4	ESTUDOS DE REGIME PERMANENTE DO SISTEMA DE GERAÇÃO	33
2.5	ESTUDOS DINÂMICOS DO SISTEMA DE GERAÇÃO	39
2.6	MODELOS DE CONTROLE PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO	42
2.7	O SISTEMA CONVERSOR DE POTÊNCIA DE QUATRO QUADRANTES	43
2.8	NOVAS PROPOSTAS PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO COM VELOCIDADE VARIÁVEL	47
2.9	A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM VELOCIDADE VARIÁVEL NO BRASIL	49
2.10	OUTROS ESTUDOS PERTINENTES AO TEMA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM VELOCIDADE VARIÁVEL	50
2.11	TRABALHOS SOBRE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE GERADORES ASSÍNCRONOS DE DUPLA ALIMENTAÇÃO	51
3	O MODELO DE REGIME PERMANENTE PARA O GEADA	58
3.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE O GEADA	59
3.2	O CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O ESTUDO DO REGIME PERMANENTE DO GEADA	60
3.3	EQUACIONAMENTO DAS CORRENTES DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO GEADA	62
3.3.1	A corrente de rotor	63
3.3.2	A corrente de estator	65
3.3.3	Formas finais das correntes do rotor e do estator	66
4	BALANÇO E FLUXOS DE POTÊNCIAS APLICADOS AO GEADA EM REGIME PERMANENTE	69
4.1	ANÁLISE DOS CONJUGADOS MECÂNICO E ELETROMAGNÉTICO E ÂNGULO DE CARGA	71
4.1.1	Princípios da conversão de energia	72
4.1.2	Os conjugados	73
4.1.3	O conceito de potência de escorregamento	75
4.2	ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA DE GERAÇÃO	75
4.3	POTÊNCIA MECÂNICA NO SISTEMA DE GERAÇÃO	77
4.4	POTÊNCIAS ATIVAS NO GEADA	77
4.4.1	O circuito equivalente em regime permanente do GEADA com a explicitação das componentes das potências ativa e mecânica no circuito do rotor	78
4.4.2	Potência ativa no rotor do GEADA	79
4.4.3	Potência ativa no estator do GEADA	79
4.4.4	Potência ativa disponível à carga	79
4.4.5	Potência ativa no entreferro do GEADA	80
4.4.6	Relações entre as demais potências ativas do GEADA	81

4.5 POTÊNCIAS REATIVAS NO SISTEMA DE GERAÇÃO	82
4.5.1 Potência reativa no rotor do GEADA.....	83
4.5.2 Potência reativa no estator do GEADA.....	83
4.5.3 Potência de magnetização do GEADA	83
4.5.4 Potência reativa da carga.....	84
4.5.5 Potência reativa no entreferro do GEADA	84
4.6 O EQUACIONAMENTO DAS POTÊNCIAS DO GEADA.....	84
4.7 MODOS OPERATIVOS DO GEADA	91
4.7.1 Modo operativo subsíncrono	91
4.7.2 Modo operativo sobressíncrono	93
4.8 ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA DO GEADA	94
4.8.1 Relação da tensão do rotor com o fator de potência do GEADA.....	95
4.9 ANÁLISE DO RENDIMENTO DO GEADA	96
4.9.1 O rendimento no modo operativo subsíncrono.....	96
4.9.2 O rendimento no modo operativo sobressíncrono.....	97
5 ANÁLISE DO GEADA COMO GERADOR SÍNCRONO	99
5.1 SEMELHANÇAS ENTRE O GEADA E UM GERADOR SÍNCRONO	99
5.2 DIFERENÇAS ENTRE O GEADA E UM GERADOR SÍNCRONO	100
5.3 A REATÂNCIA SÍNCRONA E A TENSÃO INTERNA.....	101
5.4 ANÁLISE DO GEADA COMO GERADOR SÍNCRONO	106
5.4.1 Ângulo de potência do GEADA.....	107
5.4.2 Limite de estabilidade em regime permanente para o GEADA.....	107
6 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO GEADA	109
6.1 CURVA DE EXCITAÇÃO	109
6.2 REGIÕES DE OPERAÇÃO	110
6.2.1 Aplicação do conceito de regiões de operação ao GEADA	117
6.3 PROPOSTA DE CURVA DE CAPACIDADE DO GEADA	117
6.3.1 A aplicação da curva de capacidade para os geradores síncronos	117
6.3.2 Os fatores que limitam a capacidade de um gerador síncrono	118
6.3.3 Considerações preliminares.....	120
6.3.4 A curva de capacidade do GEADA.....	122
6.3.5 A aplicação da curva de capacidade do GEADA.....	124
7 ESTUDOS EXPERIMENTAIS	126
7.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GEADA	126
7.1.1 Critérios para o projeto dos enrolamentos do GEADA.....	127
7.1.2 Considerações sobre o “retrofitting” do GEADA.....	129
7.2 CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DO CONVERSOR DE POTÊNCIA	130
7.2.1 Utilização do inversor de frequência comercial como conversor de potência	130
7.3 BANCADA DE TESTES PARA O GEADA	132
7.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO GEADA.....	134
7.4.1 Ensaio para verificação da relação de transformação entre os enrolamentos do rotor e do estator.....	137
7.4.2 Ensaio para medição da resistência dos enrolamentos do GEADA.....	139
7.4.3 Ensaio com o gerador a vazio	140
7.4.4 Ensaio com o rotor aberto e na velocidade síncrona.....	141
7.4.5 Ensaio com o rotor parado e aberto.....	142
7.4.6 Ensaio com o rotor bloqueado.....	143
7.4.7 Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do GEADA a partir dos ensaios da norma IEEE Std 112/1996	145
7.5 ENSAIOS DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DO GEADA.....	149

7.5.1 Ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente contínua no rotor ...	149
7.5.2 Ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada no rotor .	154
7.5.3 Conclusões sobre as curvas de magnetização do GEADA.....	161
7.6 ENSAIOS DO GEADA OPERANDO COM CARGA	162
7.6.1 Curva de regulação do GEADA	163
7.6.2 Curva de carga do GEADA	164
7.6.3 Curva da corrente do rotor em função da corrente de carga do GEADA.....	166
7.6.4 Curva comparativa dos conjugados dos modos operativos subsíncrono e sobressíncrono do GEADA.....	167
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	169
8.1 CONCLUSÕES DAS ANÁLISES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS DO GERADOR ASSÍNCRONO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO	169
8.2 CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DO GERADOR ASSÍNCRONO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO	170
8.3 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO TRABALHO	171
REFERÊNCIAS.....	172
APÊNDICE.....	181

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema básico do gerador assíncrono de dupla alimentação.	27
Figura 2 – Comparação entre resultados experimentais e numéricos com escorregamento equivalente de -600 rpm (-40%) a +600rpm (+40%) para uma máquina de 4 pólos e 50Hz (DJUROVIÉ, 1995).	28
Figura 3 – Sistema isolado de geração de energia elétrica com velocidade variável (PENA, 1996).	28
Figura 4 – Curva da potência reativa em relação a tensão do rotor para uma máquina de 3hp (FERREIRA, 2004).	37
Figura 5 – Curvas da corrente e da tensão do rotor em função da velocidade para uma máquina de 7,5kW, 50Hz e 6 pólos (SMITH, 2005).	38
Figura 6 – Comparação entre o estudo teórico de regime permanente e o controle dinâmico implementado nos ensaios para uma máquina de 7,5kW, 50Hz e 6 pólos (SMITH, 2005).	39
Figura 7 – Referências “dq0” e “abc” arbitrárias para transformação de variáveis.	40
Figura 8 – Diagrama esquemático do sistema de geração com o gerador assíncrono de dupla alimentação (ÇADIRCI, 1994).	44
Figura 9 - Diagrama esquemático do sistema de conversor c.a./c.c./c.a. estudado por (HABETLER, 1993).	45
Figura 10 – Esquema do Sistema de geração do tipo KRAMER estático (BAROUDI, 2005)	46
Figura 11 – Esquema de Geração com conversor de potência de quatro quadrantes (BAROUDI, 2005)	46
Figura 12 – Esquema de Geração com conversor matricial de potência (BAROUDI, 2005).	46
Figura 13 – Sistema isolado de geração de energia elétrica com velocidade variável (HOFMANN, 2002).	48
Figura 14 – Sistema híbrido de geração com o gerador assíncrono de dupla alimentação e uma célula combustível conectada ao “barramento CC” do seu conversor de potência (PALLE, 2005).	49
Figura 15 - Curvas de conjugado para um gerador assíncrono de dupla alimentação, com a tensão do rotor igual a -25V, no modo sobressíncrono, 0V quando o rotor tem seus terminais curto-circuitados e igual a +25V no modo subsíncrono. (OLIVEIRA, 2004).	53
Figura 16 - Curvas da potência ativa do estator e do rotor de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função do escorregamento, com Pr a potência ativa no rotor e Ps a potência ativa no estator. (OLIVEIRA, 2004).	53
Figura 17 - Curvas da potência ativa total disponível para a carga ou sistema elétrico, de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função do escorregamento. (OLIVEIRA, 2004).	54
Figura 18 - Curvas da potência reativa de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função do escorregamento, com a tensão do rotor igual a -25V, no modo sobressíncrono, 0V quando o rotor tem seus terminais curto-circuitados e igual a +25V no modo subsíncrono (OLIVEIRA, 2004).	54

Figura 19 - Curvas da potência reativa de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função da potência ativa, com a tensão do rotor igual a -25V, no modo sobressíncrono, 0V quando o rotor tem seus terminais curto-circuitados e igual a +25V no modo subsíncrono (OLIVEIRA, 2004).	55
Figura 20 - Curvas “V” da corrente do estator em função da tensão do rotor, para três valores de escorregamento para uma máquina de 1,5kW, 115V, 50Hz e 2 pólos (TAMURA, 1989).	56
Figura 21 - Curvas “V” da potência reativa fornecida ao sistema elétrico ou carga em função da tensão do rotor para uma máquina de 3hp (FERREIRA, 2004).	56
Figura 22 - Curvas “V” da potência aparente disponível ao sistema elétrico ou carga em função da corrente de campo, para turbogeradores síncronos (IEEE, 1990).....	57
Figura 23 – Circuito equivalente completo para o gerador de dupla alimentação.	60
Figura 24 – Circuito equivalente para o estudo do gerador de dupla alimentação.....	61
Figura 25 – Diagrama para as tensões do circuito equivalente para o gerador de dupla alimentação em estudo.	61
Figura 26 – Equivalente Thèvenin do circuito equivalente do estator do GEADA.	63
Figura 27 – Equivalente Thèvenin do estator com o circuito equivalente do rotor do GEADA.	64
Figura 28 – Equivalente Thèvenin do circuito equivalente do rotor do GEADA.	65
Figura 29 – Equivalente Thèvenin do rotor com o circuito equivalente do estator do GEADA.	65
Figura 30 – Balanço de potências ativa e mecânica no GEADA.	70
Figura 31 – Diagrama fasorial com as forças magnetomotrizes do estator e do rotor de uma máquina elétrica genérica.	74
Figura 32 – Convenção para o fluxo de potências ativa e mecânica no sistema de geração estudado.	76
Figura 33 – Convenção para o fluxo de potência reativa no sistema de geração estudado.....	76
Figura 34 – Circuito equivalente do GEADA com os termos relativos à potência mecânica e à perda por efeito Joule no circuito do rotor.....	78
Figura 35 – Convenção para o fluxo de potência ativa no GEADA simplificado.	85
Figura 36 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo subsíncrono com fator de potência, FP, unitário.	92
Figura 37 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo subsíncrono com fator de potência, FP, indutivo.....	92
Figura 38 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo subsíncrono com fator de potência, FP, capacitivo.	92
Figura 39 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo sobressíncrono com fator de potência, FP, unitário.	93
Figura 40 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo sobressíncrono com fator de potência, FP, indutivo.	94
Figura 41 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo sobressíncrono com fator de potência capacitivo.	94
Figura 42 – Fluxo de potência ativa e mecânica no sistema de geração convencional, modo subsíncrono, considerando o conversor de potência sem perdas.....	97
Figura 43 – Fluxo de potência ativa e mecânica no sistema de geração convencional, modo sobressíncrono, considerando o conversor de potência sem perdas.	98
Figura 44 – Circuitos equivalentes para o gerador síncrono para definição da reatância síncrona (a) em função das quedas de tensões e (b) em função dos parâmetros. ..	102
Figura 45 – Diagrama fasorial para regime permanente do gerador síncrono (a) em função das quedas de tensão e (b) em função dos parâmetros (JORDÃO, 1980).	102

Figura 46 – Circuito equivalente para o GEADA conforme conceito de gerador síncrono...	103
Figura 47 – Circuito equivalente do circuito do rotor do GEADA (a) circuito equivalente (b) equivalente Thèvenin e (c) equivalente como gerador síncrono.	104
Figura 48 – Circuito equivalente do circuito do estator do GEADA (a) circuito equivalente (b) equivalente Thèvenin e (c) equivalente como gerador síncrono.	105
Figura 49 – Circuito equivalente para o conceito de reatância síncrona do GEADA (a) com parâmetros e tensão induzida a partir do rotor e (b) com a reatância síncrona.....	106
Figura 50 – Diagrama fasorial, ângulo de potência e fator de potência para o GEADA, com o conceito de reatância síncrona.	107
Figura 51 – Curva de magnetização (eo) conceitual de gerador síncrono (JORDÃO, 1984).	109
Figura 52 – Circuito equivalente para a curva de regiões de operação do rotor	111
Figura 53 – Representação gráfica conceitual da tensão do rotor em função da corrente do estator com o centro e o raio.	112
Figura 54 – Região de operação (hachurada) para tensão do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo síncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).	113
Figura 55 – Região de operação (hachurada) para tensão do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo subsíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).	114
Figura 56 – Região de operação (hachurada) para tensão do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo sobressíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).	114
Figura 57 – Região de operação (hachurada) para as potências da carga do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo síncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).	115
Figura 58 – Região de operação (hachurada) para as potências da carga do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo subsíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).	116
Figura 59 – Região de operação (hachurada) para as potências da carga do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo sobressíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).	116
Figura 60 – Curva de capacidade de geradores síncronos genérica – relação das diversas componentes com o sistema de geração convencional. (LEMOS, 2006).....	118
Figura 61 – Circuitos equivalentes para (a) o gerador síncrono e (b) o conceito de reatância síncrona e tensão interna do GEADA.....	121
Figura 62 – Diagrama fasorial do GEADA como gerador síncrono, com a reatância síncrona, tensão interna e tensão e corrente no estator.	121
Figura 63 – Diagrama fasorial do GEADA com o esboço dos trechos relativos aos limites das correntes do rotor e do estator.	123
Figura 64 – Curva de capacidade proposta para o GEADA.....	124
Figura 65 – Foto do (a) estator do GEADA e (b) detalhe das bobinas do estator.	128
Figura 66 – Foto do (a) rotor GEADA e (b) detalhe das bobinas do rotor.....	128
Figura 67 – Foto dos (a) anéis e escovas do GEADA e (b) detalhe dos anéis com indicação do anel novo.	129
Figura 68 – Foto da (a) e (b) montagem do rotor no interior do estator do GEADA.....	129
Figura 69 – Diagrama esquemático da bancada de testes do GEADA.	133
Figura 70 – Foto da bancada de testes do GEADA.....	133
Figura 71 – Foto da bancada de testes do GEADA e quadros de comando do motor CC e do inversor de frequência.	134
Figura 72 – Terminais do estator do GEADA.....	137

Figura 73 – Terminais do rotor do GEADA.....	137
Figura 74 – Gráfico para cálculo das perdas por atrito e ventilação no ensaio a vazio do GEADA.	141
Figura 75 – Impedâncias de acordo com a posição angular do rotor em relação ao estator, com os valores em Ω	144
Figura 76 – Montagem da bancada para o ensaio da curva de magnetização do GEADA com o rotor alimentado com corrente contínua.	150
Figura 77 – Esquemas de ligação dos terminais do enrolamento do rotor para o ensaio da curva de magnetização em corrente contínua (a) esquema 1 e (b) esquema 2.	150
Figura 78 – Curvas de magnetização do GEADA com corrente contínua no rotor, comparando-se os esquemas de ligação 1 e 2 dos terminais do rotor.	152
Figura 79– Curvas de magnetização do GEADA com corrente contínua no rotor, comparando-se os esquemas de ligação 1 e 2 dos terminais do rotor.	153
Figura 80 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com o esquema de ligação 2 para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo segundo ponto e (d) o vigésimo quarto ponto.	154
Figura 81 – Montagem da bancada para o ensaio da curva de magnetização do GEADA com o rotor alimentado com corrente alternada.	155
Figura 82 – Curvas de magnetização do GEADA com corrente alternada no rotor.	157
Figura 83 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento do conversor de potência 16kHz e $s= +10\%$ para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo ponto e (d) o décimo quinto ponto.	158
Figura 84 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento do conversor de potência 4kHz e $s= +10\%$ para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo ponto e (d) o décimo quinto ponto.	159
Figura 85 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento 4kHz e $s= -10\%$ para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo ponto e (d) o décimo quinto ponto.	160
Figura 86 – Curvas de magnetização do GEADA com corrente contínua e corrente alternada no rotor.....	161
Figura 87 – Montagem da bancada para o ensaio da curva de regulação do GEADA.	162
Figura 88 – Curvas conceituais de regulação para um gerador síncrono genérico (JORDÃO, 1980).	163
Figura 89 – Curva de regulação para o GEADA com o escorregamento $s= +10\%$	164
Figura 90 – Curva de carga (tensão e frequência geradas) com fator de potência unitário do GEADA para os escorregamentos de $s= +10\%$, $s= +5\%$ e $s= -10\%$	165
Figura 91 – Zoom da curva de carga (tensão e frequência geradas) de fator de potência unitário do GEADA para os escorregamentos de $s= +10\%$, $s= +5\%$ e $s= -10\%$, mostrando a pequena variação da tensão entre $+1\%$ e $-0,5\%$	165
Figura 92 – Curva de carga de fator de potência unitário do GEADA para os escorregamentos de $s= +10\%$, $s= +5\%$ e $s= -10\%$	167
Figura 93 – Curva comparativa dos conjugados do GEADA para os escorregamentos de $s= +10\%$, $s= +5\%$ e $s= -10\%$, para fins de análise qualitativa.	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da geração com velocidade fixa com a geração com a velocidade variável para uma Usina Hidrelétrica (SAIDEL, 1997).	32
Tabela 2 - Comparação das perdas no ferro em relação às perdas totais (ESKANDER, 1996)	36
Tabela 3 – Dados de placa originais do motor e dados do GEADA após o “retrofitting”	126
Tabela 4 – Dados de placa do inversor de frequência da SEW utilizado para os ensaios e operação do GEADA.	131
Tabela 5 - Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização do GEADA.....	136
Tabela 6 - Relação de Transformação entre o estator e o rotor do GEADA.	138
Tabela 7 - Relação de Transformação entre o rotor e o estator do GEADA.	138
Tabela 8 - Resistências do rotor e do estator do GEADA medidas com ohmímetro.	140
Tabela 9 - Grandezas medidas no ensaio a vazio do GEADA.	141
Tabela 10 - Grandezas medidas no Ensaio a vazio do GEADA com o rotor na velocidade síncrona.	142
Tabela 11 - Grandezas medidas no Ensaio com o rotor parado e aberto.....	142
Tabela 12 – Valores medidos de tensão e corrente nos terminais do estator variando-se a posição angular entre o rotor bloqueado e o estator do GEADA.	143
Tabela 13 - Grandezas medidas no ensaio com o rotor bloqueado	144
Tabela 14 - Iterações para o cálculo dos parâmetros do GEADA, a partir do ensaio a vazio e do ensaio com o rotor bloqueado.	146
Tabela 15 - Iterações para o cálculo dos parâmetros do GEADA a partir do ensaio a vazio com o rotor à velocidade síncrona e do ensaio com o rotor bloqueado.....	147
Tabela 16 - Iterações para o cálculo dos parâmetros do GEADA a partir do ensaio com o rotor aberto e à velocidade síncrona e do ensaio com o rotor bloqueado.....	147
Tabela 17 - Demais parâmetros calculados a partir dos ensaios a vazio e com o rotor bloqueado.....	148
Tabela 18 - Parâmetros calculados para o circuito equivalente do GEADA.....	148
Tabela 19 - Instrumentos utilizados no ensaio das curvas de magnetização do GEADA.	149
Tabela 20 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente contínua, esquema de ligação 1.	151
Tabela 21 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente contínua, esquema de ligação 2.	152
Tabela 22 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento em 16kHz e $s = + 10\%$	156
Tabela 23 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento em 4kHz e $s = + 10\%$	156
Tabela 24 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento em 4kHz e $s = - 10\%$	156
Tabela 25 - Valores medidos no ensaio da curva de regulação do GEADA, com escorregamento $s = + 10\%$	163

Tabela 26 - Valores medidos no ensaio da curva de carga (tensão e frequência geradas) com fator de potência unitário, do GEADA, para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$	164
Tabela 27 - Valores medidos para a corrente de carga e corrente do rotor, no ensaio da curva de carga com fator de potência unitário, do GEADA, para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$, mostrando a pequena variação da tensão entre $+1\%$ e $-0,5\%$	166

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ANSI: *American National Standard Institute*;

CEEE: Companhia Estadual de Energia Elétrica;

f.e.m.: força eletromotriz;

f.m.m.: força magnetomotriz;

GEADA: Gerador assíncrono de dupla alimentação, o gerador foco desse estudo;

IEEE: *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*;

LMEAE: Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia, da
UFRGS;

rms: a média quadrática (*root mean square*) de uma grandeza;

“V/f”: modo de controle escalar do inversor de frequência comercial que mantém constante a relação entre a tensão e a frequência fornecida ao motor de indução;

LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{sincrona}$: frequência síncrona da tensão gerada nos terminais do gerador, em [Hz];

$f_{campo_girante}$: frequência do campo girante no gerador, em [Hz];

f_{rotor} : frequência correspondente à velocidade de rotação do rotor, em [Hz];

I_1 : módulo da corrente do estator, em [A];

V_2 : módulo da tensão do rotor, em [V];

“dq0” : variáveis representativas da máquina elétrica a partir da transformação de Park;

α, β : coordenadas usadas no modelo semelhante ao modelo “dq0”;

$fas, fbs, fcs, fqs, fds, \delta, \omega$: coordenadas genéricas para relação da transformação de Park;

R'_x : resistência equivalente para o conversor de potência, em [Ω];

a : relação de transformação da tensão do estator para a tensão do rotor, adimensional;

I'_2 : módulo da corrente do rotor referida ao estator, em [A];

V_1 : módulo da tensão de saída dos terminais do estator, em [V];

P_M : potência mecânica no eixo, em [W];

r_i : resistência correspondente às perdas no ferro, em [Ω];

I_{1a} : módulo da corrente no estator, em [A];

V_{2a} : módulo da tensão do rotor, referida ao estator, em [V];

\vec{V}_s : fasor tensão do estator, para o modelo do GEADA em regime permanente, em [V];

\vec{V}_r : fasor tensão do rotor, para o modelo do GEADA em regime permanente, em [V];

R_s : resistência do estator, para o modelo do GEADA em regime permanente, em $[\Omega]$;

R_r : resistência do rotor, para o modelo do GEADA em regime permanente em $[\Omega]$;

R_{fe} : resistência correspondente às perdas no ferro, para o modelo do GEADA em regime permanente, em $[\Omega]$;

X_s : reatância de dispersão do estator, para o modelo do GEADA em regime permanente, em $[\Omega]$;

X_r : reatância de dispersão do rotor, para o modelo do GEADA em regime permanente, em $[\Omega]$;

X_m : reatância de magnetização, para o modelo do GEADA em regime permanente, em $[\Omega]$;

\vec{I}_s : fasor corrente do estator, para o modelo do GEADA em regime permanente, em [A];

\vec{I}_r : fasor corrente do rotor, para o modelo do GEADA em regime permanente, em [A];

\vec{I}_m : fasor corrente de magnetização, para o modelo do GEADA em regime permanente, em [A];

θ_{V_r} : ângulo de fase da tensão do rotor, em [rad];

\vec{E} : fasor tensão interna (f.e.m. induzida), em [V];

ω_s : velocidade síncrona, em [rad/s];

ω_r : velocidade do rotor, em [rad/s];

\vec{V}_{Ths} : fasor tensão equivalente do modelo Thèvenin para o estator, em [V];

\vec{V}_{Thr} : fasor tensão equivalente do modelo Thèvenin para o rotor, em [V];

Z_{Ths} : impedância equivalente do modelo Thèvenin para o estator, em $[\Omega]$;

Z_{Thr} : fasor da tensão do modelo Thèvenin para o rotor, em $[\Omega]$;

$W_{entrada}$: energia de entrada no sistema de geração, em [J];

$W_{saída}$: energia de saída no sistema de geração, em [J];

W_{carga} : energia disponível para a carga do sistema de geração, em [J];

W_{perdas} : energia de perdas ôhmicas no sistema de geração, em [J];

$W_{magnética}$: energia relativa ao circuito magnético no sistema de geração, em [J];

P_{mec_3} : potência ativa total mecânica entregue pela máquina motriz ao gerador, descontadas as perdas, em [W];

P_{mec} : potência ativa total mecânica entregue pela máquina motriz ao gerador, para uma fase do circuito, em [W];

P_{escorr} : potência ativa para compensação do escorregamento, para uma fase do circuito, em [W];

P_{Joule_r} : potência ativa consumida pelas perdas ôhmicas por efeito Joule no rotor, para uma fase do circuito, em [W];

P_{Joule_s} : potência ativa consumida pelas perdas ôhmicas por efeito Joule no estator, para uma fase do circuito, em [W];

P_{carga} : potência ativa disponível à carga ou sistema elétrico ao qual o GEADA está conectado, para uma fase do circuito, em [W];

P_{ferro} : potência ativa consumida pelas perdas no ferro do gerador, para uma fase do circuito, em [W];

P_{perdas_mec} : potência consumida pelas perdas mecânicas por atrito e ventilação, para uma fase do circuito, em [W];

$P_{máq_motriz}$: potência mecânica bruta entregue ao sistema pela máquina motriz, para uma fase do circuito, em [W];

P_g : potência ativa do entreferro do gerador, conceito da soma das potências mecânica e de compensação do escorregamento que flui para o estator, para uma fase do circuito, em [W];

P_{rotor} : potência ativa fornecida pelo conversor de potência ao rotor, para uma fase do circuito, em [W];

P_{atrito} : potência mecânica consumida pelo atrito nos mancais do eixo, em [W];

$P_{ventilação}$: potência mecânica consumida pela ventilação, em [W];
 $Q_{conv_pot_3}$: potência reativa fornecida pelo conversor de potência ao rotor, em [var];
 Q_{conv_pot} : potência reativa fornecida pelo conversor de potência ao rotor para uma fase do circuito, em [var];
 $Q_{dispersão_r}$: somatório da potência reativa de dispersão do rotor, para uma fase do circuito, em [var];
 Q_{acopl_magn} : potência envolvida no acoplamento magnético através da reatância de magnetização, para uma fase do circuito, em [var];
 $Q_{dispersão_s}$: potência de dispersão do circuito do estator, para uma fase do circuito, em [var];
 Q_{carga} : potência reativa da carga ou do sistema elétrico ao qual está conectado o GEADA, para uma fase do circuito, em [var];
 e : f.e.m. induzida num enrolamento, em [V];
 N : número de espiras do enrolamento, adimensional;
 φ : fluxo magnético, em [Wb];
 B : indução magnética, em [T];
 v : velocidade do condutor em relação ao fluxo que este atravessa, em [m/s];
 ω_{eixo} : velocidade de rotação do eixo mecânico, em [rad/s];
 T_m : conjugado mecânico, em [N.m];
 T_e : conjugado eletromagnético, em [N.m];
 $F_{estator}$: força magnetomotriz relativa ao estator, em [A.e];
 F_{rotor} : força magnetomotriz relativa ao rotor, em [A.e];
 δ : ângulo de potência, em [rad];
 \vec{I}_{carga} : fasor corrente fornecida pelo gerador à carga, em [A];
 R_{carga} : resistência da carga, em [A];
 \vec{I}_r^* : conjugado do fasor corrente do rotor, em [A];
 P_g_s : potência ativa que é transferida ao estator a partir do entreferro, em [W];
 P_g_r : potência ativa que é transferida do rotor ao entreferro, em [W];

$P_{estator}$: potência ativa gerada no estator, em [W];
 $P_{entrada_conv_pot}$: potência ativa de entrada do conversor de potência, em [W];
 $P_{saida_conv_pot}$: potência ativa de saída do conversor de potência, em [W];
 θ_E : ângulo de fase da tensão induzida, em [rad];
 θ_{I_r} : ângulo de fase da corrente do rotor, em [rad];
 Φ_m : fluxo magnético, em [Wb];
 FP : fator de potência da corrente da carga, adimensional;
 \vec{S} : fasor potência aparente, em [VA];
 P : potência ativa, em [W];
 Q : potência reativa, em [W];
 Z : impedância, em [Ω];
 η : rendimento, em [%];
 $\eta_{subsíncrono}$: rendimento no modo operativo subsíncrono, em [%];
 $\eta_{sobressíncrono}$: rendimento no modo operativo sobressíncrono, em [%];
 x_m : reatância de magnetização do gerador síncrono, em [Ω];
 x_l : reatância de dispersão do gerador síncrono, em [Ω];
 χ_s : reatância síncrona do gerador síncrono, em [Ω];
 \vec{E}_s : fasor tensão induzida no estator a partir do rotor, em [V];
 \vec{E}_r : fasor tensão induzida no rotor a partir do estator, em [V];
 \vec{E}_a : fasor queda de tensão na resistência da armadura do gerador síncrono, em [V];
 R_a : resistência de armadura do gerador síncrono, em [V];
 \vec{E}_f : fasor tensão de campo do gerador síncrono, em [V];
 \vec{E}_g : fasor tensão induzida no entreferro, em [V];
 $\vec{\Phi}_f$: fasor fluxo magnético, em [Wb];
 \vec{I}_f : fasor corrente de campo do gerador síncrono, em [A];
 \vec{V}_t : fasor tensão nos terminais do gerador síncrono, em [V];

R_{T1} : resistência na temperatura $T1$, em $[\Omega]$;

R_{T2} : resistência na temperatura $T2$, em $[\Omega]$;

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de dissertação insere-se no contexto atual do Sistema Elétrico Brasileiro, onde se verifica uma grande preocupação em se utilizar, com as melhores eficiência e eficácia possível, a energia disponível na natureza com o emprego de melhores tecnologias.

É neste momento em que se buscam novas maneiras de se gerar energia elétrica a partir de fontes naturais não-convencionais (solar, ventos, marés, hidrogênio, etc.) e, principalmente, aprimoram-se os aproveitamentos das fontes assim chamadas de clássicas (hidráulica e térmica), que se observa o aumento do interesse pela geração de energia elétrica com velocidade variável e frequência constante. Com isso, vislumbram-se e viabilizam-se dos pontos de vista técnico, econômico e de eficiência, os aproveitamentos energéticos que operam em tais condições.

1.1 MOTIVAÇÃO

A máquina síncrona tornou-se a base dos sistemas de geração de energia elétrica devido as suas características operacionais e pelo fácil controle de frequência e tensão geradas e também da potência reativa entregue ao sistema.

No contexto da geração hidrelétrica, porém, a necessidade de se manter constante a velocidade do conjunto turbina-gerador resulta, muitas vezes, numa potência gerada inferior àquela disponível na turbina pela variação do nível de água do reservatório e numa quantidade de energia produzida menor. Ou seja, como uma das principais características das turbinas hidráulicas é a existência de uma potência ótima para cada valor do nível do reservatório, a potência fornecida pela turbina nestes casos não seria a máxima disponível, pela necessidade de se manter uma velocidade constante do conjunto, para controle da frequência constante. Desta forma, o aproveitamento da energia total proveniente da água que passou pela turbina não seria o máximo possível.

Também na área da geração eólica ocorre algo muito semelhante e menos controlável, pois, como o reservatório, no caso anterior, varia de nível, os ventos também possuem perfis diferentes de velocidade para cada época do ano. Assim, com a utilização de máquinas de velocidade constante conectadas às turbinas eólicas, não se verifica o melhor aproveitamento da potência disponível dos ventos, conforme a sazonalidade, ou então são

necessários equipamentos mecânicos ou eletrônicos de alto custo para obter-se a frequência desejada, viabilizando assim a produção de energia elétrica nas condições exigidas.

Já com geradores projetados para operarem com velocidade variável, mantendo-se a tensão gerada com frequência constante, este aproveitamento máximo da energia disponível, quer seja da água, ou dos ventos, pode ser alcançado de forma mais imune a sazonalidade.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho de dissertação é contribuir para o estudo do gerador assíncrono de dupla alimentação, referido neste trabalho como GEADA, inserido num sistema de geração de energia elétrica capaz de operar, em regime permanente, em condições de velocidade variável da máquina motriz e manter sob controle a tensão e frequência geradas.

Este objetivo encontra-se fundamentado no estudo teórico do GEADA, na implantação de uma bancada de testes no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE), nos ensaios para determinação dos parâmetros da máquina para validação do seu estudo teórico, na análise do GEADA sob a óptica de máquina síncrona na forma que é vista pelo sistema, no desenvolvimento de uma proposta de curva de capacidade de operação ("capability curve") como a utilizada na operação dos geradores síncronos, na análise da questão de rendimento e de curva de excitação do GEADA e, complementarmente, da definição de diretrizes para seleção desse gerador e seu conversor de potência.

Uma contribuição pretendida por este trabalho está no desenvolvimento de uma modelagem da máquina para melhor explicar, particularmente do ponto de vista didático, o seu funcionamento e, ao mesmo tempo, dar subsídios que permitam aperfeiçoar a sua operação como gerador assíncrono de dupla alimentação.

Este trabalho é parte integrante do projeto de pesquisa aprovado para o Programa de P&D da CEEE sob o título "Estudo e Desenvolvimento de Sistema de Geração de Energia Elétrica a partir de Motor de Indução de Rotor Bobinado Excitado por Conversor de Frequência", conduzido no LMEAE desta universidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em três grandes partes: (i) a primeira é a revisão da literatura, com a análise dos trabalhos existentes sobre o tema de gerador assíncrono de dupla

alimentação; (ii) a segunda é o desenvolvimento teórico do modelo de regime permanente, dos equacionamentos, das potências, da análise do GEADA como gerador síncrono e a proposta de adaptação da curva de capacidade dos geradores síncronos e (iii) a terceira apresenta os estudos experimentais realizados com o GEADA, abrangendo a definição de diretrizes para a seleção do gerador assíncrono de dupla alimentação e de seu conversor de potência, os ensaios para caracterização do GEADA, o levantamento da curva de magnetização com velocidade variável, e ensaios do GEADA operando com carga.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A intenção desta revisão bibliográfica é apresentar uma sucinta análise dos trabalhos publicados nos diversos meios científicos sobre a geração assíncrona de velocidade variável e frequência controlada. O estado em que se encontram a tecnologia e os estudos acerca da geração de energia elétrica com velocidade variável é descrito neste capítulo.

Existem diversas denominações nos trabalhos consultados para a máquina assíncrona com rotor bobinado operando com velocidade variável e frequência controlada nos terminais do estator, dependendo da aplicação e da época em que o trabalho foi desenvolvido. Neste trabalho adota-se a denominação “gerador assíncrono de dupla alimentação”, resumido como “GEADA”, considerando-se que a máquina em estudo opera como gerador.

Aqui cabe a observação que alguns autores adotam a denominação de “gerador de indução de dupla alimentação” pela semelhança física que este gerador possui com o motor de indução de rotor bobinado. Porém, ao se utilizar a expressão “gerador assíncrono”, dá-se destaque ao seu princípio de funcionamento, que é exatamente o desatrelamento entre a velocidade de rotação mecânica do rotor e a frequência do campo magnético no entreferro que é visto pelo estator como sendo síncrona.

Existe uma tendência de denominarem-se todos os sistemas de geração de energia elétrica que não transformam uma fonte de energia em energia elétrica diretamente na frequência síncrona de “geração assíncrona”, porém esta tendência não será observada neste trabalho, pelo entendimento que este termo é mais propriamente referido a máquinas rotativas, como é o caso do GEADA.

O conversor de potência conectado aos terminais do rotor serve tanto para impor potência ao circuito deste rotor, alimentação positiva, como extrair potência deste circuito, uma alimentação negativa, conforme o modo de operação do gerador.

2.1 PANORAMA GERAL

A capacidade das máquinas assíncronas de dupla alimentação em terem a sua rotação ajustada é conhecida desde o início do século XX, apresentando já neste período algumas aplicações específicas na indústria, principalmente em esteiras de transporte com diversos motores. Alguns trabalhos já contemplavam os estudos para este tipo de aplicação das máquinas assíncronas, como (CONCORDIA, 1942).

A configuração composta por uma máquina assíncrona com seu rotor bobinado conectado a um inversor e este a um retificador de forma que seja possível controlar a tensão gerada nos terminais e sua frequência, aproveitando-se também a energia que flui do rotor para o sistema ou carga, conhecida como “slip energy”, foi desenvolvida no início da década de 1960, conforme (KRAUSE, 1988). Já a aplicação destas máquinas para a geração de energia só se tornou industrialmente viável com o desenvolvimento e uso da eletrônica de potência nas duas últimas décadas, o que possibilitou a utilização de conversores de frequência para controle da excitação do enrolamento de campo no rotor.

Desde a década de 1960 a preocupação dos pesquisadores e empresas que empregam esta tecnologia foi o desenvolvimento de sistemas cada vez mais avançados, com menores perdas, menores custos, melhores controles dinâmicos, melhores projetos das máquinas e dos sistemas auxiliares que os compõem. Com isto, têm-se aumentadas as possibilidades de emprego desta tecnologia nos sistemas elétricos, tanto para a geração de energia elétrica confiável como no controle da estabilidade das linhas de transmissão.

A topologia básica do sistema de geração proposto é apresentada na Figura 1, onde aparecem o gerador assíncrono de dupla alimentação e o conversor de potência conectado ao enrolamento do rotor.

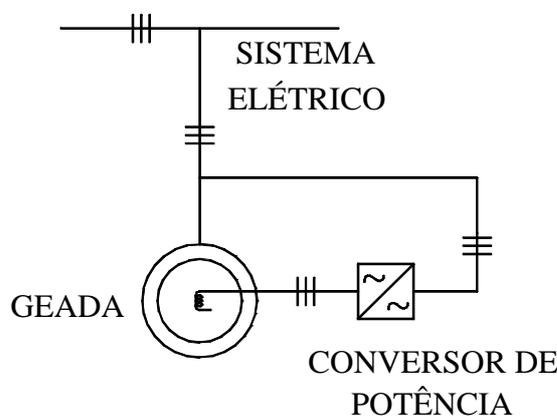


Figura 1 – Esquema básico do gerador assíncrono de dupla alimentação.

Diversos trabalhos atestam o sucesso da busca pela viabilidade da geração de energia elétrica a partir de fontes de velocidade variável, como (DJUROVIĆ, 1995) que apresenta resultados práticos comparados aos resultados numéricos, Figura 2.

A conclusão do trabalho de (DJUROVIĆ, 1995) é que a geração de energia elétrica com velocidade variável é viável.

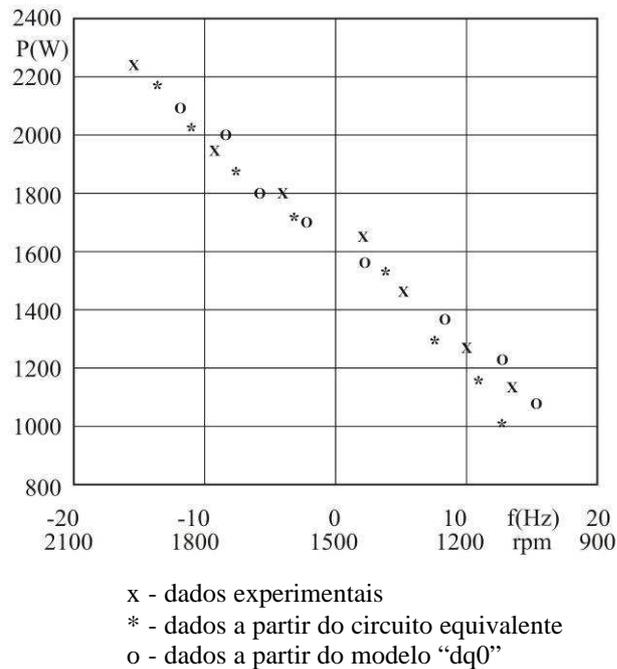


Figura 2 – Comparação entre resultados experimentais e numéricos com escorregamento equivalente de -600 rpm (-40%) a +600rpm (+40%) para uma máquina de 4 pólos e 50Hz (DJUROVIĆ, 1995).

O trabalho de (PENA, 1996) apresenta também resultados práticos comparados a numéricos, a partir de um sistema isolado de geração como o apresentado na Figura 3, e apresenta as equações básicas do modelo "dq0".

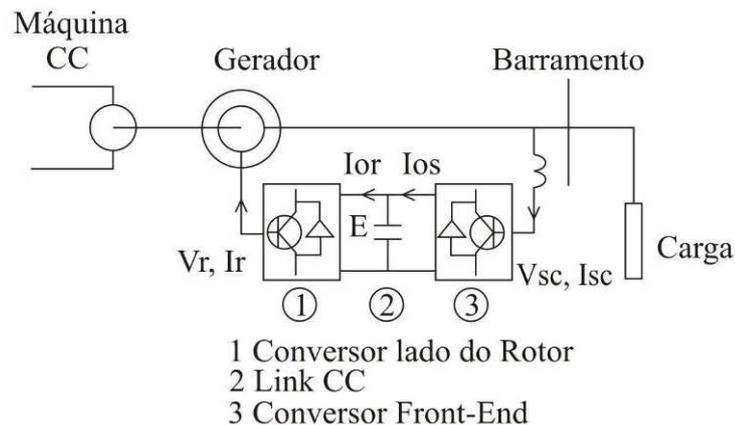


Figura 3 – Sistema isolado de geração de energia elétrica com velocidade variável (PENA, 1996).

A existência de diversas patentes registradas nos Estados Unidos da América, como por exemplo, as representadas por (WESTINGHOUSE, 1981; GE, 2005a; GE, 2005b; HAWAIIAN ELECTRIC COMPANY, INC., 2005; ALOYS WOBLEN, 2005) contemplando sistemas de geração de energia elétrica com velocidade variável também demonstra a

viabilidade e estado da arte de tal tecnologia, empregada principalmente aos sistemas eólicos, pela característica de variabilidade dos ventos.

O trabalho de (BANSAL, 2003) apresenta, por sua vez, uma extensa lista bibliográfica com os trabalhos publicados sobre a aplicação de geradores de indução em sistemas de energia não convencionais. Alguns dos trabalhos referidos nesta lista servem de base a esta análise do estado da arte de geração de energia elétrica com velocidade variável.

2.2 OS DIFERENTES TIPOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A literatura existente sobre o assunto de geração de energia elétrica apresenta diversas configurações de sistemas que operam com frequência da tensão gerada constante, tanto com as máquinas motrizes em velocidade constante ou variável, sendo as principais (SALAMEH, 1986; MEYER, 2000a):

1. Máquina síncrona operando à velocidade constante e conseqüente tensão gerada com frequência constante;
2. Máquina síncrona operando à velocidade variável com seus terminais alimentando um conversor c.a./c.c. e, a partir dele, um conversor de frequência para prover a tensão à frequência constante para o sistema ou carga;
3. Máquina assíncrona auto-excitada por capacitores com velocidade constante e, eventualmente, alimentando um conversor c.a./c.c. e, a partir dele, um conversor de frequência para prover a tensão de frequência constante para o sistema ou carga;
4. Máquina assíncrona em velocidade sobressíncrona com tensão e frequência nos terminais impostas pelo sistema (barramento infinito);
5. Máquina assíncrona de dupla alimentação com o rotor bobinado alimentado por conversor de frequência para compensar a diferença de velocidade entre o campo girante da armadura e a velocidade do rotor;
6. Máquina assíncrona com velocidade variável e frequência constante por controle eletrônico pela carga.

Existem também outras configurações pouco usuais para geração em velocidade variável, em que é possível ter-se a frequência controlada, como, por exemplo, o caso das máquinas síncronas com duas ou mais combinações de número de pólos, apresentando muitas restrições de utilização por trabalhar apenas em determinadas velocidades de rotação.

Um apanhado geral é apresentado no livro de (FARRET, 1999) sobre estes tipos diversos de geração de energia elétrica, completando o elenco com a geração a partir de fonte solar, biogás, óleo diesel, células combustível, incluindo uma análise sobre os benefícios das microcentrais, quaisquer que seja a fonte, para o Meio Ambiente, assunto importante e pertinente ao nosso tempo atual. O autor dá importância, com esse livro, à geração de energia elétrica de forma descentralizada e próxima ao consumo, o que pode contribuir para o desenvolvimento do interior do Brasil, que é rico em fontes de energia e carente de energia elétrica disponível para o consumo. Este livro pode ser aplicado diretamente na prática, pois apresenta conceitos bastante sintéticos e diretos.

Os livros de (CHAPALLAZ, 1992; SIMÕES, 2004) apresentam de forma completa, as teorias e aplicações práticas para o uso do gerador de indução auto-excitado para a geração de energia elétrica. O livro de (CHAPALLAZ, 1992), apresenta o passo a passo da definição, cálculo e instalação de um gerador de indução, podendo ser utilizado por pessoas que não possuam o total conhecimento da engenharia envolvida na geração de energia elétrica. Já o livro de (SIMÕES, 2004) é para ser estudado e aplicado por pessoas que detenham um maior nível de conhecimento de engenharia. Conclui-se, portanto, que estes livros se propõem a atingir públicos diferentes, mas com a intenção de contribuir com a divulgação e ampliação do emprego do gerador assíncrono auto-excitado no campo da geração de energia elétrica.

Nesta dissertação de mestrado, o gerador a ser estudado é o de dupla alimentação, como já foi antecipado no Capítulo 1.

2.3 BENEFÍCIOS DA GERAÇÃO COM VELOCIDADE VARIÁVEL

A aplicação de geradores com velocidade variável pode proporcionar vários benefícios, conforme sugeridos nos trabalhos de (GISH, 1981; BOGALECKA, 1993; MEYER, 2000a; KUNZLER JR., 2003; RÜNCOS, 2005a):

1. Aumento do rendimento global, através do ajuste da rotação do conjunto turbina-gerador de forma a manter a turbina operando na condição de rendimento máximo, independente do nível do reservatório ou vento, ou qualquer outra situação limitante da potência para geradores síncronos;
2. Operação com vazão reduzida que poderá ser resultante de restrições ambientais, inclusão de nova usina hidrelétrica no mesmo rio ou mudança na política de

geração da empresa, e, desta forma, se pode minimizar os problemas ocasionados pela operação da turbina com a vazão reduzida, por exemplo, a cavitação, mantendo-se uma velocidade menor do que os geradores de velocidade constante, por exemplo, as máquinas síncronas, necessitam;

3. Aumento do aproveitamento da capacidade de usinas mais antigas (hidrelétricas ou termelétricas), que por ventura possuam potência disponível maior que a potência para a qual foram originalmente projetadas, ampliando-se a faixa de operação da turbina, e com isto, ter ampliada a faixa de potência fornecida ao sistema elétrico ou carga, além do rendimento melhorado;

4. Melhoria da estabilidade dinâmica, com a possibilidade de poder operar com geradores que possam ter sua velocidade rapidamente alterada, tornando os conjuntos geradores capazes de suportar os transitórios decorrentes de falhas nas linhas de transmissão ou distribuição, sem perder o sincronismo; também a energia cinética armazenada no rotor da máquina pode ser entregue ao sistema por um tempo mais longo, pois se pode compensar a perda de velocidade de diversas formas, melhorando a confiabilidade do sistema de geração;

5. Aumento da capacidade de transmissão e distribuição com o sistema mais estável dinamicamente, sendo possível aumentar o nível de carregamento das linhas de transmissão e distribuição;

6. Aumento da capacidade de entrega de potência ativa, pois os geradores de velocidade variável possuem uma faixa de operação sensivelmente maior que os de velocidade constante (máquinas síncronas), e esta possibilidade, aliada à maior velocidade de resposta para ajuste de potência ativa, possibilita aumentar a capacidade de carga ativa e diminuir as oscilações de frequência nos sistemas de potência;

7. Capacidade de operação com grandes variações de altura líquida dos reservatórios, viabilizando usinas que possuem grandes variações do nível de seus reservatórios, compatibilizando o projeto da turbina com estas variações; considerando um cenário de racionamento por causa dos baixos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas, trazendo uma melhora do aproveitamento da água dos reservatórios;

8. Benefícios ambientais, pois usinas hidrelétricas com geradores de velocidade variável poderão substituir usinas termelétricas, diminuindo o impacto ambiental em diversas regiões; além disso, existem estudos (MEYER, 2000a) que mostram que com a turbina operando na sua velocidade ótima há uma diminuição da mortalidade dos peixes que passam pelas pás da turbina;

9. Aplicações em fazendas eólicas; considerando-se que a característica principal da geração eólica é a grande variação de velocidade dos ventos, tornando-a mais competitiva, se comparada com outras fontes de energia como a hidráulica e a térmica;

10. Sincronização e paralelismo do gerador com o sistema elétrico realizados de modo rápido sem comprometer a estabilidade do sistema, pelo rápido controle da frequência gerada a partir do sistema conversor de potência conectado ao enrolamento do rotor;

11. O uso do GEADA em sistemas de geração eólica diminui a necessidade de utilização de “caixas de engrenagens ou transmissão” (*gearboxes*) e não utiliza dispositivos eletrônicos de potência no estágio de potência, mas apenas no estágio de excitação (acoplado ao rotor); com isso, o custo é menor, e amplia a sua aplicação em sistemas de maior potência; permite a geração com tensão controlada e frequência constante nos terminais de armadura do gerador dentro de uma faixa razoável de variação de velocidade.

O trabalho de (SAIDEL, 1997) apresenta alguns resultados de pesquisas no Brasil compreendendo fatores econômicos com ênfase na análise de eficiência energética, a partir de simulação de usinas hidrelétricas operando no regime normal, com a velocidade constante da turbina, e no regime de velocidade variável, apresentado na Tabela 1, e a quantificação de impacto ambiental, a partir da análise da redução dos níveis operativos do reservatório, com conseqüências diretas sobre o grau de impacto ambiental do aproveitamento.

Tabela 1 - Comparação da geração com velocidade fixa com a geração com a velocidade variável para uma Usina Hidrelétrica (SAIDEL, 1997).

Energia Diária Rotação Fixa MWh	Fator de Carga	Ganho Anual de Energia (%)	Faixa de Variação da Rotação (%)	
			Superior	inferior
1443	0,75	3,2	-6,1	-17,0
1224	0,75	4,1	-5,5	-17,0
1251	0,65	3,7	-3,9	-17,0
1062	0,65	3,0	-2,4	-17,0
1059	0,65	1,6	-0,2	-12,7

A base da Tabela 1, apresentada em (SAIDEL, 1997), foi a Usina Hidrelétrica Caconde, no Brasil, por ter uma característica bastante propícia à geração de energia elétrica

com velocidade variável, que é o fato de apresentar uma grande variação da queda d'água durante a sua operação, o que é potencialmente maior para este tipo de comparação. O estudo do impacto ambiental foi feito qualitativamente e indica que se poderia ter uma redução na área alagada pelo reservatório de até 6% com a operação das turbinas desta usina em velocidade variável, o que significa também uma diminuição nas obras civis da usina.

O trabalho de (GISH, 1981) apresenta também uma série de benefícios a favor dos sistemas de geração de energia elétrica com velocidade variável empregando geradores assíncronos de dupla alimentação, basicamente iguais aqueles já citados no início desta seção, e apresenta também a avaliação do emprego deste modo de operação em usinas hidrelétricas, sob a óptica de que estes geradores podem ser considerados como geradores síncronos.

2.4 ESTUDOS DE REGIME PERMANENTE DO SISTEMA DE GERAÇÃO

O enfoque desta dissertação de mestrado é o estudo do GEADA em regime permanente, e por isto este assunto é o mais explorado neste capítulo.

O trabalho de (SALAMEH, 1986) compreende o estudo de regime permanente do gerador assíncrono de dupla saída, uma configuração peculiar do gerador assíncrono de dupla alimentação onde o seu rotor é conectado a um inversor de frequência, o lado do rotor possui a função de retificador simplesmente, operando somente no modo sobressíncrono. Os autores usam o conceito de velocidade síncrona e velocidade nominal para dividir os modos de controle do gerador. A velocidade nominal do gerador corresponde ao escorregamento nominal, caso a máquina seja operada como motor de indução com carga nominal no seu eixo. A proposta do trabalho é que o controle deste gerador seja dividido em duas etapas. Quando operando com velocidade acima da velocidade síncrona e abaixo da velocidade nominal, o gerador em questão é controlado como um gerador de indução, com os terminais dos enrolamentos do rotor curto-circuitados. O melhor desempenho desta maneira é verificado quando a velocidade do rotor corresponde ao escorregamento nominal. Uma vez que o rotor tenha uma velocidade maior que a velocidade correspondente ao escorregamento nominal, o gerador é controlado inserindo-se uma resistência variável no circuito do rotor ou, com o mesmo efeito, mudando-se o ângulo de disparo dos tiristores do inversor de frequência acoplado ao rotor. Os autores definem que o efeito do inversor de frequência é de uma resistência variável visto dos terminais do rotor, na forma da equação (1).

$$R_x' = \frac{a \cdot V_1 \cdot \cos \alpha}{I_2'} \quad (1)$$

Sendo R_x' é a resistência variável equivalente, a é a relação de transformação da tensão do estator para a tensão do rotor, V_1 é a tensão do estator, α é o ângulo de disparo dos tiristores e I_2' a corrente do rotor referida ao estator. Concluindo, o trabalho apresenta ainda os resultados dos diversos ensaios em laboratório.

O trabalho de (EL HAGRY, 1989) também traz esta idéia de incorporar os efeitos do conversor de potência através do uso de uma resistência variável, baseada também na equação (1).

No trabalho de (JEONG, 1987), também é proposta a utilização da resistência equivalente em substituição ao inversor de frequência conectado ao rotor, considerando que assim o sistema formado pelo gerador e o inversor de potência constitui uma malha fechada, e considerando que, pelo controle do chaveamento dos tiristores imprimir uma característica de fator de potência unitário ao inversor de frequência. Ao contrário do trabalho de (SALAMEH, 1986), o inversor de frequência está com o seu lado retificador conectado aos terminais do estator, de forma que alimenta o circuito do rotor com uma tensão trifásica de frequência variável. Desta forma, o sistema operará como gerador tanto no modo subsíncrono quanto sobressíncrono, não sendo, porém, possível o aproveitamento da energia do rotor no modo sobressíncrono. Os autores apresentam o equacionamento para regime permanente a partir do circuito equivalente e com o modelo “dq0”, considerando a resistência variável, completando o trabalho com os resultados dos ensaios.

O trabalho de (VICATOS, 1989) apresenta para o gerador assíncrono de dupla alimentação as formas finais do equacionamento das correntes e potências do gerador assíncrono de dupla alimentação para o circuito equivalente, sendo uma das referências fundamentais para esta dissertação de mestrado, como é verificado no capítulo 3.

Em (VICATOS, 1989) a análise dos modos operativos subsíncrono e sobressíncrono, segue por dois caminhos distintos embora cheguem às mesmas conclusões. Buscando uma simplificação, nesta dissertação de mestrado foi apresentada uma forma única para esta análise, que é vista no Capítulo 4.

Os autores de (VICATOS, 1989) apresentam também estratégias de controle para a magnitude e frequência da tensão impressa ao rotor e fazem uma análise do sistema

alimentando uma carga passiva RL. Os resultados de simulação e ensaios são comparados em gráficos que complementam o trabalho.

O trabalho de (TAMURA, 1989) apresenta, a partir das equações diferenciais para o gerador assíncrono de dupla alimentação o modelo para regime permanente, referindo-se a este como uma máquina síncrona. Apresenta uma forma alternativa de análise do circuito equivalente, apresentando também as equações para as tensões induzidas no entreferro.

Uma preocupação dos autores é com a incorporação das perdas no ferro através da consideração da resistência das perdas magnéticas, normalmente considerada infinita no circuito equivalente. Uma análise do fluxo de potência é apresentada, considerando que o conversor de potência conectado ao rotor não está alimentado pela potência gerada nos terminais do estator.

Outro enfoque do trabalho de (TAMURA, 1989), as curvas “V”, será visto na seção 2.11.

O trabalho de (ÇADIRCI, 1992) apresenta de maneira bastante didática o assunto do estudo de regime permanente, com utilização do circuito equivalente do gerador assíncrono de dupla alimentação para o desenvolvimento do seu modelo de estudo.

Os autores apresentam de maneira mais completa a mesma idéia de se dividir o modo de operação sobressíncrono em duas regiões, como é feito em (SALAMEH, 1986), esclarecendo o porquê desta divisão. Nesta etapa são apresentadas as características de cada grandeza em cada modo operativo.

Os autores de (ÇADIRCI, 1992) consideram o fluxo de carga no sistema sem que o conversor de potência conectado ao rotor esteja alimentado pela potência gerada nos terminais.

O trabalho segue com a análise do chaveamento dos dispositivos estáticos e da inércia do seu desligamento, chamado de “*overlap*” e, segundo os autores, o conversor de potência deve ter a comutação forçada, utilizando dispositivos adequados, de forma que possa garantir os benefícios de fornecer potência reativa capacitiva ao rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação.

Também afirmam os autores que a influência das frequências harmônicas do conversor de potência é muito maior que das perdas no ferro, sugerindo que se desprezem estas últimas, mas não as primeiras.

Diversas outras considerações sobre o sistema de geração e sobre a turbina eólica são feitos neste trabalho, tornando-o um dos mais completos e úteis para os estudos que se fazem nessa dissertação de mestrado.

No trabalho de (ESKANDER, 1996) encontram-se as formas finais das equações desenvolvidas para os estudos de regime permanente, sendo que o autor explora a questão das perdas no ferro, inclusive apresentando percentuais resumidos na Tabela 2, para o modo subsíncrono.

Tabela 2 - Comparação das perdas no ferro em relação às perdas totais (ESKANDER, 1996)

Escorregamento	Ângulo de Fase da tensão do rotor	Percentual de erro
0,05	290°	34%
	350°	58%
0,1	340°	36%
	0°	78%

O trabalho de (EDVARDESEN, 1997) apresenta como diferencial dos demais artigos a análise do fluxo de potência e considerações para o dimensionamento do conversor de potência.

Os autores de (REFOUFI, 1999), consideram o gerador assíncrono de dupla alimentação como um gerador de indução estático Kramer, e utilizam na sua análise as equações de estado para o estator e o rotor e o conversor de potência. Ao final completam o trabalho as formas de ondas das tensões e correntes simuladas.

Em (MÜLLER, 2000), tem-se a análise comparativa dos sistemas de geração assíncrona do tipo auto-excitado, do gerador conectado ao sistema elétrico através de um inversor de frequência e do gerador assíncrono de dupla alimentação. Os autores justificam a aplicação do gerador assíncrono de dupla alimentação para controle de potência reativa pelo seu funcionamento como um gerador síncrono.

Os autores apresentam o modelo dinâmico do gerador assíncrono de dupla alimentação, e a partir deste fazem a análise do regime permanente apresentando também uma análise das potências no gerador que será utilizada nessa dissertação de mestrado.

Em (LOBOSCO, 2001) encontra-se uma explicação didática do que é apresentado em livros usados no ensino de máquinas elétricas como (FITZGERALD, 1990; SAY, 1983; HINDMARSH, 1984), a representação em separado dos componentes do circuito equivalente conforme a sua correspondência às perdas ativas no rotor ou à potência mecânica. Esta idéia é usada nessa dissertação de mestrado, no Capítulo 3.

Os autores de (DATTA, 2002) fazem uma análise descritiva dos sistemas de geração de energia elétrica com velocidade variável, com considerações sobre cada um deles,

complementando com uma análise do sistema de captura da energia que compõem cada um destes sistemas estudados.

Uma proposta diferente dos demais trabalhos citados nesta seção sobre estudos de regime permanente do gerador assíncrono de dupla alimentação é apresentada no trabalho de (FERREIRA, 2004) e refere-se à aplicação deste gerador como compensador síncrono. Os autores exploram o controle do fator de potência do gerador a partir da análise do circuito equivalente clássico aplicado ao gerador assíncrono de dupla alimentação, através das equações das potências ativa e reativa. Pelas equações podem-se tirar conclusões sobre como se dá o controle do fator de potência através da magnitude e ângulo de fase da tensão impressa ao rotor. A Figura 4 apresenta a curva que relaciona a potência reativa com a tensão impressa ao rotor.

O trabalho segue apresentando o estudo dinâmico, usando o modelo “dq0” ou transformada de Park como base, e sugere a aplicação do controle vetorial para o conversor de potência. Por fim, estão o controle da potência reativa e os resultados de simulação e ensaios. Lendo-se o artigo, tem-se a impressão que os autores utilizaram um inversor de frequência tradicional como conversor de potência.

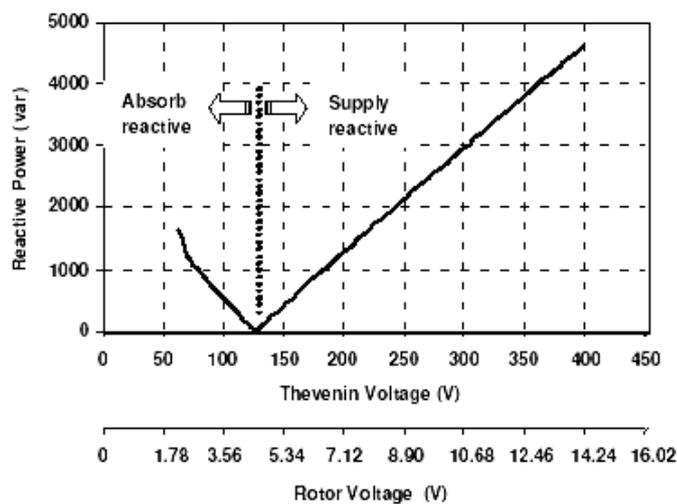


Figura 4 – Curva da potência reativa em relação a tensão do rotor para uma máquina de 3hp (FERREIRA, 2004).

Visando contribuir com a melhoria da conversão de energia de sistemas eólicos utilizando o gerador assíncrono de dupla alimentação, o trabalho de (SMITH, 2005) abrange o modelo de regime permanente do gerador assíncrono de dupla alimentação incluindo um algoritmo para a determinação da tensão impressa ao rotor pelo conversor de potência e o ângulo de fase entre esta tensão e a tensão gerada a partir do conhecimento do conjugado

mecânico, da velocidade de rotação e a tensão nos terminais do estator. No caso desta dissertação de mestrado, propõem-se outros algoritmos, como, por exemplo, conhecendo-se a tensão e a corrente da carga e a velocidade de rotação chega-se aos valores do conjugado mecânico e a amplitude e ângulo de fase da tensão do rotor. Isto é tratado no Capítulo 4.

O trabalho apresenta ainda o estudo transitório e os resultados de ensaios experimentais do sistema, como o apresentado na Figura 5, onde o conjugado mecânico é considerado constante e a corrente no rotor também o é.

A máquina utilizada no trabalho de (SMITH, 2005) para os estudos experimentais possui 7,5kW e 6 pólos.

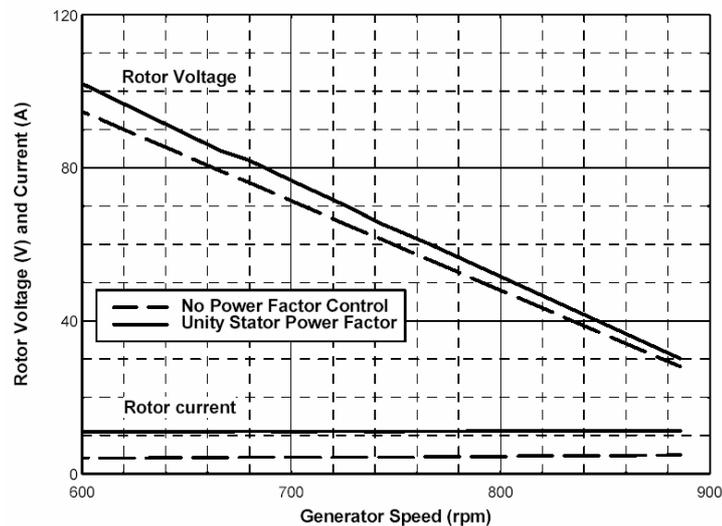


Figura 5 – Curvas da corrente e da tensão do rotor em função da velocidade para uma máquina de 7,5kW, 50Hz e 6 pólos (SMITH, 2005).

A Figura 6 compara o estudo teórico de regime permanente e os ensaios onde foi implementado o controle dinâmico. Note-se que as retas são coincidentes, o que mostra que o modelo em regime permanente simplificado, sem considerar as perdas no ferro, pode ser aplicado aos estudos de regime permanente do gerador assíncrono de dupla alimentação.

Faltou verificar o porque do trabalho de (ESKANDER, 1996) apresentar resultados tão diferentes do obtido por (SMITH, 2005), quando se comparam o gráfico da Figura 6 com os valores da Tabela 2. No estudo destes dois artigos, não ficou clara a diferença entre eles, pois partem do mesmo circuito equivalente para o gerador assíncrono de dupla alimentação e utilizam praticamente as mesmas equações de regime permanente.

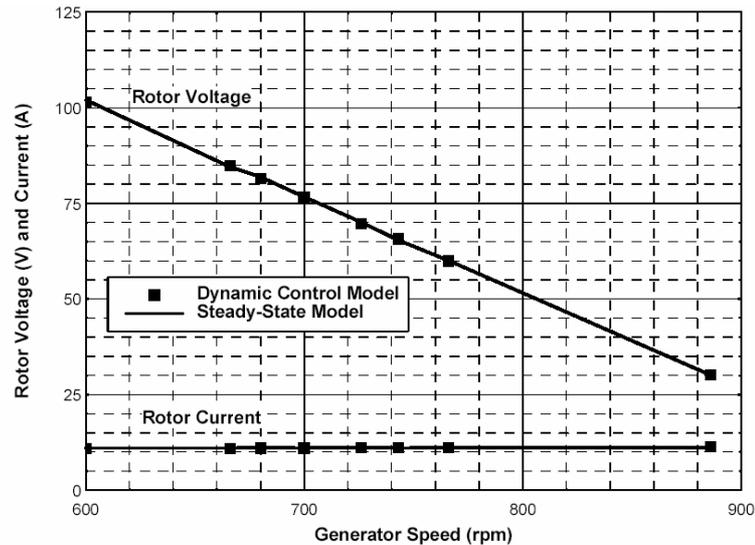


Figura 6 – Comparação entre o estudo teórico de regime permanente e o controle dinâmico implementado nos ensaios para uma máquina de 7,5kW, 50Hz e 6 pólos (SMITH, 2005).

Também o trabalho de (ÇADIRCI, 1992) cita que as perdas no ferro devem ser consideradas nos estudos de regime permanente, mas não apresenta resultados experimentais conclusivos.

2.5 ESTUDOS DINÂMICOS DO SISTEMA DE GERAÇÃO

Os estudos dinâmicos dos sistemas de geração de energia elétrica com velocidade variável com a aplicação de gerador assíncrono de dupla alimentação são explorados pelos trabalhos (KRAUSE, 1988; VICATOS, 1991; BOGALECKA, 1993; DJUROVIÉ, 1995; PENA, 1996; RUPPERT, 1997; DUNDING, 2000; FEIJÓO, 2000; KAZACHKOV, 2004; SEMAN, 2004; FERNÁNDES, 2005; GAGNON, 2005; ÇADIRCI, 2005; GONZAGA, 2005).

O trabalho de (BOGALECKA, 1993) apresenta o estudo dinâmico do gerador assíncrono de dupla alimentação conectado a uma rede onde se encontra um gerador síncrono. O autor usa as equações no seu modo clássico e apresenta diversos resultados gráficos para comprovar o seu estudo de transitório.

Os trabalhos de (KRAUSE, 1988; VICATOS, 1991; DJUROVIÉ, 1995; PENA, 1996; RUPPERT, 1997; FEIJÓO, 2000;) apresentam as equações utilizadas para descrever a máquina assíncrona de dupla alimentação a partir da transformação de variáveis, do modelo de grandezas trifásicas reais da máquina, tensão e corrente para o modelo inicialmente desenvolvido por Park para os geradores síncronos, conhecido como teoria das duas reações,

e posteriormente como modelo “dq0” (PARK, 1929). Estes trabalhos apresentam as formas finais das equações do modelo “dq0”, encontrando-se nos livros de (KRAUSE, 1995; ONG, 1998; LYSHEVSKI, 2000) o desenvolvimento base para este estudo.

O modelo “dq0” é uma das inúmeras transformações de variáveis que são usadas nos estudos de máquinas elétricas. Em (KRAUSE, 1995) são citadas as transformadas de Park, Stanley, Kron e de Brereton, como sendo, na realidade, casos particulares de uma transformação geral desenvolvida em (KRAUSE, 1965). Esta transformação refere as variáveis do estator e do rotor da máquina (tensões, correntes e fluxos concatenados) a uma referência de eixos que rotacionam a uma velocidade angular arbitrária, podendo inclusive ser nula (referência estacionária). Assim simplifica-se a análise da máquina assíncrona por eliminar-se a influência da variação no tempo sobre as indutâncias. Esta transformação ficou conhecida como Sistema de Eixos de Referência Arbitrária, ou originalmente do inglês, “arbitrary reference frame” (KRAUSE, 1965), conforme a Figura 7. Para a análise dinâmica de máquinas de dupla alimentação, esta transformação apresenta muitas vantagens, possibilitando tanto a análise completa em regime permanente quanto regime transitório, desde que sejam feitas as considerações adequadas a cada caso.

Esta transformada geral é aplicada para a armadura (estator) de máquinas assíncronas e síncronas e também para o campo no caso de máquinas assíncronas.

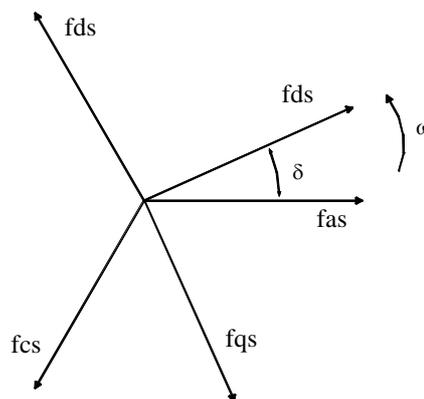


Figura 7 – Referências “dq0” e “abc” arbitrárias para transformação de variáveis.

O trabalho de (FEIJÓO, 2000) apresenta uma formulação para o estudo da máquina assíncrona de dupla alimentação onde é apresentado um equacionamento bastante didático, similar ao apresentado em (KRAUSE, 1995), propondo um modelo de terceira ordem para a máquina em estudo. Os autores fornecem uma orientação passo a passo para o desenvolvimento do modelo “dq0” de forma matricial, a partir do desenvolvimento para a

máquina assíncrona de rotor em gaiola, com o fornecimento das matrizes intermediárias utilizadas justamente para se realizar a transformação de variáveis, normalmente estacionárias para coordenadas referenciadas aos eixos direto “d” e em quadratura “q”. Neste trabalho os autores também provêm o modelamento das fontes de tensão de campo (rotor) de modo a ser interessante o equacionamento para a máquina assíncrona de rotor bobinado. Ressalte-se apenas que nesse artigo há um erro na sua equação número (5), facilmente verificado se comparamos o desenvolvimento até esta equação com o apresentado em (KRAUSE, 1995), nas suas equações número (4.2-5) e (4.5-5). Este erro não inviabiliza o desenvolvimento apresentado no trabalho, porém outras equações serão encontradas no trabalho de (FEIJÓO, 2000), quando se aplicar a correção naquela sua equação número (5).

O trabalho de (KAZACHKOV, 2004) apresenta pouca utilidade para esta pesquisa, pois apenas relata o desenvolvimento de modelos para fazendas eólicas utilizados em estudos de estabilidade de sistemas e fluxo de potência, e apresenta diversos gráficos com os resultados das simulações realizadas.

Em (DUNDING, 2000; SEMAN, 2004) encontra-se o desenvolvimento do modelo dinâmico analítico, baseado nas equações diferenciais clássicas aplicadas ao gerador assíncrono de dupla alimentação, sem o uso de transformações de variáveis, com os estudos e simulações desenvolvidos no ambiente do programa computacional MATLAB/SIMULINK, sendo que em (SEMAN, 2004) o estudo é dirigido a um gerador eólico de 1,7MVA durante distúrbios do sistema elétrico.

O trabalho de (FERNANDÉZ, 2005) apresenta o estudo também através do modelo analítico, de geradores assíncronos de dupla alimentação em fazendas eólicas que possuam limitações para a geração. Os autores justificam o seu trabalho considerando que o crescente número de fazendas eólicas conectadas a redes elétricas de transmissão ou distribuição modificará a forma de como estas redes elétricas se comportam, e então limitações aos geradores eólicos serão impostas, para a garantia da estabilidade destas redes.

Os autores de (GAGNON, 2005) trabalharam no desenvolvimento dos modelos de geradores assíncronos de dupla alimentação implementados no ambiente de simulação SIMULINK do MATLAB em suas versões mais recentes. Os autores desenvolveram o trabalho com o estudo de geradores eólicos com o uso do MATLAB/SIMULINK e de outro programa de simulação em tempo real, o HYPERSYN, de forma que fosse possível estudar casos em tempo real.

O trabalho de (ÇADIRCI, 2005) aborda a análise de desempenho de sistema do tipo “slip energy recovery system” durante transitórios no sistema elétrico ao qual o gerador

está conectado. Os autores usam o modelo “dq0” clássico desenvolvido para máquinas assíncronas de dupla alimentação, e apresentam diversas análises e considerações para o estudo em questão e resultados gráficos das simulações realizadas.

O trabalho de (GONZAGA, 2005) apresenta o estudo de estabilidade dentro de uma faixa de velocidade variável para motores assíncronos de dupla alimentação operando em modo síncrono, a partir do desenvolvimento do modelo linear para pequenas variações para este tipo de motor. Esta metodologia para estudos de estabilidade de máquinas é recente, e sugere um novo ramo do estudo de estabilidade de máquinas elétricas.

Conclui-se com esta análise que houve um retorno aos desenvolvimentos dos modelos dinâmicos analíticos, considerando-se as grandezas das máquinas ao invés da aplicação de artifícios como transformadas de variável, a partir dos últimos cinco anos, como se pode ver pelos trabalhos mais recentes, com exceção do trabalho de (ÇADIRCI, 2005).

2.6 MODELOS DE CONTROLE PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO

Diversos sistemas de controle para o sistema de geração de energia elétrica com velocidade variável com a aplicação de gerador assíncrono de dupla alimentação são explorados pelos trabalhos (XUE, 1991; YAMAMOTO, 1991; RONGVE, 2003; TANG, 2003; CARMELI, 2005; MOHAMMED, 2005; WEGENER, 2006).

Em (XUE, 1991) encontra-se apresentado um novo modelo orientado ao fluxo do estator para sistemas de acionamento de máquinas assíncronas, baseado no controle do barramento de corrente contínua entre o retificador e o inversor destes sistemas.

O trabalho de (YAMAMOTO, 1991), provavelmente por ser um dos primeiros trabalhos a abordar o controle das potências ativa e reativa do gerador assíncrono de dupla alimentação de forma independente e estável, serve de base para diversos outros trabalhos sobre este mesmo assunto, como por exemplo, o trabalho de (TANG, 1993), que por sua vez foi a base para outros trabalhos como (RONGVE, 2003).

Em (YAMAMOTO, 1991) é usado a o Sistema de Eixos de Referência fixada ao entreferro, e a partir dele é desenvolvido o sistema de controle independente das potências ativa e reativa. São apresentados o desenvolvimento deste sistema de controle e os resultados de simulação e práticos.

Já o trabalho de (TANG, 1993) apresenta o desenvolvimento de uma estratégia flexível para o controle das potências em sistemas compostos por geradores assíncronos de

dupla alimentação. Os autores utilizam o modelo “dq0” já mencionado na seção 2.6 e apresentam a implementação de um esquema em laço fechado para o controle em ambiente computacional de simulação com os respectivos resultados.

O trabalho de (RONGVE, 2003), apresenta uma visão do controle do gerador assíncrono de dupla alimentação a partir do modelamento idêntico ao modelo “dq0” desenvolvido pelos trabalhos citados na seção 2.6 anterior, porém os autores se referem como sendo um sistema de duas coordenadas, α e β , ortogonais entre si, o que nada mais é do que o sistema “dq0”. O trabalho apresenta uma estratégia de controle para a corrente do estator, como um sistema “Scherbius” estático. São apresentados ainda resultados de simulação e de laboratório.

Em (CARMELI, 2005) é proposto e estudado um de controle vetorial sem sensor de velocidade para o sistema composto de máquina assíncrona de dupla alimentação, com a utilização de modelamento dinâmico clássico deste tipo de máquina, sem transformação. É abordado um critério para a estimativa da velocidade da máquina em questão. Resultados de simulações são apresentados.

No trabalho de (MOHAMMED, 2005) um controle direto do conjugado com controle do fator de potência do estator é desenvolvido, e mais simples que o controle orientado ao campo. Os autores justificam o seu trabalho, porque até o momento, nos estudos publicados, o controle direto do conjugado foi pouco explorado aplicado às máquinas assíncronas de dupla alimentação. O trabalho contempla as considerações e a forma final do desenvolvimento do modelo de equações para este tipo de controle, um diagrama de implementação do controle, complementado por resultados das simulações realizadas no ambiente MATLAB/SIMULINK.

O número de trabalhos estudados que utilizam o ambiente computacional de simulações MATLAB/SIMULINK sugere que este ambiente de simulação tornou-se quase que um padrão para a realização de estudos dinâmicos.

2.7 O SISTEMA CONVERSOR DE POTÊNCIA DE QUATRO QUADRANTES

Além dos trabalhos já referidos nas seções anteriores deste capítulo, outros trabalhos referem-se mais precisamente aos inversores de frequência acoplados aos enrolamentos do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação.

Nesta dissertação de mestrado, o sistema utilizado para o controle da tensão e frequência acoplado ao rotor do GEADA será referenciado como conversor de potência, pelo fato deste permitir o fluxo de potência tanto no sentido do sistema elétrico para o rotor como no sentido do rotor para o sistema elétrico. Isto é possível, porque o sistema utilizado é do tipo quatro quadrantes.

Estes conversores de potência são compostos por dois inversores de frequência conectados “back-to-back”, de forma que, dependendo do modo de operação do sistema de geração, um inversor funciona como retificador e o outro como inversor de frequência, e em outro modo de operação as funções são trocadas.

Uma análise do ângulo de comutação dos tiristores que compõem os conversores de potência é apresentada no trabalho de (ÇADIRCI, 1994), sendo baseado na Figura 8. É aplicado o modelo “dq0” híbrido para o gerador assíncrono de dupla alimentação, de forma que as grandezas do estator são transformadas ao sistema de eixos cartesianos direto, “d”, e em quadratura, “q”. Para o rotor, permanecem as grandezas do circuito trifásico, tendo-se o sistema de coordenadas “a”, “b” e “c” defasadas 120° entre si.

No trabalho são explorados os modos em que o conversor do lado do rotor funciona como inversor e o conversor do lado do transformador funciona como retificador e o modo em que o funcionamento é o inverso. É apresentado o desenvolvimento final das equações para este estudo, e alguns resultados, para complementar o trabalho.

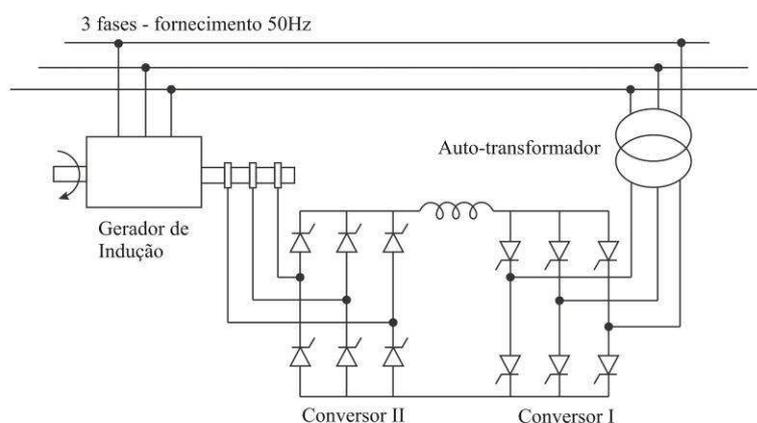


Figura 8 – Diagrama esquemático do sistema de geração com o gerador assíncrono de dupla alimentação (ÇADIRCI, 1994).

Já o trabalho de (HABETLER, 1993) apresenta um esquema para o controle para ser aplicado a sistemas de acionamento c.a./c.c./c.a. de aplicações gerais. Nota-se pela Figura 9 que o sistema estudado é semelhante aquele utilizado por outros trabalhos, como por

exemplo, em (ÇADIRCI, 1994), apresentado na Figura 8. O autor apresenta o desenvolvimento das equações ao longo do seu trabalho, um bloco diagrama para o sistema de controle, a análise de regime permanente, do desempenho de harmônicas do sistema, da operação transitória e resultados de simulação.

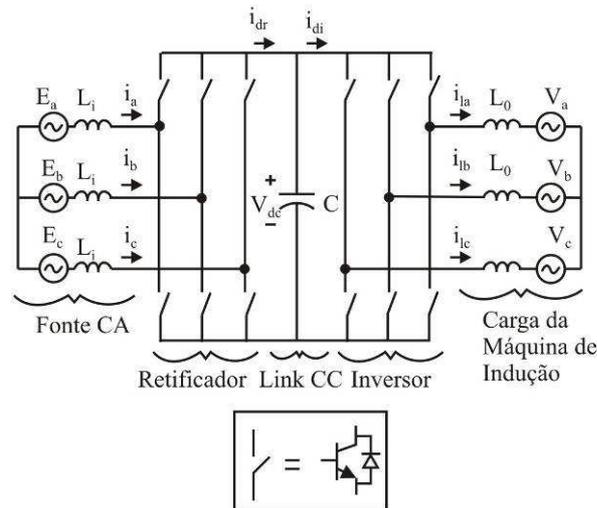


Figura 9 - Diagrama esquemático do sistema de conversor c.a./c.c./c.a. estudado por (HABETLER, 1993).

Concluindo, o trabalho de (HABETLER, 1993) pode ser aplicado por aqueles que busquem estudar os sistemas de geração com velocidade variável, utilizando geradores assíncronos de dupla alimentação.

Em (BAROUDI, 2005) é apresentado um panorama geral sobre as diversas topologias e tecnologias disponíveis para os conversores de potência para sistemas de geração de velocidade variável. Nas Figuras 10 e 11 temos as topologias que se adaptam aos estudos desta dissertação de mestrado, sendo que o esquema da Figura 10 somente permite o fluxo de potência no sentido do rotor para o sistema elétrico, pela existência do retificador sem controle acoplado diretamente ao enrolamento do rotor. Por outro lado, o esquema da Figura 11 permite o fluxo de potência nos dois sentidos, por se tratar de um conversor de potência de quatro quadrantes.

As diversas estratégias de controle dos conversores de potência de quatro quadrantes são abordadas por (BAROUDI, 2005) e estão sucintamente descritas a seguir:

1. Controle vetorial aplicado ao rotor e ao conversor do lado do sistema elétrico com o sistema de eixos de referência orientado com o eixo direto “d” referido ao vetor tensão do estator, de forma que se consegue uma máxima transferência de potência do sistema de geração para o sistema elétrico;

2. Esquemas de controle com sensores de velocidade, que são caros;
3. Controle baseado em vetores espaciais de tensão, com a aplicação de certos vetores de tensão ao rotor pode-se aumentar a potência ativa gerada no estator e outros vetores de tensão podem reduzir a potência reativa, impactando diretamente no fator de potência do sistema de geração.

Uma outra topologia também abordada em (BAROUDI, 2005) é o conversor matricial, apresentado na Figura 12, que possui a capacidade de funcionar em quatro quadrantes com apenas um estágio de dispositivos de chaveamento.

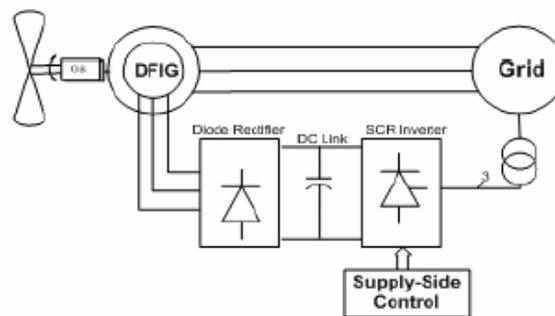


Figura 10 – Esquema do Sistema de geração do tipo KRAMER estático (BAROUDI, 2005)

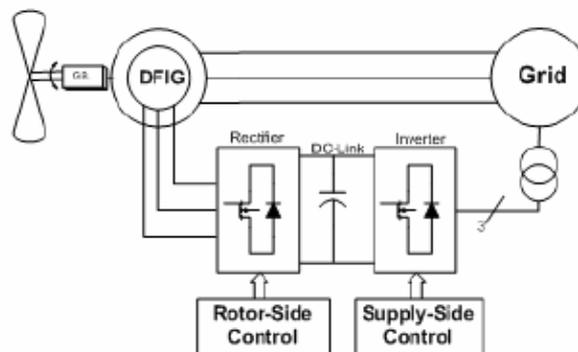


Figura 11 – Esquema de Geração com conversor de potência de quatro quadrantes (BAROUDI, 2005)

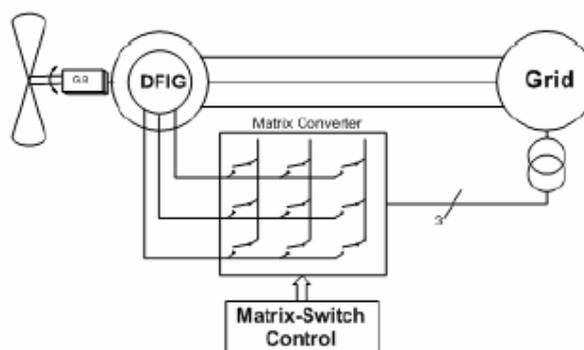


Figura 12 – Esquema de Geração com conversor matricial de potência (BAROUDI, 2005).

O autor de (BAROUDI, 2005) cita como benefícios desta topologia do conversor de potência o fato do mesmo usar apenas um estágio, a necessidade de apenas um controle para este estágio e a não utilização de um dispositivo de armazenagem de energia, geralmente capacitores ou indutores. Este tipo de conversor usa o esquema de controle orientado ao fluxo do estator aplicado ao conversor matricial. Apesar de apresentar apenas um estágio, este conversor necessita de dezoito dispositivos de chaveamento estático, contribuindo para o aumento do seu custo.

No trabalho de (NICOLÁS, 2002) é citado o fato do conversor de potência ter uma capacidade de potência igual a uma parcela da potência do gerador, correspondente à potência do escorregamento do rotor. Os autores citam o desenvolvimento de um conversor de potência de três estágios, pelo fato dos grandes geradores eólicos apresentarem necessidade de tensão superior a 2,5kV, e por isto as topologias dos conversores necessitam serem modificadas para que se possa fornecer este nível de tensão ao circuito do rotor, o que pode ser conseguido aumentando-se o número de estágios dos dispositivos de chaveamento estático em série.

O trabalho de (OLIVEIRA, 2004) apresenta a base bastante completa para o estudo do conversor de potência de quatro quadrantes, com o equacionamento, análise de controle e simulações. Serve bem para o entendimento do seu funcionamento e pode ser usado também para o projeto preliminar do conversor de potência a ser utilizado no sistema de geração em estudo.

2.8 NOVAS PROPOSTAS PARA O SISTEMA DE GERAÇÃO COM VELOCIDADE VARIÁVEL

Outros trabalhos buscam propor novas topologias para as tecnologias desenvolvidas a partir do emprego do gerador assíncrono de dupla alimentação com rotor bobinado, como, por exemplo, o uso de gerador sem escovas, conhecido como “brushless” foco dos trabalhos de (BRUNE, 1993; SPÉE, 1995; RÜNCOS, 2000; RÜNCOS, 2005b) e até mesmo outras configurações, como apresentado em (PALLE, 2005).

Também a aplicação dos geradores assíncronos de dupla alimentação é estudada compondo sistemas de geração de energia elétrica baseados em bombeamento da água de retorno para o reservatório para novo aproveitamento, conhecidos como “pumped storage power plants”, como os trabalhos de (BENDL, 1999; ERLICH, 2002).

O trabalho de (HOFMANN, 2002) propõe a utilização do barramento em corrente contínua do sistema conversor de potência diretamente acoplado a um barramento em corrente contínua para a transmissão de energia elétrica, como na Figura 13.

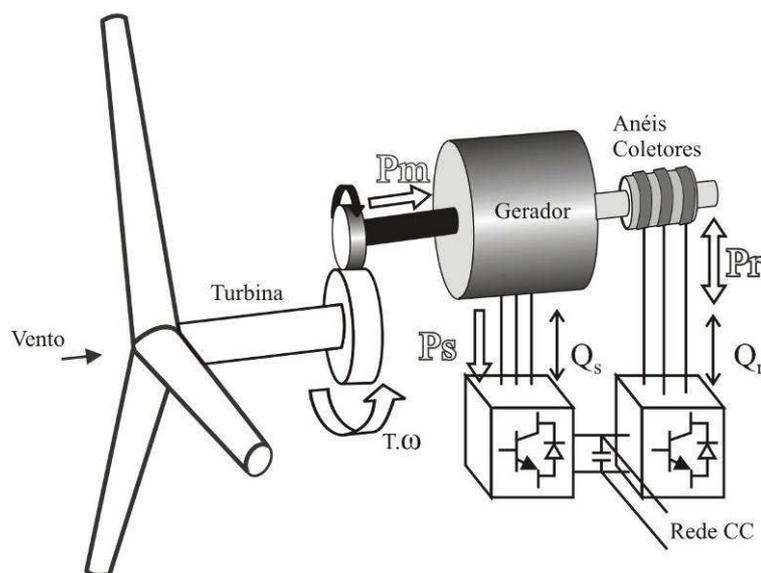


Figura 13 – Sistema isolado de geração de energia elétrica com velocidade variável (HOFMANN, 2002).

O trabalho de (HOFMANN, 2002) também cita que o laboratório ao qual estão ligados os autores está realizando pesquisas sobre geradores assíncronos de dupla alimentação sem escovas.

O trabalho de (NICOLÁS, 2002) apresenta diversas diretrizes para o projeto de gerador assíncrono de dupla alimentação, a partir da análise de características do sistema de geração com velocidade variável.

Uma nova configuração, estudada em (PALLE, 2005), contempla a concepção de um sistema híbrido, com o uso do gerador assíncrono de dupla alimentação em conjunto com outros sistemas de energia renovável, conectados ao barramento CC do conversor de potência, de forma a otimizar a produção de energia elétrica do sistema, sendo o foco, neste trabalho, a aplicação de uma célula combustível como esta fonte de energia renovável.

Com esta configuração é possível injetar-se potência no sistema de corrente alternada, carga ou gerador assíncrono, a partir de uma fonte de corrente contínua através do conversor de potência conectado entre o circuito do rotor e o sistema elétrico ou carga. Este sistema híbrido, mostrado na Figura 14, pode compensar a variação ou falta de ventos para o

fornecimento de energia elétrica de forma muito eficiente, através do uso da eletricidade gerada pela célula combustível neste momento.

O trabalho apresenta simulações a partir do modelo dinâmico do gerador assíncrono de dupla alimentação e da célula combustível. É demonstrado o controle das potências ativa e reativa e a correção do fator de potência. O sistema completo foi simulado no ambiente MATLAB/SIMULINK.

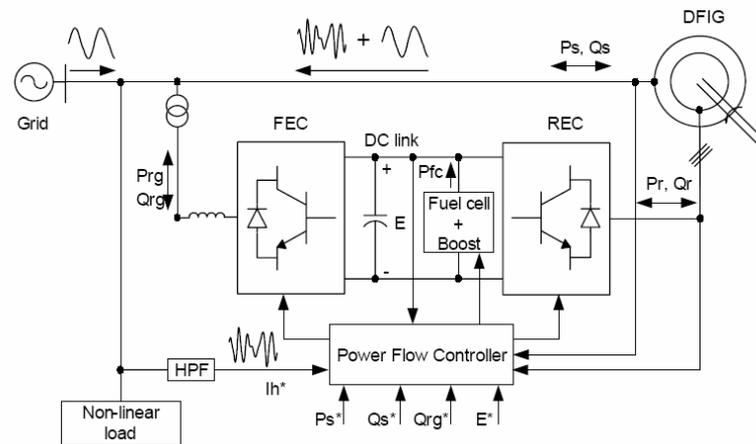


Figura 14 – Sistema híbrido de geração com o gerador assíncrono de dupla alimentação e uma célula combustível conectada ao “barramento CC” do seu conversor de potência (PALLE, 2005).

2.9 A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM VELOCIDADE VARIÁVEL NO BRASIL

O desenvolvimento das tecnologias para a geração de energia elétrica com velocidade variável acompanhou o desenvolvimento mundial. Trabalhos como (CARNEIRO JÚNIOR, 1981; CARDOSO, 1981) atestam a ocorrência de estudos no Brasil no final da década de 1970.

O trabalho de (SANTOS, 2003) segue no rumo dos estudos de implementações da geração assíncrona de pequeno porte, visando os aproveitamentos mais próximos aos consumidores, diminuindo assim os custos de transporte da energia da fonte a carga. O trabalho explora o modelo do gerador assíncrono conectado diretamente à rede, com considerações sobre o automatismo e instrumentação das pequenas usinas hidrelétricas. Nesta área o trabalho de (RESENDE, 1994) explora o gerador de indução auto-excitado.

No campo da geração assíncrona com geradores de dupla alimentação, têm-se os trabalhos de (SAIDEL, 1997; CAMPOS, 2004; OLIVEIRA, 2004). O trabalho de dissertação

de mestrado de (CAMPOS, 2004) apresenta uma introdução à geração eólica, a comparação de custos de sistemas de geração e o estudo de regime permanente numa rede de uma concessionária, e por fim um panorama da geração eólica no Brasil. Outra contribuição do trabalho é a apresentação sobre a teoria dos conversores estáticos duplos, como o autor chama o conversor de potência utilizado pelo sistema de geração que estuda.

O trabalho de (OLIVEIRA, 2004) explora o modelo dinâmico “dq0” e o de regime permanente a partir do modelo dinâmico, para o gerador assíncrono de dupla alimentação, com diversos resultados de simulação para um gerador de 2MW. Dois capítulos sobre o controle do conversor de potência apresentam a topologia usual aplicada aos sistemas de geração eólica, com um capítulo focando o conjunto do conversor de potência que fica conectado ao sistema elétrico e outro capítulo focando o conjunto que fica conectado aos terminais do rotor. Na seqüência do trabalho apresenta uma consistente análise e simulação de um sistema eólico real.

O trabalho de (MIRANDA, 2005) contribui para o assunto, apresentando justificativas e considerações para a aplicação da geração eólica conectada diretamente às redes de distribuição, seguindo o conceito de geração distribuída, que traz uma série de benefícios para o consumidor final, todos já citados na seção 2.2 deste capítulo.

Também os trabalhos de (MEYER, 2000a; MEYER, 2000b; KUNZLER JR., 2003; RÜNCOS, 2005a) mostram as diferentes etapas de pesquisas sobre o assunto.

2.10 OUTROS ESTUDOS PERTINENTES AO TEMA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM VELOCIDADE VARIÁVEL

Outros trabalhos que contribuem para os estudos sobre a geração de energia elétrica com velocidade variável são, por exemplo, (WILLIS, 1989; MOON, 2003; KWON, 2005; LIU; 2005; WÜRFEL, 2005; SHIMA, 2005; WEGENER, 2006).

Os trabalhos de (WILLIS, 1989; MOON, 2003) contribuem com procedimentos para a estimação dos parâmetros de máquinas de indução a partir de ensaios de rotor bloqueado, de forma que se tenha uma melhor caracterização da máquina para os estudos de simulação. O trabalho (KWON, 2005) demonstra também a preocupação em se ter a melhor caracterização possível da máquina de indução, formulando esta caracterização como um problema de otimização, e para isto aplicando um algoritmo genético a um modelo “dq0” para

máquina de indução que contempla também a saturação da reatância de magnetização e os efeitos de um circuito distribuído no circuito do rotor.

Também o trabalho de (SHIMA, 2005) demonstra esta preocupação com a definição dos parâmetros mais realista possível, e usa para tanto a análise de elementos finitos das correntes e reatâncias de um gerador assíncrono de dupla alimentação.

O trabalho de (LIU, 2005) discute e apresenta solução para a implementação digital de um sistema para máquinas de indução controladas sem sensor, operando em uma faixa ampla de velocidades. O trabalho contribui também para os estudos de monitoramento de tensão e fluxos em máquinas de indução.

O trabalho de (WÜRFEL, 2005) apresenta uma introdução ao assunto de monitoramento das escovas dos anéis coletores do rotor de geradores assíncronos de dupla alimentação. O trabalho busca o monitoramento das propriedades de condução das escovas e o centelhamento ocorrido entre estas e os anéis durante a operação do gerador. Este trabalho demonstra que as atenções dos pesquisadores começam a se voltar para o funcionamento do sistema de geração com geradores assíncronos de dupla alimentação, uma vez que os modelos matemáticos básicos estão bem compreendidos.

O trabalho de (WEGENER, 2006) apresenta os resultados do estudo de operação de um gerador assíncrono de dupla alimentação com um inversor de frequência padrão conectado ao seu circuito do rotor. Estes estudos contemplam os ensaios de um sistema montado no qual é utilizado um inversor de frequência comercial para o controle da tensão e da frequência imposta ao circuito do rotor. A ressalva que se faz a este fato é que o programa original, “software”, do inversor foi ampliado externamente de forma que seja possível o controle independente da tensão e da frequência entregue ao rotor do gerador, enquanto que originalmente os inversores de frequência, por serem desenvolvidos para o acionamento de motores de indução, apresentam controles “V/f” e vetorial, para o controle do conjugado, não estando aptos a permitirem o controle independente necessário já referido.

2.11 TRABALHOS SOBRE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE GERADORES ASSÍNCRONOS DE DUPLA ALIMENTAÇÃO

Como essa dissertação de mestrado propõe uma adaptação do conceito de curva de capacidade dos geradores síncronos para o GEADA, especial atenção é dada aos trabalhos sobre curvas características de gerador assíncrono de dupla alimentação.

O trabalho de (LAUW, 1988) apresenta, além do estudo do gerador de velocidade variável, o conceito de diagrama circular para este gerador, com base na teoria clássica do motor de indução. Traz o estudo da operação e controle do conversor de potência e dos modos de operação do gerador, abrangendo a operação com a máxima eficiência baseada no diagrama circular.

Os trabalhos de (BENDL, 1998; SCHREIER, 1999) apresentam a idéia das regiões de funcionamento para os geradores assíncronos de dupla alimentação, originalmente referidas como “working regions”, cujo conceito é muito semelhante à curva de capacidade dos geradores síncronos, que será mais bem explorada no Capítulo 6.

No caso do GEADA temos que a curva de conjugado serve para analisarmos a disponibilidade da potência a partir de seus parâmetros elétricos. Complementando este conceito, o trabalho de (OLIVEIRA, 2004) apresenta um estudo teórico completo com simulações sobre o gerador assíncrono de dupla alimentação e sua aplicação na geração eólica, abrangendo as diversas curvas características deste tipo de gerador.

Em (OLIVEIRA, 2004) encontra-se uma comparação entre o conjugado do motor de indução e do gerador assíncrono de dupla alimentação e fica claro que este gerador pode operar nos dois quadrantes respectivos à operação como gerador, como pode ser observado na Figura 15, onde cada curva é obtida a partir de um modo de operação, quando a tensão do rotor é igual a $-25V$, no modo sobressíncrono, $0V$ quando o rotor tem seus terminais curto-circuitados e igual a $+25V$ no modo subsíncrono, com o sinal negativo indicando que se está considerando a inversão da seqüência de fases. Curvas de mesma forma podem ser obtidas para a potência ativa.

As Figuras 15 a 19 são do trabalho de (OLIVEIRA, 2004), e foram simuladas para um gerador assíncrono de dupla alimentação com uma potência de $2MW$, tensão nominal nos seus terminais de $690V$, frequência de 50 Hz e 4 pólos (1500 rpm).

O autor utiliza o modelo “dq0” para o gerador assíncrono de dupla alimentação, e a partir deste, o modelo para regime permanente, obtido fazendo-se as variações no tempo dos fluxos concatenados nulas. Com a análise das equações obtidas no Capítulo 3, nota-se que as equações desenvolvidas para o circuito equivalente nesse trabalho são iguais àquelas obtidas em (OLIVEIRA, 2004) para os estudos de regime permanente a partir do modelo dinâmico “dq0”. Este modelo de regime permanente foi usado para as Figuras 15, 16, 17, 18 e 19. Isto valida os resultados obtidos nesse estudo.

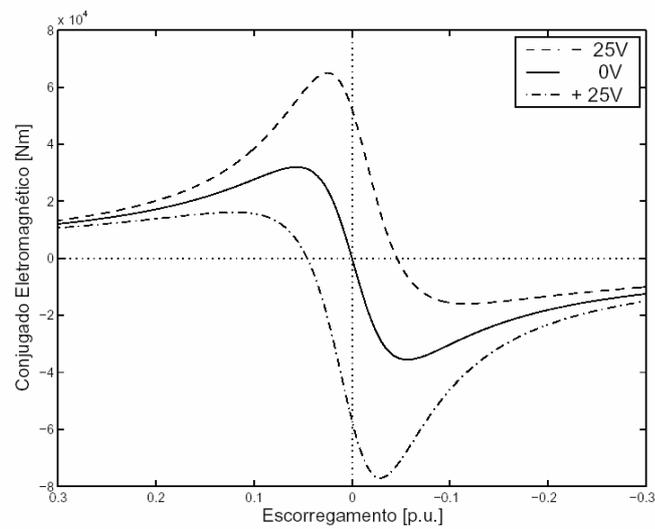


Figura 15 - Curvas de conjugado para um gerador assíncrono de dupla alimentação, com a tensão do rotor igual a -25V, no modo sobressíncrono, 0V quando o rotor tem seus terminais curto-circuitados e igual a +25V no modo subsíncrono. (OLIVEIRA, 2004).

A Figura 16 apresenta as curvas de potência ativa disponíveis para a carga ou sistema elétrico ao qual o gerador está conectado, as parcelas de contribuição a partir do estator, P_s , linha cheia, e do rotor, P_r , linha tracejada. A potência ativa com sinal negativo está sendo fornecida à carga ao sistema elétrico e com sinal positivo é absorvida destes.

Já a Figura 17 apresenta a potência ativa total disponível para a carga ou sistema elétrico, correspondendo à soma das duas contribuições da Figura 16.

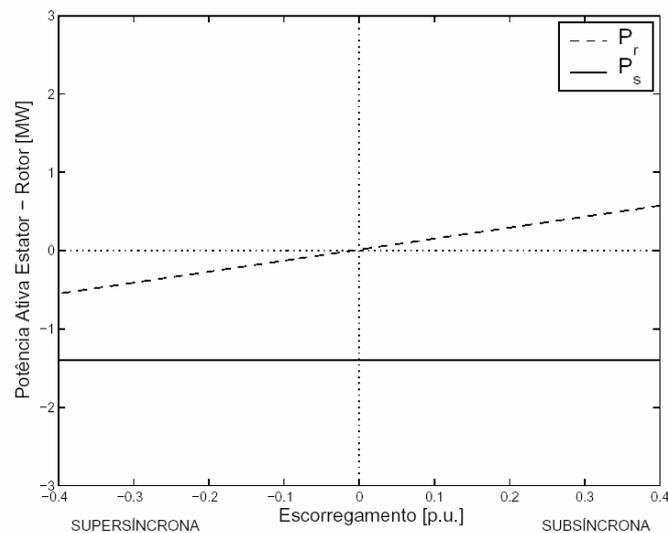


Figura 16 - Curvas da potência ativa do estator e do rotor de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função do escorregamento, com P_r a potência ativa no rotor e P_s a potência ativa no estator. (OLIVEIRA, 2004).

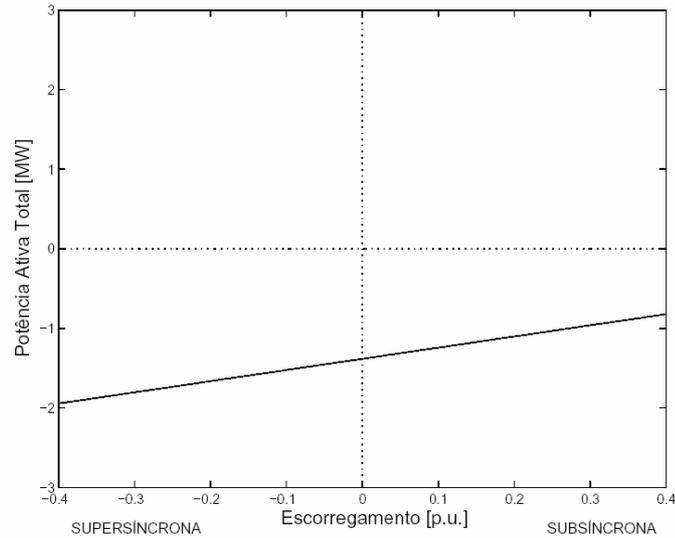


Figura 17 - Curvas da potência ativa total disponível para a carga ou sistema elétrico, de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função do escorregamento. (OLIVEIRA, 2004).

E a Figura 18 apresenta a potência reativa em função do escorregamento nos três modos de operação do gerador assíncrono de dupla alimentação: subsíncrono, sobressíncrono e síncrono, para a tensão entregue ao circuito do rotor com os valores de +25V, -25V e 0V respectivamente. A mesma observação sobre a inversão da seqüência de fases é feita para as curvas apresentadas.

A contribuição da análise que o autor de (OLIVEIRA, 2004) faz, da potência reativa em função do escorregamento é o conhecimento dos limites operacionais do gerador em relação a cada valor do escorregamento, isto porque a potência ativa está ligada diretamente à potência mecânica da máquina motriz que o move.

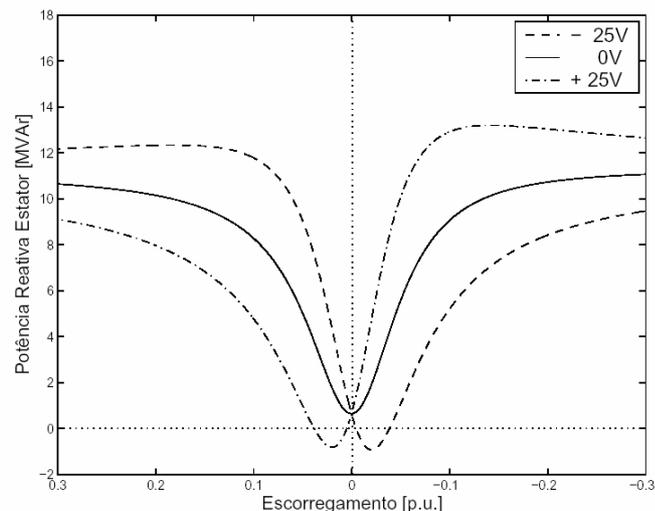


Figura 18 - Curvas da potência reativa de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função do escorregamento, com a tensão do rotor igual a -25V, no modo sobressíncrono, 0V quando o rotor tem seus terminais curto-circuitados e igual a +25V no modo subsíncrono (OLIVEIRA, 2004).

A relação entre a potência reativa e a potência ativa serve para que se tenha subsídio sobre o desempenho do gerador assíncrono de dupla alimentação. A Figura 19 ilustra esta relação, para os três modos de operação do gerador assíncrono de dupla alimentação: subsíncrono, sobressíncrono e síncrono, estudados por (OLIVEIRA, 2004).

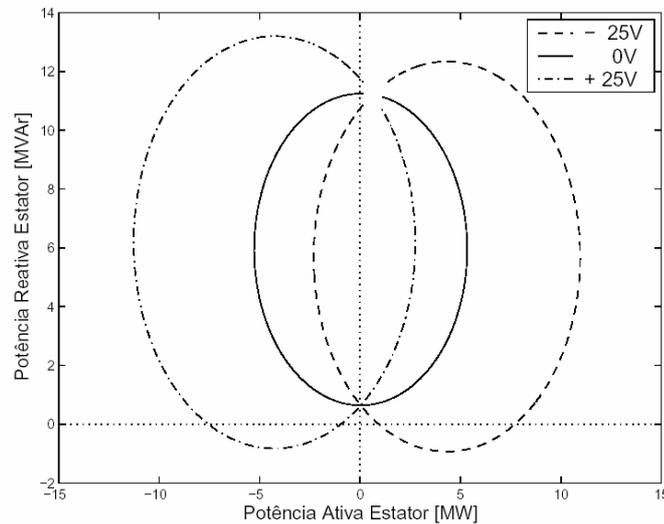


Figura 19 - Curvas da potência reativa de um gerador assíncrono de dupla alimentação em função da potência ativa, com a tensão do rotor igual a -25V, no modo sobressíncrono, 0V quando o rotor tem seus terminais curto-circuitados e igual a +25V no modo subsíncrono (OLIVEIRA, 2004).

Outro conceito interessante é sobre as curvas “V”. O trabalho de (TAMURA, 1989) apresenta curvas características para o gerador assíncrono de dupla alimentação, chamadas de curvas “V”, encontradas na Figura 20. Estas curvas relacionam a tensão imposta pelo conversor de frequência ao circuito do rotor com a corrente de carga no estator, considerando-se que a tensão nos seus terminais é controlada dentro de uma faixa estreita de variação. A máquina utilizada neste trabalho possui a potência nominal de 1,5kW, tensão nominal de 115V, frequência 50Hz e 2 pólos.

O trabalho de (FERREIRA, 2004) apresenta a curva “V”, conforme a Figura 21, que relaciona a tensão imposta ao circuito do rotor com a potência reativa trocada com a carga ou sistema elétrico, sendo possível verificar-se a partir desta figura a faixa de operação onde o gerador fornece potência reativa a carga ou absorve, apresentando inclusive o ponto de operação com fator unitário, quando a potência reativa é nula. A máquina utilizada neste trabalho apresenta potência nominal de 3hp, tensão nominal 127V e frequência 60Hz.

As curvas da tensão do estator em função da corrente do rotor, $V_2 \times I_1$, de (TAMURA, 1989) e de (FERREIRA, 2004) são obtidas mantendo-se o valor do escorregamento, s , e a potência mecânica, P_{mec} , constantes.

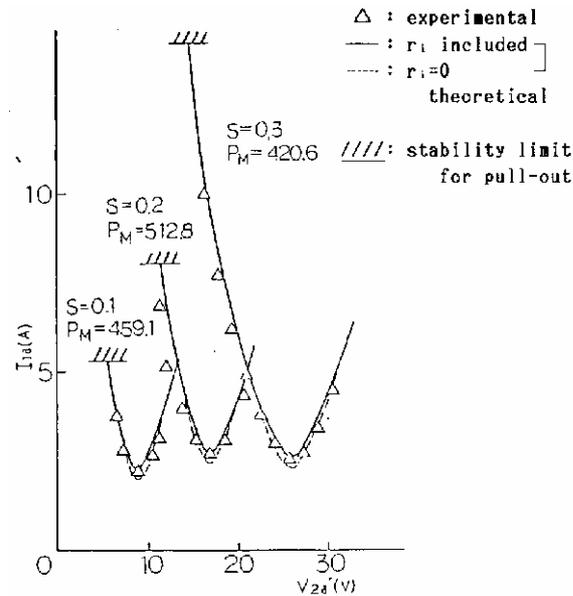


Figura 20 - Curvas “V” da corrente do estator em função da tensão do rotor, para três valores de escorregamento para uma máquina de 1,5kW, 115V, 50Hz e 2 pólos (TAMURA, 1989).

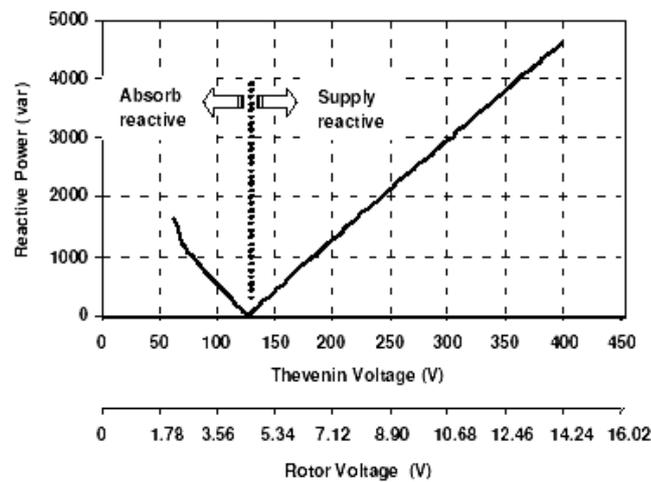


Figura 21 - Curvas “V” da potência reativa fornecida ao sistema elétrico ou carga em função da tensão do rotor para uma máquina de 3hp (FERREIRA, 2004).

Já a norma IEEE Std. 67-1990, do *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, (IEEE, 1990), que trata da operação e manutenção de turbogeradores, apresenta as curvas características para este gerador síncrono, que possui o número de par de pólos entre um e dois, e por isto apresentam grande velocidade de rotação, tendo, conseqüentemente, o seu rotor do tipo cilíndrico, assim como o rotor dos geradores assíncronos de dupla alimentação. Assim podemos, como é descrito no Capítulo 5, utilizar os conceitos básicos dos

geradores síncronos de rotor cilíndrico para o GEADA. Entre as curvas características apresentadas nessa norma, estão as curvas “V”, apresentadas na Figura 22.

Estas curvas “V” relacionam a corrente do circuito do rotor, chamada de corrente de campo, e a potência aparente disponível à carga, e apresentam diversas aplicações, como verificação dos limites de operação em relação às temperaturas dos enrolamentos do rotor e do estator, referenciados na norma como campo e armadura, por se tratar de uma norma aplicada a geradores síncronos, e os desempenhos conforme os valores de fator de potência da carga ou do sistema elétrico ao qual o gerador está conectado.

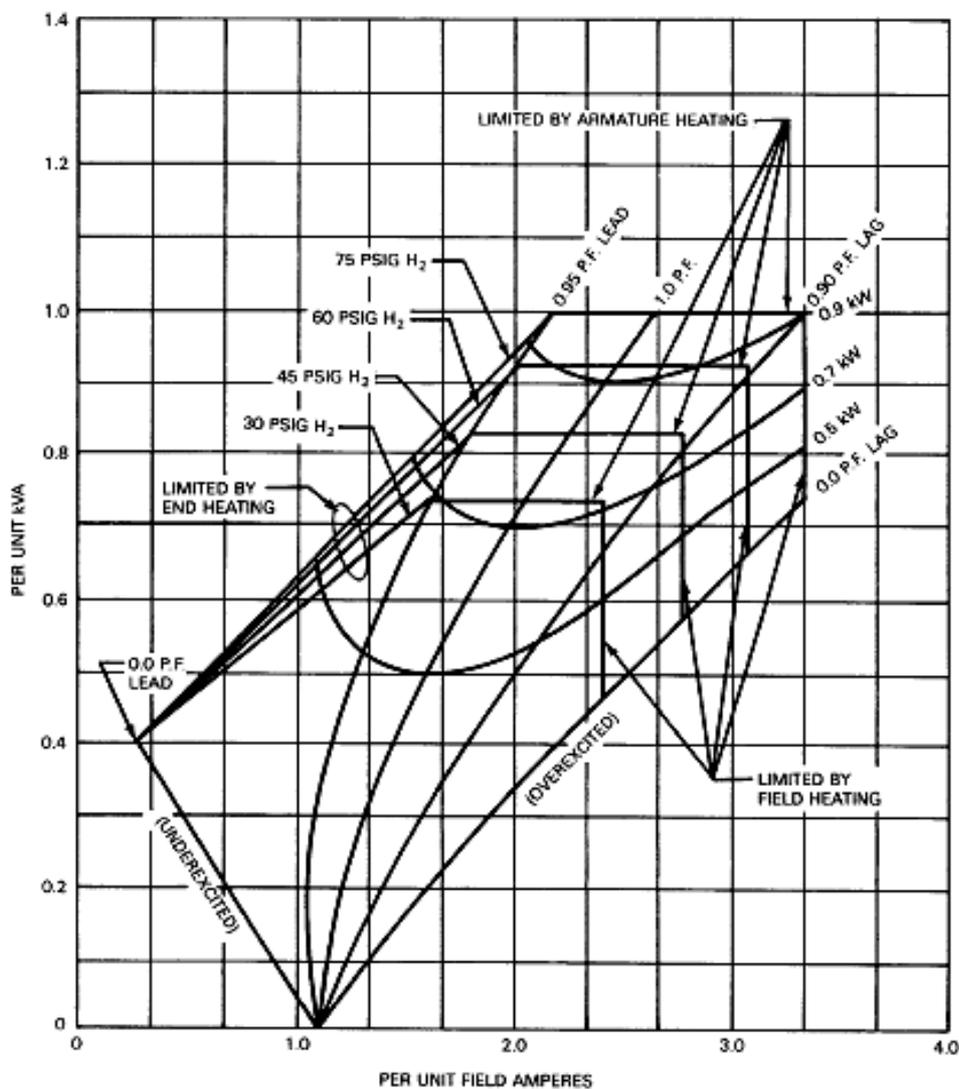


Figura 22 - Curvas “V” da potência aparente disponível ao sistema elétrico ou carga em função da corrente de campo, para turbogeradores síncronos (IEEE, 1990).

A partir do estado da arte sobre o tema gerador assíncrono de dupla alimentação, apresentado nesse capítulo, passamos ao estudo teórico de regime permanente do GEADA.

3 O MODELO DE REGIME PERMANENTE PARA O GEADA

Para o estudo proposto neste trabalho, neste capítulo é apresentado o embasamento teórico para o desenvolvimento do modelo para estudos em regime permanente do gerador assíncrono de dupla alimentação (GEADA), a partir da teoria clássica do circuito equivalente da máquina assíncrona, encontrada em diversos textos como (FITZGERALD, 1990; SAY, 1983; KOSTENKO, 1965; HINDMARSH, 1984).

Como apresentado no Capítulo 2, o gerador assíncrono de dupla alimentação, como máquina trifásica, possui o rotor com um enrolamento trifásico acessível por meio de anéis coletores e escovas, como o motor de indução de rotor bobinado, através dos quais um inversor de frequência alimentará o enrolamento do rotor.

O princípio de funcionamento deste gerador deriva do conhecido princípio do motor de indução, complementado com o fato que, para haver a geração de uma tensão trifásica com frequência constante independente da carga alimentada pelos terminais do estator, se faz necessária a compensação do escorregamento, através de um conversor de frequência. Este será responsável por fornecer ao enrolamento do rotor uma tensão também trifásica cuja frequência corresponderá à frequência do escorregamento. Desta forma obtém-se a sobreposição de dois campos magnéticos no entreferro de frequências distintas, resultando num campo magnético girante cuja frequência corresponderá à soma das frequências de rotação mecânica do eixo do rotor e da tensão impressa ao enrolamento do rotor na frequência do escorregamento, conforme a equação (2), induzindo no enrolamento do estator (armadura) uma força eletromotriz, com a frequência deste campo magnético girante.

$$f_{sincrona} = f_{campo_girante} + f_{rotor} \quad (2)$$

O modelo de circuito equivalente que ora se apresenta é baseado no modelo do motor de indução de rotor em gaiola, que por sua vez é baseado no modelo do transformador, sendo que as máquinas rotativas apresentam duas formas de produção da f.e.m. induzida como princípio básico de funcionamento. A primeira, compartilhada pelo transformador, é a f.e.m. induzida no enrolamento secundário pelo “efeito transformador”, a partir da variação no tempo do fluxo magnético gerado por corrente alternada no enrolamento primário. A segunda forma é a f.e.m. induzida no enrolamento secundário pelo “efeito rotacional”, quando a partir da rotação do enrolamento primário conduzindo uma corrente alternada ou contínua, o enrolamento secundário percebe uma variação no tempo do fluxo magnético produzido por

esta corrente, a partir da variação no espaço deste fluxo (FITZGERALD, 1990; HINDMARSH, 1984; SAY, 1983).

Como o desenvolvimento do modelo de circuito equivalente do motor de indução é suficientemente explorado em livros textos, suprime-se deste trabalho este desenvolvimento detendo-se apenas às peculiaridades de adaptação do modelo ao gerador em estudo.

Assim como num motor de indução para haver conjugado no eixo do rotor deve haver um movimento relativo entre o rotor e o campo girante no entreferro, no caso do GEADA isto também ocorre, traduzido na medida do escorregamento. Este movimento relativo será compensado pela aplicação de tensões trifásicas no enrolamento rotor com a frequência deste escorregamento. Isto possibilita ao gerador operar tanto na velocidade síncrona, quando a tensão aplicada ao rotor apresentará frequência nula (corrente contínua), quanto nas velocidades subsíncrona ou sobressíncrona, mantendo-se sempre controlada a frequência da tensão gerada nos terminais do estator. Desta forma a aplicação deste gerador é apropriada para sistemas de geração de energia eólica e até mesmo em pequenas centrais hidrelétricas.

3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O GEADA

Para a análise teórica do GEADA é necessário que se estabeleçam hipóteses iniciais do modelo que será desenvolvido e outros conceitos, como a seguir:

1. O gerador é composto por enrolamentos trifásicos equilibrados tanto no estator quanto no rotor, possuindo impedâncias idênticas para as três fases e mesmo número de pólos;
2. A resistência do contato das escovas com os anéis coletores está somada à resistência do enrolamento do rotor;
3. A distribuição das forças magnetomotrizes, f.m.m., é uniforme e senoidal no espaço, da mesma forma que a distribuição da densidade de fluxo no entreferro;
4. O entreferro entre o estator e o rotor é considerado uniforme;
5. Os caminhos magnéticos no ferro apresentam relutâncias desprezíveis;
6. As tensões e correntes tanto do gerador quanto do sistema conversor de potência apresentam apenas a componente de frequência fundamental, não havendo distorção harmônica, são simétricas e defasadas de 120 graus elétricos entre si;

7. As perdas resultantes do atrito nos mancais e do movimento do ar no gerador já estão descontadas da potência mecânica entregue ao eixo do gerador pela máquina primária;
8. As perdas magnéticas são mínimas, sendo desconsideradas;
9. As perdas elétricas no sistema conversor de potência são desconsideradas.

3.2 O CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O ESTUDO DO REGIME PERMANENTE DO GEADA

Conforme (HINDMARSH, 1984), a máquina de indução, quando estacionária, possui funcionamento similar ao transformador, afora sua perda de eficiência pela existência do entreferro entre o estator e o rotor e da geometria que contribui para maiores reatâncias de dispersão. Assim, apresenta o mesmo diagrama fasorial.

A Figura 23 apresenta o circuito equivalente de uma fase de um gerador assíncrono de dupla alimentação, semelhante ao circuito da máquina de indução, acrescentado da fonte de tensão de módulo, fase e frequência controladas. Neste circuito temos a tensão gerada no estator, \vec{V}_s , a aplicada ao rotor, \vec{V}_r , as resistências dos enrolamentos do estator, R_s , do rotor, R_r e a correspondente às perdas no ferro, R_{fe} , e as reatâncias de dispersão do estator, X_s , do rotor, X_r e a reatância de magnetização, X_m . Conforme a teoria clássica, a influência do escorregamento aparece como uma impedância do rotor refletida ao estator, através do emprego do escorregamento, s . A tensão \vec{V}_s é considerada como a referência.

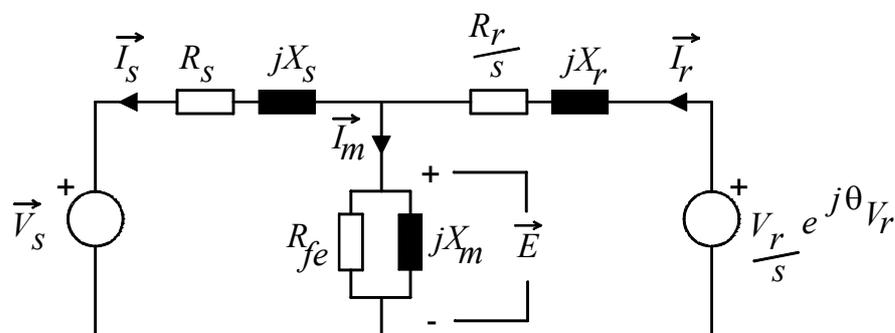


Figura 23 – Circuito equivalente completo para o gerador de dupla alimentação.

Nesse estudo, o termo que representa as perdas no ferro, R_{fe} , será suprimido do circuito equivalente, de forma a simplificar o desenvolvimento matemático, significando que as perdas magnéticas no ferro serão desprezadas.

O circuito da Figura 23 será modificado de forma que se possa utilizá-lo mesmo quando a velocidade de rotação for síncrona, ou seja, $s=0$. Na forma apresentada na Figura 24 não há indefinição por divisão por zero, e o seu equacionamento continua sendo o mesmo que o da Figura 23 quando se suprime o termo relativo às perdas magnéticas no ferro. Sendo assim, o circuito equivalente da Figura 24 será usado ao longo deste estudo.

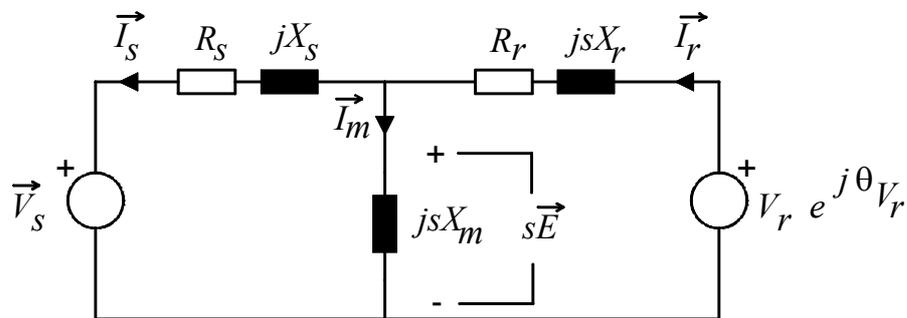


Figura 24 – Circuito equivalente para o estudo do gerador de dupla alimentação.

Conforme (BROSAN, 1966), o desenvolvimento do modelo de circuito equivalente leva em consideração as relações de transformação para a tensão induzida como sendo 1:s e para a corrente 1:1, sendo possível suprimir-se o termo do transformador ideal.

Neste trabalho será considerada a tensão gerada nos terminais do GEADA como sendo a referência, e então teremos a relação entre as tensões envolvidas no circuito conforme a Figura 25, onde θ_{V_r} é o ângulo de fase entre \vec{V}_s e \vec{V}_r .

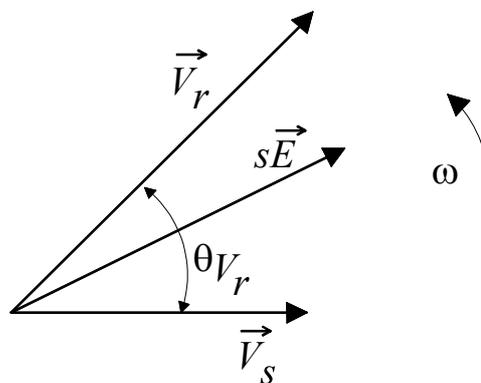


Figura 25 – Diagrama para as tensões do circuito equivalente para o gerador de dupla alimentação em estudo.

O escorregamento s é definido como a diferença entre a velocidade síncrona, aquela correspondente à frequência nos terminais do estator, e a velocidade de rotação mecânica do rotor. Normalmente tem-se s em relação à velocidade síncrona, como a equação (3) apresenta.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3)$$

Através do estudo de regime permanente é possível analisar o funcionamento do gerador quanto a correntes, tensões, velocidades, perdas, e a partir do mesmo podem ser desenvolvidas expressões para a análise de conjugados e potências.

Complementando o desenvolvimento do circuito equivalente, em (FITZGERALD, 1990; HINDMARSH, 1984; LOBOSCO, 2001) é esclarecido que no termo correspondente à resistência do rotor R_r do circuito equivalente estão contempladas a perda ôhmica e a potência mecânica pela seguinte igualdade na equação(4).

$$\frac{R_r}{s} = R_r + \frac{R_r \cdot (1 - s)}{s} \quad (4)$$

Para a análise do circuito equivalente apresentado na Figura 18 consideram-se como variáveis independentes o escorregamento, s , a tensão do rotor, \vec{V}_r , e o ângulo de fase, θ_{V_r} , entre as tensões do estator, \vec{V}_s , e do rotor, \vec{V}_r .

Nesta análise procede-se com o desenvolvimento de expressões para as correntes da estator, \vec{I}_s , e do rotor, \vec{I}_r , para no capítulo seguinte serem desenvolvidas as equações para as potências ativa e reativa tanto do estator quanto do rotor.

Isto feito é possível analisarem-se os modos operativos subsíncrono e sobressíncrono do gerador em estudo.

3.3 EQUACIONAMENTO DAS CORRENTES DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO GEADA

Para a análise do circuito equivalente será aplicado o clássico Teorema de Thèvenin (SCOTT, 1965).

3.3.1 A corrente de rotor

Calcula-se a corrente de rotor inicialmente pelo equivalente Thèvenin para o circuito do estator, através de uma fonte de tensão equivalente, \vec{V}_{Ths} , e uma impedância, Z_{Ths} , de forma a se obter o circuito equivalente da Figura 26 (b) a partir do circuito da Figura 26 (a).

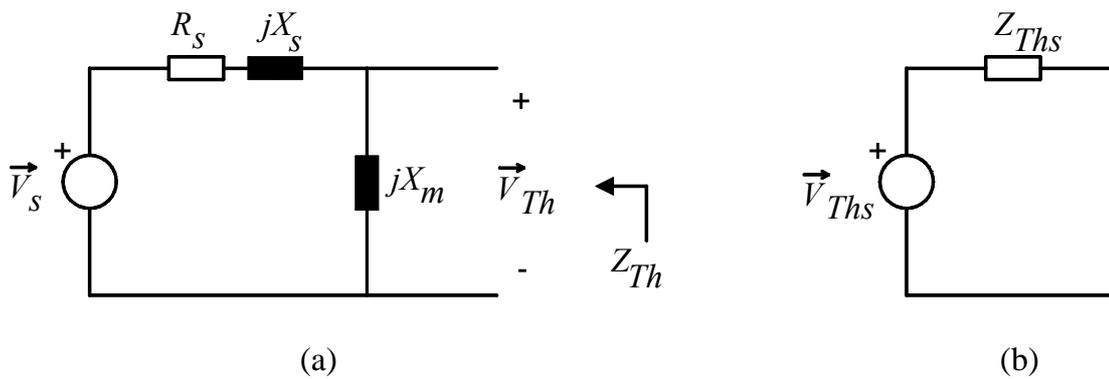


Figura 26 – Equivalente Thèvenin do circuito equivalente do estator do GEADA.

Assim a fonte de tensão equivalente, \vec{V}_{Ths} , é calculada pela equação (5).

$$\vec{V}_{Ths} = \vec{V}_s \cdot \frac{j \cdot X_m}{(R_s + j \cdot X_s) + (j \cdot X_m)} \quad (5)$$

Como a tensão nos terminais do estator, \vec{V}_s , é a referência do sistema fasorial, apresenta ângulo de fase igual a zero, conforme a equação (6).

$$\vec{V}_s = V_s \cdot (\cos 0^\circ + j \cdot \sin 0^\circ) = V_s \quad (6)$$

A impedância equivalente Z_{Ths} é calculada considerando-se \vec{V}_s nula, correspondendo à associação em paralelo da impedância característica do estator com a impedância de dispersão, jX_m , expressa pela equação (7).

$$Z_{Ths} = \frac{(-X_s \cdot X_m) + j \cdot (R_s \cdot X_m)}{R_s + j \cdot (X_s + X_m)} \quad (7)$$

Desta forma teremos o circuito equivalente apresentado na Figura 27.

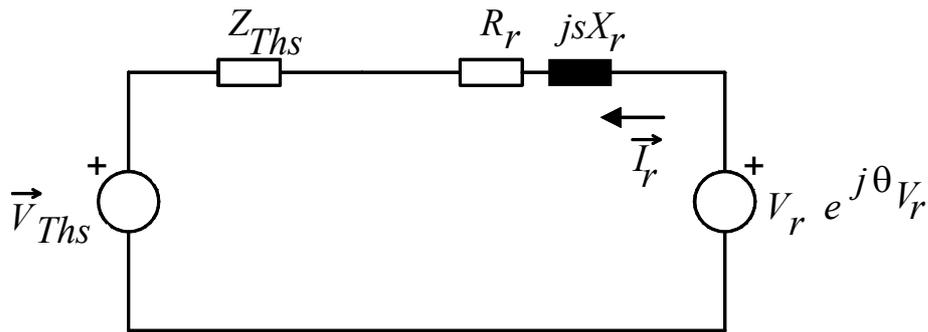


Figura 27 – Equivalente Thèvenin do estator com o circuito equivalente do rotor do GEADA.

Para o desenvolvimento faz-se necessário ter-se a tensão do rotor expressa na sua forma retangular, em função de seno e co-seno.

$$V_r e^{j\theta_{V_r}} = V_r \cdot (\cos\theta_{V_r} + j\text{sen}\theta_{V_r}) \quad (8)$$

Com todos os termos do circuito expressos na forma retangular, procede-se o cálculo da corrente do rotor.

$$\bar{I}_r = \frac{\left[\left(\frac{V_r}{s} \cdot \cos\theta_{V_r} + j \cdot \frac{V_r}{s} \cdot \text{sen}\theta_{V_r} \right) - \vec{V}_{Ths} \right]}{Z_{Ths} + \frac{R_r}{s} + jX_r} \quad (9)$$

$$\bar{I}_r = \frac{\left[\left(\frac{V_r}{s} \cdot \cos\theta_{V_r} + j \cdot \frac{V_r}{s} \cdot \text{sen}\theta_{V_r} \right) - V_s \cdot \frac{j \cdot X_m}{(R_s + j \cdot X_s) + (j \cdot X_m)} \right]}{Z_{Ths} + \frac{R_r}{s} + jX_r} \quad (10)$$

A impedância total do circuito é expandida para a expressão (11).

$$\begin{aligned} Z_{Ths} + \frac{R_r}{s} + jX_r &= \\ &= \frac{[-(s \cdot X_s X_m) + (R_s R_r) - (s \cdot X_s X_r) + (s \cdot X_m X_r)]}{s \cdot [R_s + j \cdot (X_s + X_m)]} + \\ &+ \frac{j[(s \cdot R_s X_m) + (s \cdot R_s X_r) + (R_r X_s) + (R_r X_m)]}{s \cdot [R_s + j \cdot (X_s + X_m)]} \end{aligned} \quad (11)$$

Assim temos a corrente do rotor expressa na equação (12).

$$\bar{I}_r = \frac{\left[(R_s V_r \cos\theta_{V_r}) - (X_s V_r + X_m V_r) \text{sen}\theta_{V_r} \right] + j \left[(R_s V_r \text{sen}\theta_{V_r}) + (X_s V_r + X_m V_r) \cos\theta_{V_r} - s X_m V_s \right]}{\left[(R_s R_r) - s(X_s X_m + X_s X_r + X_m X_r) \right] + j \left[s \cdot R_s (X_m + X_r) + R_r (X_s + X_m) \right]} \quad (12)$$

3.3.2 A corrente de estator

Para calcularmos a corrente do estator, seguiremos os mesmos passos, iniciando pelo equivalente Thèvenin, para o circuito do rotor, conforme a Figura 28 a seguir.

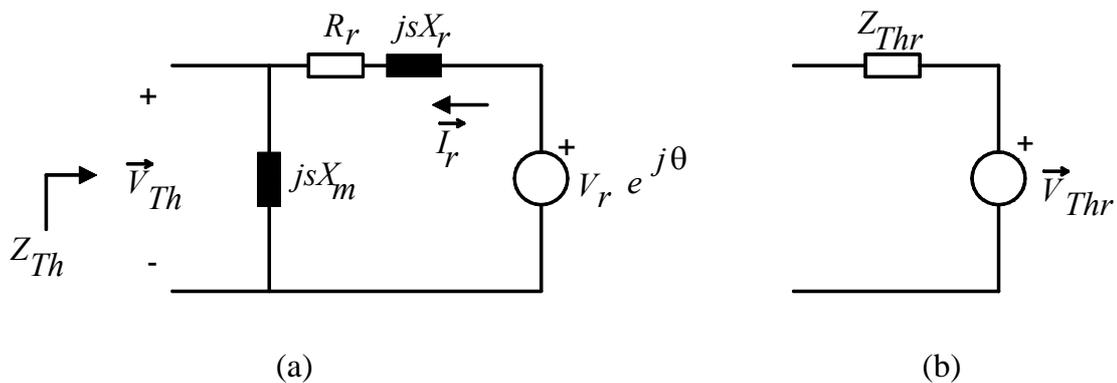


Figura 28 – Equivalente Thèvenin do circuito equivalente do rotor do GEADA.

Assim a fonte de tensão equivalente, \vec{V}_{Ths} , é calculada pela equação (13).

$$\vec{V}_{Thr} = \frac{\vec{V}_r}{s} \cdot \frac{j \cdot X_m}{\left(\frac{R_r}{s} + j \cdot X_r\right) + (j \cdot X_m)} \quad (13)$$

E a impedância equivalente Z_{Thr} é expressa pela equação (14).

$$Z_{Thr} = \frac{(-X_r \cdot X_m) + j \cdot \left(\frac{R_r}{s} \cdot X_m\right)}{\frac{R_r}{s} + j \cdot (X_r + X_m)} \quad (14)$$

Temos então o circuito equivalente da Figura 29 a seguir.

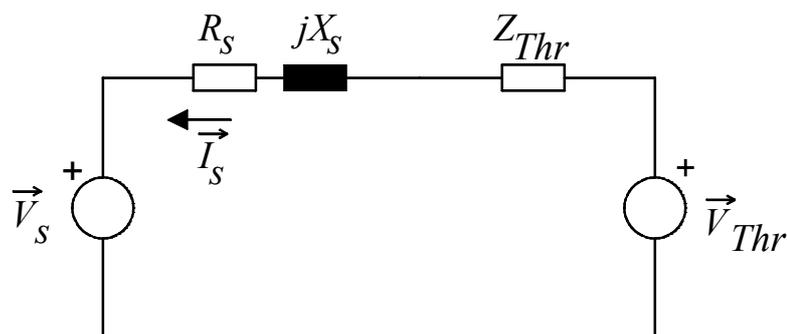


Figura 29 – Equivalente Thèvenin do rotor com o circuito equivalente do estator do GEADA.

A corrente do estator, \vec{I}_S , a partir deste circuito será calculada pelas equações a seguir.

$$\vec{I}_S = \frac{[\vec{V}_{Thr} - \vec{V}_S]}{R_S + jX_S + Z_{Thr}} \quad (15)$$

$$\vec{I}_S = \frac{\left[\frac{(V_r \cos \theta_{V_r} + jV_r \sin \theta_{V_r})}{s} \cdot \left[\frac{j \cdot X_m}{\left(\frac{R_r}{s} + j \cdot X_r \right) + (j \cdot X_m)} \right] - V_S \right]}{R_S + jX_S + Z_{Thr}} \quad (16)$$

E finalmente:

$$\vec{I}_S = \frac{[-(R_r V_S + X_m V_r \sin \theta_{V_r})] + j[X_m V_r \cos \theta_{V_r} - s V_S (X_r + X_m)]}{[(R_S R_r) - s(X_S X_m + X_S X_r + X_m X_r)] + j[s \cdot R_S (X_m + X_r) + R_r (X_S + X_m)]} \quad (17)$$

3.3.3 Formas finais das correntes do rotor e do estator

Para que se tenham as equações que traduzem as potências ativa e reativa do GEADA, se faz necessário ter-se a corrente do estator e do rotor expressas com suas partes reais e imaginárias bem definidas, na forma da equação (18).

$$\vec{I} = I_{real} + j I_{imag} \quad (18)$$

Analisando-se as equações das correntes do estator e do rotor, (12) e (17), observa-se que o denominador é comum às duas equações, o que sugere ser possível a utilização de operadores auxiliares. Aplicando-se a álgebra de números complexos (SCOTT, 1965) às equações das correntes do estator e rotor, (12) e (17), verifica-se que podem ser utilizados os seguintes fatores auxiliares.

$$F_A = \left[\left(\frac{R_S R_r}{s} \right) - (X_S X_m + X_S X_r + X_m X_r) \right] \quad (19)$$

$$F_B = \left[\frac{R_r}{s} (X_m + X_S) + R_S (X_r + X_m) \right] \quad (20)$$

Assim, manipulando-se a equação (12), da corrente do rotor, chega-se às equações (21) e (22), que apresentam a parte real e a parte imaginária desta corrente, respectivamente.

$$\begin{aligned}
I_{r\,real} = & \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_A \left[\left(R_s \frac{V_r}{s} \cos \theta_{V_r} \right) - \left(X_s \frac{V_r}{s} + X_m \frac{V_r}{s} \right) \text{sen} \theta_{V_r} \right] \right] + \\
& + \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_B \left[\left(R_s \frac{V_r}{s} \text{sen} \theta_{V_r} \right) + \left(X_s \frac{V_r}{s} + X_m \frac{V_r}{s} \right) \cos \theta_{V_r} - X_m V_s \right] \right]
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
I_{r\,imag} = & \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_A \left[\left(R_s \frac{V_r}{s} \text{sen} \theta_{V_r} \right) + \left(X_s \frac{V_r}{s} + X_m \frac{V_r}{s} \right) \cos \theta_{V_r} - X_m V_s \right] \right] - \\
& - \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_B \left[\left(R_s \frac{V_r}{s} \cos \theta_{V_r} \right) - \left(X_s \frac{V_r}{s} + X_m \frac{V_r}{s} \right) \text{sen} \theta_{V_r} \right] \right]
\end{aligned} \tag{22}$$

com

$$\vec{I}_r = I_{r\,real} + j \cdot I_{r\,imag} \tag{23}$$

Da mesma forma procede-se para a corrente do estator em relação à equação (17).

$$\begin{aligned}
I_{s\,real} = & \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_A \left[- \left(\frac{R_r}{s} V_s + X_m \frac{V_r}{s} \text{sen} \theta_{V_r} \right) \right] \right] + \\
& + \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_B \left[X_m \frac{V_r}{s} \cos \theta_{V_r} - V_s (X_r + X_m) \right] \right]
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
I_{s\,imag} = & \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_A \left[X_m \frac{V_r}{s} \cos \theta_{V_r} - V_s (X_r + X_m) \right] \right] + \\
& + \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot \left[F_B \left[+ \left(\frac{R_r}{s} V_s + X_m \frac{V_r}{s} \text{sen} \theta_{V_r} \right) \right] \right]
\end{aligned} \tag{25}$$

com

$$\vec{I}_s = I_{s\,real} + j \cdot I_{s\,imag} \tag{26}$$

Estas equações são semelhantes àquelas encontradas nos artigos de (VICATOS, 1989; SMITH, 2005), porém cabe observar que neste estudo o sentido da corrente do estator é definido pela Figura 24 considerando-se que o GEADA está fornecendo corrente para a carga

ou sistema de conexão, como em (SMITH, 2005), ao contrário do sentido utilizado no artigo de (VICATOS, 1989) e maioria dos trabalhos que utilizam os sentidos das correntes para a operação como motor.

Observa-se, também, que estas equações estão em concordância com aquelas desenvolvidas no trabalho de (OLIVEIRA, 2004) para regime permanente, conforme descrito no Capítulo 2.

4 BALANÇO E FLUXOS DE POTÊNCIAS APLICADOS AO GEADA EM REGIME PERMANENTE

Apresentam-se neste capítulo os conceitos necessários para o entendimento dos fluxos de potência envolvidos na operação do GEADA.

Conforme (CHAPALLAZ, 1992; FITZGERALD, 1990; HINDMARSH, 1984; KRAUSE, 1995; SAY, 1983) o balanço de energia para as máquinas elétricas de corrente alternada é expresso conforme a equação (27).

$$W_{entrada} = W_{saída} = W_{carga} + W_{perdas} + W_{magnética} \quad (27)$$

Essa equação (27) indica que, com o sistema de geração em estudo operando em regime permanente, o somatório das energias é zero, ou seja, a energia de entrada no sistema, $W_{entrada}$, que é essencialmente mecânica, é igual à energia de saída, $W_{saída}$, composta pela energia elétrica disponível para a carga ou sistema ao qual o GEADA está conectado, W_{carga} , pela energia dissipada na forma de calor pelas perdas de efeito Joule dos circuitos elétricos e ferro, pelas perdas mecânicas de atrito e ventilação, W_{perdas} , e pela energia envolvida na geração do campo magnético de acoplamento entre os circuitos magnéticos do rotor e do estator, $W_{magnética}$.

Estas parcelas de energia estão relacionadas às parcelas de potências ativas e potências reativas nos componentes dos circuitos do GEADA. Dividimos então o balanço de potências conforme as equações (28) e (29), considerando o circuito trifásico composto por três circuitos monofásicos equilibrados.

Na equação (28), que corresponde às potências ativas, P_{mec_3} é a potência mecânica fornecida pela máquina motriz, sendo o total da potência ativa de entrada no sistema em estudo, e por isto está relacionada à soma das potências das três fases dos circuitos. Neste estudo utilizar-se-ão as potências referentes a uma fase do circuito, assim como a representação do circuito equivalente, e, portanto, a potência mecânica referida ao longo desse trabalho, quando não indicado explicitamente, será igual a um terço de P_{mec_3} , sendo referida como P_{mec} .

$$P_{mec_3} = 3 \cdot P_{mec} = 3 \cdot (P_{escorr} + P_{Joule_r} + P_{Joule_s} + P_{carga}) \quad (28)$$

A potência mecânica monofásica, P_{mec} , corresponde ao somatório da potência necessária para compensar a diferença de velocidade entre do eixo mecânico, ao qual está acoplado o rotor, e do eixo do campo magnético girante no entreferro, P_{escorr} , da perda por efeito Joule no enrolamento do rotor, P_{Joule_r} , e no enrolamento do estator, P_{Joule_s} , e da potência disponível para a carga ou sistema elétrico ao qual o GEADA está conectado. A Figura 30 apresenta o conceito da potência mecânica e potências ativas envolvidas na operação do GEADA. Note-se que nessa figura aparecem ainda a parcela correspondente às perdas no ferro, P_{ferro} , que será desconsiderada nesse estudo, as perdas mecânicas por atrito e ventilação, $P_{perdas_mec.}$, e a potência mecânica bruta entregue ao sistema pela máquina motriz, $P_{máq._motriz}$, estando estas duas últimas divididas por três porque se está considerando o balanço de potências para uma fase do circuito trifásico do GEADA, e a potência do entreferro, P_g , que corresponde ao conceito da soma das potências mecânica e de compensação do escorregamento que fluem para o estator. Este conceito é mais bem explicado na seção 4.1.3.

Como será apresentado nas seções seguintes, a potência do rotor, P_{rotor} , é fornecida pelo conversor de potência que está conectado aos terminais do circuito do rotor, e é responsável pela potência de compensação do escorregamento, P_{escorr} , de forma a se ter o campo magnético girante na frequência síncrona, e pelas perdas por efeito Joule no circuito do rotor, P_{Joule_r} . Este conversor de potência está sendo considerado ideal, sem perdas, e com a sua potência sendo suprida por outra fonte.

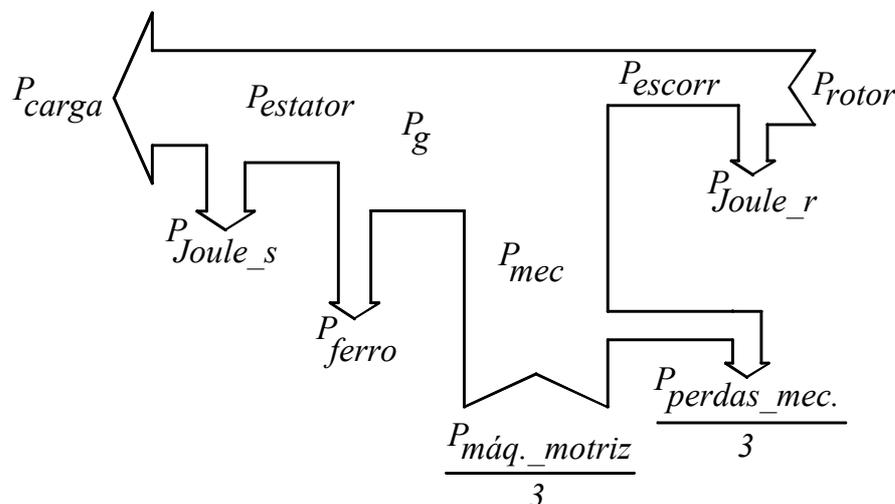


Figura 30 – Balanço de potências ativa e mecânica no GEADA.

A relação entre as potências reativas envolvidas no sistema está apresentada na equação (29).

$$Q_{conv_pot_3} = 3 \cdot Q_{conv_pot} = 3 \cdot (Q_{dispersão_r} + Q_{acopl_magn} + Q_{dispersão_s} + Q_{carga}) \quad (29)$$

Nessa equação, a potência reativa entregue ao circuito monofásico pelo conversor de potência, Q_{conv_pot} , corresponde ao somatório da potência reativa de dispersão do rotor, $Q_{dispersão_r}$, da potência envolvida no acoplamento magnético através da reatância de magnetização, Q_{acopl_magn} , da potência de dispersão do circuito do estator, $Q_{dispersão_s}$, e da potência reativa da carga ou do sistema elétrico ao qual está conectado o GEADA, Q_{carga} .

Em regime permanente temos que esta potência reativa será trocada entre os circuitos indutivos do GEADA e o circuito do conversor de potência, que pode assumir caráter indutivo ou capacitivo, e da carga ou sistema elétrico, podendo ser chamada de potência circulante.

Pode-se observar que uma variação instantânea da potência reativa, resultado de um regime transitório de operação, será absorvida ou fornecida durante este transitório, pelo dispositivo de armazenamento de energia do conversor de potência, no caso o indutor (conversor tipo fonte de corrente) ou o capacitor (conversor tipo fonte de tensão), aumentando ou diminuindo sua energia armazenada, de forma que, quando o sistema de geração entrar no novo regime permanente, esta potência reativa, apresentando o seu novo valor, continua a ser trocada entre os circuitos magnéticos do sistema, a carga e o conversor de potência.

A seguir apresentam-se os conceitos da conversão eletromecânica de energia e após, desenvolvem-se as equações para as potências ativas e reativas de cada segmento do sistema de geração em estudo, com base nas definições dessa seção.

4.1 ANÁLISE DOS CONJUGADOS MECÂNICO E ELETROMAGNÉTICO E ÂNGULO DE CARGA

Para um melhor entendimento das definições colocadas na seção anterior, faz-se necessário que se apresente uma análise sucinta sobre os conjugados presentes durante a operação do GEADA.

4.1.1 Princípios da conversão de energia

No GEADA a conversão de energia se dá através de duas formas: (i) elétrica/elétrica e (ii) mecânica/elétrica. A forma de conversão de energia elétrica/elétrica tem por base a f.e.m. induzida nos enrolamentos do estator pelo efeito transformador, e , originada pela variação no tempo do fluxo magnético, φ , gerado pela corrente alternada conduzida pelo enrolamento do rotor suprida pelo conversor de potência conectado aos terminais daquele. Isto se dá conforme a lei de Faraday, expressa na equação (30) sendo encontrado em (FITZGERALD, 1990; HINDMARSH, 1984).

$$e = N \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (30)$$

A forma de conversão de energia mecânica/elétrica, em se tratando de um gerador, é baseada na f.e.m. induzida nos enrolamentos do estator por efeito do movimento, com estes enrolamentos sentindo a variação no tempo do fluxo magnético a partir do movimento rotacional dos enrolamentos do rotor conduzindo uma corrente alternada. A taxa de variação do fluxo sentida pelos enrolamentos do estator, neste caso, será o somatório da taxa de variação da corrente alternada no rotor somada à velocidade de rotação do próprio rotor.

Esta f.e.m. induzida é calculada também pela equação (30), tendo o mesmo resultado se calculada pela equação genérica (31),

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (31)$$

com l sendo o comprimento ativo do condutor e v a velocidade do condutor em relação ao fluxo que este atravessa.

Exemplificando, pode-se considerar que para o GEADA com o rotor parado, quando a velocidade de rotação é igual a zero, apresentar para uma tensão gerada nos terminais do estator com frequência constante, deve ser aplicada uma tensão aos enrolamentos do rotor com os valores nominais de tensão e frequência. A partir do momento em que o rotor começa a girar, recebendo potência mecânica da máquina motriz, é necessário diminuir a frequência do fluxo gerado pelo enrolamento do rotor, através da diminuição da frequência da tensão aplicada pelo conversor de potência a este enrolamento, a uma razão proporcionalmente inversa ao aumento da velocidade de rotação, ω_{eixo} . A f.e.m. induzida

pelo efeito transformador quando o rotor está parado é reduzida a uma taxa igual ao escorregamento, s , calculado pela equação (32).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_{eixo}}{\omega_s} \quad (32)$$

Caso o rotor atinja a velocidade síncrona, a frequência da tensão aplicada ao enrolamento do rotor será zero (corrente contínua), e o GEADA passará ao modo operacional síncrono.

4.1.2 Os conjugados

A partir da f.e.m. induzida nos enrolamentos do estator, quando for fornecida uma corrente à carga ou sistema elétrico ao qual o GEADA está conectado, haverá o aparecimento de um conjugado eletromagnético que se oporá ao conjugado mecânico entregue ao eixo do rotor, na busca de equilíbrio, que resultará na conversão eletromecânica de energia.

Este conjugado está relacionado ao fato que, esta corrente elétrica sendo fornecida a carga criará uma onda de fluxo no entreferro, que gira à velocidade correspondente à frequência da tensão gerada nos terminais deste. Este fluxo reage com o fluxo gerado pela corrente no rotor, dando origem ao conjugado eletromagnético, pelo esforço que há destes dois fluxos magnéticos se alinharem. Este conjugado se oporá à rotação do rotor, e exigirá que a máquina motriz acoplada ao eixo do GEADA responda com um conjugado mecânico de mesmo módulo, para manter a velocidade de rotação do eixo constante (FITZGERALD, 1990).

O conjugado mecânico, T_m , é calculado pela equação (33), com P_{mec} em Watts, ω_{eixo} em rad/s e T_m em N.m.

$$T_m = \frac{P_{mec}}{\omega_{eixo}} \quad (33)$$

O conjugado eletromagnético, T_e , é igual a T_m , pois está sendo considerado nesse trabalho que P_{mec} corresponde à potência mecânica líquida, já tendo sido descontadas as perdas mecânicas por atrito e ventilação da potência da máquina motriz. Assim, para haver a conservação da energia, o conjugado eletromagnético deve ser igual ao conjugado mecânico, conforme a equação (34).

$$T_e = T_m \quad (34)$$

A Figura 31 apresenta o diagrama fasorial de uma máquina elementar e a relação entre as forças magnetomotrizes, f.m.m., do estator, $F_{estator}$, e do rotor, F_{rotor} , representado pelos fasores colocados nos eixos dos respectivos campos magnéticos.

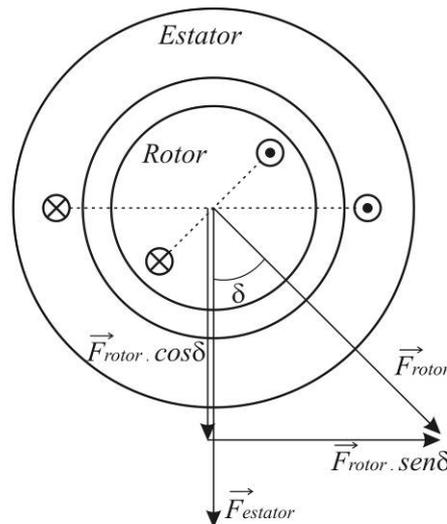


Figura 31 – Diagrama fasorial com as forças magnetomotrizes do estator e do rotor de uma máquina elétrica genérica.

A força tangencial relacionada com a rotação do rotor multiplicada pelo raio do rotor é o conjugado mecânico que atua sobre o eixo do GEADA. É calculada pela equação (35).

$$T_m = (F_{rotor} \cdot \text{sen} \delta) \cdot \text{raio}_{rotor} \quad (35)$$

Ao ângulo δ entre as forças magnetomotrizes, que é o ângulo entre os eixos dos campos magnéticos do estator e do rotor, é chamado ângulo de conjugado, pois somente há conjugado quando o ângulo δ é diferente de zero, caso contrário o conjugado é nulo. Pela equação (35) fica claro que o conjugado mecânico é máximo quando o ângulo δ é 90° .

Este ângulo δ também é chamado de ângulo de carga, por sua dependência da carga elétrica suprida pelo gerador.

A outra componente da força do rotor é o empuxo eletromagnético que atua sobre o eixo do rotor, que tende a diminuir o entreferro, não tendo nenhuma relação com o movimento rotacional do eixo. Na operação normal do gerador o empuxo magnético de um enrolamento é compensado pelo do outro, e conseqüentemente, há um equilíbrio de forças

radiais. O conceito de empuxo magnético somente terá importância durante algum transitório do gerador, quando poderá ocorrer desbalanceamento entre as fases e das f.m.m.

Observe-se que, quando o ângulo δ é zero, este empuxo é máximo, e quando δ é 90° , ele é nulo, conforme a equação (36).

$$\text{empuxo eletromagnético} = F_{\text{rotor}} \cdot \cos \delta \quad (36)$$

4.1.3 O conceito de potência de escorregamento

Como visto nos capítulos anteriores, a operação do GEADA com seu eixo em velocidade mecânica diferente daquela definida como síncrona, relativa ao eixo do campo magnético girante, exige que se compense esta diferença de velocidade. Esta compensação se dá pela inserção de uma tensão alternada no seu circuito de rotor, com a frequência correspondendo a aquela diferença de velocidades. Este é o conceito de potência de escorregamento, P_{escorr} , que é a potência entregue ao rotor pelo conversor de potência, necessária para a compensação de diferença de velocidades. Esta potência é uma parcela da potência correspondente ao conjugado eletromagnético total, entregue ao circuito do estator.

4.2 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA DE GERAÇÃO

O fluxo das potências no sistema de geração em estudo será convencionado conforme as Figuras 32 e 33, respectivamente para a potência ativa e potência reativa.

Estes fluxos correspondem à situação do GEADA alimentando uma carga ou o sistema elétrico ao qual está conectado, tendo o seu conversor de potência alimentado a partir da potência gerada nos terminais do estator do GEADA, aplicação convencional em sistemas de geração.

Destas figuras tem-se os conceitos para as potências consideradas neste trabalho. Da Figura 32, temos a potência mecânica líquida como potência de entrada no sistema em estudo, e a potência da carga como potência de saída. As perdas nas partes ativas do GEADA estão sintetizadas nas perdas Joule do estator, do rotor e do conversor de potência. A potência de entrada no rotor, suprida pelo conversor de potência, é uma parcela da potência gerada nos terminais do estator, nos sistemas convencionais de geração de energia elétrica, sendo a diferença entre estas duas potências, a potência disponível para ser consumida pela carga

ligada diretamente ao GEADA ou ser fornecida ao sistema elétrico ao qual o gerador está conectado. A potência do entreferro, cujo conceito é explorado na seção 4.4.5, é a potência total que é transmitida ao estator, correspondendo à soma da potência de compensação do escorregamento, que provém do rotor, e da potência mecânica líquida fornecida pela máquina motriz acoplada ao eixo do rotor.

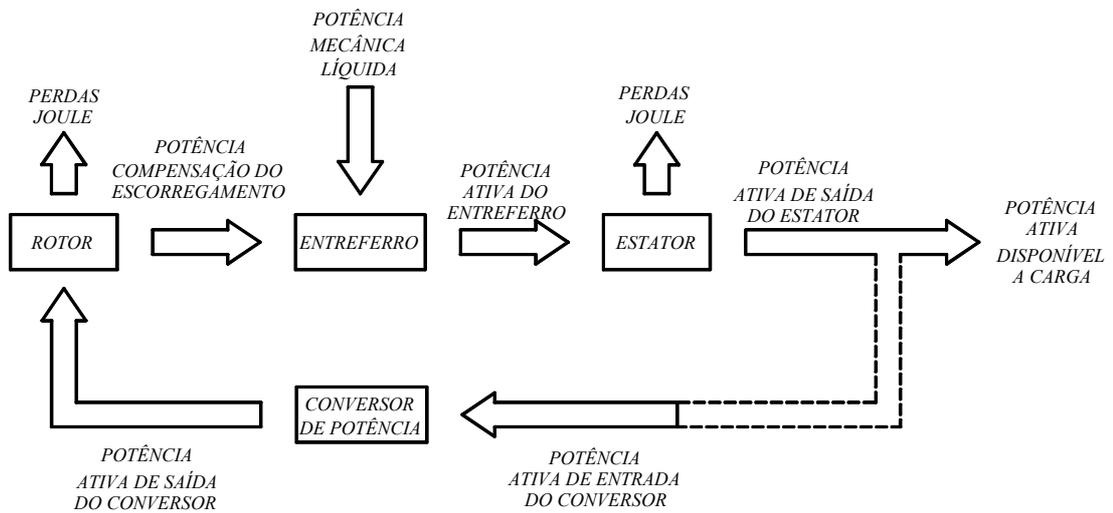


Figura 32 – Convenção para o fluxo de potências ativa e mecânica no sistema de geração estudado.

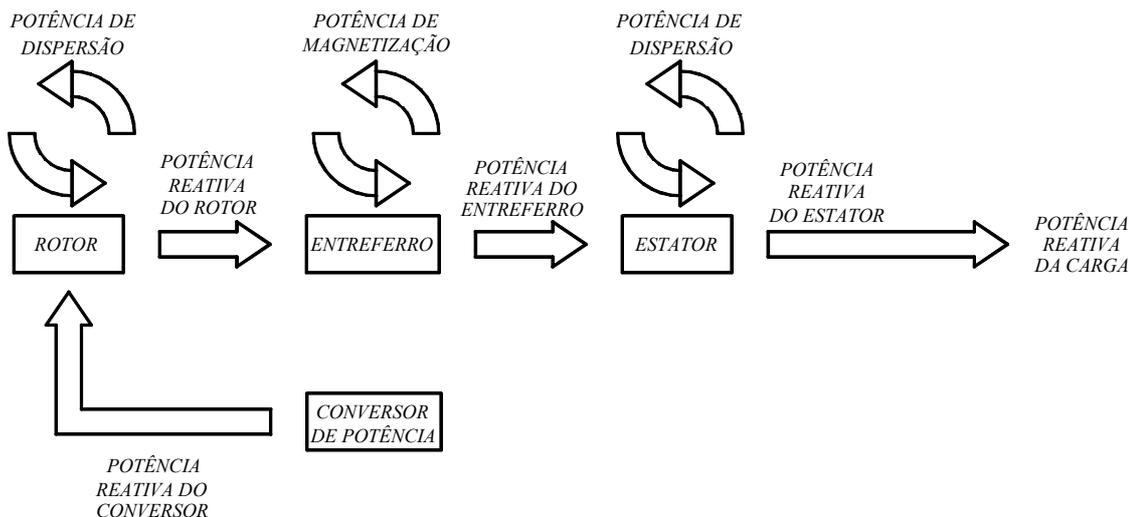


Figura 33 – Convenção para o fluxo de potência reativa no sistema de geração estudado.

Analisando a Figura 33, a potência reativa relativa às reatâncias de dispersão do estator e do rotor, somada à potência de magnetização e à potência gerada ou consumida pela carga ou sistema elétrico, é gerada no conversor de potência, através do chaveamento dos

tiristores. Como se está considerando o conversor de potência ideal, com uma ponte retificadora para corrente contínua, a potência reativa na sua entrada pode ser considerada zero.

Como será apresentado depois, os sentidos das potências convencionados nas Figuras 32 e 33 referem-se à operação subsíncrona, quando o rotor gira a uma rotação inferior à rotação relativa à frequência síncrona. Para a operação sobressíncrona, os sentidos são mantidos os mesmos, porém alguns valores terão sinais negativos, indicando que o fluxo da referida potência se dá no sentido contrário ao convencionado nesta seção.

4.3 POTÊNCIA MECÂNICA NO SISTEMA DE GERAÇÃO

A potência mecânica, conforme citado no início desse capítulo e na Figura 32, será considerada como sendo a potência mecânica disponível no eixo do gerador, ou líquida, já subtraídas as perdas mecânicas. Estas perdas são referentes ao atrito nos mancais que suportam o eixo do conjunto máquina motriz e GEADA e ao atrito do rotor com o ar em movimento no interior da máquina, referido como perdas por ventilação. Desta forma, nos ensaios na bancada de testes do projeto, será esta a potência mecânica disponível no eixo, correspondendo ao valor do produto do conjugado mecânico, T_m , pela velocidade de rotação deste eixo, ω_{eixo} . Isto é resumido na equação (37) e na equação (23), transcrita na equação (38).

$$P_{mec} = P_{maq_motriz} - P_{mecânicas} = P_{maq_motriz} - (P_{atrito} + P_{ventilação}) \quad (37)$$

$$P_{mec} = T_m \cdot \omega_{eixo} \quad (38)$$

4.4 POTÊNCIAS ATIVAS NO GEADA

São apresentadas nesta seção as considerações de cada parcela de potência ativa envolvida, conforme a equação (28), porém, antes serão revistos os conceitos envolvidos com o circuito equivalente do GEADA, estudado no Capítulo 3.

4.4.1 O circuito equivalente em regime permanente do GEADA com a explicitação das componentes das potências ativa e mecânica no circuito do rotor

No Capítulo 3 foi apresentado o modelo do circuito equivalente para os estudos de regime permanente do GEADA e o equacionamento das correntes de estator e rotor na sua forma clássica.

Porém, conforme sustentado nos trabalhos de (HINDMARSH, 1984; ÇADIRCI, 1992; LOBOSCO, 2001; SAY, 1983), para o estudo das potências envolvidas no referido modelo, se faz necessária que seja explicitada a representação dos componentes relativos à potência mecânica no circuito equivalente e à potência de perdas por efeito Joule nos enrolamentos do circuito, de maneira a permitir os equacionamentos das potências ativas envolvidas no GEADA em regime permanente considerando o escorregamento, nos modos subsíncrono ou sobressíncrono. É sustentado por (LOBOSCO, 2001) ainda, que a maneira como se representa o circuito equivalente na Figura 24 pode levar a entendimentos errôneos quando se estudam as potências no circuito em questão.

Assim, os termos relativos às potências estão representados na Figura 34, que tem origem na Figura 24. Os termos do circuito do rotor relativos à perda Joule estão circulados na Figura 34 com ovais de linha cheia, e os termos relativos à potência mecânica, circulados com a oval de linha tracejada. A fundamentação para esta divisão é suprimida para a objetividade.

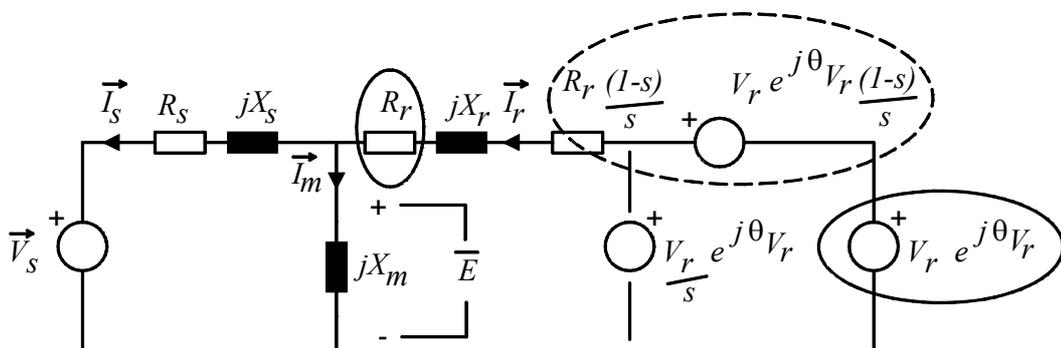


Figura 34 – Circuito equivalente do GEADA com os termos relativos à potência mecânica e à perda por efeito Joule no circuito do rotor.

Esta alteração no circuito equivalente original, embora importante para o equacionamento apresentado adiante das potências ativas no GEADA operando em regime

permanente, não altera o equacionamento das correntes de estator e rotor desenvolvido no Capítulo 3.

4.4.2 Potência ativa no rotor do GEADA

A potência entregue pelo sistema conversor de potência ao rotor do GEADA ou recebida por aquele deste é compreendida como potência do rotor. Esta potência contempla a potência ativa consumida pelas resistências do circuito do enrolamento do rotor, P_{Joule_r} , e uma parcela da potência ativa proporcional ao escorregamento, necessária para a compensação deste. Estas duas potências são tratadas inicialmente separadamente neste trabalho, sendo nesta seção tratada a primeira.

A potência correspondente às perdas elétricas nas resistências do enrolamento por efeito Joule, conforme a equação (4), que é apresentada na equação (39), considerando-se o exposto anteriormente na seção 4.4.1, com base na Figura 34.

$$P_{Joule_r} = |\vec{I}_r|^2 \cdot R_r \quad (39)$$

4.4.3 Potência ativa no estator do GEADA

A potência ativa consumida no circuito do estator correspondente às perdas nas resistências do enrolamento por efeito Joule será calculada pela equação (40).

$$P_{Joule_s} = |\vec{I}_s|^2 \cdot R_s \quad (40)$$

4.4.4 Potência ativa disponível à carga

A potência ativa consumida pela carga ou entregue ao sistema elétrico ao qual o GEADA está conectado, P_{carga} , é calculada pela equação (41), considerando-se que a corrente de carga, \vec{I}_{carga} , será a corrente do estator, \vec{I}_s , definida no Capítulo 3.

$$P_{carga} = |\vec{I}_{carga}|^2 \cdot R_{carga} \quad (41)$$

Como foi apresentado no Capítulo 2, caso neste trabalho fosse considerado o sistema de geração de energia elétrica convencional como o conversor de potência sendo alimentado pela potência gerada nos terminais do GEADA, para se ter a corrente da carga, deveríamos descontar da corrente do estator, a corrente consumida pelo conversor de potência para alimentar o rotor. Neste segundo caso, conforme (JEONG, 1987), podemos, para fins de equacionamento, inserir uma resistência equivalente em paralelo com a carga, para representar a corrente de entrada do conversor de potência. Isto não será compreendido neste trabalho.

4.4.5 Potência ativa no entreferro do GEADA

Neste estudo utiliza-se o conceito de potência do entreferro para se relacionar a potência líquida de entrada do sistema fornecida pela máquina motriz e a potência fornecida pelo conversor de potência, com o escorregamento do rotor.

Desta forma teremos que a potência ativa no entreferro, P_g , pelo princípio da conservação de energia, apresentará o mesmo valor, quando calculada a partir das potências ativas envolvidas ou no rotor ou no estator, diferindo apenas no sentido do fluxo desta potência, incluindo-se aí a potência mecânica.

Conforme (HINDMARSH, 1984) a inserção da fonte de tensão e frequência controlada no circuito equivalente do rotor da máquina de indução clássica, conforme já apresentado nas Figuras 24 e 34, não altera a distribuição das componentes da potência do entreferro, potência ativa nesta seção, mantendo-se as mesmas, conforme a equação (42).

$$P_g = s \cdot P_g + (1 - s) \cdot P_g \quad (42)$$

Estas componentes da potência do entreferro, segundo (HINDMARSH, 1984), são calculadas conforme as equações (43) e (44), respeitando-se os sentidos das correntes e tensões convencionados nas Figuras 24 e 32. A equação (43) relaciona a potência transferida do rotor para o entreferro, P_{escorr} , com a potência no entreferro, P_g , e a equação (44) apresenta a relação entre esta potência no entreferro e a potência mecânica líquida no eixo, P_{mec} .

$$P_{escorr} = s \cdot P_g \quad (43)$$

$$P_{mec} = \frac{P_{mec} - 3}{3} = (1 - s) \cdot P_g \quad (44)$$

Conforme a equação (44), a potência do entreferro, P_g , neste trabalho, está sendo considerada como relativa a uma fase do circuito trifásico do GEADA. Também no balanço de potências apresentado na Figura 30, pode ser visualizada a relação desta potência com as demais potências envolvidas na operação do GEADA.

A potência no entreferro, P_g , é a potência que é transferida ao estator a partir do entreferro, P_{g_s} , e é igual à potência mecânica, P_{mec} , somada à potência que é transferida do rotor ao entreferro, P_{g_r} .

4.4.6 Relações entre as demais potências ativas do GEADA

A título de estudo teórico, apresentam-se nesta seção os conceitos das demais potências ativas do GEADA.

A partir da Figura 32 tem-se que a potência ativa disponível à carga ou sistema elétrico é igual à potência ativa gerada no estator, $P_{estator}$, subtraída da potência ativa de entrada do conversor de potência conectado ao rotor, $P_{entrada_conv_pot}$, se considerarmos como existente a conexão em linha tracejada nesta Figura 26. Assim tem-se a equação (45).

$$P_{carga} = P_{estator} - P_{entrada_conv_pot} \quad (45)$$

As relações da Figura 26 são traduzidas pelas equações (46) a (50).

$$P_{estator} = P_g - P_{Joule_s} \quad (46)$$

$$P_{entrada_rotor} = P_{saída_conv_pot} = P_{entrada_conv_pot} - P_{Joule_conv} \quad (47)$$

$$P_{escorr} = P_{entrada_rotor} - P_{Joule_r} \quad (48)$$

$$s \cdot P_g = P_{g_r} = P_{escorr} \quad (49)$$

$$P_g = P_{escorr} + P_{mec} \quad (50)$$

Assim, tomando por base a equação (42), resumimos o fluxo de potência ativa no sistema de geração como na equação (51), que confirma a conservação da energia no sistema de geração em questão, pois a potência de saída, P_{carga} , é igual à potência de entrada, descontadas as perdas nos componentes ativos dos circuitos.

$$P_{carga} = P_{mec} - (P_{Joule_r} + P_{Joule_s} + P_{Joule_conv}) \quad (51)$$

Para fins de utilização destas equações neste trabalho, a equação (47) é transformada na equação (52) porque o conversor de potência está sendo considerado sem perdas. E, como consequência, a equação (41) toma a forma final da equação (53).

$$P_{entrada_rotor} = P_{saída_conv_pot} = P_{entrada_conv_pot} \quad (52)$$

$$P_{carga} = P_{mec} - (P_{Joule_r} + P_{Joule_s}) \quad (53)$$

Pode-se calcular o conjugado eletromagnético a partir da potência no entreferro a partir das equações (33) e (34), resumidas na equação (44).

$$T_e = \frac{P_{mec}}{\omega_{eixo}} = \frac{(1-s) \cdot P_g}{\omega_{eixo}} \quad (54)$$

Assim, a equação (54) apresenta a relação entre o conjugado eletromagnético e a potência no entreferro, estando transcrita nas equações (55) e (56), em concordância com o que está na seção 4.1.

$$T_e = \frac{P_{mec}}{\omega_s \cdot (1-s)} \quad (55)$$

$$T_e = 3 \cdot \frac{P_g}{\omega_s} \quad (56)$$

4.5 POTÊNCIAS REATIVAS NO SISTEMA DE GERAÇÃO

A excitação dos circuitos magnéticos das máquinas elétricas se desenvolve a partir do atraso ou adianto da corrente fornecida a estes circuitos em relação à tensão, o que se convencionou ao longo da história chamar-se “potência reativa”. A exemplo do que ocorre com as máquinas de indução clássicas, esta potência deve ser fornecida por uma fonte externa, dada a incapacidade intrínseca da própria máquina em suprir por si só esta potência de excitação aos seus circuitos magnéticos. Analisando-se a máquina síncrona, constata-se que esta também necessita de uma fonte externa para o fornecimento da potência reativa para os circuitos magnéticos, que é o sistema de excitação acoplado ao seu enrolamento de rotor.

Assim, neste trabalho, com o GEADA operando conectado ao sistema elétrico ou alimentando uma carga isoladamente, o fornecimento da potência reativa aos seus circuitos será considerado através do conversor de potência acoplado ao rotor.

Conforme (JEONG, 1987) a potência reativa é circulante, sendo, em regime permanente balanceada automaticamente pelo conversor de potência, pela ação do chaveamento (disparo) dos seus dispositivos controlados, de forma a prover aos circuitos do rotor e do estator uma corrente adiantada, compondo a potência reativa capacitiva, compensando a potência reativa necessária para os circuitos magnéticos. Isto pode ser visualizado na Figura 32.

4.5.1 Potência reativa no rotor do GEADA

É a potência relacionada às reatâncias de dispersão do circuito magnético do rotor, sendo calculada pela equação (57).

$$Q_{dispers\tilde{a}o_r} = |\vec{I}_r|^2 \cdot X_r \quad (57)$$

4.5.2 Potência reativa no estator do GEADA

É a potência relacionada às reatâncias de dispersão do circuito magnético do estator, expressa na equação (58).

$$Q_{dispers\tilde{a}o_s} = |\vec{I}_s|^2 \cdot X_s \quad (58)$$

4.5.3 Potência de magnetização do GEADA

É a potência necessária para a magnetização do circuito de acoplamento entre o rotor e o estator, sendo o responsável pela transferência de energia através do entreferro, conforme o modo de operação do GEADA.

Esta potência de magnetização será calculada pela equação (59), seguindo-se os sentidos das correntes definidos nas Figuras 24 e 33 e resumidos na equação (60).

$$Q_{acopl_magn} = |\vec{I}_m|^2 \cdot X_m \quad (59)$$

onde

$$\vec{I}_m = \vec{I}_r - \vec{I}_s \quad (60)$$

4.5.4 Potência reativa da carga

É a potência reativa fornecida à carga, e é expressa pela equação (61).

$$Q_{carga} = |\vec{I}_{carga}|^2 \cdot X_{carga} \quad (61)$$

4.5.5 Potência reativa no entreferro do GEADA

Nesta seção estão definidas as potências reativas dos diversos circuitos do gerador, através do conceito de potência reativa do entreferro.

Conforme já exposto, a potência reativa é uma potência circulante no sistema de geração, mas para efeito de desenvolvimento do equacionamento, será considerada como sendo circulante entre o conversor de potência e o rotor, deste para o entreferro, para o estator e para a carga ou sistema elétrico ao qual o GEADA está conectado.

A partir do conceito de potência reativa do entreferro e da convenção dos sentidos para as parcelas da potência reativa envolvida no GEADA conforme a Figura 32, têm-se as equações (62) a (64), a partir da equação (29).

$$Q_{g_r} = Q_{conv_pot} - Q_{dispensão_r} - Q_{acopl_magn} \quad (62)$$

$$Q_{g_s} = Q_{dispensão_s} + Q_{carga} \quad (63)$$

$$Q_{g_s} = -Q_{g_r} \quad (64)$$

4.6 O EQUACIONAMENTO DAS POTÊNCIAS DO GEADA

Para os estudos a que se propõe este trabalho se faz necessário que se tenham as potências ativas e reativas descritas em função das tensões e parâmetros do GEADA, a partir

das equações conceituais desenvolvidas nas seções 4.4. e 4.5, tomando-se por base o circuito equivalente da Figura 24.

Para a equação das potências disponíveis para a carga ou sistema de conexão usa-se o conjugado da corrente do estator, \vec{I}_s^* , que corresponde à equação (65).

$$\vec{I}_s^* = I_{s\text{real}} - j I_{s\text{imag}} \quad (65)$$

A potência ativa disponível à carga, P_{carga} , pode ser calculada pela equação (55), porém ao longo deste trabalho será usada preferencialmente a forma da equação (66). A partir das equações (24) a (26), do Capítulo 3, chega-se à equação (67).

$$P_{carga} = \text{Real}(\vec{S}_{carga}) = \text{Real}(\vec{V}_s \cdot \vec{I}_s^*) \quad (66)$$

$$P_{carga} = \frac{-V_s^2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\frac{R_s R_r^2}{s^2} + R_s (X_r + X_m)^2 + X_m^2 \frac{R_r}{s} \right] + \frac{V_s V_r X_m}{s(F_A^2 + F_B^2)} [F_B \cos \theta_{V_r} - F_A \sin \theta_{V_r}] \quad (67)$$

Note-se que a equação da potência entregue ao rotor pelo conversor de potência está sendo considerada inicialmente como sendo fornecida por outra fonte que não a potência gerada pelo GEADA, conforme a seção 4.4.6, de forma que a equação (45) toma a forma da equação (68), conforme a Figura 29.

$$P_{carga} = P_{estator} \quad (68)$$

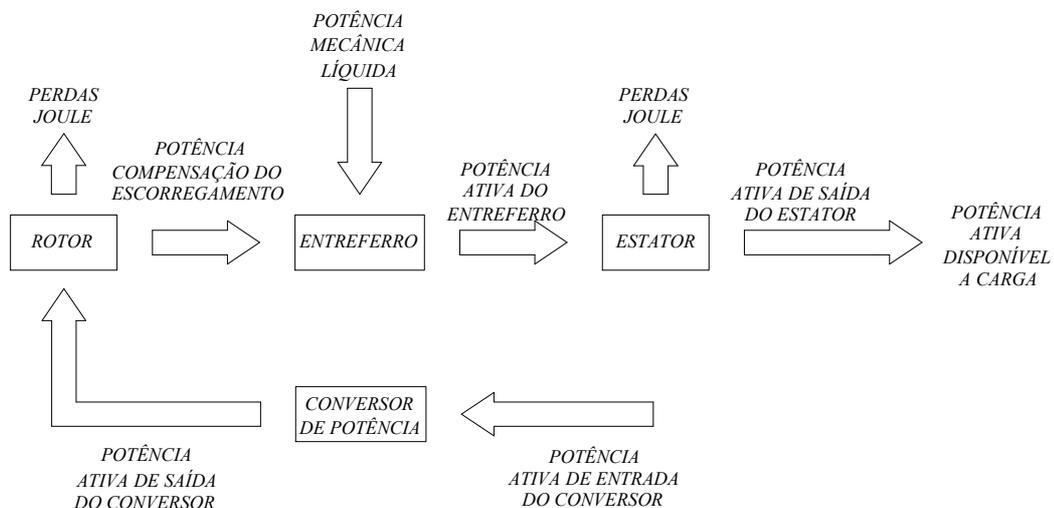


Figura 35 – Convenção para o fluxo de potência ativa no GEADA simplificado.

A potência reativa da carga, Q_{carga} , entregue pelo estator ao sistema de conexão ou carga, é dada pela equação (70) a partir da equação (69), ao invés da equação (61), e das equações (24) a (26).

$$Q_{carga} = \text{Imag}(\vec{S}_{carga}) = \text{Imag}(\vec{V}_s \cdot \vec{I}_s^*) \quad (69)$$

$$Q_{carga} = -\frac{V_s V_r X_m}{s(F_A^2 + F_B^2)} [F_A \cos \theta_{V_r} + F_B \text{sen} \theta_{V_r}] - \frac{V_s^2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[(X_r + X_m) \cdot (X_s X_r + X_m (X_s + X_r)) + \frac{R_r^2 (X_s + X_m)}{s^2} \right] \quad (70)$$

Para equacionar a parcela da potência correspondente às perdas por efeito Joule nas resistências do estator, P_{Joule_s} , necessita-se da equação do quadrado da corrente de estator. Assim tem-se a equação (71).

$$|\vec{I}_s|^2 = \frac{(F_{1s}^2 + F_{2s}^2)}{(F_A^2 + F_B^2)} \quad (71)$$

Os termos F_A e F_B estão definidos nas equações (19) e (20), e F_{1s} e F_{2s} definidos nas equações (72) e (73).

$$F_{1s} = \left(\frac{R_r}{s} V_s + X_m \frac{V_r}{s} \text{sen} \theta_{V_r} \right) \quad (72)$$

$$F_{2s} = \left(X_m \frac{V_r}{s} \cos \theta_{V_r} - V_s (X_r + X_m) \right) \quad (73)$$

Com isto a potência dissipada na forma de calor nas resistências do enrolamento do estator resulta na equação (74).

$$P_{Joule_s} = \frac{1}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\frac{R_r^2 V_s^2 R_s}{s^2} + \frac{2R_r V_s X_m V_r R_s}{s^2} \text{sen} \theta_{V_r} + V_s^2 X_r^2 R_s \right] + \frac{1}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[V_s^2 X_m^2 R_s - \frac{2X_m V_r V_s X_r R_s}{s} \cos \theta_{V_r} \right] - \frac{1}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\frac{2X_m V_r V_s X_m R_s}{s} \cos \theta_{V_r} + \frac{X_m^2 V_r^2 R_s}{s^2} \right] + \frac{2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[V_s^2 X_r X_m R_s \right] \quad (74)$$

A potência reativa relativa à dispersão nas reatâncias próprias do enrolamento do estator é calculada pela equação (76) a partir da equação (58).

$$Q_{dispersão_s} = \frac{(F_{I_s}^2 + F_{2s}^2)}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot X_s \quad (75)$$

$$\begin{aligned} Q_{dispersão_s} = & \frac{1}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(V_s^2 X_s \frac{R_r^2}{s^2} \right) + \left(X_m^2 X_s \frac{V_r^2}{s^2} \right) + \left(V_s^2 X_r^2 X_s \right) \right] + \\ & + \frac{1}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(X_m^2 X_s V_s^2 \right) + 2 \left(X_m X_s X_r V_s^2 \right) \right] - \\ & - \frac{2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{V_r}{s} X_s X_m V_s \right) \cdot \left(\frac{R_r}{s} \text{sen}\theta_{V_r} + X_r \text{cos}\theta_{V_r} + X_m \text{cos}\theta_{V_r} \right) \right] \end{aligned} \quad (76)$$

As potências ativa e reativa entregues ao rotor pelo conversor de potência ao qual está conectado ou recebido deste por aquele são dadas pelas equações (78) e (80).

$$P_{conv} = \text{Real} \left(V_r (\text{cos}\theta_{V_r} + j \text{sen}\theta_{V_r}) \cdot \vec{I}_r^* \right) \quad (77)$$

$$\begin{aligned} P_{conv} = & \frac{V_r^2}{s(F_A^2 + F_B^2)} \left[\frac{R_s^2 R_r}{s} + (X_s + X_m) \frac{R_r X_s}{s} \right] + \\ & + \frac{V_r^2}{s(F_A^2 + F_B^2)} \left[X_m \left(\frac{R_r X_s}{s} + X_m \left(R_s + \frac{R_r}{s} \right) \right) \right] - \\ & - \frac{V_s V_r X_m}{(F_A^2 + F_B^2)} [F_B \text{cos}\theta_{V_r} + F_A \text{sen}\theta_{V_r}] \end{aligned} \quad (78)$$

$$Q_{conv} = \text{Imag} \left[\frac{V_r}{s} (\text{cos}\theta_{V_r} + j \text{sen}\theta_{V_r}) \cdot \vec{I}_r^* \right] \quad (79)$$

$$\begin{aligned} Q_{conv} = & \frac{V_r^2}{s^2(F_A^2 + F_B^2)} \left[R_s^2 (X_r + X_m) + (X_s + X_m) (X_s X_r + X_m (X_s + X_r)) \right] + \\ & + \frac{V_s V_r X_m}{s(F_A^2 + F_B^2)} [F_A \text{cos}\theta_{V_r} - F_B \text{sen}\theta_{V_r}] \end{aligned} \quad (80)$$

Da mesma forma que para o estator, necessitamos da corrente de rotor ao quadrado, expressa na forma da equação (81).

$$|\bar{I}_r|^2 = \frac{(F_{1r}^2 + F_{2r}^2)}{(F_A^2 + F_B^2)} \quad (81)$$

Os termos F_{1r} e F_{2r} estão definidos nas equações (82) e (83).

$$F_{1r} = \left[\left(R_s \frac{V_r}{s} \cos \theta_{V_r} \right) - \left(X_s \frac{V_r}{s} + X_m \frac{V_r}{s} \right) \text{sen} \theta_{V_r} \right] \quad (82)$$

$$F_{2r} = \left[\left(R_s \frac{V_r}{s} \text{sen} \theta_{V_r} \right) + \left(X_s \frac{V_r}{s} + X_m \frac{V_r}{s} \right) \text{cos} \theta_{V_r} - X_m V_s \right] \quad (83)$$

Tem-se então a equação (84) que calcula a potência dissipada na forma de calor nas resistências do enrolamento do rotor, efeito Joule, partindo-se da equação (53).

$$\begin{aligned} P_{\text{Joule}_r} = & \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(R_r R_s^2 V_r^2 \right) + \left(R_r X_s^2 V_r^2 \right) + \left(R_r X_m^2 V_r^2 \right) \right] + \\ & + \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[2 \left(R_r X_m X_s V_r^2 \right) + R_r X_m^2 V_s^2 \right] - \\ & - \frac{2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(R_r V_r X_m V_s \right) \cdot \left(R_s \text{sen} \theta_{V_r} + X_s \text{cos} \theta_{V_r} + X_m \text{cos} \theta_{V_r} \right) \right] \end{aligned} \quad (84)$$

A potência reativa correspondente ao circuito de dispersão do rotor é calculada pela equação (86) a partir da equação (58) e (81).

$$Q_{\text{dispersão}_r} = \frac{(F_{1r}^2 + F_{2r}^2)}{(F_A^2 + F_B^2)} \cdot X_r \quad (85)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{dispersão}_r} = & \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(R_s^2 X_r \frac{V_r^2}{s^2} \right) + \left(X_s^2 X_r \frac{V_r^2}{s^2} \right) + \left(X_m^2 X_r \frac{V_r^2}{s^2} \right) \right] + \\ & + \frac{I}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[2 \left(X_m X_s X_r \frac{V_r^2}{s^2} \right) + X_m^2 X_r V_s^2 \right] - \\ & - \frac{2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_r}{s} X_r X_m V_s \right) \cdot \left(R_s \text{sen} \theta_{V_r} + X_s \text{cos} \theta_{V_r} + X_m \text{cos} \theta_{V_r} \right) \right] \end{aligned} \quad (86)$$

A potência reativa envolvida na magnetização dos circuitos responsáveis pela transferência da potência através do entreferro tanto do rotor ao estator quanto do estator para o rotor é calculada pela equação (90) a partir das equações (59) e (60).

$$|\vec{I}_m|^2 = |\vec{I}_r - \vec{I}_s|^2 = \frac{(F_1^2 + F_2^2)}{(F_A^2 + F_B^2)} \quad (87)$$

Sendo que os termos F_1 e F_2 são as somas, respectivamente, dos termos F_{1s} e F_{1r} e F_{2s} e F_{2r} , conforme as equações (88) e (89).

$$F_1 = (F_{1r} + F_{1s}) \quad (88)$$

$$F_2 = (F_{2r} - F_{2s}) \quad (89)$$

$$\begin{aligned} Q_{acopl_magn} = & \frac{1}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(R_s^2 X_m \frac{V_r^2}{s^2} \right) + \left(X_s^2 X_m \frac{V_r^2}{s^2} \right) + \left(\frac{R_r^2}{s^2} X_m V_s^2 \right) \right] + \\ & + \frac{2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(R_s \frac{V_r}{s} \frac{R_r}{s} V_s X_m \cos \theta_{V_r} \right) - \left(X_s \frac{V_r}{s} \frac{R_r}{s} V_s X_m \sin \theta_{V_r} \right) \right] - \\ & - \frac{1}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(V_s^2 X_r^2 X_m \right) + 2 \left(R_s \frac{V_r}{s} V_s X_r X_m \sin \theta_{V_r} \right) + 2 \left(X_s \frac{V_r}{s} V_s X_r X_m \cos \theta_{V_r} \right) \right] \end{aligned} \quad (90)$$

A partir da equação (48) temos a equação (91), para o cálculo da potência ativa que flui entre o rotor e o entreferro.

$$\begin{aligned} P_{escorr} = P_{g_r} = & \frac{X_m^2}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[\frac{V_r^2 R_s}{s} - V_s^2 R_r \right] + \\ & + \frac{V_r V_s X_m \cos \theta_{V_r}}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[((X_s + X_m) R_r - R_s (X_r + X_m)) \right] + \\ & + \frac{V_r V_s X_m \sin \theta_{V_r}}{(F_A^2 + F_B^2)} \left[(R_s R_r + X_r X_s + X_m (X_s + X_r)) \right] \end{aligned} \quad (91)$$

Pode-se calcular a potência ativa entregue ao estator pelo entreferro pela equação (92), na qual, substituindo-se as equações (67) e (74) chega-se à equação (93). A equação (92) também relaciona a potência total entregue ao estator a partir do entreferro, com a potência que flui entre o entreferro e o rotor.

$$P_{g_s} = P_g = P_{carga} + P_{Joule_s} = \frac{P_{g_r}}{s} \quad (92)$$

$$\begin{aligned}
P_g = & \frac{X_m^2}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left(\frac{V_r^2}{s} R_s - V_s^2 R_r \right) + \\
& + \frac{V_r V_s X_m \cos \theta_{V_r}}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_r}{s} (X_s + X_m) - R_s (X_r + X_m) \right) \right] + \\
& + \frac{V_r V_s X_m \sin \theta_{V_r}}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_s R_r}{s} + X_r X_s + X_m (X_s + X_r) \right) \right]
\end{aligned} \tag{93}$$

Para que se calcule a potência mecânica líquida entregue ao eixo do rotor pela máquina motriz, recorre-se à equação (44), transcrita na equação (94), que traduz a relação entre a potência mecânica e a potência do entreferro, chegando-se a equação (95).

$$P_{mec} = (1-s) \cdot P_g = P_{g_r} \cdot \frac{(1-s)}{s} \tag{94}$$

$$\begin{aligned}
P_{mec} = & \frac{(1-s) \cdot X_m^2}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left(\frac{V_r^2}{s} R_s - V_s^2 R_r \right) + \\
& + \frac{(1-s) \cdot V_r V_s X_m \cos \theta_{V_r}}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_r}{s} (X_s + X_m) - R_s (X_r + X_m) \right) \right] + \\
& + \frac{(1-s) \cdot V_r V_s X_m \sin \theta_{V_r}}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_s R_r}{s} + X_r X_s + X_m (X_s + X_r) \right) \right]
\end{aligned} \tag{95}$$

O conjugado mecânico correspondente a uma fase do GEADA, T_m , é calculado a partir das equações (34), (55) e (56), sendo que a equação (96) apresenta a sua forma em função das grandezas e parâmetros do GEADA.

$$\begin{aligned}
T_m = & \frac{X_m^2}{\omega_s \cdot s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left(\frac{V_r^2}{s} R_s - V_s^2 R_r \right) + \\
& + \frac{V_r V_s X_m \cos \theta_{V_r}}{\omega_s \cdot s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_r}{s} (X_s + X_m) - R_s (X_r + X_m) \right) \right] + \\
& + \frac{V_r V_s X_m \sin \theta_{V_r}}{\omega_s \cdot s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_s R_r}{s} + X_r X_s + X_m (X_s + X_r) \right) \right]
\end{aligned} \tag{96}$$

Para a potência reativa no entreferro, partindo-se da equação (65), chega-se à equação (97).

$$\begin{aligned}
Q_{g-r} = & \frac{-V_S V_r X_m \cos \theta_{V_r}}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_r}{s} R_S + X_S X_m - X_r X_m + X_S X_r \right) \right] + \\
& + \frac{V_S V_r X_m \sin \theta_{V_r}}{s \cdot (F_A^2 + F_B^2)} \left[\left(\frac{R_r}{s} X_S - \frac{R_r}{s} X_m - R_S X_r - R_S X_m \right) \right] + \\
& + \frac{V_r^2}{s^2} X_m^2 X_S - V_S^2 \left(X_m^2 X_r + \frac{R_r^2}{s^2} X_m + X_r^2 X_m \right)
\end{aligned} \tag{97}$$

4.7 MODOS OPERATIVOS DO GEADA

Na seção 4.6 foram apresentadas as equações que serão utilizadas para os cálculos das potências referentes ao GEADA.

O modelo do circuito equivalente para o GEADA foi construído a partir da teoria clássica para motores de indução, considerando a máquina com velocidade de rotação do eixo rotor, ω_{eixo} , abaixo da velocidade correspondente à frequência síncrona, ω_s . Isto fica claro na consideração do termo escorregamento, s , que vem a ser, por definição, um atraso da rotação do eixo mecânico (do rotor) em relação à rotação do eixo do campo magnético girante no entreferro, conforme o conceito apresentado na seção 4.1.

Trazendo-se este conceito de escorregamento para o GEADA, este opera como gerador com o rotor tanto na velocidade abaixo da velocidade síncrona, operando no modo subsíncrono, quanto na velocidade acima, no modo sobressíncrono. Por definição, no modo subsíncrono o escorregamento é positivo, enquanto que no modo sobressíncrono, o escorregamento é negativo.

As equações desenvolvidas nos Capítulos 3 e 4 são válidas para qualquer modo operativo, bastando usar-se o valor correto do escorregamento, com o seu sinal.

4.7.1 Modo operativo subsíncrono

Conceitualmente falando, tanto na Figura 32 como na Figura 35, o fluxo de potências ativas é positivo para o modo operativo subsíncrono. Tem-se que a tensão imposta pelo conversor de potência ao rotor, \vec{V}_r , tem a mesma seqüência de fases da tensão gerada nos terminais do estator, \vec{V}_s .

4.7.2 Modo operativo sobressíncrono

Para a análise do modo operativo sobressíncrono o fluxo de potência ativa entre o rotor e o entreferro ocorre no sentido contrário daquele convencionado nas Figuras 32 e 35. O escorregamento é calculado pela mesma equação (32), transcrita na equação (98).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_{eixo}}{\omega_s} \quad (98)$$

A velocidade de rotação do eixo do GEADA, ω_{eixo} , sendo maior que a velocidade síncrona, ω_s , resulta no escorregamento negativo, gerando um campo magnético girante adiantado em relação ao campo magnético correspondente à frequência síncrona no estator (armadura). Para que se mantenha esta frequência síncrona deve-se, então, ter uma frequência negativa para a tensão imposta pelo conversor de potência, que é garantida pela seqüência de fases invertida desta tensão em relação à seqüência de fases da tensão gerada nos terminais do estator.

Neste modo operativo sobressíncrono, tomando-se por base as Figuras 24 ou 33, o sentido da corrente de rotor, \vec{I}_r , é invertida, porque a tensão induzida, \vec{E} , é maior que \vec{V}_r , tendo-se a equação (99).

$$-\vec{I}_r = \vec{I}_s + \vec{I}_m \quad (99)$$

Nas Figuras 39, 40 e 41 é usada $-\vec{I}_r$, onde são apresentados os diagramas fasoriais de fator de potência unitário, indutivo e capacitivo de modo geral.

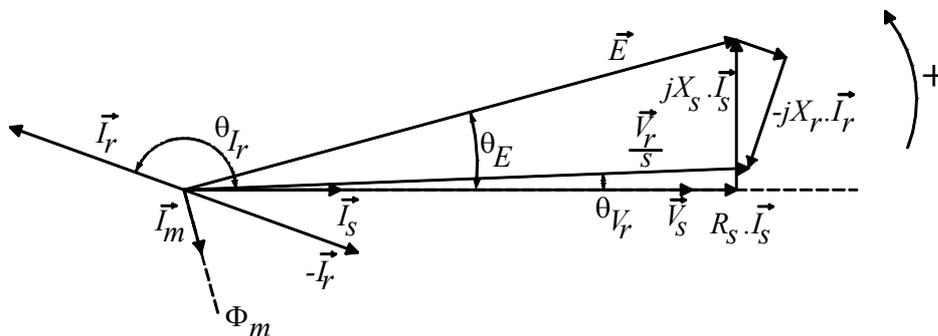


Figura 39 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo sobressíncrono com fator de potência, FP, unitário.

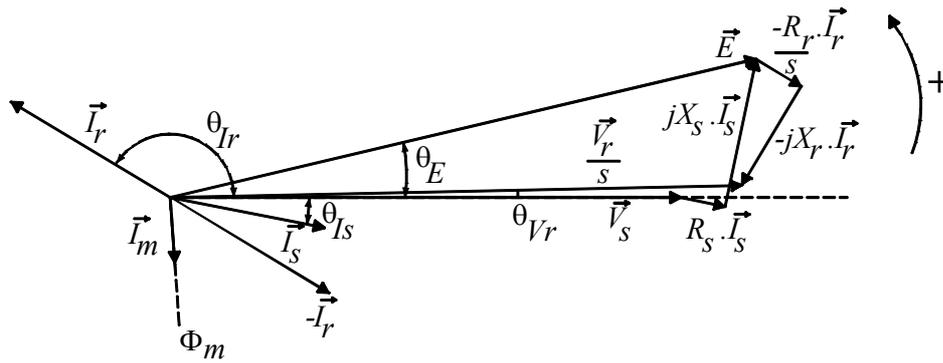


Figura 40 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo sobressíncrono com fator de potência, FP, indutivo.

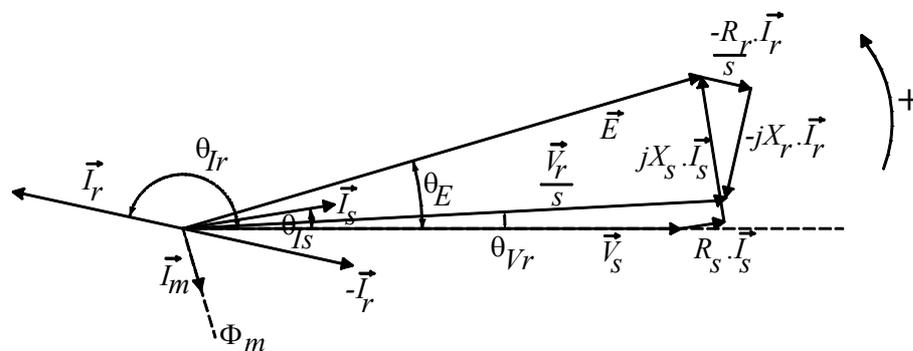


Figura 41 – Diagrama fasorial teórico do GEADA - modo sobressíncrono com fator de potência capacitivo.

4.8 ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA DO GEADA

O conhecimento do fator de potência, FP , é importante para a operação do GEADA. O fator de potência pode ser calculado pela equação (100), através do co-seno do ângulo de fase entre a tensão gerada nos terminais do estator, \vec{V}_s , e a corrente que circula no estator, \vec{I}_s , que está sendo considerada a corrente que circulará na carga também, pelas considerações feitas na seção 4.7, que servem de base para a Figura 35.

$$FP = \cos(\theta_{I_s} - \theta_{V_s}) \quad (100)$$

Como a tensão gerada nos terminais é considerada a referência de ângulo das tensões e correntes, com ângulo 0° , fica a equação (100) na forma da equação (101).

$$FP = \cos(\theta_{I_s}) \quad (101)$$

4.8.1 Relação da tensão do rotor com o fator de potência do GEADA

Para investigar-se o efeito da tensão do rotor, \vec{V}_r , no fator de potência, FP, do GEADA, apresentam-se inicialmente as equações básicas que traduzem as relações entre as tensões, corrente, ângulos de fase e potência ativa e reativa.

Os autores de (FERREIRA, 2004) baseiam sua análise do efeito da tensão imposta pelo conversor de potência ao rotor, \vec{V}_r , no fator de potência do GEADA, nas equações (102) a (104).

Segundo (FERREIRA, 2004) a tensão interna, \vec{E} , corresponde à tensão do equivalente Thèvenin, \vec{V}_{Thr} expressa pela equação (13), com base na Figura 28, para se computar a equação da corrente \vec{I}_s .

$$\vec{S} = P + jQ = 3 \cdot \vec{V}_s \cdot \vec{I}_s \cdot \cos\theta_{I_s} + j3 \cdot \vec{V}_s \cdot \vec{I}_s \cdot \sin\theta_{I_s} \quad (102)$$

$$P_{carga} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{Z^2} \cdot R + 3 \cdot \frac{V_s \cdot E}{Z} \cdot \sin(\theta_E + \theta_{I_s} - 90^\circ) \quad (103)$$

$$Q_{carga} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{Z^2} \cdot X - 3 \cdot \frac{V_s \cdot E}{Z} \cdot \cos(\theta_E + \theta_{I_s} - 90^\circ) \quad (104)$$

onde

$$\vec{E} = \vec{V}_{Thr} = \frac{\vec{V}_r}{s} \cdot \frac{j \cdot X_m}{\left(\frac{R_r}{s} + j \cdot X_r\right) + (j \cdot X_m)} \quad (105)$$

$$\vec{Z} = R + jX = (R_s + jX_s) + Z_{Thr} = Z \angle \theta_Z \quad (106)$$

Com Z_{Thr} definido na equação (14) e Figura 28, e θ_E e θ_{I_s} como ilustrados nas Figuras 36 a 41 e o fator de potência, FP , expresso pela equação (101).

Para a análise do efeito em questão, mantém-se primeiramente a potência ativa, P_{carga} , constante. Ao se variar-se a tensão imposta pelo conversor de potência ao rotor, \vec{V}_r , e conseqüentemente a tensão induzida \vec{E} , conclui-se, a partir da equação (103), que a variação da parcela $\sin(\theta_E + \theta_{I_s} - 90^\circ)$ será no sentido contrário, de forma a satisfazer a condição, P_{carga} constante. Assim, da equação (104), tem-se que a parcela $\cos(\theta_E + \theta_{I_s} - 90^\circ)$ variará

na mesma direção de \vec{V}_r , por exemplo, se \vec{V}_r aumenta, esta parcela aumenta. Desta forma a potência reativa variará também, no sentido que depende dos valores das outras grandezas expressas nesta equação.

Analisando-se a equação (104) temos que a potência reativa da carga é composta por dois termos somados. O primeiro é dependente apenas da tensão dos terminais e dos parâmetros do GEADA, e o segundo termo dependente também da tensão no rotor. A partir desta colocação, vê-se que existe um valor de \vec{V}_r para o qual a potência reativa da carga, Q_{carga} , é nula, correspondendo a um fator de potência, FP , unitário. Deste ponto, mantendo-se P_{carga} constante, ao aumentar-se \vec{V}_r tem-se o fator de potência capacitivo, com o GEADA fornecendo potência reativa a carga ou sistema elétrico. Diminuindo \vec{V}_r , Q_{carga} aumenta, resultando num fator de potência indutivo, com o GEADA consumindo potência reativa indutiva da carga ou sistema elétrico.

4.9 ANÁLISE DO RENDIMENTO DO GEADA

O conceito de rendimento de um sistema relaciona a potência de saída com a potência de entrada, na forma geral da equação (107).

$$\eta = \frac{\text{Potência útil de saída}}{\text{Potência de entrada}} = 1 - \frac{\text{Perdas}}{\text{Potência de entrada}} \quad (107)$$

4.9.1 O rendimento no modo operativo subsíncrono

A partir do conceito geral expresso na equação (107), passa-se a seguir a considerar o conceito de rendimento a partir do modo subsíncrono.

Somente tem sentido o conceito de rendimento do sistema de geração estudado se se considera o GEADA operando na forma convencional no modo operativo subsíncrono, com os sentidos dos fluxos apresentados na Figura 42, onde a potência de entrada do conversor de potência é suprida por uma parcela da potência ativa gerada nos terminais do GEADA, e, portanto o rendimento é calculado pela equação (110), a partir da equação (53).

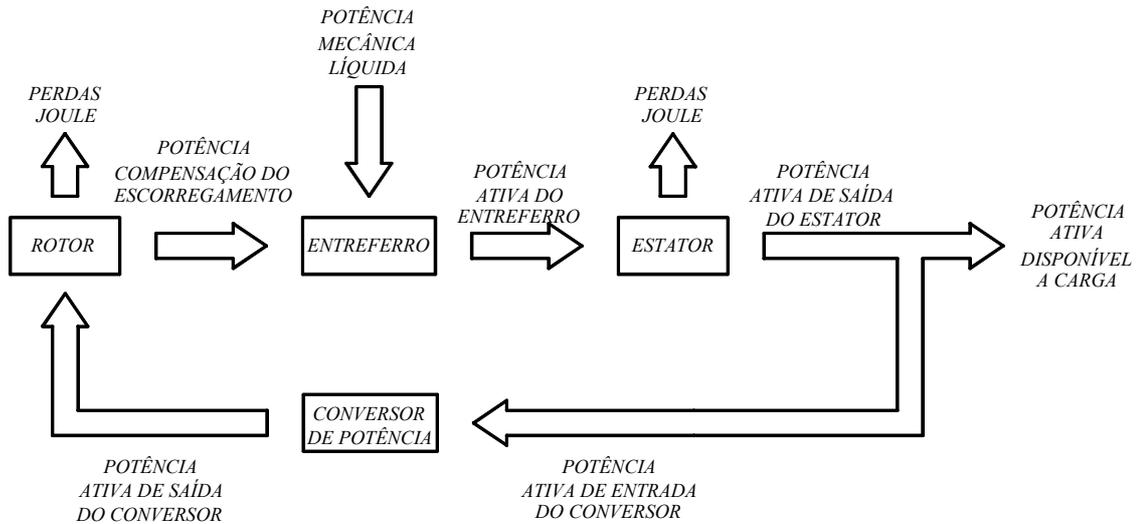


Figura 42 – Fluxo de potência ativa e mecânica no sistema de geração convencional, modo subsíncrono, considerando o conversor de potência sem perdas.

Com base na Figura 42 e nas equações (42) a (53), chega-se à equação (111), que expressa o rendimento do GEADA num sistema de geração convencional, operando no modo subsíncrono. Note-se que o rendimento calculado com esta equação (111) é igual ao dos motores de indução.

$$\eta_{\text{subsíncrono}} = \frac{P_{\text{carga}}}{P_{\text{mec}}} = \frac{(P_{\text{estator}} - P_{\text{rotor}})}{P_{\text{mec}}} \quad (108)$$

$$\eta_{\text{subsíncrono}} = \frac{P_{\text{carga}}}{P_{\text{mec}}} = \frac{((P_g - P_{\text{Joule}_s}) - (P_{\text{Joule}_r} + s \cdot P_g))}{P_{\text{mec}}} \quad (109)$$

$$\eta_{\text{subsíncrono}} = \frac{P_{\text{carga}}}{P_{\text{mec}}} = \frac{P_g \cdot (1 - s) - (P_{\text{Joule}_r} + P_{\text{Joule}_s})}{P_{\text{mec}}} \quad (110)$$

$$\eta_{\text{subsíncrono}} = \frac{P_{\text{carga}}}{P_{\text{mec}}} = 1 - \frac{(P_{\text{Joule}_r} + P_{\text{Joule}_s})}{P_{\text{mec}}} \quad (111)$$

4.9.2 O rendimento no modo operativo sobressíncrono

Seguindo a idéia da seção anterior, o conceito de rendimento do sistema de geração estudado considerando-se o GEADA operando na forma convencional no modo operativo sobressíncrono, com os sentidos dos fluxos apresentados na Figura 43, onde a potência da carga é a soma das potências de entrada do conversor de potência, com o sentido

contrário, e a potência ativa gerada nos terminais do GEADA, e, portanto, o rendimento é calculado pela equação (112), a partir da equação (53).

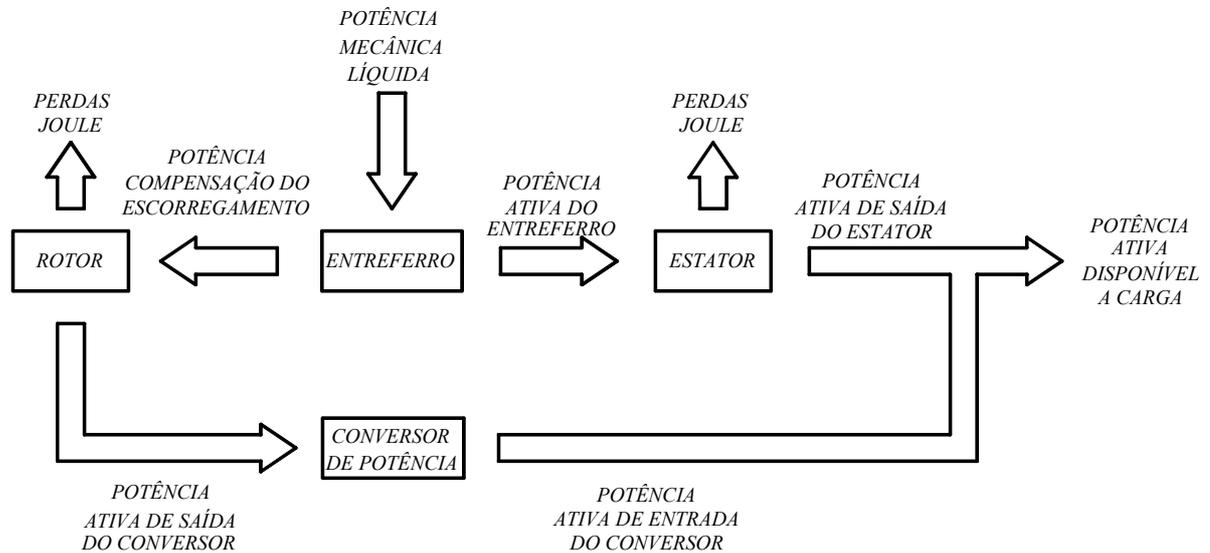


Figura 43 – Fluxo de potência ativa e mecânica no sistema de geração convencional, modo sobressíncrono, considerando o conversor de potência sem perdas.

A exemplo do que foi feito para o rendimento do modo operativo sobressíncrono nas equações (108) a (111), tem-se as equações (112) a (115).

$$\eta_{sobressíncrono} = \frac{P_{carga}}{P_{mec}} = \frac{(P_{estator} + (-P_{rotor}))}{P_{mec}} \quad (112)$$

$$\eta_{sobressíncrono} = \frac{P_{carga}}{P_{mec}} = \frac{((P_g - P_{Joule_s}) - (s \cdot P_g - P_{Joule_r}))}{P_{mec}} \quad (113)$$

$$\eta_{sobressíncrono} = \frac{P_{carga}}{P_{mec}} = 1 - \frac{(P_{Joule_s} + P_{Joule_r})}{P_{mec}} \quad (114)$$

Comparando-se as equações (111) e (114), tem-se que os rendimentos nos dois modos operativos são iguais, em conformidade com o conceito geral da equação (107). Esta igualdade verifica-se para uma mesma carga e diferentes velocidades de rotação do eixo do rotor, traduzidas no conceito de escorregamento.

5 ANÁLISE DO GEADA COMO GERADOR SÍNCRONO

Em contribuição aos estudos de fluxo de potência em sistemas elétricos, onde são calculados os desempenhos em regime permanente, este capítulo apresenta uma sucinta comparação entre os geradores assíncronos de dupla alimentação e os geradores síncronos, através da análise das suas semelhanças e diferenças.

A proposta deste capítulo é contribuir para os estudos e sistemas elétrico de forma que seja possível, mediante algumas considerações acerca do funcionamento do GEADA, utilizarem-se os modelos desenvolvidos para o gerador síncrono nos programas computacionais existentes de estudos de regime permanente de sistemas elétricos de potência. Assim será possível utilizarem-se os mesmos conceitos básicos dos geradores síncronos para quando se empregam geradores assíncronos de dupla alimentação no sistema. Também se objetiva contribuir para que sejam adaptadas as curvas características dos geradores síncronos para o GEADA, o que será explorado no Capítulo 6.

5.1 SEMELHANÇAS ENTRE O GEADA E UM GERADOR SÍNCRONO

O gerador síncrono tem por características principais a dependência da frequência da tensão gerada nos seus terminais da velocidade de rotação do seu eixo e a existência de um sistema conectado ao seu enrolamento do rotor, o sistema de excitação, através do qual se faz o controle do campo magnético girante no seu entreferro com o conseqüente controle da tensão e do fluxo de potência entre o gerador e o sistema elétrico ou carga conectada aos seus terminais.

Analisando-se de seu estator, o GEADA é um gerador que possui a frequência da tensão gerada controlada, que, correspondendo a uma frequência síncrona, poderá ser considerado um gerador síncrono, para todos os efeitos.

O sistema conversor de potência conectado ao seu enrolamento do rotor será o principal responsável por podermos considerar o GEADA como um gerador síncrono, pois permite que o campo magnético girante no entreferro seja controlado, à luz de como o campo no entreferro do gerador síncrono é controlado.

Com o correspondente fluxo magnético no entreferro controlado, pode-se levar o GEADA a ponto de funcionamento necessário requisitado pelo sistema elétrico, desde que dentro dos limites térmicos e limites mecânicos dos seus componentes.

A frequência é controlada no gerador síncrono pela velocidade de rotação da máquina motriz, ou turbina, e para isto possui um sistema de controle desta velocidade, de forma que seja possível manter-se o gerador sincronizado com o sistema elétrico mesmo com variações na potência ativa e reativa exigida por este sistema, pela variação no nível do reservatório ou pequenas perturbações elétricas sofridas por este mesmo sistema elétrico.

No GEADA a frequência é controlada através do sistema conversor de potência, que imprimindo uma tensão de frequência equivalente ao escorregamento do rotor, compensa-o, e garante que o fluxo magnético tenha a sua frequência de rotação controlada.

É a partir do controle da frequência do fluxo magnético no entreferro que se garante o controle da frequência e da tensão gerada nos terminais do estator. Isto é independentemente da forma como a frequência do fluxo magnético no entreferro é controlada, se pela velocidade mecânica do rotor ou se pela superposição da frequência do rotor sobre a velocidade de rotação deste.

É evidente que o GEADA apresenta uma variável que não se aplica ao gerador síncrono em sincronismo: o escorregamento. Na seção 5.3 é feita a correlação entre uma característica elétrica importante do gerador síncrono para os estudos de regime permanente, sua reatância síncrona, e a “reatância síncrona” do GEADA, que é função variável do escorregamento.

5.2 DIFERENÇAS ENTRE O GEADA E UM GERADOR SÍNCRONO

A diferença básica entre os dois tipos de geradores é justamente a existência do escorregamento no GEADA. O controle da frequência do fluxo magnético no entreferro pode ser menos complexo, uma vez que traz para o gerador esta função, ao contrário do gerador síncrono, onde a função de controle da frequência do fluxo magnético no entreferro está a cargo do regulador de velocidade da turbina. No GEADA, o controle da frequência é totalmente eletrônico, não apresentando partes mecânicas.

Da mesma forma que, para os estudos de regime permanente do gerador síncrono se considera que seu eixo gira a uma velocidade constante e síncrona, considera-se no caso do GEADA que o conversor de potência fornece a frequência do escorregamento ao circuito do rotor de maneira a garantir que a frequência do fluxo magnético no entreferro é constante e síncrona.

Assim garante-se que a intenção de demonstrar que o GEADA pode ser considerado como se fosse um gerador síncrono para todos os efeitos de sistema elétrico ao qual ele está conectado é coerente, eletromagneticamente viável, sem induzir a erros de conceituação.

A partir do que já foi apresentado nos Capítulos 3 e 4 deste trabalho, temos que o seu funcionamento está embasado na existência de um sistema conversor de potência, que ora fornece potência, tensão e corrente para o rotor a partir do sistema elétrico, ora fornece potência para o sistema elétrico a partir do rotor.

5.3 A REATÂNCIA SÍNCRONA E A TENSÃO INTERNA

Todos os estudos de regime permanente do gerador síncrono são feitos considerando-se a reatância síncrona do gerador e a sua tensão interna. Por isto conhecer-se estas características torna-se de suma importância no estudo apresentado neste capítulo.

Com base em (JORDÃO, 1980), a reatância síncrona do gerador síncrono, χ_s , corresponde à soma da reatância de dispersão do estator, x_l , e a reatância de magnetização, x_m , conforme a equação (115), seguindo-se a simbologia adotada nesta dissertação de mestrado.

$$\chi_s = x_l + x_m \quad (115)$$

As Figuras 44(a) e 44(b) apresentam em duas formas diferentes o circuito equivalente utilizado para os estudos de regime permanente do gerador síncrono. Tanto na Figura 44(a) quanto na Figura 44(b) \vec{E}_f , definida pela equação (116), representa a componente da tensão induzida no circuito da armadura, induzida pelo campo girante no entreferro. Na Figura 44(a), \vec{E}_r corresponde à componente da queda de tensão na resistência da armadura, expressa pela equação (117) e \vec{E}_a corresponde a componente da tensão induzida pelo próprio circuito da armadura, ou seja, pelas reatâncias e é expressa pela equação (118).

$$\vec{E}_f = \vec{V}_s + \vec{I} \cdot (R_a + j\chi_s) \quad (116)$$

$$\vec{E}_r = \vec{I} \cdot R_a \quad (117)$$

$$\vec{E}_a = \vec{I} \cdot j(x_l + x_m) \quad (118)$$

As Figuras 45(a) e 45(b) apresentam os diagramas fasoriais para os circuitos das Figuras 35(a) e 35(b) respectivamente.

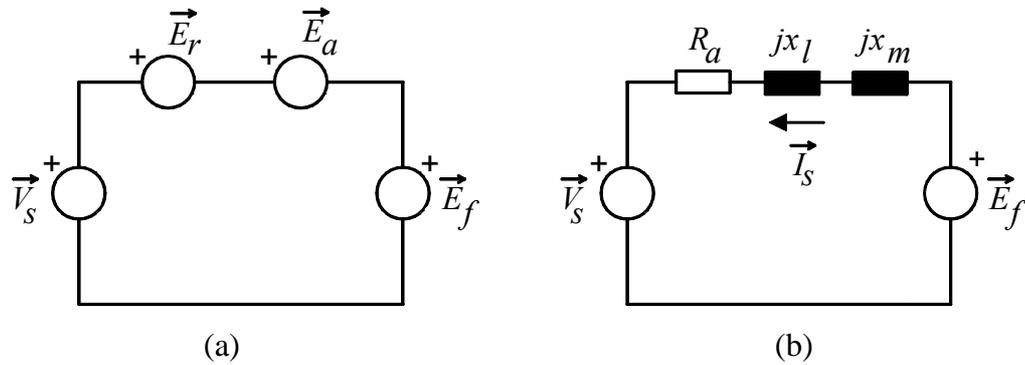


Figura 44 – Circuitos equivalentes para o gerador síncrono para definição da reatância síncrona (a) em função das quedas de tensões e (b) em função dos parâmetros.

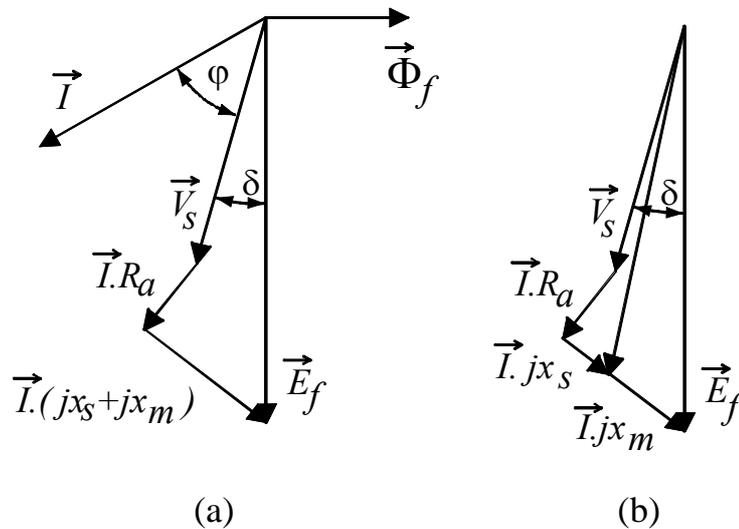


Figura 45 – Diagrama fasorial para regime permanente do gerador síncrono (a) em função das quedas de tensão e (b) em função dos parâmetros (JORDÃO, 1980).

A proposta a ser apresentada nesse capítulo, pode-se assim dizer, é definir um conceito para a reatância síncrona do GEADA. A partir deste conceito é possível construir a curva de capacidade para o GEADA conforme os conceitos aplicados aos geradores síncronos, assunto tratado no Capítulo 5.

No Capítulo 3 desenvolveram-se todas as equações de corrente a partir do circuito equivalente clássico das máquinas assíncronas. Comparando-se então os conceitos adotados

para estas máquinas e para os geradores síncronos, explorados nas Figuras 24 e 44(b), respectivamente, pode-se observar que os circuitos estão baseados em conceitos diferentes.

Inicialmente é necessário que se tenha um circuito equivalente para o GEADA na forma do circuito equivalente do gerador síncrono, e que possa ser descrito pelo diagrama fasorial da Figura 45(b). Com estas considerações, desenvolve-se o circuito da Figura 46, que respeita os conceitos aplicados no Capítulo 3 dessa dissertação, mas que servirá apenas como artifício matemático para que sejam definidas as fontes de tensão constantes para o estator, \vec{E}_s , e para o rotor, \vec{E}_r . O acoplamento entre os dois ramos do circuito se dá pelo conceito da f.e.m. do entreferro, \vec{E}_g .

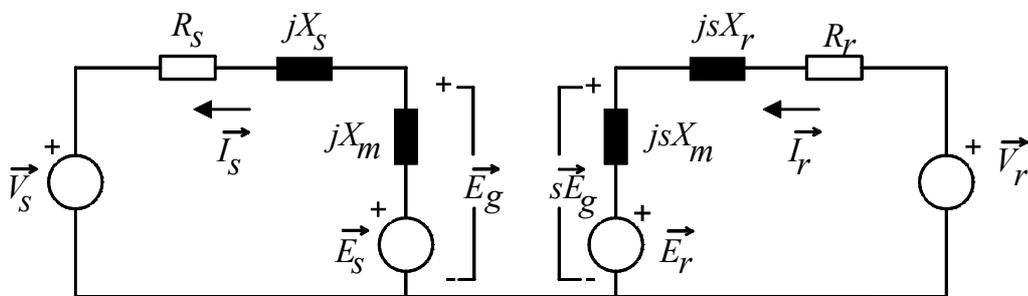


Figura 46 – Circuito equivalente para o GEADA conforme conceito de gerador síncrono.

Parte-se do pressuposto que para cada valor de tensão gerada nos terminais do estator do GEADA, \vec{V}_s , e potências ativa e reativa da carga ou sistema elétrico ao qual o GEADA está conectado, tem-se valores para as três variáveis independentes do sistema em estudo: módulo, fase e frequência da tensão imposta ao rotor, que tornam o valor da fonte de tensão para o circuito do estator, \vec{E}_s , constante.

A análise do circuito da Figura 46 baseia-se nos desenvolvimentos feitos no Capítulo 3, para os equivalentes Thèvenin das equações (5) a (17). Faz-se necessário definir-se \vec{E}_s em função dos parâmetros do rotor, e \vec{E}_r em função dos parâmetros do estator.

Para esta definição de \vec{E}_s e \vec{E}_r partimos da Figura 28(a), transcrita na Figura 47(a), que serviu de base para o desenvolvimento do equivalente Thèvenin do circuito do rotor do GEADA, que foi representado na Figura 28(b) e transcrito na Figura 47(b). Para primeiro definir-se \vec{E}_s partimos da Figura 47(c), que apresenta o termo retirado da Figura 46 que é necessário para o desenvolvimento do conceito de reatância síncrona do GEADA.

Na comparação das Figuras 47(b) e 47(c), teremos a equação (119), considerando que a tensão nos terminais, \vec{V} , é a mesma nos dois circuitos. Procedendo-se o desenvolvimento, chega-se à equação (120) que define, de forma simplificada, a fonte de tensão \vec{E}_S , em função dos demais parâmetros do GEADA, sendo que Z_{Thr} é definido pela equação (14), no Capítulo 3.

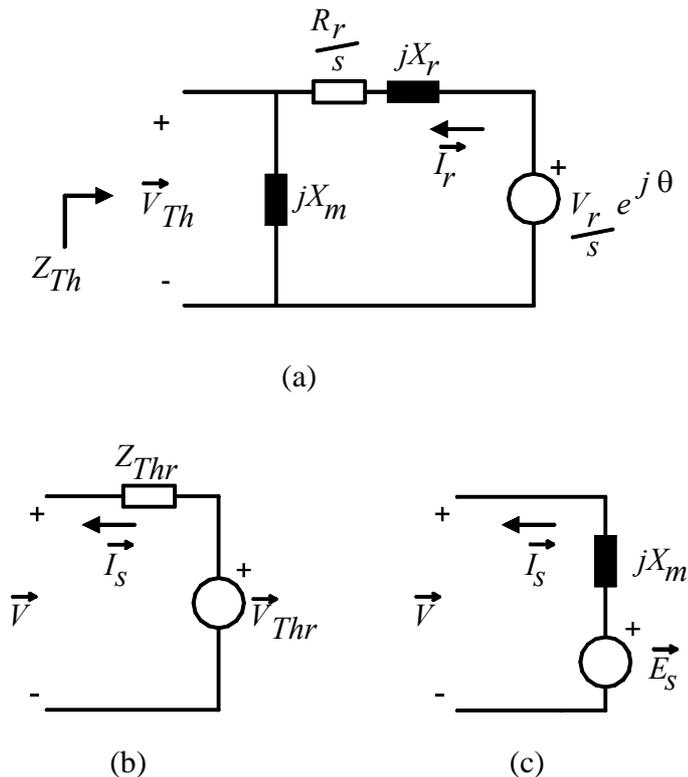


Figura 47 – Circuito equivalente do circuito do rotor do GEADA (a) circuito equivalente (b) equivalente Thévenin e (c) equivalente como gerador síncrono.

$$\vec{E}_S = \vec{V}_{Thr} - \vec{I}_S \cdot Z_{Thr} + \vec{I}_S \cdot jX_m \quad (119)$$

$$\vec{E}_S = \frac{\frac{\vec{V}_r}{s} \cdot jX_m \cdot (R_S + jX_S + jX_m) + \vec{V}_S \cdot X_m^2}{\left(\frac{R_r}{s} + jX_r + jX_m\right)(R_S + jX_S + Z_{Thr})} \quad (120)$$

De forma análoga é o desenvolvimento da equação para a fonte de tensão \vec{E}_r . Tem-se a Figura 48(a), transcrição da Figura 26(a), que apresenta o circuito equivalente do estator do GEADA, a Figura 48(b) que apresenta o equivalente Thévenin do circuito do rotor,

que foi apresentado originalmente na Figura 26(b). A Figura 48(c) apresenta o termo da Figura 46 necessário para este desenvolvimento.

A equação (121) descreve a relação entre as Figuras 48(b) e 48(c), e com o desenvolvimento chega-se à equação (122), que define, de forma simplificada, a fonte de tensão \vec{E}_r em função dos parâmetros do GEADA, sendo Z_{Ths} definido pela equação (7), do Capítulo 3.

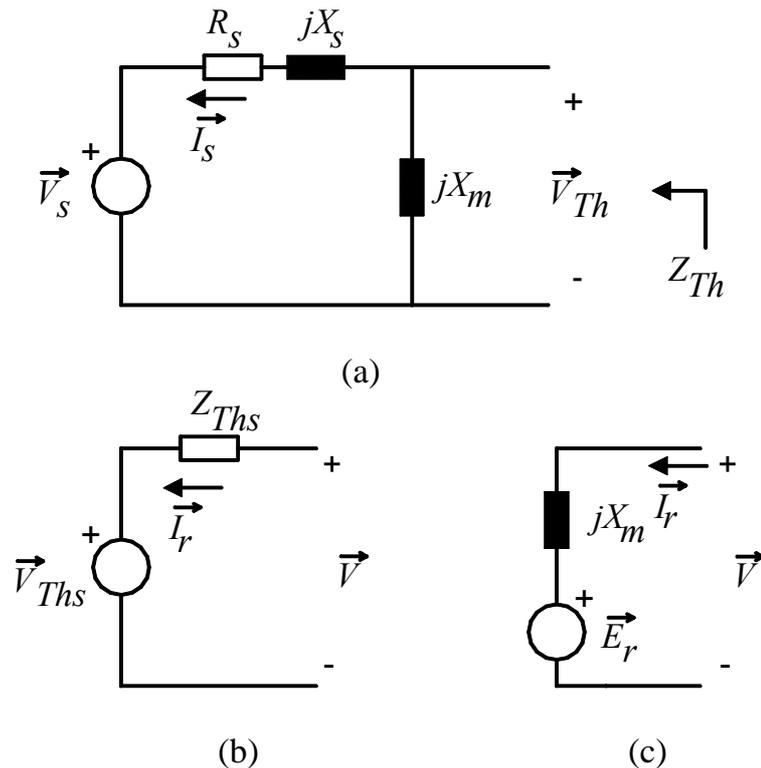


Figura 48 – Circuito equivalente do circuito do estator do GEADA (a) circuito equivalente (b) equivalente Thévenin e (c) equivalente como gerador síncrono.

$$\vec{E}_r = \vec{V}_{Ths} + \vec{I}_r \cdot Z_{Ths} - \vec{I}_r \cdot jX_m \quad (121)$$

$$\vec{E}_r = \frac{\vec{V}_s \cdot jX_m \cdot \left(\frac{R_r}{s} + jX_r + jX_m \right) + \frac{\vec{V}_r}{s} \cdot X_m^2}{\left(\frac{R_r}{s} + jX_r + Z_{Ths} \right) (R_s + jX_s + jX_m)} \quad (122)$$

A partir do circuito definido na Figura 47(c), completo agora na Figura 49, tem-se o circuito equivalente para o desenvolvimento do conceito de “reatância síncrona” para o GEADA, onde a equação (115), base para o gerador síncrono, agora também é a base para o GEADA. A Figura 49(a) apresenta o circuito equivalente em termos de resistência e

reatâncias e a Figura 49(b) o circuito equivalente com o conceito de χ_s , a reatância síncrona do GEADA.

A reatância síncrona, χ_s , é variável em função do escorregamento, porém, assim como acontece com o equacionamento do modelo para o motor de indução, esta variação é transformada na variação da tensão interna, e expressa por esta última, a exemplo do que ocorreu com a tensão e a resistência do rotor no Capítulo 3.

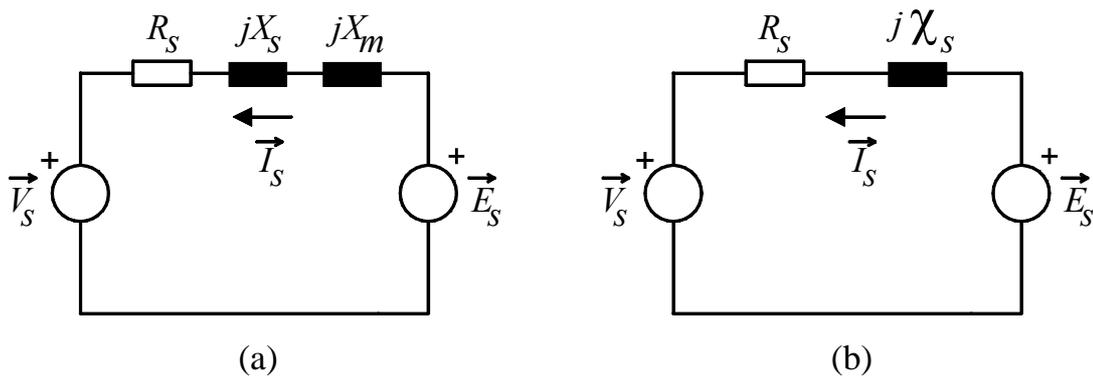


Figura 49 – Circuito equivalente para o conceito de reatância síncrona do GEADA (a) com parâmetros e tensão induzida a partir do rotor e (b) com a reatância síncrona.

A equação (123) apresenta o conceito de reatância síncrona com os parâmetros do GEADA.

$$\chi_s = X_s + X_m \quad (123)$$

A partir da definição do conceito de reatância síncrona para o GEADA é possível estabelecerem-se as relações entre correntes, tensões e potências, à luz do que é feito para o gerador síncrono, o que é compreendido no Capítulo 6.

5.4 ANÁLISE DO GEADA COMO GERADOR SÍNCRONO

Com o desenvolvimento exposto nas seções anteriores deste capítulo se torna possível a análise do GEADA com base na teoria das máquinas síncronas de rotor cilíndrico apresentada no livro de (JORDÃO, 1980), de forma sucinta. A base para esta análise é o conceito de reatância síncrona desenvolvido na seção 5.3. A partir deste conceito, é possível estabelecer-se o conceito de ângulo de potência. A Figura 50, baseada na Figura 45, apresenta o diagrama fasorial, o ângulo de potência δ , e o ângulo de fase entre a tensão e a corrente do estator, ϕ , cujo co-seno é o fator de potência do GEADA.

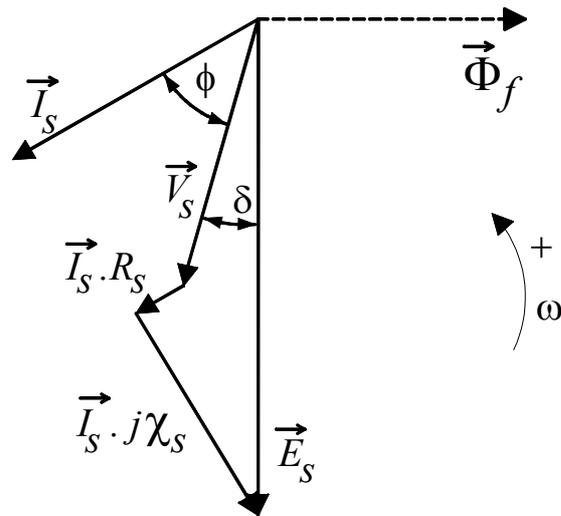


Figura 50 – Diagrama fasorial, ângulo de potência e fator de potência para o GEADA, com o conceito de reatância síncrona.

5.4.1 Ângulo de potência do GEADA

Conforme (JORDÃO, 1980), a potência ativa fornecida pelo estator é calculada pela equação (124), apresentando o fator de potência, $\cos(\phi)$. A equação (125) também apresenta o cálculo da potência ativa fornecida pelo estator, porém, em função da tensão nos terminais, \vec{V}_S , a tensão interna, \vec{E}_S , a reatância síncrona, χ_S , e o ângulo de potência, δ . Este conceito é útil para as análises de excitação, através do circuito do rotor, principalmente do fluxo magnético no entreferro, traduzido pela fonte de tensão, \vec{E}_S .

$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos(\phi) \quad (124)$$

$$P_S = \frac{V_S \cdot E_S}{\chi_S} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (125)$$

5.4.2 Limite de estabilidade em regime permanente para o GEADA

Continuando a análise do GEADA como gerador síncrono, conforme (JORDÃO, 1980), temos que pela equação (125), a potência ativa, P_S , é uma função senoidal, considerando-se que a reatância síncrona, χ_S , se mantém constante, dependente apenas da tensão nos terminais do estator, \vec{V}_S , a tensão interna \vec{E}_S e do ângulo de potência, δ . Quando o

gerador estiver conectado ao sistema elétrico que imponha a tensão aos terminais do gerador, \vec{V}_s , e a frequência do campo girante no entreferro, χ_s será dependente de \vec{E}_s e δ .

Para cada condição de excitação, ou modo operativo conforme o escorregamento, teremos uma senóide para potência ativa, com seu máximo valor quando o ângulo de potência for 90° .

No caso dos geradores síncronos convencionais, o limite de estabilidade teórica em regime permanente corresponde a este valor máximo de P_s , uma vez que, ao se ultrapassar o ângulo correspondente a este valor máximo, ou seja, 90° , o sincronismo será perdido. Isto se dá porque o conjugado mecânico no eixo gerado pela máquina motriz, quando este ângulo de potência ultrapassa os 90° tenderá a acelerar o gerador, e com isto a frequência do campo girante não mais será constante.

No caso do GEADA não é diferente, porque do ponto de vista dos seus terminais do estator, ele é um gerador síncrono, pois se mantém o campo girante girando na velocidade síncrona.

6 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO GEADA

Nesse capítulo são apresentadas as curvas que se aplicam ao GEADA, as teorias e conceitos que explicam seu desenvolvimento, aplicação e resultados, à luz da teoria clássica das máquinas de indução e dos geradores síncronos.

As curvas estudadas são:

1. Curva de excitação;
2. Regiões de operação;
3. Curva de capacidade, baseada no conceito do GEADA operando como gerador síncrono.

6.1 CURVA DE EXCITAÇÃO

A curva de excitação do GEADA segue a definição daquela para os geradores síncronos, genericamente apresentada na Figura 50A, e geradores de corrente contínua, qual seja, relaciona a tensão induzida no estator com a corrente aplicada no rotor. Tanto no modo subsíncrono como no modo sobressíncrono, é referida como uma corrente de excitação.

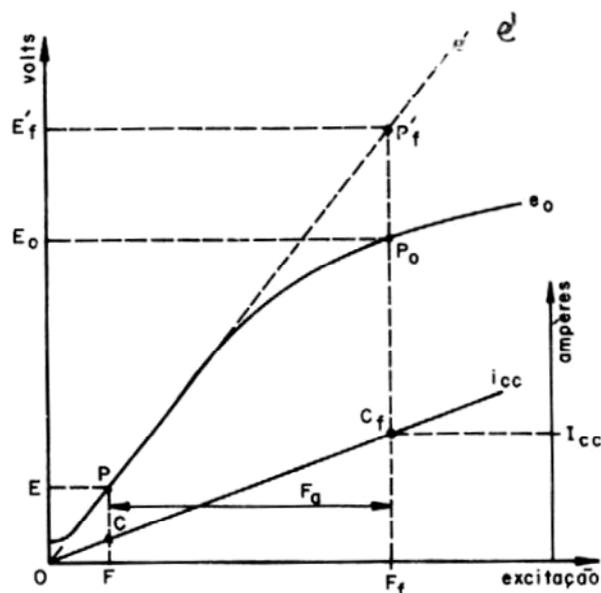


Figura 51 – Curva de magnetização (e_o) conceitual de gerador síncrono (JORDÃO, 1984).

Esta curva apresenta, pelo fato do GEADA tratar-se de uma máquina de rotação mecânica assíncrona e rotação do seu campo magnético síncrono, uma dependência intrínseca

da velocidade de rotação mecânica do rotor compensada pela frequência do escorregamento imposta ao circuito do rotor pelo conversor de potência. Para elucidar esta dependência recorreremos aos conceitos aplicados na análise do GEADA como gerador síncrono, no Capítulo 5.

A curva de excitação do GEADA nos mostra, de fato, como atuam as reatâncias do gerador, uma vez que cada valor da corrente aplicada ao circuito do rotor induzirá uma determinada tensão no circuito do estator, de acordo com as leis do eletromagnetismo.

Como conseqüência, uma ressalva deve ser feita para a curva de excitação do GEADA: ao contrário do gerador síncrono, a sua curva de excitação é variável conforme o escorregamento. Esta variação tem origem na sua reatância mútua que é variável, pois é dependente da frequência imposta ao circuito do rotor pelo conversor de potência, pelo surgimento de correntes parasitas e pelas perdas por histerese no núcleo do rotor.

Esta modificação na curva, quando o GEADA é operado em pequenas faixas de variação, entre 1% e 3%, na velocidade mecânica correspondente à frequência síncrona, pode ser desprezada, tanto no modo subsíncrono quanto no modo sobressíncrono. Já quando esta variação é maior, como por exemplo, $\pm 10\%$, esta diferença não pode ser desprezada, conforme apontam os resultados experimentais apresentados no Capítulo 7.

Outra ressalva que deve ser feita é o fato da tensão nos terminais do estator ser assumida, em vazio, igual à tensão induzida ou tensão interna da armadura, seguindo-se as demais considerações e conceitos aplicados nessa dissertação de mestrado, principalmente aqueles definidos nos Capítulos 3 e 4.

No Capítulo 7 são apresentadas as curvas de magnetização do GEADA, sendo operado como um gerador síncrono, quando a excitação do circuito do rotor é em corrente contínua e sendo operado como gerador assíncrono de dupla alimentação a vazio, quando a excitação é em corrente alternada.

6.2 REGIÕES DE OPERAÇÃO

Os trabalhos de (BENDL, 1998; SCHREIER, 1999) apresentam o conceito de regiões de operação do gerador assíncrono de dupla alimentação, com o nome original de “working regions”.

A definição da região de operação é caracterizada por circunferências, como é visto ao final desta seção, e baseia-se no circuito equivalente de regime permanente do

gerador assíncrono de dupla alimentação, mostrado na Figura 52, muito semelhante daquele usado no Capítulo 3 e de onde se têm as equações (126) a (130).

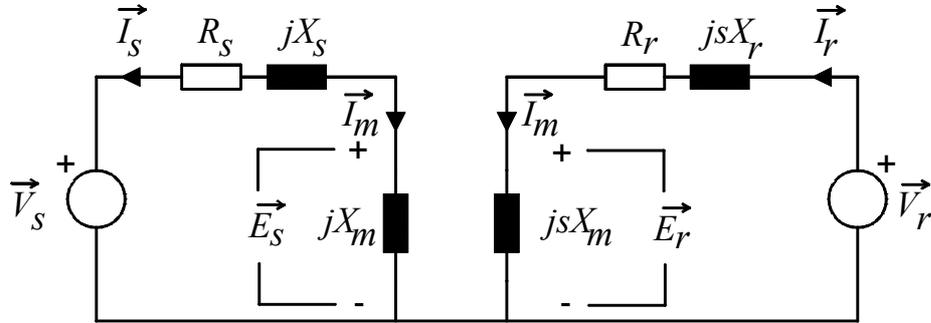


Figura 52 – Circuito equivalente para a curva de regiões de operação do rotor .

$$\vec{V}_s = jX_m \vec{I}_m - (R_s + jX_s) \vec{I}_s \quad (126)$$

$$\vec{V}_r = jsX_m \vec{I}_m + (R_r + jsX_s) \vec{I}_r \quad (127)$$

$$\vec{E}_s = jX_m \vec{I}_m \quad (128)$$

$$\vec{E}_r = jsX_m \vec{I}_m \quad (129)$$

$$\vec{I}_r = \vec{I}_s + \vec{I}_m \quad (130)$$

Seguindo este desenvolvimento obtêm-se as mesmas equações (12) e (17) do Capítulo 3.

Assim tem-se para a tensão do rotor o seguinte desenvolvimento, chegando-se à equação da tensão do rotor em função da corrente do estator, conforme a equação (131).

$$\begin{aligned} \vec{V}_r(\vec{I}_s) = & \frac{s}{jX_m} \left(V_s \left(\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r) \right) \right) + \\ & + \frac{s}{jX_m} \left(jX_m \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right) + (R_s + jX_s) \cdot \left(\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r) \right) \right) \vec{I}_s \end{aligned} \quad (131)$$

Conforme adotado em (SCHREIER, 1999) temos a equação (131) escrita em função de um centro, K_1 , e um raio, $(K_2 \cdot \vec{I}_s)$, na equação (132), com base no conceito da Figura 53.

$$\vec{V}_r(\vec{I}_s) = K_1 + K_2 \cdot \vec{I}_s \quad (132)$$

onde

$$K_1 = \frac{(R_r + jsX_r) \cdot V_s}{jX_m} \quad (133)$$

$$K_2 = -\frac{(R_s + jX_s)(R_r + jsX_r) + s \cdot X_m^2}{jX_m} \quad (134)$$

A corrente no estator, \vec{I}_s , é composta do módulo, I_{sM} , seu valor máximo, e o ângulo de fase, θ_{I_s} , conforme a equação (135).

$$\vec{I}_s = I_{sM} \cdot e^{j\theta_{I_s}} \quad (135)$$

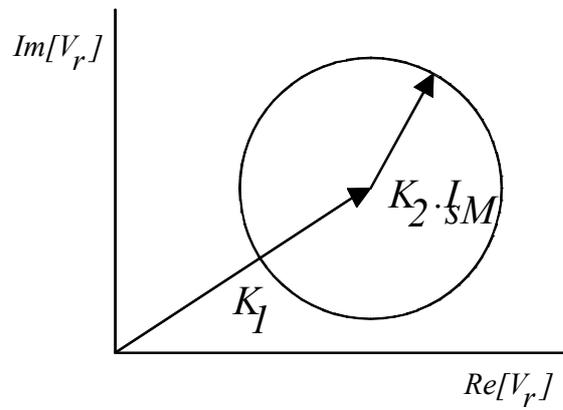


Figura 53 – Representação gráfica conceitual da tensão do rotor em função da corrente do estator com o centro e o raio.

Então se conclui que a região compreendida no interior da circunferência representada na Figura 53 corresponde à região na qual a tensão do rotor, \vec{V}_r , pode variar de forma a se ter, no máximo, o valor máximo da corrente do estator, I_{sM} .

De forma análoga se procede em relação à corrente do rotor, e chega-se à equação para a tensão no rotor, \vec{V}_r , em função da corrente do rotor, \vec{I}_r , apresentada na equação (136).

$$\vec{V}_r(\vec{I}_r) = K_3 + K_4 \cdot \vec{I}_r \quad (136)$$

onde

$$K_3 = \frac{jsX_m \cdot V_s}{(R_s + jX_s)} \quad (137)$$

$$K_4 = \frac{(R_s + jX_s)(R_r + jsX_r) + s \cdot X_m^2}{(R_s + jX_s)} \quad (138)$$

Da mesma forma que \vec{I}_s , a corrente no rotor, \vec{I}_r , é expressa de um módulo e ângulo de fase, conforme a equação (139).

$$\vec{I}_r = I_{rM} \cdot e^{j\theta_{Ir}} \quad (139)$$

A mesma consideração pode ser feita, ou seja, ao se variar a tensão do rotor dentro da área formada pela circunferência da Figura 53, trocando-se K_1 por K_3 , e $(K_2 \cdot I_{SM})$ por $(K_4 \cdot I_{rM})$, obtém-se no máximo, a corrente máxima do rotor, I_{SM} .

Plotando-se as duas funções num mesmo plano $\text{Re}(\vec{V}_r) \times \text{Im}(\vec{V}_r)$, com base na equação (140), teremos o que os autores de (BENDL, 1998; SCHREIER, 1999) chamaram de região de operação para a tensão do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação, a qual corresponde a área formada pela interseção das duas circunferências do plano. Como exemplo, as Figuras 54 a 56, retiradas do trabalho de (BENDL, 1998), apresentam hachuradas as áreas de interseção para o funcionamento do gerador assíncrono de dupla alimentação no modo operativo síncrono, subsíncrono e sobressíncrono, respectivamente. Nestas Figuras, a tensão no rotor tem a notação de \mathbf{u}_r .

$$\vec{V}_r = \text{Re}(\vec{V}_r) + j \text{Im}(\vec{V}_r) = \text{Re}(\mathbf{u}_r) + j \text{Im}(\mathbf{u}_r) \quad (140)$$

As Figuras 54 a 56 referem-se a um gerador assíncrono de dupla alimentação com potência nominal de 320MW e com tensão nominal em seus terminais de 22kV.

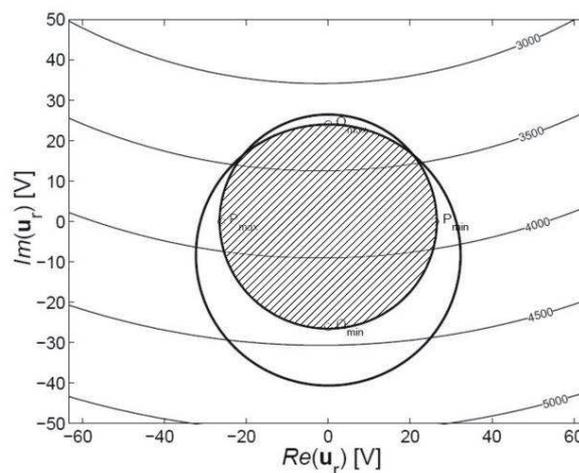


Figura 54 – Região de operação (hachurada) para tensão do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo síncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).

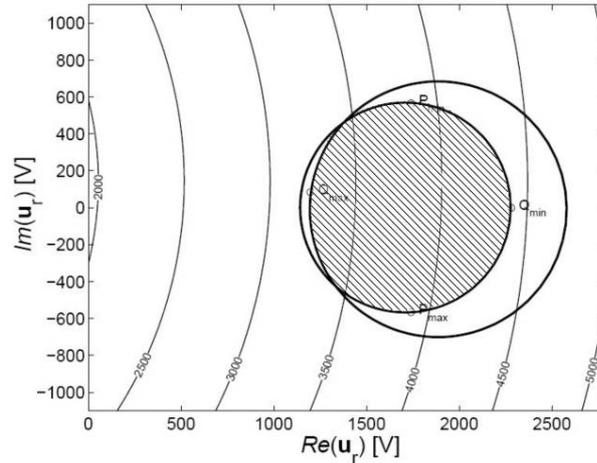


Figura 55 – Região de operação (hachurada) para tensão do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo subsíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).

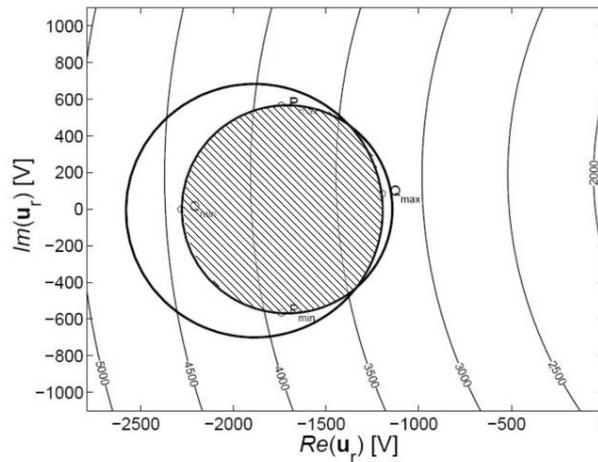


Figura 56 – Região de operação (hachurada) para tensão do rotor do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo sobressíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).

Nota-se que nas Figuras 54 e 55 os gráficos estão espelhados em relação ao eixo vertical, o que nos leva a concluir que as regiões de operação nos modos subsíncrono e sobressíncrono são correspondentes, para um mesmo valor de escorregamento, sendo a única diferença o sinal do valor da tensão do rotor entregue a este pelo conversor de potência, como deveria ser. Este fato está em concordância com a definição dos modos operativos no Capítulo 4, quando se afirmou que para uma mesma diferença entre a velocidade de rotação do eixo mecânico e a velocidade síncrona do eixo do campo girante, independente do escorregamento apresentar um sinal positivo ou negativo, o valor da tensão do rotor será o mesmo.

A partir dos conceitos e considerações anteriores é possível definir-se as regiões de operação do gerador assíncrono de dupla alimentação no que tange as potências ativa e

reativa da carga, estudo importante para a sua operação, seguindo a proposta dos trabalhos de (BENDL, 1998; SCHREIER, 1999).

As equações (141) e (142), da teoria clássica, definem as relações entre correntes, tensões e potências da carga, fornecida pelo conversor de potência.

$$P_S = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\vec{V}_S \cdot \vec{I}_S^*) \quad (141)$$

$$Q_S = \frac{3}{2} \operatorname{Im}(\vec{V}_S \cdot \vec{I}_S^*) \quad (142)$$

onde \vec{I}_S^* é o conjugado da corrente do estator, \vec{I}_S .

Estas equações (141) e (142), em conjunto com as equações (126) a (131), são usadas para definir-se a relação entre a potência ativa no estator, P_S , em função da potência reativa no estator, Q_S , e plotando-se num plano $P_S \times Q_S$, teremos a região de operação do gerador assíncrono de dupla alimentação.

As Figuras 57, a 59 apresentam as regiões de operação da potência ativa do estator (ou da carga), onde não se extrapolam os valores máximos das correntes do rotor e do estator, para os modos operativos síncrono, subsíncrono e sobressíncrono, relativas às Figuras 54 a 56 respectivamente. Assim como estas Figuras 54 a 56, as Figuras 57 a 59 referem-se a um gerador assíncrono de dupla alimentação com potência nominal de 320MW e com tensão nominal em seus terminais de 22kV.

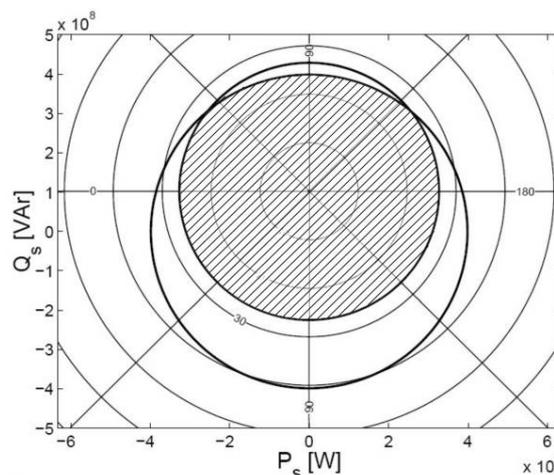


Figura 57 – Região de operação (hachurada) para as potências da carga do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo síncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).

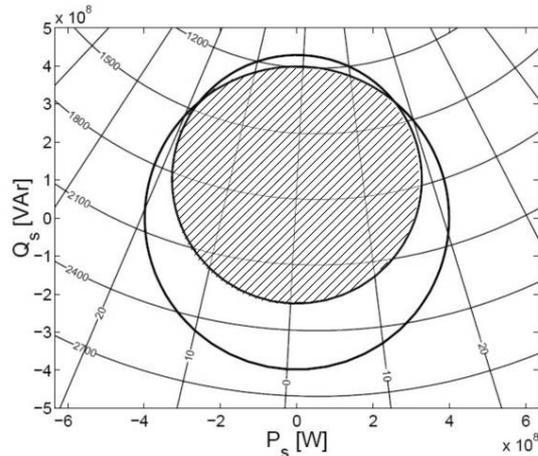


Figura 58 – Região de operação (hachurada) para as potências da carga do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo subsíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).

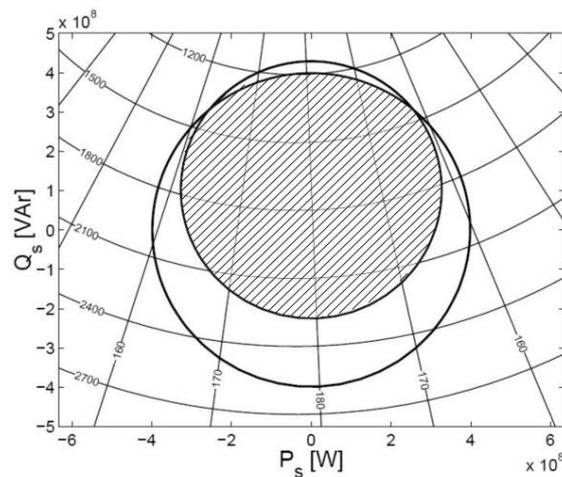


Figura 59 – Região de operação (hachurada) para as potências da carga do gerador assíncrono de dupla alimentação – modo operativo sobressíncrono, para um gerador de 320MW e 22kV (BENDL, 1998).

Nestas Figuras 57 a 59, as linhas circulares isométricas na área interna dos eixos correspondem ao módulo da tensão do rotor e as linhas radiais o ângulo de fase, de modo que, ao se definir uma carga a ser suprida pelo GEADA, graficamente se verifica qual é o módulo e ao ângulo de fase que a tensão do rotor deve apresentar para possibilitar este ponto de funcionamento. Novamente se nota uma similaridade entre as regiões do modo subsíncrono e do modo sobressíncrono, pois os gráficos das Figuras 58 e 59 possuem o mesmo módulo da tensão do rotor, porém o ângulo de fase distante 180° , o que corresponde à inversão de sinal observada nas Figuras 55 e 56.

6.2.1 Aplicação do conceito de regiões de operação ao GEADA

Pelo que foi apresentado, pode-se concluir que os conceitos de regiões de operação conforme (BENDL, 1998; SCHREIER, 1999) são úteis para a definição dos limites operacionais da tensão do rotor, e conseqüentemente, das potências ativas e reativas.

6.3 PROPOSTA DE CURVA DE CAPACIDADE DO GEADA

A partir dos conceitos de reatância síncrona e tensão interna desenvolvidos no Capítulo 5, apresenta-se nesta seção uma proposta de curva de capacidade, a exemplo do que ocorre com os geradores síncronos. Esta curva também é conhecida por “Capability” ou ainda “Capabilidade”, mas neste trabalho, será referida como Curva de Capacidade do GEADA.

A teoria para a construção da curva de capacidade dos geradores síncronos é bastante conhecida e difundida, sendo até hoje usada para prever as condições de funcionamento do gerador síncrono quanto à relação entre suas potências ativa e reativa, ou seja, seu fator de potência, e sua operação sobrecarregado ou subcarregado, conforme a necessidade da carga ou do sistema elétrico ao qual o gerador síncrono está conectado.

A curva de capacidade pode ser definida, de acordo com (MELO, 1977) como o contorno de superfícies, no plano $P \times Q$, potência ativa x potência reativa, dentro dos quais pode-se operar o gerador síncrono em regime permanente contínuo.

6.3.1 A aplicação da curva de capacidade para os geradores síncronos

Durante a operação de um gerador síncrono é preciso conhecer seus limites dentro dos quais pode operar sem restrição. Na Figura 60 temos um exemplo didático sobre as diversas componentes da curva da capacidade, observando-se que muitos são os fatores que limitam a operação de um gerador síncrono, como por exemplo, a limitação da potência máxima que a máquina motriz pode entregar ao gerador, à capacidade do seu sistema de excitação, à estabilidade de funcionamento em sincronismo e às condições térmicas dos seus enrolamentos.

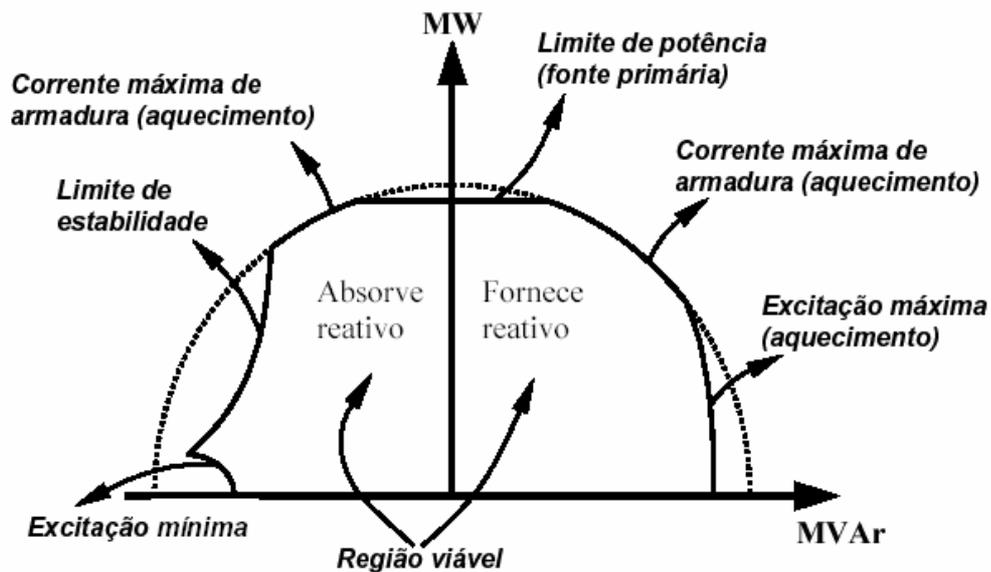


Figura 60 – Curva de capacidade de geradores síncronos genérica – relação das diversas componentes com o sistema de geração convencional. (LEMOS, 2006)

A curva de capacidade encontra aplicação porque apresenta, de forma sintética e simultânea, as limitações dos fatores envolvidos no sistema de geração. Observe-se que a região onde a operação do gerador síncrono é possível, sem ultrapassar qualquer limite, está compreendida no interior da linha cheia.

Cada sistema de geração tem a sua própria curva de capacidade, estabelecida pelos seus elementos de projeto e construção, que dependem da sua aplicação, do sistema elétrico onde está inserido, etc. Até mesmo dois geradores idênticos, conectados a duas turbinas diferentes terão duas curvas diferentes.

6.3.2 Os fatores que limitam a capacidade de um gerador síncrono

Conforme (MELO, 1977; LOBOSCO, 1984), a curva de capacidade é função direta da tensão dos terminais do gerador, e conclui afirmando que cada gerador possuirá uma família de curvas, considerando-se que a tensão nominal nos seus terminais varia em torno de um valor. Isto se deve ao fato da operação do gerador ser limitada pelas suas perdas no ferro. Estas perdas no ferro estão intrinsecamente ligadas à tensão de trabalho do gerador, e quanto maior a tensão nos seus terminais, maior será o fluxo magnético necessário, e conseqüentemente, maior serão as perdas no ferro por correntes parasitas.

Outro fator limitante são as perdas por efeito Joule no enrolamento da armadura, pois o sistema de refrigeração do gerador estará dimensionado para um certo valor nominal de

calor, acima do qual os materiais de isolamento dos enrolamentos terão sua eficiência comprometida. Normalmente esta limitação é estabelecida indiretamente pela potência aparente nominal do gerador.

Além desta limitação da corrente de armadura, há limitação de perdas por efeito Joule também no circuito de campo, acarretando um limite máximo para a corrente de campo, I_f . Da teoria dos geradores síncronos, de acordo com (ALTINO, 1983; JORDÃO, 1984), a corrente de campo é a responsável pela força eletromotriz de excitação, E_f , que portanto, estará limitada a um valor máximo admissível em função do limite de aquecimento do enrolamento de campo. Para uma determinada tensão nos terminais e corrente de armadura (e de carga) fixa, um gerador síncrono necessita tanto mais f.e.m. de excitação, E_f , quanto mais for indutivo o fator de potência da carga ou sistema ao qual está conectado (quanto mais indutivo, menor o fator de potência). Sendo assim, existe um valor de fator de potência indutivo abaixo do qual seria exigido um valor de E_f superior ao limite determinado pela máxima corrente de campo.

Isto explica porque a definição do gerador síncrono tem como elemento determinante das suas características a potência aparente, em VA, e o fator de potência indutivo, abaixo do qual o gerador não poderá operar com a sua potência aparente máxima.

Do conceito de ângulo de potência, δ , da seção 4.1, temos que a potência ativa que um gerador pode entregar à carga ou sistema ao qual esteja conectado é função do ângulo de potência, que é o ângulo entre a f.e.m. do campo, \vec{E}_f , e a tensão nos terminais do gerador, \vec{V}_t , desprezando-se a resistência de armadura. A equação (143), a exemplo da equação (125), apresenta a relação entre a potência ativa, a f.e.m. do campo, a tensão dos terminais, a reatância síncrona e o ângulo de potência, para geradores síncronos de pólos cilíndricos, os quais mais se assemelham ao GEADA. Nessa equação (143) χ_s é a reatância síncrona do gerador síncrono.

$$P = \frac{E_f \cdot V_t}{\chi_s} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (143)$$

Conforme apresentado na seção 4.1. desse trabalho, o ângulo de potência máximo correspondente ao máximo valor de potência ativa que pode ser fornecido pelo gerador antes deste perder o sincronismo, é 90 graus elétricos. Este valor máximo de potência ativa é chamado de limite estático de estabilidade teórica, e depende do valor da excitação.

Por outro lado, pequenos valores de f.e.m. de campo, E_f , indicando que o gerador síncrono está operando sob fatores de potência bastante capacitivos, poderão levá-lo a posições iguais ou próximas do limite de estabilidade, o que não deve ser permitido. Com este exemplo, se demonstra que existirão regiões em que, embora os limites de perdas sejam respeitados, a máquina seja levada à instabilidade.

Desta forma, haverá na curva de capacidade trechos que serão determinados pelo limite de estabilidade e pelo mínimo de excitação.

Por fim, nesse estudo, há ainda o fator limitador da potência mecânica máxima que a máquina motriz é capaz de suprir ao gerador síncrono de forma que este o converta em potência ativa. Este fator somente influenciará na curva de capacidade se a potência mecânica nominal for menor que a potência nominal ativa com fator de potência unitário para a qual o gerador foi projetado.

6.3.3 Considerações preliminares

A base para a proposta de adaptação da curva de capacidade dos geradores síncronos à operação do GEADA, tem por base a definição da reatância síncrona, χ_s , e da tensão interna, \vec{E}_s , definidos no Capítulo 5, nas equações (120) e (123), transcritas nas equações (144) e (145) e a Figura 49(b), transcrita na Figura 60(b). A equação (146) é a transcrição da equação (28).

$$\chi_s = X_s + X_m \quad (144)$$

$$\vec{E}_s = \frac{\vec{V}_r \cdot jX_m \cdot (R_s + jX_s + jX_m) + \vec{V}_s \cdot X_m^2}{\left(\frac{R_r}{s} + jX_r + jX_m\right)(R_s + jX_s + Z_{Thr})} \quad (145)$$

onde

$$Z_{Thr} = \frac{(-X_r \cdot X_m) + j \cdot \left(\frac{R_r}{s} \cdot X_m\right)}{\frac{R_r}{s} + j \cdot (X_r + X_m)} \quad (146)$$

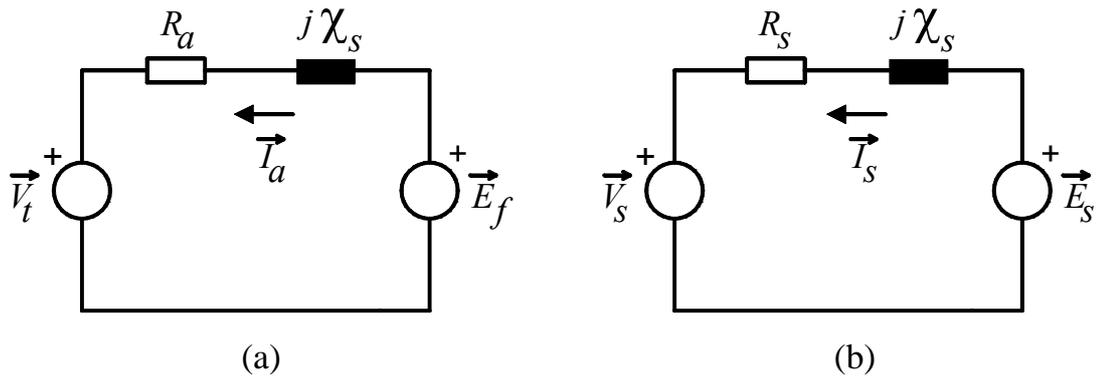


Figura 61 – Circuitos equivalentes para (a) o gerador síncrono e (b) o conceito de reatância síncrona e tensão interna do GEADA

A partir da Figura 61 tem-se a relação entre os termos usualmente utilizados no desenvolvimento das curvas de capacidade e os conceitos apresentados no Capítulo 5, com as equivalências expressas nas equações (147) a (151). A equação (151) traduz o circuito da Figura 61 (b).

$$\vec{V}_s \equiv \vec{V}_t \quad (147)$$

$$\vec{E}_s \equiv \vec{E}_t \quad (148)$$

$$\vec{I}_s \equiv \vec{I}_a \quad (149)$$

$$R_s \equiv R_a \quad (150)$$

$$\vec{E}_s = \vec{V}_s + j\chi_s \vec{I}_s \quad (151)$$

Assim, temos o diagrama fasorial conforme a Figura 51, transcrita aqui na Figura 62. Deve-se lembrar que a tensão interna do GEADA, \vec{E}_s , e a reatância síncrona são dependentes do escorregamento, conforme já afirmado no Capítulo 5.

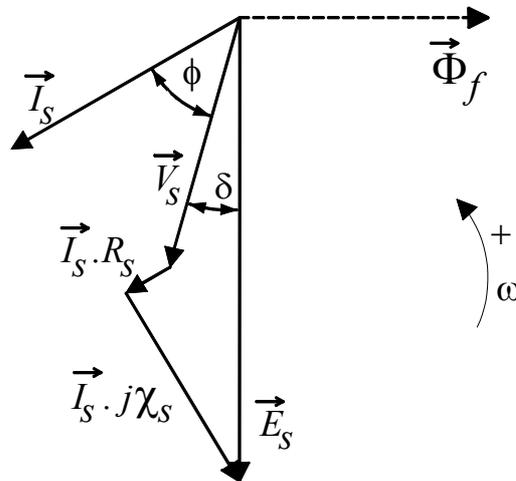


Figura 62 – Diagrama fasorial do GEADA como gerador síncrono, com a reatância síncrona, tensão interna e tensão e corrente no estator.

6.3.4 A curva de capacidade do GEADA

Tendo-se estabelecido as relações e conceitos básicos, apresenta-se nessa seção a forma de obtenção de cada um dos trechos da curva de capacidade para o GEADA.

A partir do diagrama fasorial da Figura 62, obtém-se, de acordo com (MELO, 1977), o trecho relativo à limitação da corrente do rotor, e respectiva limitação da tensão interna do GEADA, e o trecho relativo à limitação da corrente do estator. Para um melhor entendimento, a Figura 62 é modificada na forma da Figura 63, com a supressão da resistência do estator, a exemplo do que ocorre com o gerador síncrono, pois a queda de tensão sobre esta resistência é muitas vezes menor que a queda de tensão sobre a reatância síncrona. O arco de linha cheia representa a limitação da corrente do estator, e o arco de linha tracejada, o limite da corrente do rotor.

O diagrama da Figura 63 já apresenta as características da curva de capacidade do GEADA, mas para se ter o conceito de curva de capacidade conforme estabelecido para os geradores síncronos, deve-se tê-la num plano $P \times Q$.

Isto é possível quando se usa um artifício matemático de se dividir os termos da equação (151) pela reatância síncrona, χ_s , e multiplicar por V_s , que é o módulo da tensão do estator, conforme a equação (152).

$$\frac{V_s \cdot \vec{E}_s}{\chi_s} = \frac{V_s \cdot \vec{V}_s}{\chi_s} + j \vec{I}_s \cdot V_s \quad (152)$$

Redesenhando a Figura 63 com os termos da equação (152) tem-se a curva de capacidade no plano $P \times Q$, como se queria, na Figura 64.

Para um ponto genérico A, teremos as coordenadas correspondentes nos P_A e Q_A que correspondem às equações (153) e (154), podendo-se provar que correspondem respectivamente à potência ativa e a potência reativa nos terminais do estator do GEADA.

$$P_A = V_s \cdot I_s \cdot \cos \phi \quad (153)$$

$$Q_A = V_s \cdot I_s \cdot \sin \phi \quad (154)$$

Sendo assim, a potência aparente do GEADA é expressa pela equação (155).

$$S = V_s \cdot I_s \quad (155)$$

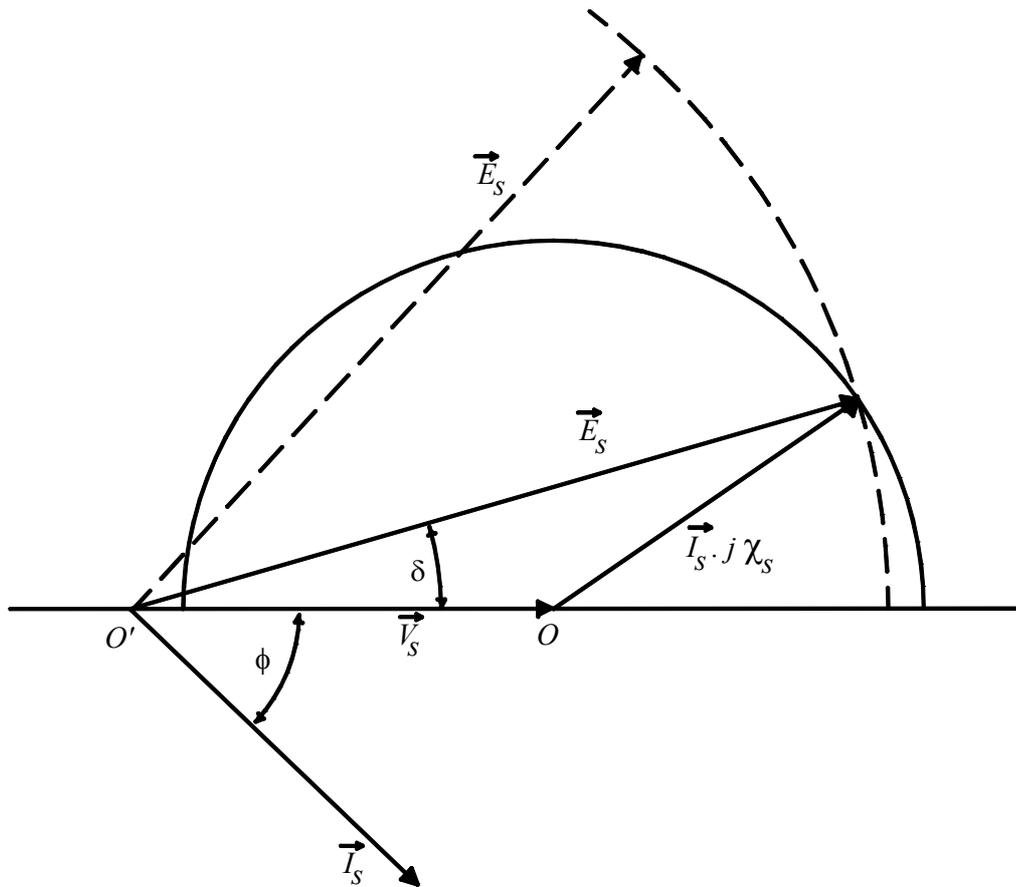


Figura 63 – Diagrama fasorial do GEADA com o esboço dos trechos relativos aos limites das correntes do rotor e do estator.

Quanto à estabilidade do GEADA, de acordo com o Capítulo 5, temos que a linha que une o ponto B ao ponto O na Figura 64 corresponde à posição onde o ângulo de potência é igual a 90 graus elétricos. Neste ponto, teria-se a potência ativa máxima que ocorreria para o valor máximo permissível da tensão interna, E_s .

Também na Figura 64, o ponto C corresponde ao valor máximo de potência ativa que o GEADA pode fornecer à sua carga ou ao sistema elétrico, com fator de potência, FP , unitário. Caso este valor de potência ativa seja menor que a potência mecânica disponível na máquina motriz, haverá um trecho da curva que estará limitada a este valor da potência mecânica.

Nos textos de (MELO, 1977, ALTINO, 1983, JORDÃO, 1984) são explorados os limites de estabilidade teórico e prático, e a excitação mínima, o que não será contemplado nesse trabalho.

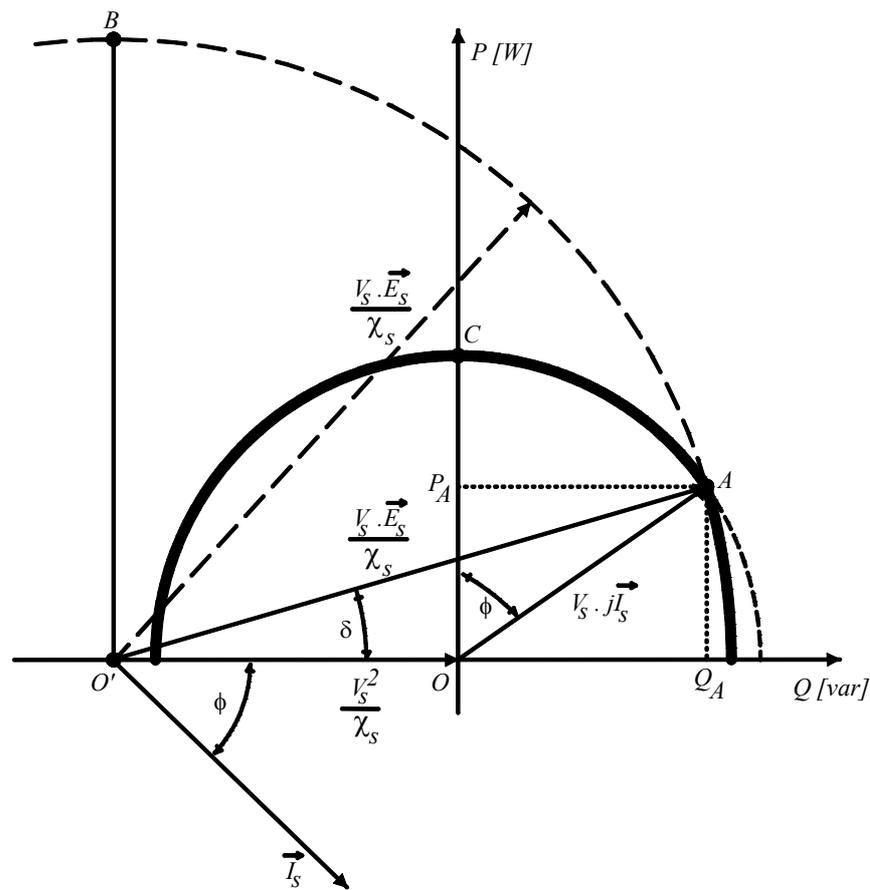


Figura 64 – Curva de capacidade proposta para o GEADA.

6.3.5 A aplicação da curva de capacidade do GEADA

Tendo em vista que a curva de capacidade se aplica para a determinação dos limites de operação do GEADA, a exemplo do que ocorre com os geradores síncronos, podemos concluir que este conceito de curva de capacidade para o GEADA segue os mesmos princípios dos trabalhos de (BENDL, 1998; SCHREIER, 1999), explorados na seção 6.2.

A diferença do método apresentado nesta seção é a sua fácil visualização dos parâmetros e sua influência nos limites de operação do GEADA, incluindo considerações a cerca do limite de estabilidade da excitação mínima, que não é possível ser visualizada nas regiões de operação propostas nos trabalhos de (BENDL, 1998; SCHREIER, 1999). Esta semelhança de conceitos foi expressa por (CHOMÁT, 2006) quando questionado se o pesquisador conhecia algum trabalho a nível mundial sobre a aplicação do conceito de curva de capacidade aos geradores assíncronos de dupla alimentação. A resposta foi que os

conceitos de regiões de operação poderiam ser entendidos como uma proposta de apresentação dos limites da corrente do rotor e do estator, algo semelhante ao que ocorre com a curva de capacidade.

Por outro lado, em (LEMOS, 2006) temos a afirmação que a estabilidade do gerador assíncrono de dupla alimentação depende muito da sua aplicação, do seu conversor de potência e das características do sistema elétrico ao qual está conectado. Esta comunicação pessoal inclui ainda a afirmação que não se definiram de maneira consensual os limites de estabilidade para os aerogeradores, que possuem a maior probabilidade de aplicação do GEADA.

7 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

De acordo com a proposta deste trabalho, apresenta-se neste capítulo o estudo experimental sobre o GEADA. Seguiu-se a seqüência temporal com que foram realizados, iniciando com a definição das características do gerador, neste caso o GEADA, do conversor de potência, continuando com a montagem da bancada de ensaios e definição dos equipamentos e instrumentos, os ensaios para a caracterização dos parâmetros do GEADA.

7.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GEADA

Inicialmente, cogitou-se a possibilidade de se adquirir um gerador assíncrono de rotor bobinado de um fabricante nacional, e após uma série de tratativas com a equipe técnica deste fabricante, declinou-se da idéia pelo alto custo desta aquisição.

Sendo assim, decidiu-se pela utilização de um antigo motor assíncrono de rotor bobinado pertencente ao Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia, LMEAE, da UFRGS. A Tabela 3 apresenta os dados de placa do motor e do GEADA. Este motor possui mais de 50 anos de uso, e por isto se fez necessário um processo de “*retrofitting*” para que o motor pudesse operar como GEADA.

Tabela 3 – Dados de placa originais do motor e dados do GEADA após o “*retrofitting*”.

Característica	Motor original	GEADA
Fabricante	ASEA	ASEA / LMEAE
Ano de fabricação	década de 1950	2004
N.º de fases	3	3
Ligação no estator	estrela ou triângulo	estrela ou triângulo
Ligação no rotor	estrela sem acesso ao neutro	estrela com acesso ao neutro
Tensão nominal no estator	220V em estrela	220V em estrela
Frequência nominal	50 Hz	60 Hz
N.º de pólos	4	4
Corrente de linha no estator	11,1A	
Potência	3kW – 4hp	2kW
rotação nominal	1410 rpm	1790 rpm
N.º de anéis	3	4
Escovas	duas por anel	uma por anel
Tipo de enrol. do estator	em espiral, de 1 camada	imbricado de dupla camada
N.º espiras do enrol. do estator	6 grupos de 3 bobinas	3 grupos de 12 bobinas com 11 espiras cada
N.º de ranhuras do estator	36	36
Passo de ranhura do estator	1-10	1-10
Tipo de enrol. do rotor	espiralado, de 1 camada	imbricado de dupla camada
N.º espiras do enrol. do rotor	6 grupos de 4 bobinas	3 grupos de 16 bobinas com 9 espiras cada
N.º de ranhuras do rotor	48	48
Passo de ranhura do rotor	1-16, 1-14, 1-12, 1-10	1-13

Foram realizadas as seguintes modificações e modernizações:

1. Substituição dos enrolamentos do rotor e do estator, para melhoria do isolamento dos fios de cobre e definição da relação de transformação próxima da unitária;
2. Limpeza dos rolamentos dos mancais com a troca da graxa, para diminuição do atrito com o eixo;
3. Instalação de um anel para acesso ao neutro do enrolamento por meio de escova de carvão, que permitirá medições monofásicas e em outros projetos, a filtragem das componentes harmônicas do circuito do rotor;
4. Limpeza geral da carcaça.

7.1.1 Critérios para o projeto dos enrolamentos do GEADA

Para o projeto dos novos enrolamentos buscou-se nas referências o embasamento para a definição da relação de espiras entre os enrolamentos do rotor e do estator, encontrando no trabalho de (DATTA, 2002), a afirmação de que é vantajoso usar-se um número menor de espiras no enrolamento do rotor, embora isto requeira uma maior corrente nominal deste para se manter o valor do fluxo magnético no entreferro e nos núcleos magnéticos próximo dos utilizados usualmente.

Isto tem a ver com a relação de transformação, RT , próxima da unidade que tem a finalidade principal de propiciar a otimização nos parâmetros do rotor, resistências e reatâncias, e possibilitar maiores valores nominais da tensão a ser fornecida pelo conversor de potência ao rotor, de forma que este conversor de potência tenha um melhor desempenho do ponto de vista do circuito de chaveamento dos tiristores que o compõem. Isto também diminui a ocorrência de frequências harmônicas nesta tensão.

Isto foi considerado na definição dos critérios para o projeto dos enrolamentos, mantendo a relação próxima da unidade não é tarefa simples, pois a reforma do citado motor não contemplaria a alteração do número de ranhuras nos núcleos do rotor ou do estator.

Esta necessidade de se ter a relação de transformação próxima da unidade se mostra efetiva também na aplicação de inversores de frequência do tipo comercial como conversor de potência, como é o caso do estudo em questão, o que é explorado na seção seguinte.

O projeto foi feito a partir dos cálculos de enrolamentos estáticos para máquinas síncronas com base no texto de (TURNER, 1945; KOSTENKO, 1965; JORDÃO, 1980), conforme apresentado no Apêndice. A principal preocupação foi manter-se os núcleos magnéticos originais do estator e do rotor, ainda que se desconheçam as propriedades magnéticas do aço empregado nestes núcleos, e garantir que a relação de transformação trifásica entre rotor e estator fosse o mais próxima da unidade possível.

Todo o projeto dos enrolamentos foi baseado considerando-se o aço destes núcleos de baixa qualidade magnética, visto a máquina ter sido fabricada há mais de 50 anos, estipulando-se um valor para a indução no entreferro cerca de 60% daquele usual em máquinas elétricas, que é por volta de 1 Tesla. Assim assumiu-se para a indução no entreferro, B_g , o valor de 0,6T.

O projeto completo foi desenvolvido no programa computacional MathCAD, e é apresentado ao final deste trabalho, no Apêndice, na forma original deste software.

O resultado do “*retrofitting*” do motor assíncrono com rotor bobinado que foi transformado no GEADA pode ser visto nas fotos apresentadas nas Figuras 65 a 68.

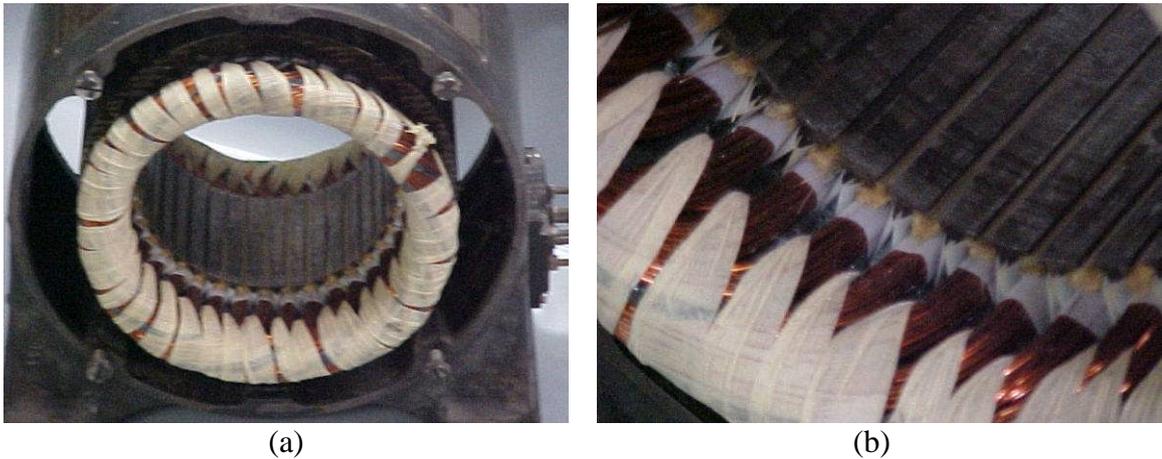


Figura 65 – Foto do (a) estator do GEADA e (b) detalhe das bobinas do estator.

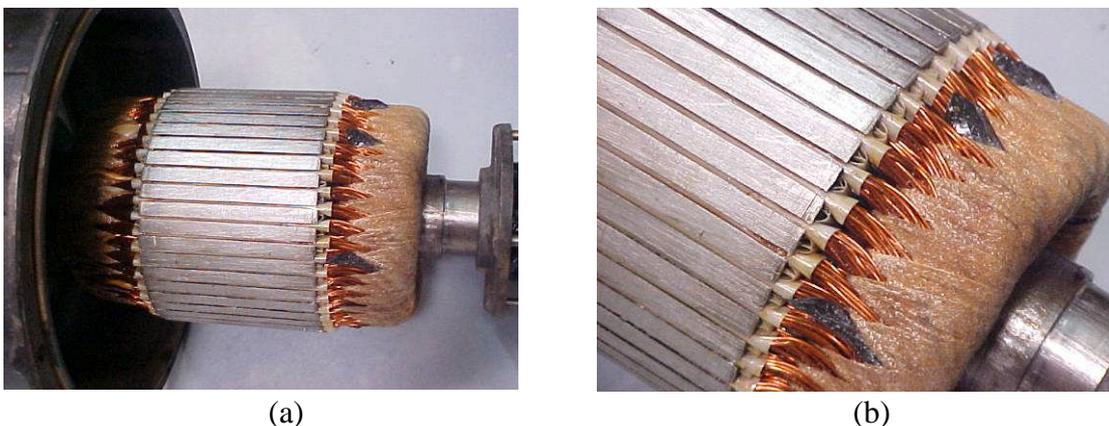


Figura 66 – Foto do (a) rotor GEADA e (b) detalhe das bobinas do rotor.

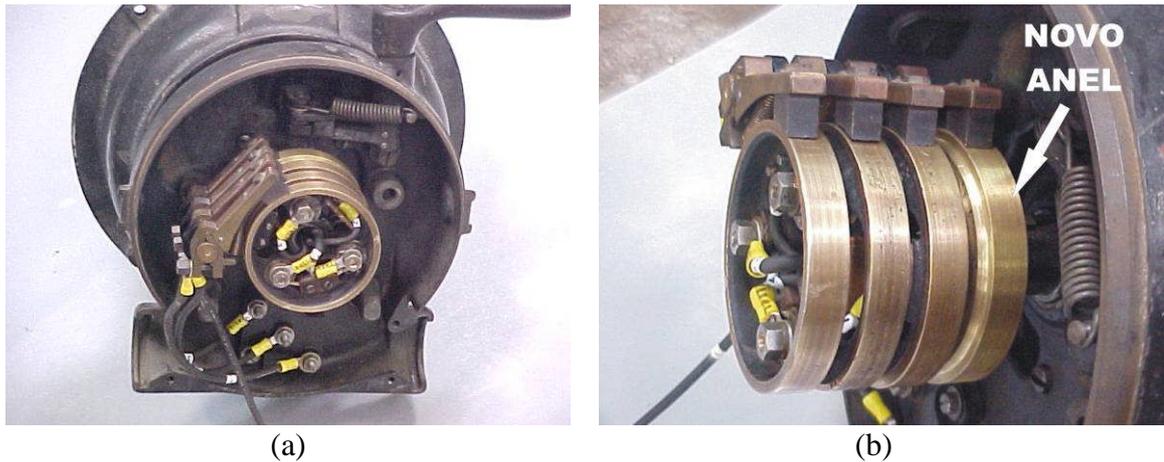


Figura 67 – Foto dos (a) anéis e escovas do GEADA e (b) detalhe dos anéis com indicação do anel novo.

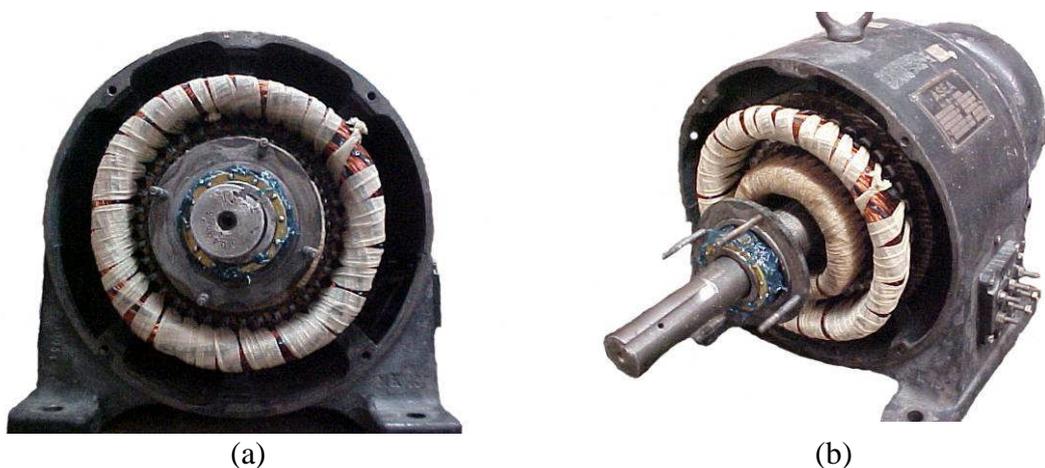


Figura 68 – Foto da (a) e (b) montagem do rotor no interior do estator do GEADA.

7.1.2 Considerações sobre o “retrofitting” do GEADA

Faz-se nesta seção considerações pertinentes que terão impacto no desempenho do GEADA ao longo dos ensaios.

Primeiramente, observa-se que, ao se manterem os mesmos núcleos magnéticos do rotor e do estator, manteve-se o passo inteiro de ranhura, e com isto, conforme (TURNER, 1945) haverá a ocorrência de harmônicas na forma da tensão gerada. Nas seções que se seguem será feita menção a esta ocorrência das harmônicas. As Figuras 79 e 82 a 84 mostram o aumento do ruído conforme aumenta a tensão gerada, indicando a presença das harmônicas.

Ao se manter os mesmos núcleos magnéticos com mais de 50 anos, haverá repercussão nas perdas magnéticas, que têm mais chance de serem maiores do que aquelas que o GEADA teria se tivesse sido projetado e construído integralmente com a tecnologia de

cálculos e materiais disponíveis nos dias de hoje, principalmente se o núcleo do rotor também fosse de aço silício.

7.2 CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DO CONVERSOR DE POTÊNCIA

Dentro do escopo desse trabalho está a utilização de um inversor de frequência comercial como conversor de potência, e, diante disso, foi necessário definirem-se os critérios mínimos para a seleção do inversor de forma a atender aos requisitos mínimos para funcionamento com o GEADA.

Os critérios definidos com base na revisão constante no Capítulo 2 são:

1. Inversor de frequência, com modulação PWM da tensão de saída, pois se considerou que este seria o pior caso em termos de forma de onda dessa tensão, que corresponde à tensão de entrada do circuito do rotor;
2. Frequência da tensão de saída o mais próximo de 0 Hz, corrente contínua, possível, para permitir uma ampla faixa de controle do GEADA;
3. Corrente nominal de saída superior à corrente nominal do estator do gerador em estudo, para o caso, se necessário, da realização de ensaios com um valor alto de escorregamento, diante da relação de transformação ser próxima da unidade;
4. Possibilidade de controle independente da tensão e da frequência, ou possuir controle escalar, “V/f”, com parâmetros que possibilitar o controle necessário à operação do GEADA em qualquer dos modos operativos;
5. Módulo regenerativo para possibilitar a operação do inversor de frequência comercial nos quatro quadrantes, visto que os inversores de frequência comerciais são desenvolvidos para acionar motores de indução;
6. Canal de comunicação com protocolos padrões RS232, GPIB ou USB, para o controle do inversor de frequência através de um computador e programa computacional supervisor.

7.2.1 Utilização do inversor de frequência comercial como conversor de potência

Por se tratar de um inversor de frequência comercial, este possui sua operação básica pelo controle escalar “V/f”, de forma a se obter, no motor que estiver sendo acionado

pelo inversor, um conjugado constante. Há inversores que possuem também o controle vetorial.

Na aplicação como conversor de potência, conforme já referido, a necessidade é que se tenha o controle independente da tensão e da frequência correspondente ao escorregamento, permitindo a operação do GEADA nos modos subsíncrono, sobressíncrono e síncrono, com o controle de potência ativa e reativa.

O inversor instalado na bancada de testes do GEADA é da SEW Eurodrive, modelo MCV4 com módulo regenerativo e canal de comunicação com o protocolo RS232. A Tabela 4 apresenta as características principais do inversor. Este inversor possui o controle escalar (V/f) e o controle vetorial, sendo que no modo de controle escalar há parâmetros que possibilitam o reforço de corrente ou de tensão na saída do inversor, o que se mostrou útil no controle da tensão gerada nos terminais do GEADA. Também existe a possibilidade de se controlar a frequência a partir de 1 Hz, com limite superior acima de 60 Hz, o que não chegou a ser usado nos ensaios.

Com este inversor é possível uma ampliação da faixa de tensão do rotor a partir de uma alteração nos parâmetros com os dados nominais (de placa) do motor que se está usando: tensão, frequência, e velocidade de rotação. Este procedimento, apesar de possibilitar o uso deste inversor como conversor de potência, não é usual. Com isto, ao longo dos ensaios, foi possível controlar a corrente de saída desde 0,7A até a corrente nominal do rotor, 6A. Observa-se que, pelo controle escalar “V/f”, ao se definir uma frequência de saída do inversor, este estima o valor que a tensão de saída deve apresentar para manter-se o conjugado constante, de acordo com os parâmetros do motor e de medidas indiretas de corrente que o mesmo realiza quando conectado ao motor em uso.

Caso seja necessário um menor valor para esta corrente, podem-se alterar estes dados novamente até se encontrarem valores que o permitam.

Tabela 4 – Dados de placa do inversor de frequência da SEW utilizado para os ensaios e operação do GEADA.

Fabricante	SEW Eurodrive
Modelo	Movidrive Compact – MCV4
Tensão nominal de entrada	380 V – 60Hz
Tensão nominal de saída	220 V
Potência	5,5 kW
Faixa de rotação	-5000 rpm a 0 rpm a 5000 rpm
Tipo de controle	escalar (V/f) e vetorial
Protocolos de comunicação	RS 232, RS 485
Módulo regenerativo	Movidrive MDR60A
Potência nominal do módulo	37kW
Parâmetros especiais	reforço de corrente e de tensão para conjugado de partida

7.3 BANCADA DE TESTES PARA O GEADA

Para completar a bancada de testes, definiram-se os requisitos mínimos necessários para os demais equipamentos e instrumentos para a realização dos ensaios de caracterização e de operação do GEADA, que são:

1. Máquina motriz CC capaz de entregar no mínimo 3kW de potência ao eixo do conjunto, e com faixa de velocidade de rotação de 0 rpm a 2300 rpm;
2. Conversor CA/CC para acionamento da máquina primária CC, com o controle de potência e rotação, realimentado por tacogerador;
3. Tacogerador para realimentação do conversor CA/CC e controle da velocidade;
4. Torquímetro capaz de medir o conjugado no eixo do conjunto;
5. Wattímetro trifásico com medição de grandezas em corrente alternada ou corrente contínua;
6. Amperímetro para medição True rms;
7. Fonte de corrente contínua com capacidade de fornecer de 0 a 10 A;
8. Osciloscópio digital com protocolo de comunicação GPIB, para a captura e registro das formas de onda;
9. Tacômetro manual para a medição da velocidade de rotação do eixo do conjunto.

Na seção que descreve cada ensaio encontra-se a lista de instrumentos utilizados no respectivo ensaio.

A Figura 69 a seguir mostra o esquema da proposta para a bancada de testes e as Figuras 70 e 71 apresentam fotos da bancada real, inclusive o torquímetro de eixo, que foi utilizado neste trabalho apenas qualitativamente, indicando que um valor de conjugado é maior que outro, sem se levar em conta o valor apresentado pelo condicionador de sinais, pois os valores apresentados durante uma leitura em qualquer dos ensaios com carga variavam muito, tendo-se tomado um valor médio das leituras.

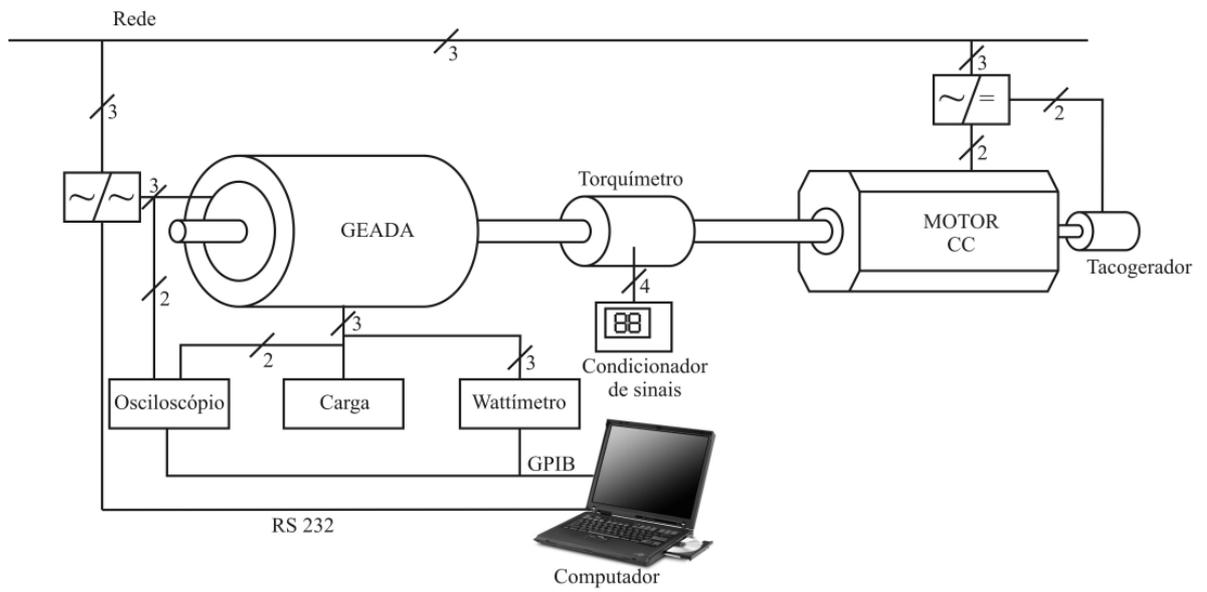


Figura 69 – Diagrama esquemático da bancada de testes do GEADA.



Figura 70 – Foto da bancada de testes do GEADA.



Figura 71 – Foto da bancada de testes do GEADA e quadros de comando do motor CC e do inversor de frequência.

7.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO GEADA

Para a verificação das premissas básicas assumidas para o equacionamento matemático do modelo para regime permanente desenvolvido no Capítulo 3 deste trabalho, faz-se necessária a realização de ensaios com o conjunto máquina motriz-gerador-excitação. Primeiramente, realizam-se os ensaios para a caracterização da máquina em estudo, com o levantamento dos parâmetros elétricos do gerador, descritos neste capítulo. Feito isto, confrontam-se as medições com os cálculos feitos seguindo os procedimentos das normas e apresentam-se as conclusões.

Como não existem normas específicas para o ensaio de geradores assíncronos de dupla alimentação, sua especificação, definição ou operação, os ensaios para caracterização do GEADA são realizados com a aplicação das normas ABNT 5383 (ABNT, 1983) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e IEEE, IEEE Std. 112 (IEEE, 1996), reconhecida pela *American National Standard Institute*, ANSI, ambas referentes a procedimentos para os ensaios de máquinas de indução, motores ou geradores. Ao longo deste capítulo segue-se a norma americana pela sua clareza na apresentação dos procedimentos.

Também foram utilizados alguns procedimentos extras que não estão previstos nestas normas, para comparação com os ensaios normalizados, que constam nos textos de (HINDMARSH, 1984; SAY, 1983). Isto foi feito para verificação da aplicabilidade dessas normas ao gerador assíncrono de dupla alimentação. Esses procedimentos estão descritos ao longo desse capítulo.

Os ensaios para a caracterização do GEADA, elencados a seguir, foram selecionados e realizados considerando-se que estes ensaios também deveriam prover dados para conferir-se se o projeto dos novos enrolamentos do estator e do rotor foi bem desenvolvido e se a execução da substituição dos enrolamentos foi bem realizada.

1. Ensaio para verificação da relação de transformação entre os enrolamentos do rotor e do estator, para validação do projeto dos novos enrolamentos do estator e rotor;

2. Ensaio de medida das resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, para o levantamento das resistências de modo direto, e comparação com os valores de resistências encontradas indiretamente pelos processos das normas usadas neste capítulo;

3. Ensaio a vazio, com o gerador funcionando como motor de indução, tendo o seu circuito do rotor com os terminais (anéis coletores) curto-circuitados e sem nenhuma carga acoplada ao seu eixo, para o levantamento dos parâmetros do estator e da perda no ferro, observando-se que neste ensaio há influências das perdas mecânicas também;

4. Ensaio a vazio, como no ensaio anterior, porém com o rotor girando à velocidade síncrona através do acoplamento com a máquina motriz, neste caso, um motor CC de velocidade e conjugado controlados, sendo uma variante do ensaio normalizado citado no item 3, só que assim garante-se que não há fluxo no circuito do rotor, como se o rotor tivesse sido extraído da máquina, observando porém, que neste ensaio não há influência das perdas mecânicas;

5. Ensaio de rotor parado, com o gerador tendo o seu circuito do rotor com os terminais abertos, com o mesmo efeito do ensaio citado no item 4, também não apresentando influência das perdas mecânicas;

6. Ensaio com o rotor bloqueado, com o gerador funcionando como motor de indução, com o rotor impedido de girar mecanicamente, para o levantamento da impedância de dispersão e a perda joule da corrente nominal e a resistência efetiva do

estator do GEADA, uma vez que desta forma o valor da resistência está mais perto do valor verificado em operação.

Dentre os vários métodos apresentados na norma IEEE Std 112 (IEEE, 1996), pelas características deste estudo, o recomendado para o tipo de máquina no qual o GEADA se enquadra, isto é, máquina com rotor bobinado, é o método F/F1 “Test Method F or F1 – Equivalent circuit”, seguindo-se o procedimento do formulário apropriado para esse método referido com “Form F1 – Method F-F1”.

Para realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos apresentados na Tabela 5 a seguir, pertencentes ao LMEAE.

As Figuras 72 e 73 apresentam as configurações e terminais dos enrolamentos do estator e do rotor do GEADA, respectivamente.

Tabela 5 - Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização do GEADA.

Equipamento	Grandeza envolvida no ensaio
Wattímetro Digital WT1030M Fabricante: YOKOGAWA Resolução: 16 bits	Módulo da Tensão e Corrente de Linha; Potências Ativa, Reativa e Aparente; Fator de Potência
Amperímetro Clamp Meter True-rms Fabricante: FLUKE Resolução: 0,1 A	Módulo da Corrente de Fase e de Linha
Ohmímetro Digital DO5 Fabricante: CROPICO Resolução: 0,001 Ω	Resistências dos enrolamentos
Tacômetro Digital a Cristal de Quartzo TD-301 Fabricante: Tako Resolução: 1 r.p.m.	Velocidade de rotação do eixo do conjunto máquina motriz-gerador
Termômetro Infravermelho com mira laser Fabricante: RAYTEC Resolução: 1 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura ambiente e dos enrolamentos
VARIAC Trifásico 220V / 240V –10A Fabricante: EQUACIONAL Resolução: analógica 0,1 V	Tensão de Linha variável

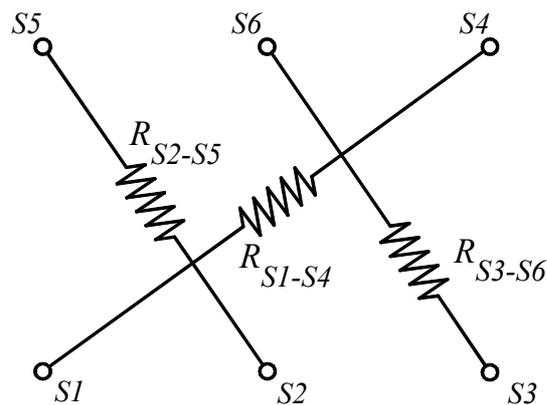


Figura 72 – Terminais do estator do GEADA.

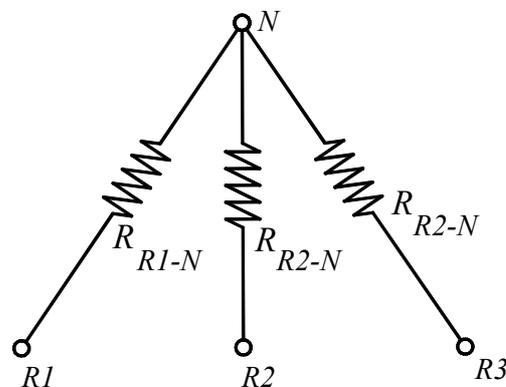


Figura 73 – Terminais do rotor do GEADA.

7.4.1 Ensaio para verificação da relação de transformação entre os enrolamentos do rotor e do estator

Este ensaio é realizado conforme o ensaio para transformadores, correspondendo à aplicação de uma tensão trifásica ao estator com os terminais das escovas do rotor em aberto, e a medição das tensões resultantes neste rotor.

O enrolamento do estator foi ligado em triângulo tendo-se como centro, ou neutro, os terminais S4, S5 e S6 com base na Figura 72 e as fases R, S e T conectadas aos terminais S1, S2 e S3 respectivamente. O enrolamento do rotor é internamente conectado em estrela, conforme pode ser observado na Figura 73, e por isto deve-se aplicar o fator $\sqrt{3}$ aos valores lidos para a tensão no estator. A Tabela 6 apresenta os resultados.

Tabela 6 - Relação de Transformação entre o estator e o rotor do GEADA.

Tensão no estator, V_s (V) (valores medidos multiplicados por $\sqrt{3}$)	Tensão no rotor, V_r (V)	Relação de Transformação, RT
31,18	31	0,99
51,96	52	1,00
69,28	70	1,01
98,73	100	1,01
116,05	120	1,03
145,49	150	1,03
173,21	180	1,04
192,26	200	1,04
211,31	220	1,04

O texto de (HINDMARSH, 1984) apresenta uma variação para o ensaio de relação de transformação da máquina de indução de rotor bobinado quando se tem acesso aos terminais do circuito rotor por meio de anéis e escovas. Esta proposta se deve ao fato que a corrente de magnetização nas máquinas de indução tem um valor expressivo se comparado com a do transformador, pela existência do entreferro na primeira, e como consequência, não se pode desconsiderar a queda de tensão nas resistências dos enrolamentos causada pela corrente de magnetização. Para diminuir a influência deste fato nos resultados, o autor de (HINDMARSH, 1984) sugere que se façam dois ensaios de relação de transformação.

O primeiro ensaio é feito no modo clássico, conforme apresentado no início desta seção, com os resultados na Tabela 6, enquanto que no segundo ensaio alimenta-se o rotor com tensão alternada, V_r , e mede-se a tensão gerada nos terminais do estator, V_s . Os resultados para os valores nominais de tensão estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Relação de Transformação entre o rotor e o estator do GEADA.

Tensão no rotor, V_r (V) ligado em estrela	Tensão no estator, V_s (V) ligado em estrela	Relação de Transformação, RT
225	220	1,023

Conforme exposto no texto de (HINDMARSH, 1984), os cálculos das relações de transformação para cada um dos casos é dada pelas equações (156) e (157).

$$RT_1 = \frac{V_r}{V_s} \quad (156)$$

$$RT_2 = \frac{V_s}{V_r} \quad (157)$$

Concluindo o ensaio, a relação de transformação real da máquina, RT , é calculada pela razão das duas relações calculadas nas equações (156) e (157), conforme a equação (158), com o valor de 1,02, o que pode ser considerado muito próximo da unidade, como foi projetada para os novos enrolamentos do GEADA, e apresentado nas seções iniciais deste Capítulo.

$$RT = \frac{RT_1}{RT_2} = 1,02 \quad (158)$$

7.4.2 Ensaio para medição da resistência dos enrolamentos do GEADA

O projeto dos novos enrolamentos do GEADA previu um quarto anel coletor para que o enrolamento do rotor possa ser ligado em estrela com neutro aterrado. Desta forma foi possível o acesso ao neutro deste enrolamento e a medição com o Ohmímetro CROPICO, que permite a medição de resistência a quatro fios, de forma a compensar a resistência dos cabos de medição. Como os fios dos enrolamentos possuem uma seção de alguns milímetros quadrados, pode-se desprezar o efeito pelicular da corrente devido a sua frequência de 60Hz. Desta forma, a norma IEEE Std 118 (IEEE, 1978a) prevê que possa ser realizada a medição de resistências com a aplicação de tensão em corrente contínua, o que pôde ser feita com a utilização do ohmímetro CROPICO.

As medições das resistências estão apresentadas na Tabela 8 observando-se que os valores correspondem às resistências medidas de cada fase, tanto do estator quanto do rotor, à temperatura ambiente de 28°C.

Para a utilização dos valores de resistência medido neste ensaio faz-se necessária, conforme recomendação da norma utilizada nestes ensaios, a IEEE Std 112 (IEEE, 1996), que estas medidas sejam corrigidas para a temperatura de trabalho do gerador com carga nominal. Para os cálculos iniciais considera-se a temperatura recomendada por esta norma, na sua Tabela 1, mesmo que o verniz esmalte e o material empregado na isolação dos fios de cobre empregados nos enrolamentos, tanto do estator quanto do rotor, pertençam à classe térmica “H”, assumindo-se como temperatura para carga nominal o valor de 75 °C. Quando forem realizados os ensaios aplicando-se carga ao gerador, os valores serão revistos para a temperatura de trabalho nominal realmente alcançada durante os ensaios.

A fórmula empregada para esta correção de valores conforme a temperatura recomendada por esta norma está transcrita neste trabalho na equação (159).

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{(t_2 + k)}{(t_1 + k)} \quad (159)$$

onde R_{t1} é o valor medido da resistência, t_1 é a temperatura em que foi medida R_{t1} , R_{t2} corresponde ao novo valor de resistência, corrigido para a temperatura t_2 , neste caso, 75°C , e o fator k corresponde a $234,5^\circ\text{C}$ para o cobre eletrolítico normalmente empregado em fios condutores.

Assim chegamos aos valores da coluna “Valor corrigido (75°C)” da Tabela 8, referindo-se aos terminais assinalados nas Figuras 72 e 73.

Como resultado deste ensaio utiliza-se o valor médio das resistências, calculado na coluna mais à direita da Tabela 8 intitulada “Valor médio @ 75°C (Ω)”, a partir das considerações feitas no Capítulo 3, quanto aos enrolamentos serem considerados equilibrados.

Tabela 8 - Resistências do rotor e do estator do GEADA medidas com ohmímetro.

Circuito	Terminais	Valor medido @ 28°C (Ω)	Valor corrigido @ 75°C (Ω)	Valor médio @ 75°C (Ω)
Rotor (Rr)	R1-Neutro	0,5943	0,7061	0,7102
	R2-Neutro	0,6019	0,7151	
	R3-Neutro	0,597	0,7093	
Estator (Rs)	S1-S4	0,4853	0,5766	0,5768
	S2-S5	0,4851	0,5763	
	S3-S6	0,4861	0,5775	

7.4.3 Ensaio com o gerador a vazio

O ensaio do GEADA a vazio foi realizado conforme a norma, IEEE Std 112 (IEEE, 1996), com o gerador operando como motor de indução, tendo os terminais das escovas do rotor curto-circuitados e sem carga acoplada ao eixo. Como o gerador foi especificado para trabalhar em tensões de 127V e 220V, o estator foi ligado em estrela, a exemplo do ocorrido com no ensaio de verificação da Relação de Transformação.

Este ensaio deve ser realizado com tensões e frequências nominais aplicadas ao estator da máquina. As grandezas medidas constam na Tabela 9.

Tabela 9 - Grandezas medidas no ensaio a vazio do GEADA.

Tensão de Fase (V)	Corrente de Linha (A)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (var)	Fator de Potência	r.p.m.	Temp. Enrol. (°C)
129,64	4,935	1919	214	1905	0,111	1798	37

As perdas por atrito e ventilação, P_{a_v} , neste ensaio são calculadas conforme o item 5.3.4 da norma IEEE Std 112 (IEEE 1996), para $V_S^2 = 0$ no gráfico de $V_S^2 \times (W - I^2 \cdot R_S)$ apresentado na Figura 74, onde os pontos correspondem às medidas e a linha reta é a tendência necessária para se ter estas perdas definidas.

Prolongando a linha de tendência do gráfico em questão até $V_S^2 = 0$, tem-se então que P_{a_v} é aproximadamente 79,33W, conforme indicado na Figura 74.

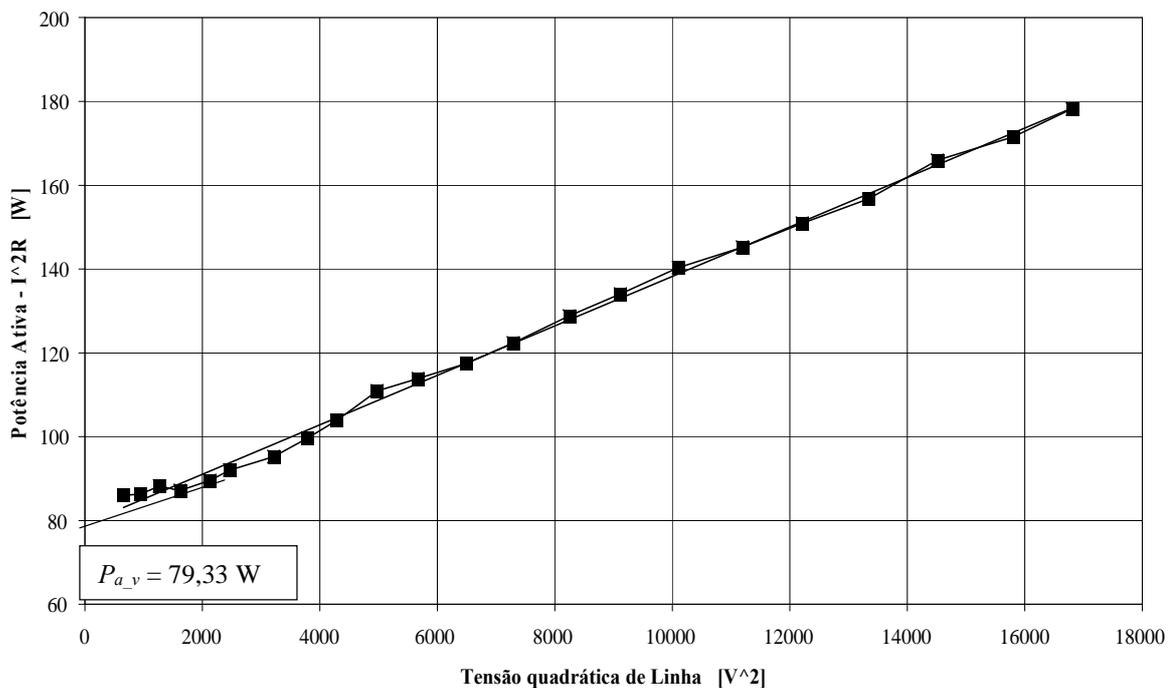


Figura 74 – Gráfico para cálculo das perdas por atrito e ventilação no ensaio a vazio do GEADA.

7.4.4 Ensaio com o rotor aberto e na velocidade síncrona

As grandezas medidas neste ensaio, apresentadas na Tabela 10 são as mesmas do ensaio anterior, porém neste ensaio o rotor está acoplado à máquina primária, girando à

velocidade síncrona e com seus terminais abertos, de forma a garantir que não haja nenhuma indução magnética no circuito do rotor ou perdas nos enrolamentos ou mecânicas, mesmo que haja um escorregamento mínimo.

Tabela 10 - Grandezas medidas no Ensaio a vazio do GEADA com o rotor na velocidade síncrona.

Tensão de Fase (V)	Corrente de Linha (A)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (var)	rpm	Temp. Enrol. (°C)
129,74	4,725	1839	116	1836	1800	31

7.4.5 Ensaio com o rotor parado e aberto

Neste ensaio os terminais do enrolamento do rotor estão abertos, havendo apenas a medição da indução no circuito magnético do rotor e a perda por efeito Joule no enrolamento do estator, sendo medida a potência ativa relativa às perdas no ferro. Assim poderá ser verificada se a desconsideração das perdas ativas no ferro, P_{fe} , pode realmente ser mantida sem prejuízo substancial aos resultados dos estudos de regime permanente do GEADA. As grandezas medidas constam na Tabela 11.

Tabela 11 - Grandezas medidas no Ensaio com o rotor parado e aberto.

Tensão de Fase (V)	Corrente de Linha (A)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (var)	Temp. Enrol. (°C)
130,49	5,01	1961	154	1954	36

Comparando-se as potências ativas nos ensaios com o rotor girando à velocidade síncrona, 116W, e aberto, 154W, verifica-se um aumento de 32% do primeiro para o segundo ensaio, correspondente às perdas no ferro. Apesar de ser um valor significativo, após a conclusão de todos os ensaios de levantamento dos parâmetros, constantes nesse capítulo, vê-se que essa componente resistiva do circuito equivalente que representa o efeito das perdas no ferro, R_{fe} , referida na seção 3.2 pode ser desconsiderada, pois ela aparece em paralelo com a reatância de magnetização, que possui um valor menor.

7.4.6 Ensaio com o rotor bloqueado

Para este ensaio, também chamado de “ensaio de impedância” segundo o método F-F1 da norma IEEE Std 112 (IEEE, 1996), deve-se ter o GEADA operando como motor de indução, com o rotor curto-circuitado, e o eixo impedido de girar.

Dentro deste ensaio de impedância, segue-se o método 1 da norma como primeiro ensaio visando confrontar os estudos teóricos com os ensaios experimentais.

Como a impedância do rotor bobinado varia com a posição angular em que se encontra este rotor em relação ao estator, devem-se pesquisar diversas posições angulares do rotor, de forma que se encontrem as posições correspondentes aos valores médios das impedâncias. Para isto deve-se elevar pausadamente o valor da tensão de modo a se obter a corrente nominal, mantendo-se o rotor bloqueado. Então se deve poder movimentar o eixo do rotor em diversas posições angulares de forma a medir-se o valor máximo e o valor mínimo da corrente. O rotor deve ser então bloqueado na posição em que o valor da corrente corresponde ao valor médio entre o máximo e o mínimo lido. A Tabela 12 apresenta os valores medidos de tensão e corrente para cada uma das posições angulares.

Esta pesquisa serve também para verificar se o rotor está simétrico quanto ao entreferro, núcleo magnético e distribuição dos enrolamentos.

Tabela 12 – Valores medidos de tensão e corrente nos terminais do estator variando-se a posição angular entre o rotor bloqueado e o estator do GEADA.

Posição angular do rotor em relação ao estator	tensão média das três fases [V]	corrente média das três fases [A]	impedância média calculada nesta posição
0°	5,35	2,53	2,11
30°	5,26	2,59	2,03
60°	5,40	2,53	2,13
90°	5,14	2,52	2,04
120°	5,39	2,55	2,11
150°	5,07	2,49	2,04
180°	5,28	2,49	2,12
210°	5,10	2,51	2,03
240°	5,47	2,58	2,12
270°	5,06	2,5	2,02
300°	5,43	2,56	2,12
330°	5,27	2,59	2,03

A diferença entre os valores medidos nas posições angulares 0°, 60°, 120°, 180°, 240° e 300° e nas posições angulares 30°, 90°, 150°, 210°, 270° e 330° é relativa (i) à diferença entre o passo de ranhura do rotor e do passo de ranhura do estator, (ii) no número de ranhuras,

(iii) no passo de bobina e (iv) no número de espiras por bobina, conforme exposto no início deste Capítulo.

A Figura 75 apresenta as medidas das impedâncias em relação à posição angular do rotor em relação ao estator e o valor médio da impedância, $2,08\Omega$, observando-se que o enrolamento é simétrico.

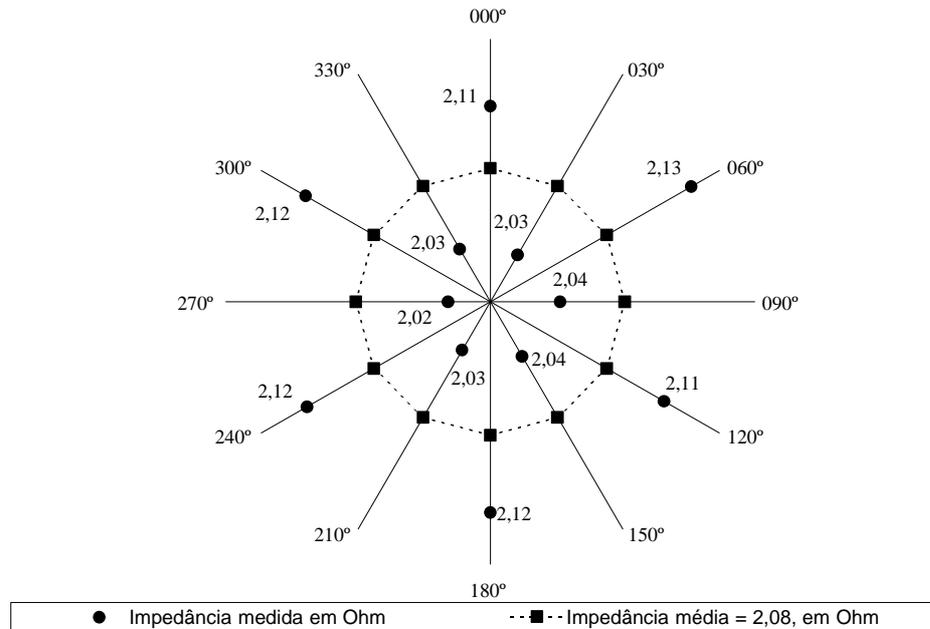


Figura 75 – Impedâncias de acordo com a posição angular do rotor em relação ao estator, com os valores em Ω .

A Tabela 13 apresenta os valores medidos para as grandezas envolvidas neste ensaio de rotor bloqueado, com o rotor bloqueado na posição angular correspondente a 15° , o que se estima que seja a posição correspondente ao valor médio da impedância.

Tabela 13 - Grandezas medidas no ensaio com o rotor bloqueado

Tensão de Fase (V)	Corrente de Linha (A)	Potência Aparente (VA)	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (var)	Fator de Potência	Temp. enrol. estator ($^\circ\text{C}$)	Temp. enrol. rotor ($^\circ\text{C}$)	estado do rotor
17,52	8,293	436	242	362	0,555	44	55	bloqueado
17,17	8,538	440	189	397	0,434	41	52	-1800 rpm

O ensaio com rotor bloqueado pode também ser realizado com rotor girando no sentido inverso ao do campo girante, sendo o rotor acionado por uma máquina motriz na velocidade síncrona. O efeito que se busca, de curto-circuito no rotor, é alcançado da mesma maneira, porém essa outra forma pode ser utilizada quando não for possível por qualquer motivo impedir o giro do rotor de forma a bloqueá-lo, quer seja pelo local onde o mesmo está

instalado quer seja pelo seu tamanho e esforço que o mesmo fará quando estiver com o rotor bloqueado.

A título de comparação, a Tabela 13 na sua terceira linha apresenta os valores medidos dessa segunda forma, com o rotor girando a 1800 rpm no sentido contrário ao que normalmente giraria quando operado como motor. Pode-se constatar que estão próximos aos do ensaio com rotor bloqueado. Nos cálculos dos parâmetros serão usados os valores do ensaio com o rotor bloqueado.

7.4.7 Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do GEADA a partir dos ensaios da norma IEEE Std 112/1996

Tendo sido definido que o cálculo dos parâmetros de GEADA seria realizado conforme a norma IEEE Std 112 (IEEE, 1996), usam-se nesta seção os valores da equação (137) e das Tabelas 8 a 11 e 13, com o objetivo de calcularem-se os parâmetros R_s , R_r , X_s , X_r e X_m para o circuito equivalente para os estudos de regime permanente do GEADA e comparar os valores encontrados para as diversas formas de ensaio apresentadas nas seções anteriores desse capítulo.

Seguindo-se o equacionamento apresentado pelo “Form F1 – Method F-F1” da norma IEEE Std 112 (IEEE, 1996), temos as seguintes equações (160) a (164).

$$Q_0 = \sqrt{(3 \cdot V_{s0} \cdot I_{s0}) - P_0} \quad [\text{var}] \quad (160)$$

$$Q_L = \sqrt{(3 \cdot V_{sL} \cdot I_{sL}) - P_L} \quad [\text{var}] \quad (161)$$

$$X_m = \frac{3 \cdot V_{s0}^2}{Q_0 - 3 \cdot I_{s0}^2 \cdot X_s} \cdot \left(\frac{I}{I + \frac{X_s}{X_m}} \right)^2 \quad [\Omega] \quad (162)$$

$$X_{sL} = \frac{Q_L}{3 \cdot I_{sL}^2 \cdot \left(1 + \frac{X_s}{X_r} + \frac{X_s}{X_m} \right)} \cdot \left(\frac{X_s}{X_r} + \frac{X_s}{X_m} \right) \quad [\Omega] \quad (163)$$

$$X_s = \frac{f}{f_L} \cdot X_{sL} \quad [\Omega] \quad (164)$$

Este método prevê que seja assumida uma relação entre X_S e X_r , conforme o tipo de construção da máquina em questão. Para o GEADA, que apresenta o rotor bobinado, a relação é igual a um, conforme a equação (165).

$$\frac{X_S}{X_r} = 1 \quad (165)$$

O método é baseado na iteração destas equações, calculando-se os valores da potência reativa tanto no ensaio a vazio, cujos valores estão indicados pelo índice “0” como no ensaio com rotor bloqueado, com os valores indicados pelo índice “L”. A iteração consiste de resolver-se a equação (162) para X_m , assumindo-se inicialmente um valor para a relação entre X_S e X_m e outro valor para X_S . Em seguida resolve-se a equação (163) para X_{SL} usando-se o mesmo valor para a relação entre X_S e X_m usado na equação (162). Resolve-se então a equação (164) para X_S . Com os valores calculados nestas equações, torna-se a resolver a equação (162), com o valor para a relação entre X_S e X_m dada pela equação (164). Assim continua-se a iteração, até que se chegue a uma diferença entre os valores calculados para X_m e X_S de uma iteração para outra menor que 0,1%.

Os cálculos iterativos na Tabela 14 referem-se ao ensaio normalizado pela IEEE Std 112 (IEEE 1996), considerando-se como valores iniciais os apresentados nas equações (166) a (168).

$$\frac{X_S}{X_r} = 1 \quad (166)$$

$$\frac{X_S}{X_m} = 0,01 \quad (167)$$

$$X_S = 1 \quad [\Omega] \quad (168)$$

Tabela 14 - Iterações para o cálculo dos parâmetros do GEADA, a partir do ensaio a vazio e do ensaio com o rotor bloqueado.

Iteração	Q_o (var)	Q_L (var)	X_m (Ω)	X_{SL} (Ω)	X_S (Ω)	Erro (%)
1	1907,697	362,4064	26,945	0,907	0,907	1,5151%
2	1907,697	362,4064	25,631	0,893	0,893	-0,0569%
3	1907,697	362,4064	25,558	0,894	0,894	-0,0057%
4	1907,697	362,4064	25,552	0,894	0,894	-0,0004%
5	1907,697	362,4064	25,552	0,894	0,894	0,0000%

Aplicando-se os resultados dos ensaios com o rotor girando a 1800 rpm apresentados nas seções anteriores deste capítulo, chegam-se aos resultados das Tabelas 15 e 16 respectivamente.

Tabela 15 - Iterações para o cálculo dos parâmetros do GEADA a partir do ensaio a vazio com o rotor à velocidade síncrona e do ensaio com o rotor bloqueado.

Iteração	Q_o (var)	Q_L (var)	X_m (Ω)	X_{sL} (Ω)	X_s (Ω)	Erro (%)
1	1835,40	362,41	27,992	0,883	0,883	-1,0395%
2	1835,40	362,41	26,717	0,892	0,892	-0,0883%
3	1835,40	362,41	26,630	0,893	0,893	-0,0066%
4	1835,40	362,41	26,624	0,893	0,893	-0,0005%
5	1835,40	362,41	26,623	0,893	0,893	0,0000%

Tabela 16 - Iterações para o cálculo dos parâmetros do GEADA a partir do ensaio com o rotor aberto e à velocidade síncrona e do ensaio com o rotor bloqueado.

Iteração	Q_o (var)	Q_L (var)	X_m (Ω)	X_{sL} (Ω)	X_s (Ω)	Erro (%)
1	1955,14	362,41	26,639	0,883	0,883	-1,1151%
2	1955,14	362,41	25,339	0,893	0,893	-0,0994%
3	1955,14	362,41	25,247	0,894	0,894	-0,0078%
4	1955,14	362,41	25,240	0,894	0,894	-0,0006%
5	1955,14	362,41	25,239	0,894	0,894	0,0000%

O formulário da norma IEEE Std 112 (IEEE, 1996) apresenta ainda as equações (169) a (175) para o cálculo da resistência do rotor referida ao estator, R_r , caso a máquina de indução em ensaio seja do tipo rotor em gaiola de esquilo.

$$b_m = \frac{I}{X_m} \left[\frac{I}{\Omega} \right] \quad (169)$$

$$X_r = \frac{I}{\left(\frac{X_s}{X_r} \right)} \quad [\Omega] \quad (170)$$

$$P_{fe} = P_0 - P_{a_v} - 3 \cdot I_{s0}^2 \cdot R_s \quad [W] \quad (171)$$

$$g_{fe} = \frac{P_{fe}}{3 \cdot V_0^2} \cdot \left(1 + \frac{X_s}{X_m} \right)^2 \left[\frac{I}{\Omega} \right] \quad (172)$$

$$R_{fe} = \frac{I}{g_{fe}} \quad [\Omega] \quad (173)$$

$$R_r'' = \left(\frac{P_L}{3 \cdot I_{sL}^2} - R_s'' \right) \cdot \left(1 + \frac{X_r}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X_r}{X_s} \right) \cdot \left(X_{sL}^2 \cdot g_{fe} \right) \quad [\Omega] \quad (174)$$

$$R_r = \frac{R_r''}{RT} = \frac{R_r''}{1,02} \quad [\Omega] \quad (175)$$

Sendo que a potência correspondente às perdas com atrito e ventilação, P_{a_v} na equação (150) é calculada conforme exposto na seção 7.4.3, a partir do gráfico da Figura 74.

Assim têm-se os resultados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Demais parâmetros calculados a partir dos ensaios a vazio e com o rotor bloqueado.

b_m (1/Ω)	X_r (Ω)	P_{fe} (W)	g_{fe} (1/Ω)	R_{fe} (Ω)	R_r (Ω)
0,0391	0,894	98,74	0,0020975	476,76	0,6723

A componente que representa o efeito das perdas no ferro, resistência do ferro, será considerada infinita, de acordo com as considerações elencadas no Capítulo 3, e os demais parâmetros calculados a partir dos ensaios conforme a norma IEEE Std 112 (IEEE 1996) para a caracterização do GEADA, sintetizados na Tabela 18.

Note-se que a resistência R_r , calculada pelo “Form F1 – Method F-F1” da norma IEEE Std 112 (IEEE, 1996), corresponde ao valor da resistência do enrolamento de uma fase do rotor para a temperatura em que se encontrava este enrolamento quando foi feito o ensaio de rotor bloqueado, conforme a Tabela 12, 55°C. O valor assumido para R_r a 75°C, das Tabelas 8 e 17, quando calculado para 55°C, resulta em 0,6643Ω, com uma diferença de 1,2%.

Tabela 18 - Parâmetros calculados para o circuito equivalente do GEADA.

Parâmetro	Valor calculado (Ω)	Observação
R_s	0,5768	para 75°C
R_r	0,7102	para 75°C
X_s	0,894	-
X_r	0,894	como $X_s = X_r$
X_m	25,239	com $R_{fe} \rightarrow \infty$

Desta forma pode-se considerar que os ensaios a vazio e de rotor bloqueado apresentam valores medidos consistentes.

7.5 ENSAIOS DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DO GEADA

Para complementar o estudo da curva de magnetização do GEADA, foram realizados ensaios nos três modos operativos possíveis: síncrono, subsíncrono e sobressíncrono. A importância do conceito de curva de magnetização do GEADA já foi explorado no Capítulo 6

Os instrumentos utilizados no ensaio estão listados na Tabela 19.

Tabela 19 - Instrumentos utilizados no ensaio das curvas de magnetização do GEADA.

Equipamento	Grandeza envolvida no ensaio
Wattímetro Digital WT1030M Fabricante: YOKOGAWA Resolução: 16 bits	Tensão de Linha no estator Corrente (cc e ca) de fase do rotor;
Tacômetro Digital a Cristal de Quartzo TD-301 Fabricante: Tako Resolução: 1 r.p.m.	Velocidade de rotação do eixo do conjunto máquina motriz-gerador
Termômetro Infravermelho com mira laser – modelo RAYRPM20L2G Fabricante: RAYTEC Resolução: 1 °C	Temperatura ambiente e dos enrolamentos
Multímetro digital TrueRMS ET-2210 Fabricante: Minipa	Tensão de saída do tacogerador para controle da velocidade do motor CC
Fonte de tensão DC, modelo DC Power Supply FCC-3020D Fabricante: DAWER	Tensão e corrente em corrente contínua para o rotor
Inversor de frequência Movidrive Compact MCV4 Fabricante: SEW Eurodrive	Tensão e corrente em corrente alternada para o rotor

7.5.1 Ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente contínua no rotor

Inicialmente, foi realizado o ensaio com corrente contínua no rotor do GEADA. Desta forma, operou-se o GEADA como se gerador síncrono fosse, controlando-se, durante todo o ensaio, a frequência da tensão gerada nos terminais do GEADA próxima de 60 Hz, mantendo-se a velocidade do motor cc, fixa em 1800 rpm.

A montagem da bancada de testes foi feita conforme a Figura 76 de forma que fosse possível medir-se a corrente com que o conversor de potência alimentava o circuito do

rotor, e a tensão gerada nos terminais do estator do GEADA. Nesta Figura observa-se que os terminais do estator foram ligados em estrela, medindo-se desta forma a tensão de fase.

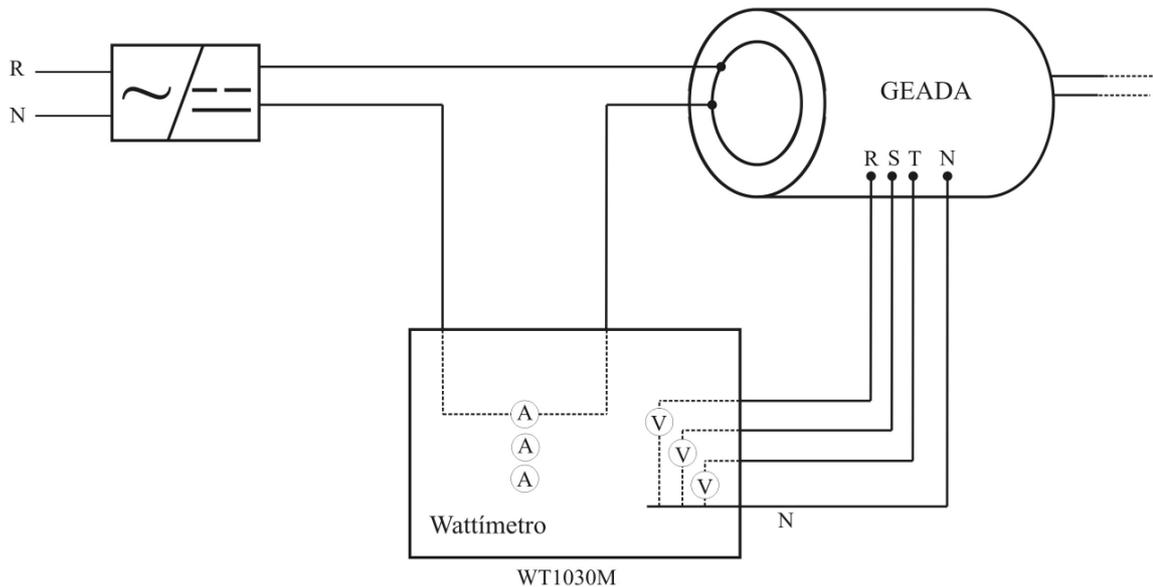


Figura 76 – Montagem da bancada para o ensaio da curva de magnetização do GEADA com o rotor alimentado com corrente contínua.

A fonte de corrente contínua permitiu abranger-se uma faixa ampla de valores para a corrente do rotor, o que favoreceu este ensaio.

Como o enrolamento do rotor, por exemplo, é trifásico equilibrado e espacialmente distribuído, para que se pudesse ter corrente contínua neste, realizou-se as medições com duas configurações distintas de ligação dos seus terminais, conforme o texto de (HINDMARSH, 1984). Estas configurações são apresentadas nas Figuras 77(a) e 77(b).

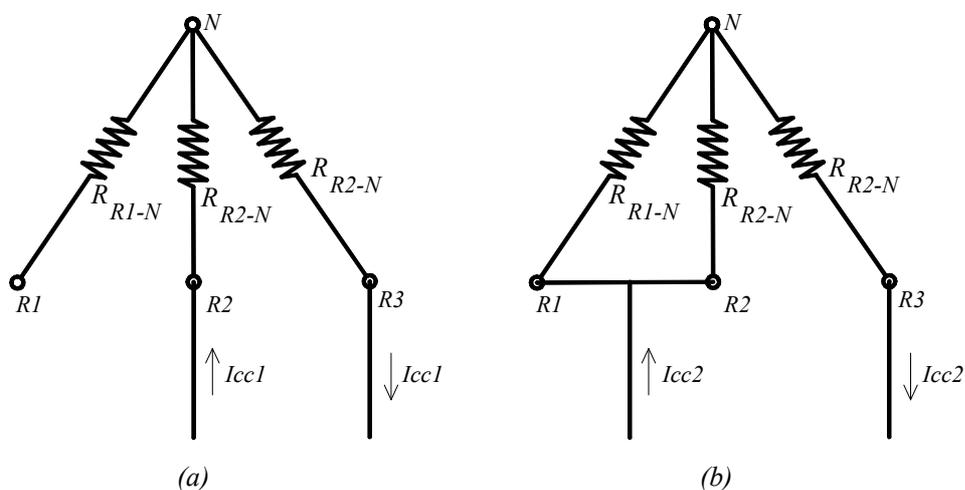


Figura 77 – Esquemas de ligação dos terminais do enrolamento do rotor para o ensaio da curva de magnetização em corrente contínua (a) esquema 1 e (b) esquema 2.

Os esquemas de ligação apresentam como princípio garantir que a f.m.m. seja distribuída senoidalmente no entreferro, porém os valores das correntes I_{cc1} e I_{cc2} são diferentes, conforme as equações (176) e (177), onde I_{ac} corresponde à corrente trifásica que seria necessária para gerar uma mesma f.m.m.

$$I_{cc1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ac} \quad (176)$$

$$I_{cc2} = \sqrt{2} \cdot I_{ac} \quad (177)$$

Assim, tem-se a relação entre as correntes I_{cc1} e I_{cc2} conforme a equação (178).

$$I_{cc2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot I_{cc1} \quad (178)$$

As Tabelas 20 e 21 apresentam os valores medidos para os ensaios em corrente contínua com os esquemas 1 e 2 de ligação dos terminais do rotor, respectivamente.

Tabela 20 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente contínua, esquema de ligação 1.

Corrente no rotor, I_{cc1} [A]	Corrente equivalente em corrente alternada, I_{ac1} [A]	Tensão de fase no estator [V]
0,342	0,279	10,05
0,501	0,409	14,54
0,665	0,543	19,76
0,846	0,691	25,15
1,041	0,850	31,26
1,393	1,137	41,34
1,621	1,324	47,94
1,856	1,515	54,9
2,244	1,832	65,46
2,435	1,988	70,74
2,692	2,198	77,27
3,163	2,583	88,72
3,542	2,892	97,46
3,966	3,238	105,7
4,393	3,587	113,02
4,761	3,887	118,5
5,12	4,180	123,17
5,465	4,462	127,16
5,82	4,752	131,14

Tabela 21 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente contínua, esquema de ligação 2.

Corrente no rotor, I_{cc2} [A]	Corrente equivalente em corrente alternada, I_{ac2} [A]	Tensão de fase no estator [V]
0,3831	0,271	11,28
0,4285	0,303	11,35
0,4996	0,353	13,08
0,585	0,414	15,16
0,7969	0,563	20,5
0,8691	0,615	22,89
1,0123	0,716	26,46
1,0729	0,759	28,07
1,186	0,839	30,96
1,559	1,102	40,44
1,757	1,242	45,97
2,002	1,416	51,96
2,255	1,595	57,97
2,647	1,872	67,14
2,89	2,044	72,68
3,201	2,263	79,82
3,352	2,370	82,97
3,675	2,599	89,52
3,925	2,775	94,52
4,099	2,898	97,68
4,568	3,230	105,72
5,095	3,603	113,59
5,447	3,852	118,16
6,029	4,263	124,94
6,525	4,614	130,06

A Figura 78 apresenta as duas curvas de magnetização obtidas a partir das considerações anteriores. É possível observar-se que o um fator proporcional entre as duas correntes do rotor é aquele apresentado na equação (178).

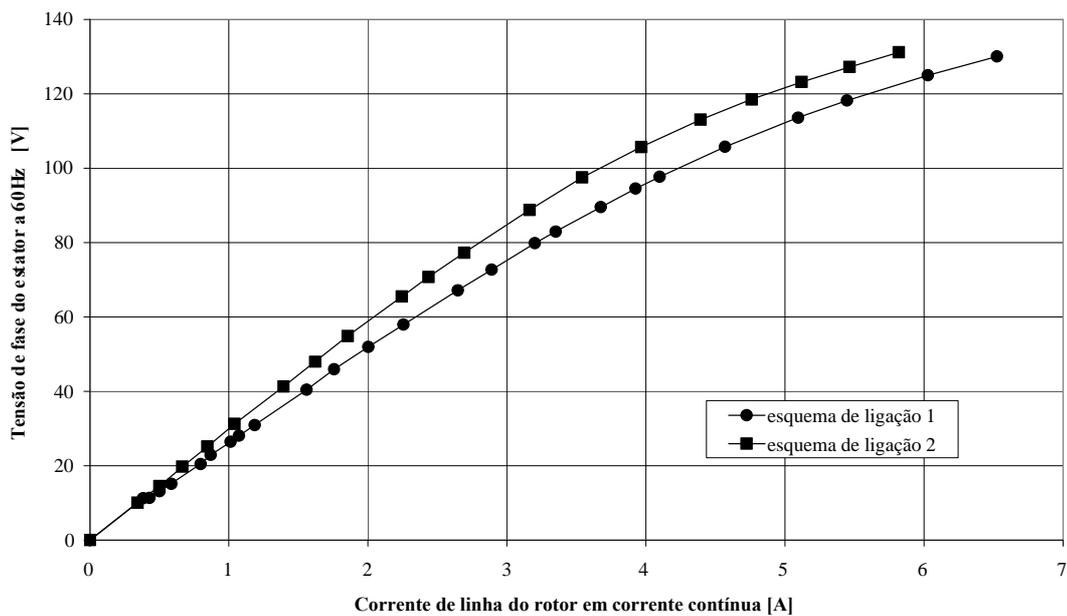


Figura 78 – Curvas de magnetização do GEADA com corrente contínua no rotor, comparando-se os esquemas de ligação 1 e 2 dos terminais do rotor.

As relações nas equações (176) e (177) são confirmadas na Figura 79, quando se plotam as curvas de magnetização dos dois esquemas de ligação da Figura 77 usando-se as colunas de I_{ac1} e I_{ac2} das Tabelas 20 e 21 respectivamente.

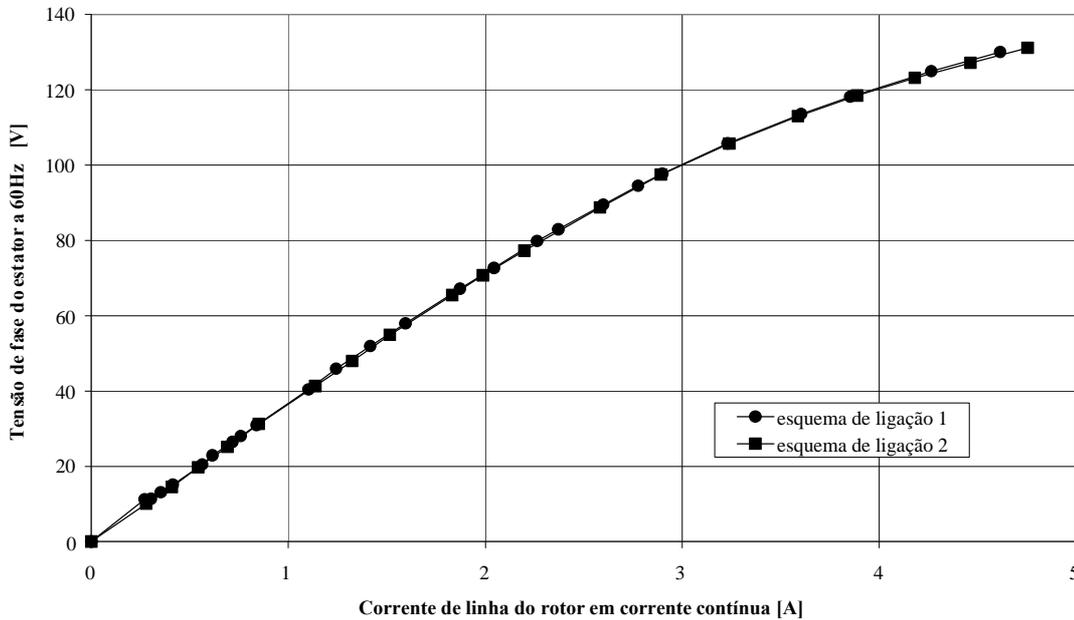


Figura 79– Curvas de magnetização do GEADA com corrente contínua no rotor, comparando-se os esquemas de ligação 1 e 2 dos terminais do rotor.

As Figuras 80 (a), (b), (c) e (d) apresentam as formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator para alguns pontos de medição do ensaio com corrente contínua. Nestas figuras nota-se o aparecimento das harmônicas na tensão gerada conforme vai se aumentando a corrente no rotor. Isto tem origem em diversos fatores e podemos citar dois: as imperfeições do entreferro do GEADA, que não pode ser considerado totalmente liso pois apresenta os dentes das ranhuras e também o passo de ranhura inteiro utilizado no projeto dos novos enrolamentos que, pelo fato de manterem-se os núcleos magnéticos do rotor e do estator.

As escalas são as mesmas em todas estas Figuras: 50V por divisão vertical e 5ms por divisão horizontal.

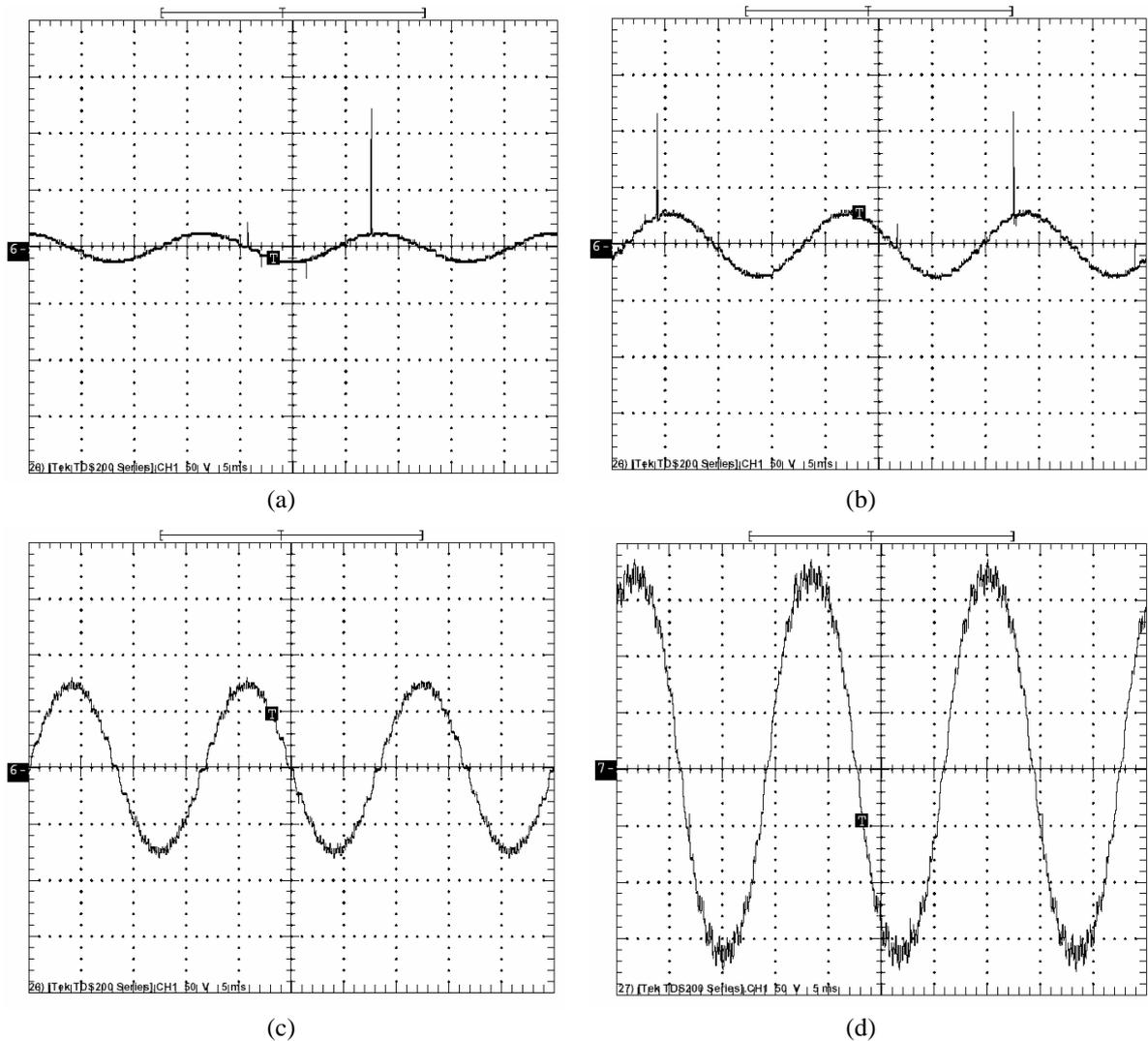


Figura 80 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com o esquema de ligação 2 para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo segundo ponto e (d) o vigésimo quarto ponto.

7.5.2 Ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada no rotor

Neste ensaio com corrente alternada optou-se, como forma de testá-lo, por utilizar o próprio inversor de frequência como fonte de tensão alternada com frequência controlada.

Como foi colocado nas seções anteriores, o inversor de frequência utilizado possui parâmetros de operação que permite controlar-se a tensão e a frequência de saída deste de maneira independente, e isto favoreceu os ensaios, pois se puderam realizar medidas numa faixa ampla de corrente do rotor, neste caso de 0,7A até 6A.

A montagem da bancada foi feita conforme o esquema da Figura 81.

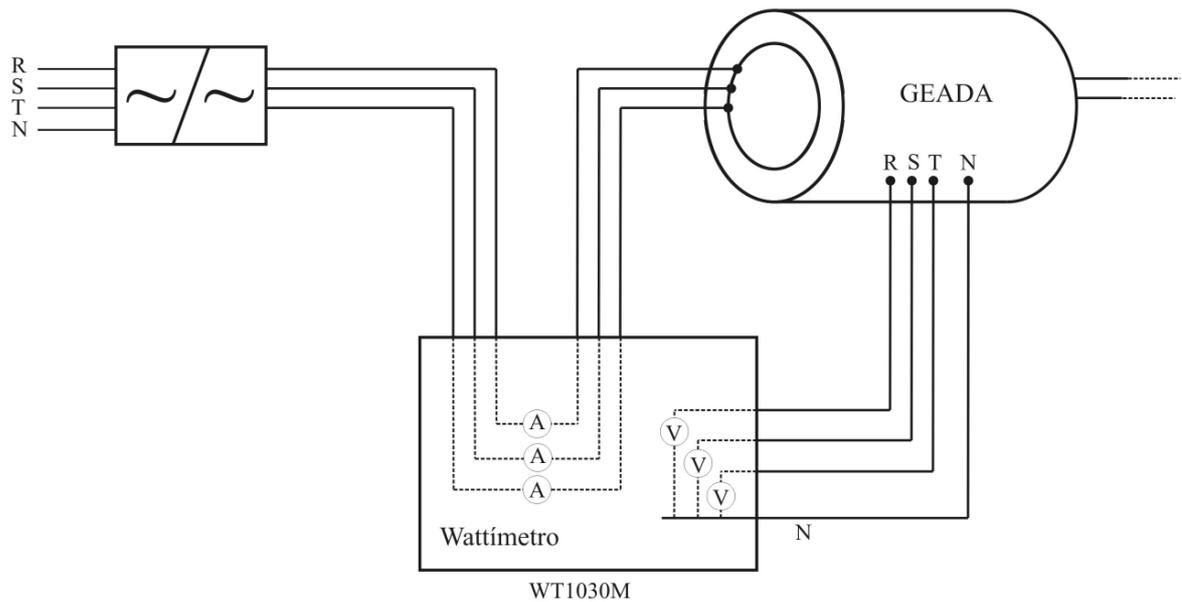


Figura 81 – Montagem da bancada para o ensaio da curva de magnetização do GEADA com o rotor alimentado com corrente alternada.

Neste ensaio, manteve-se o escorregamento em 10% da velocidade nominal, que é 1800 rpm, o que corresponde a uma frequência alternada no rotor de 6 Hz. Com isto, ao longo de todo o ensaio, manteve-se a velocidade de rotação do motor cc próxima de 1620rpm.

Como o inversor permite também se alterar a frequência de chaveamento das suas chaves estáticas (podem ser tiristores, IGBT,...) entre 4kHz e 16kHz, realizou-se dois ensaios cada um com um valor para o chaveamento, e mais um ensaio com a sequência de fases do rotor invertida, imprimindo uma frequência negativa ao rotor. Neste terceiro ensaio, a velocidade de rotação do motor cc foi mantida próxima de 1980 rpm, de forma que se garantisse a frequência síncrona, 60 Hz, nos terminais do estator, ao se aplicar uma frequência alternada de 6Hz ao rotor, com a sequência de fases invertida em comparação com os outros dois ensaios, de forma a se ter na prática o efeito de uma frequência negativa.

As Tabelas 22, 23 e 24 apresentam os valores medidos para cada um dos ensaios realizados e a Figura 82 apresenta as três curvas num mesmo plano.

Tabela 22 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento em 16kHz e $s = +10\%$.

Corrente no rotor [A]	Tensão de fase no estator [V]
0,722	32,57
0,885	38,4
1,096	46,05
1,305	53,67
1,46	59,52
1,651	66,17
1,877	74,01
2,093	81,29
2,341	89,38
2,614	97,76
2,912	107,37
3,229	114,7
3,587	122,49
4,004	130,31
4,501	138,26

Tabela 23 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento em 4kHz e $s = +10\%$.

Corrente no rotor [A]	Tensão de fase no estator [V]
0,865	41,09
0,983	46,01
1,118	51,78
1,282	58,61
1,471	66,06
1,673	73,86
1,903	81,84
2,13	89,32
2,35	97,32
2,653	105,07
2,959	112,87
3,299	120,78
3,68	128,03
4,123	135,42
4,657	142,66

Tabela 24 - Valores medidos no ensaio da curva de magnetização do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento em 4kHz e $s = -10\%$.

Corrente no rotor [A]	Tensão de fase no estator [V]
1,089	50,08
1,121	51,28
1,195	54,35
1,311	59,24
1,466	65,21
1,646	71,94
1,833	78,82
2,056	86,44
2,271	93,4
2,534	101,26
2,817	109,14
3,143	116,78
3,492	124,27
3,918	131,92
4,395	139,06

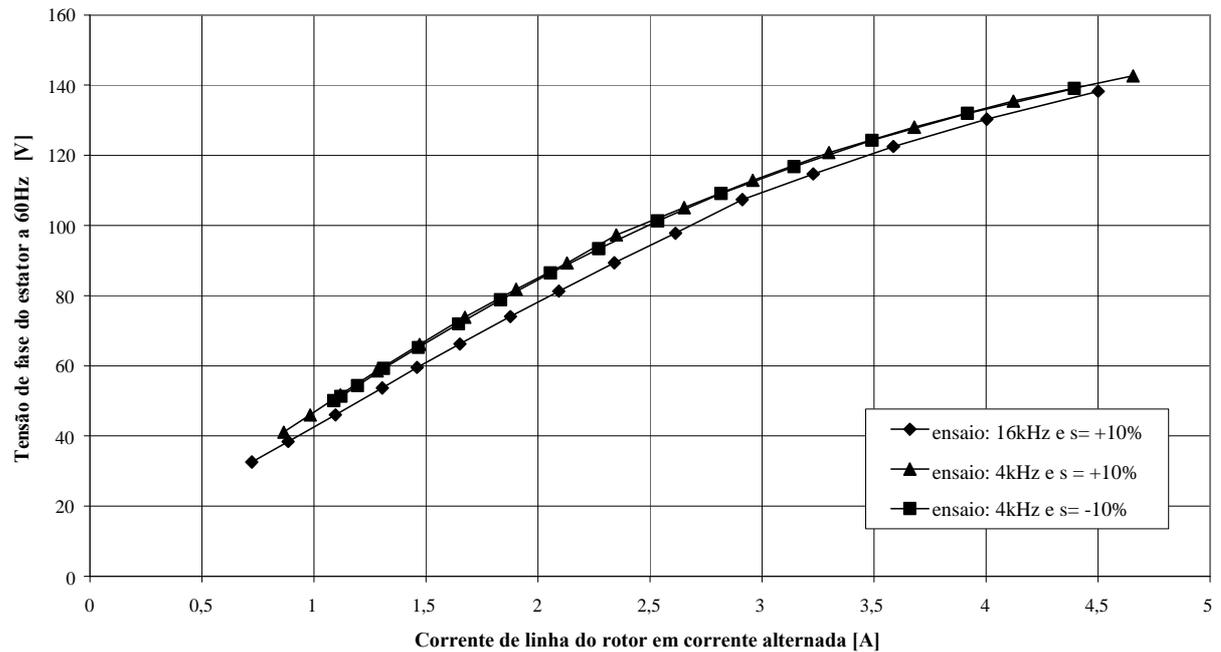


Figura 82 – Curvas de magnetização do GEADA com corrente alternada no rotor.

São duas pelo menos as conclusões que se podem ter ao analisarem-se as curvas da Figura 82: (i) a frequência de chaveamento do inversor tem influência sobre a magnetização do GEADA e (ii) o sinal da frequência, modificado pela inversão da seqüência de fases da tensão do rotor, não influi na curva de magnetização.

O que se observa na Figura 82 é que a curva do ensaio com a frequência de chaveamento igual a 16kHz, que deveria resultar numa curva acima daquelas com a frequência de chaveamento igual a 4kHz, está abaixo. Isto se deve ao fato de, nestes três ensaios, ter-se realizado as medidas das frequências fundamentais dos valores rms das tensões e correntes, medindo-se assim um valor inferior ao real.

A influência da frequência de chaveamento do conversor de potência está ligada ao aparecimento de um valor maior relativo entre a componente de frequência fundamental da tensão gerada e suas frequências harmônicas, como pode ser visualizado nas formas de onda da tensão apresentadas nas Figuras 83 a 85.

As escalas são as mesmas em todas estas Figuras: 50V por divisão vertical e 5ms por divisão horizontal.

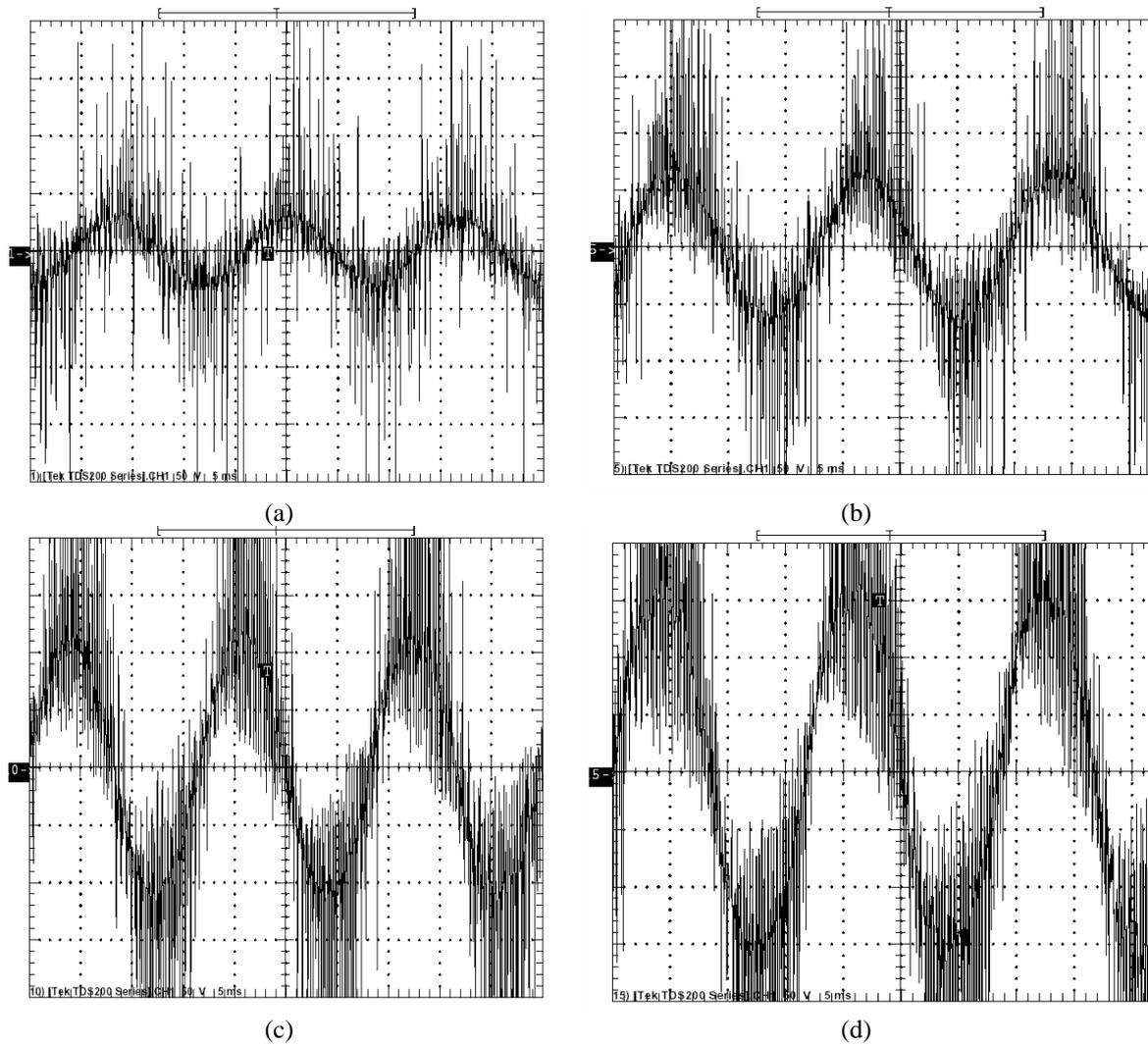


Figura 83 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento do conversor de potência 16kHz e $s = +10\%$ para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo ponto e (d) o décimo quinto ponto.

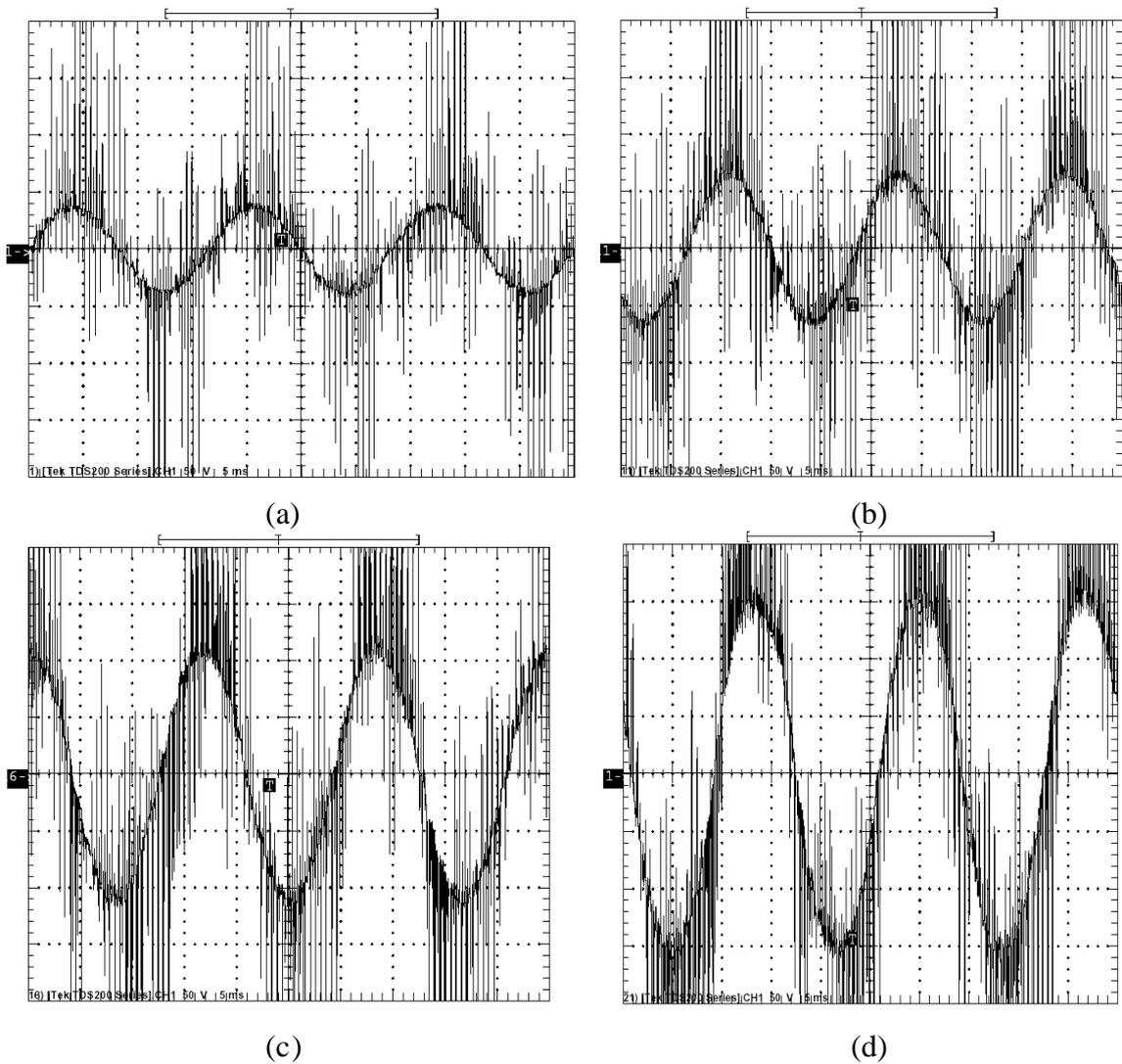


Figura 84 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento do conversor de potência 4kHz e $s = +10\%$ para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo ponto e (d) o décimo quinto ponto.

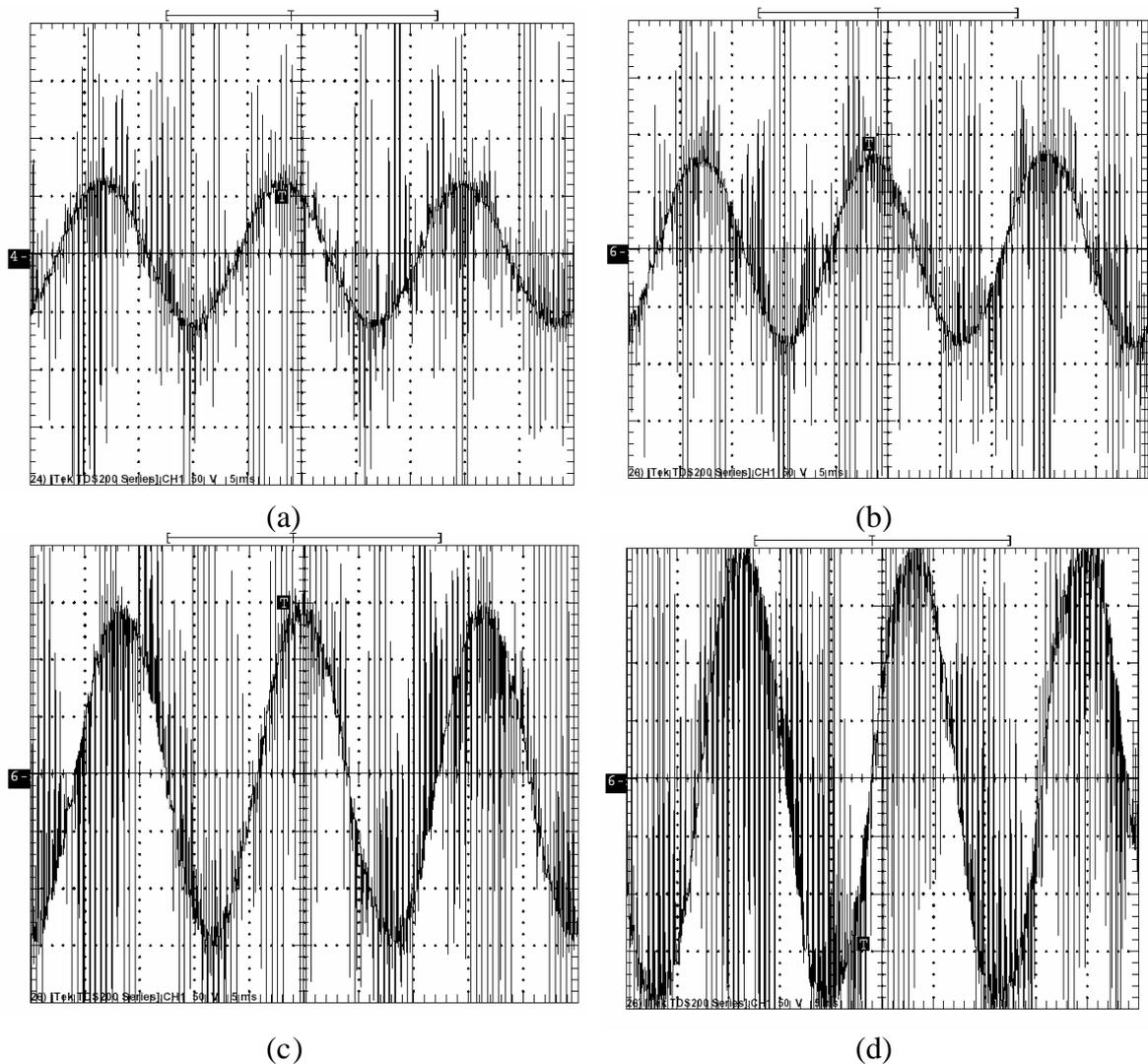


Figura 85 – Formas de onda da tensão gerada nos terminais do estator do GEADA com corrente alternada, frequência de chaveamento 4kHz e $s = -10\%$ para (a) o primeiro ponto, (b) quinto ponto, (c) décimo ponto e (d) o décimo quinto ponto.

A Figura 84 apresenta num mesmo plano as curvas de magnetização do GEADA, nas situações de corrente contínua convertida em corrente alternada, conforme a Figura 79 e corrente alternada no seu rotor.

A mesma observação a respeito das componentes harmônicas para as curvas da Figura 80 é feita para esta comparação entre a curva de magnetização em corrente contínua e as curvas com corrente alternada. Neste caso da Figura 86, a curva de magnetização em corrente contínua deveria estar acima das demais.

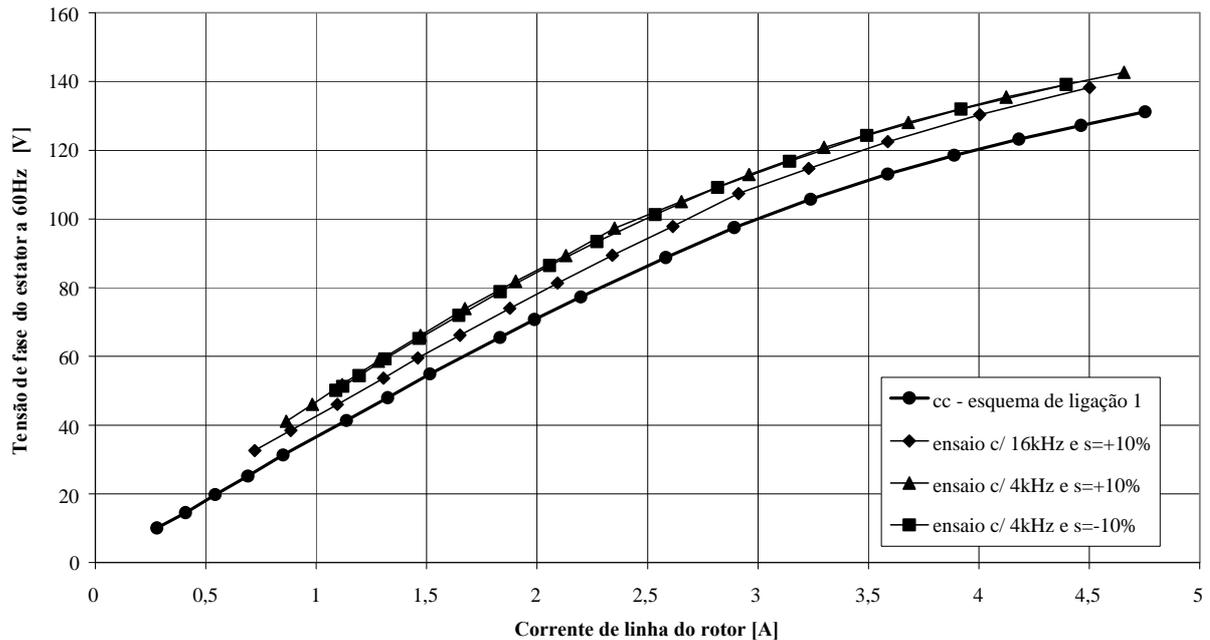


Figura 86 – Curvas de magnetização do GEADA com corrente contínua e corrente alternada no rotor.

7.5.3 Conclusões sobre as curvas de magnetização do GEADA

A partir das curvas na Figura 86, pode-se concluir que a curva de magnetização com corrente alternada não pode ser desconsiderada nos estudos do GEADA, visto que há uma variação considerável entre os valores encontrados na curva aplicando-se corrente contínua ao rotor nas curvas onde foi aplicada corrente alternada no rotor.

A variação entre um tipo de curva e o outro diz respeito ao aumento das correntes parasitas e histerese no núcleo magnético do rotor, uma vez que o estator sente o GEADA como sendo um gerador síncrono, pois percebe no entreferro um campo girante de frequência síncrona, independente da velocidade de rotação do seu eixo mecânico.

Uma peculiaridade do GEADA deve ser observada neste momento, pois se deve lembrar que o GEADA foi originado do “*retrofitting*” de um motor assíncrono de rotor bobinado com mais de 50 anos, e, mantido o mesmo núcleo magnético original, pode-se afirmar que este núcleo apresenta uma maior perda magnética do que núcleos construídos com materiais (aço silício) e metodologias atuais.

Por esta razão, as conclusões desta seção não podem ser estendidas a qualquer gerador assíncrono de dupla alimentação indiscriminadamente, sem antes analisar o seu

circuito magnético e realizar-se a mesma comparação entre a curva de magnetização com corrente contínua e com corrente alternada.

7.6 ENSAIOS DO GEADA OPERANDO COM CARGA

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais do GEADA operando com carga resistiva ($FP=1$) trifásica equilibrada.

Foram feitos dois ensaios do GEADA operando com carga, sendo levantadas quatro curvas:

1. Curva de regulação;
2. Operação com carga, mantendo-se constantes a tensão e a frequência nos terminais;
3. Curva de excitação (corrente no rotor) em função da corrente de carga;
4. Curva de conjugado em função da carga.

Outros ensaios de máquinas síncronas, como a curva de curto-circuito não foram realizados por medida de precaução, para que não se ultrapassasse os limites de temperatura do GEADA.

A montagem da bancada foi feita conforme o esquema da Figura 87, e as curvas ensaiadas com carga são apresentadas nas seções a seguir.

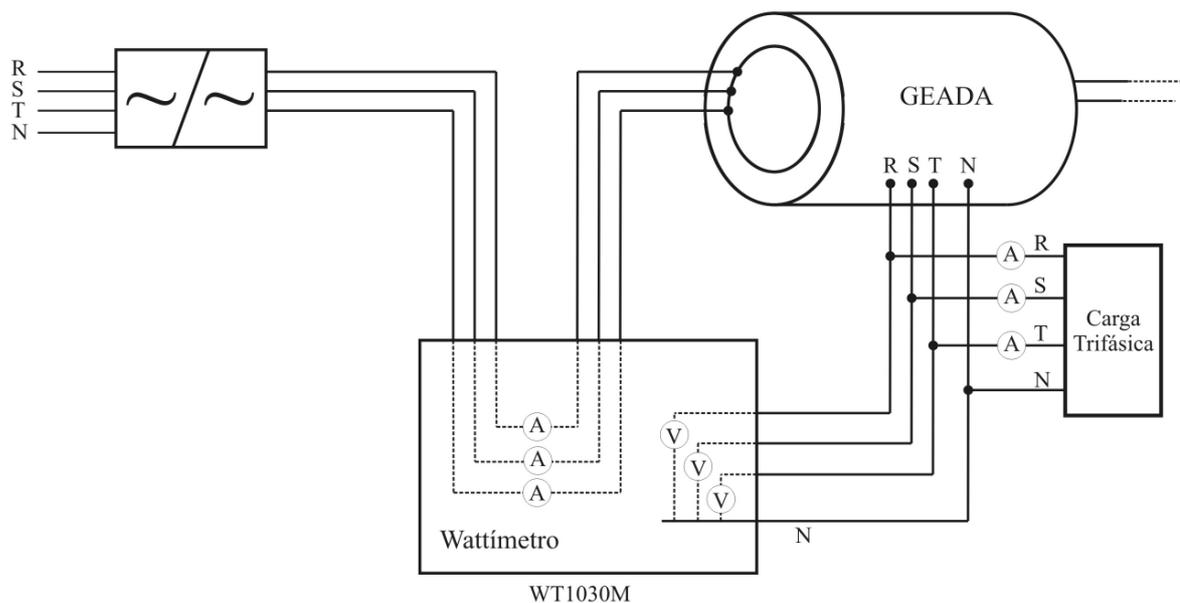


Figura 87 – Montagem da bancada para o ensaio da curva de regulação do GEADA.

7.6.1 Curva de regulação do GEADA

Esta curva apresenta, para cada valor de potência especificado, o valor da tensão do estator, V_s , em função da corrente de carga, mantendo-se constantes a velocidade de rotação do rotor e a tensão e corrente no rotor. Conceitualmente, esta curva é apresentada na Figura 88, para diversos fatores de potência, enquanto que a Figura 89 apresenta a curva experimental do GEADA para o fator de potência unitário. A Tabela 25 apresenta os valores medidos no ensaio da curva de regulação.

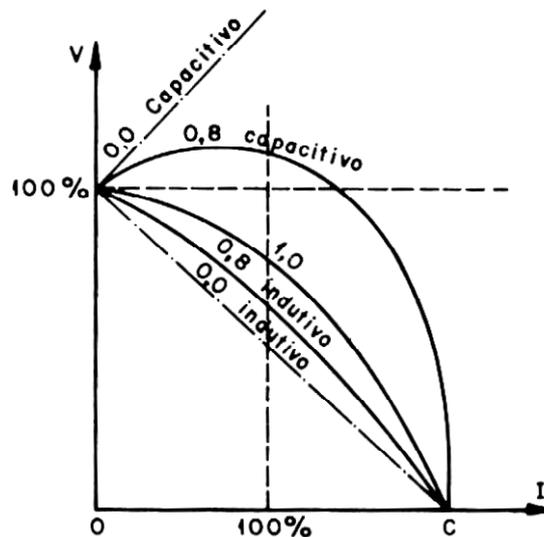


Figura 88 – Curvas conceituais de regulação para um gerador síncrono genérico (JORDÃO, 1980).

Tabela 25 - Valores medidos no ensaio da curva de regulação do GEADA, com escorregamento $s = + 10\%$.

Corrente de linha da carga [A]	Tensão de linha da carga [V]
0,00	127,1
0,88	113,8
1,00	111,5
1,24	108,5
1,51	105,3
1,75	101,7
2,01	98,6
2,50	93,0
3,02	84,5
3,51	77,8
4,12	64,9
4,49	53,1
5,09	39,2

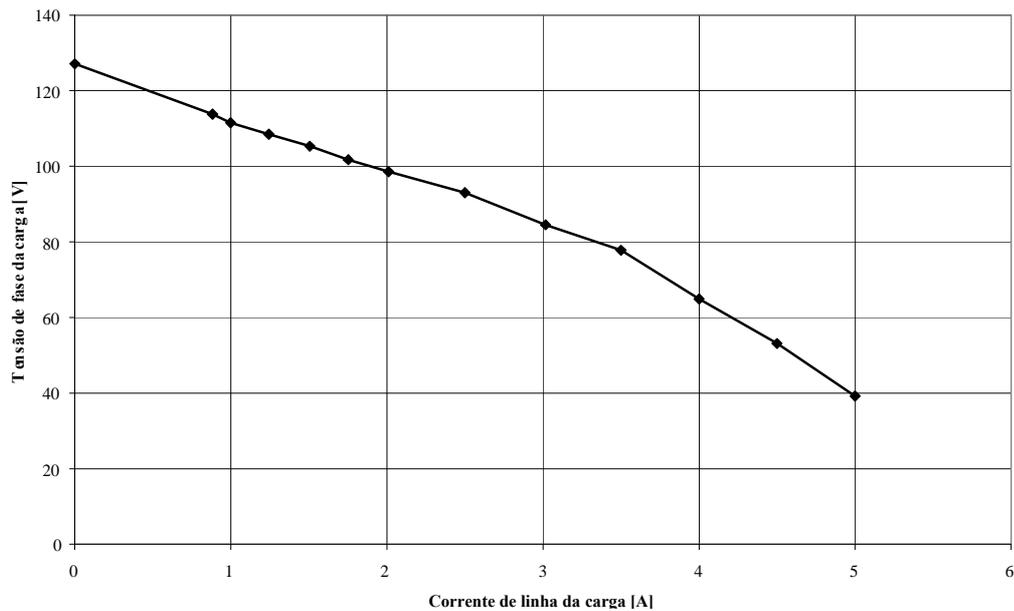


Figura 89 – Curva de regulação para o GEADA com o escorregamento $s = +10\%$.

Pela curva apresentada na Figura 89 nota-se a grande influência da impedância do enrolamento do estator, fato que já foi explorado nos capítulos anteriores que decorre principalmente dos núcleos magnéticos originais do estator e do rotor do motor terem sido mantidos no projeto dos novos enrolamentos.

7.6.2 Curva de carga do GEADA

O desempenho do GEADA operando com carga resistiva tanto no modo subsíncrono quanto no modo sobressíncrono é apresentado na Figura 90, tendo-se utilizada a mesma montagem da bancada apresentada na Figura 87. A Tabela 26 apresenta os valores medidos no ensaio da curva de carga.

Tabela 26 - Valores medidos no ensaio da curva de carga (tensão e frequência geradas) com fator de potência unitário, do GEADA, para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$.

Corrente de linha da carga [A]	$s = + 10\%$		$s = + 5\%$			$s = - 10\%$		
	Tensão de linha da carga [V]	Frequência da tensão gerada [Hz]	Corrente de linha da carga [A]	Tensão de linha da carga [V]	Frequência da tensão gerada [Hz]	Corrente de linha da carga [A]	Tensão de linha da carga [V]	Frequência da tensão gerada [Hz]
1,01	126,6	60,16	1,03	127,2	60,14	1,03	126,9	60,17
2,08	127,3	60,13	2,08	127,6	60,16	1,88	126,9	60,36
3,06	127,8	60,14	3,03	126,6	60,17	3,15	127,0	60,19
4,02	127,5	60,21	4,09	127,6	60,13	4,10	127,1	60,15
5,12	127,3	60,09	5,02	127,3	60,09	5,06	128,0	60,17

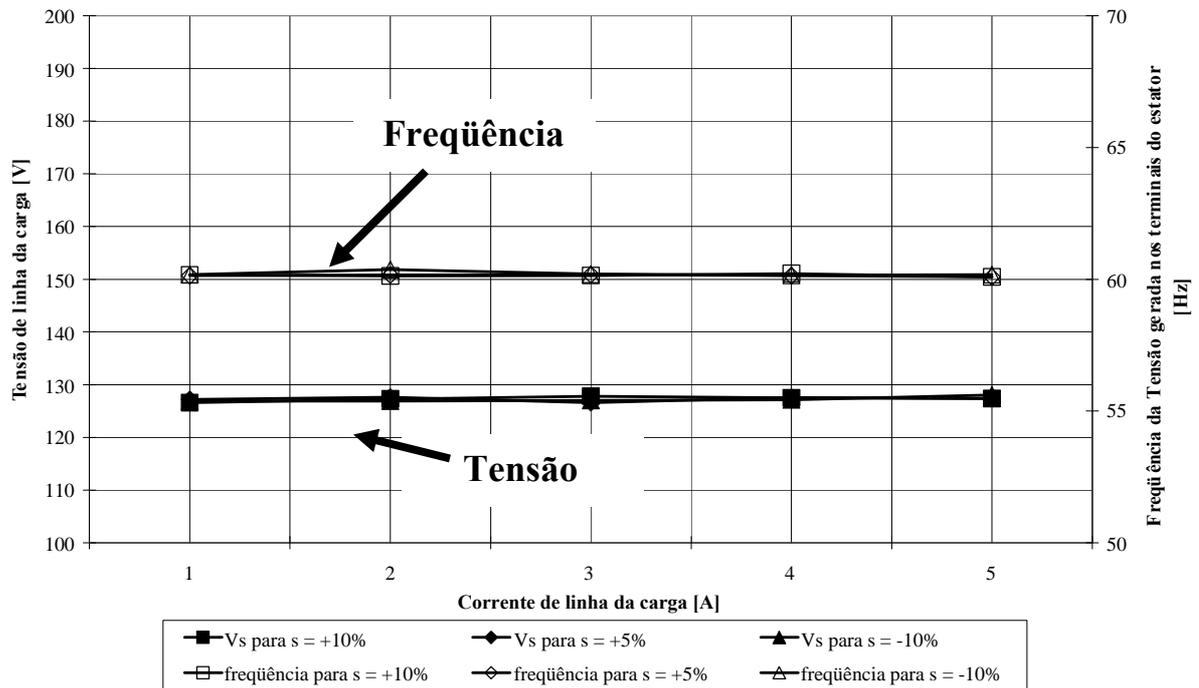


Figura 90 – Curva de carga (tensão e frequência geradas) com fator de potência unitário do GEADA para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$.

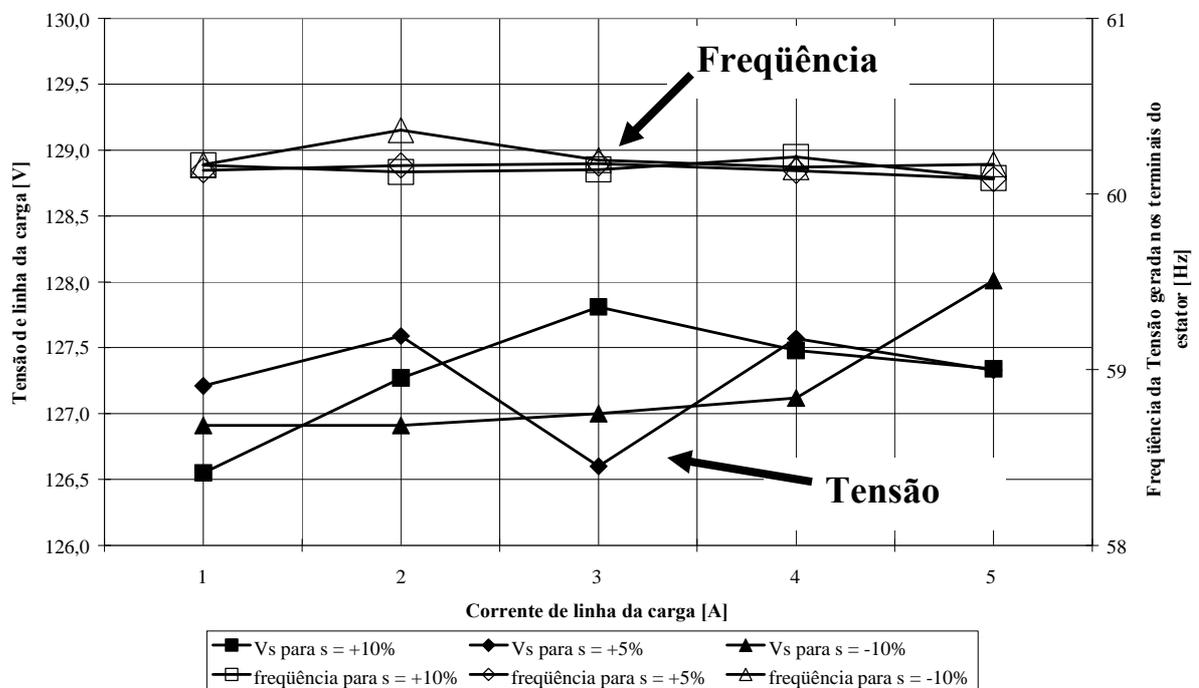


Figura 91 – Zoom da curva de carga (tensão e frequência geradas) de fator de potência unitário do GEADA para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$, mostrando a pequena variação da tensão entre $+1\%$ e $-0,5\%$.

Observa-se que apesar de se usar um inversor de frequência comercial como conversor de potência, o resultado de estabilidade da tensão e frequência nos terminais do estator é muito satisfatório, pois foi possível o controle destas grandezas de maneira independente. A variação na frequência nos terminais do estator é quase imperceptível na Figura 90 e então pela Figura 91 percebe-se que é no máximo, 0,2Hz. A variação da tensão nos terminais do estator não passou de 1V, o que, tomando-se por base os valores nominais de 127V e 60Hz, chega-se a uma variação de $\pm 0,787\%$ para a tensão e $\pm 0,33\%$ para a frequência.

Estas variações estão abaixo dos limites de variação da tensão permitida pela ANEEL no fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias de distribuição é $\pm 5\%$ e para a variação da frequência de $\pm 0,5\text{Hz}$.

7.6.3 Curva da corrente do rotor em função da corrente de carga do GEADA

Neste ensaio tem-se o comportamento da corrente do rotor, fornecida pelo conversor de potência e a corrente da carga, conforme apresentada na Figura 92, observando-se a linearidade entre as duas correntes. A Tabela 26 apresenta os valores medidos no ensaio da curva de carga.

Tabela 27 - Valores medidos para a corrente de carga e corrente do rotor, no ensaio da curva de carga com fator de potência unitário, do GEADA, para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$, mostrando a pequena variação da tensão entre $+1\%$ e $-0,5\%$.

s = + 10%		s = + 5%		s = - 10%	
Corrente de linha da carga [A]					
1,01	4,11	1,03	4,35	4,23	1,03
2,08	4,81	2,08	4,97	4,6	1,88
3,06	5,53	3,03	5,49	5,52	3,15
4,02	6,2	4,09	6,31	6,25	4,10
5,12	7,06	5,02	7,16	7,02	5,06

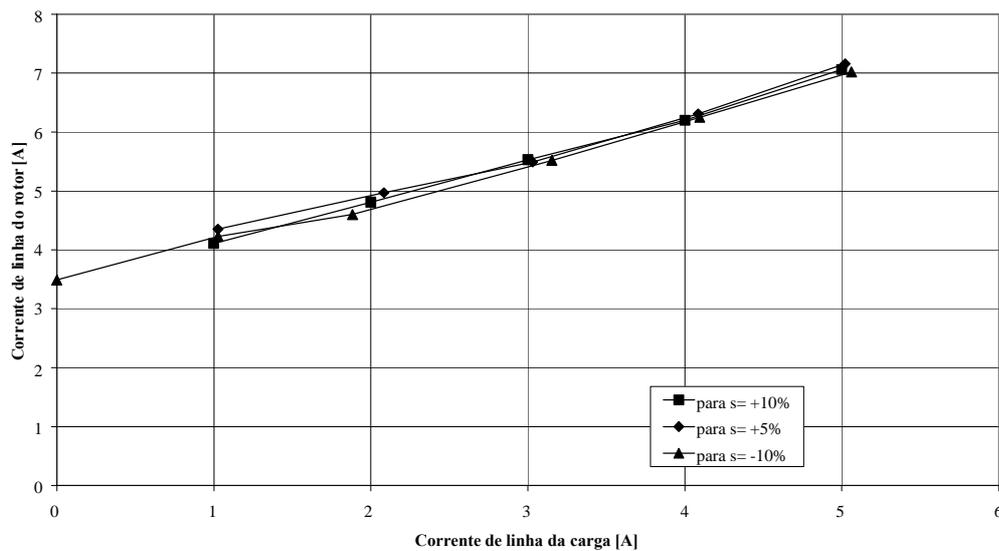


Figura 92 – Curva de carga de fator de potência unitário do GEADA para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$.

7.6.4 Curva comparativa dos conjugados dos modos operativos subsíncrono e sobressíncrono do GEADA.

A Figura 93 apresenta uma comparação de cunho mais qualitativo que quantitativo para os conjugados envolvidos nos ensaios experimentais do GEADA operando com carga, tanto no modo subsíncrono quanto sobressíncrono. Isto se deve ao fato do condicionador de sinais do torquímetro de eixo instalado na bancada variar muito os valores apresentados no display durante os ensaios, e não possui a função “hold”, dificultando a sua leitura, podendo até mesmo ter sua exatidão questionada por este fato.

Se está usando o conversor de potência desacoplado dos terminais do estator do GEADA, e portanto, a potência necessária para o seu funcionamento não está sendo provida pela máquina motriz. Isto influi nas medidas do conjugado quando o GEADA está operando no modo sobressíncrono, pois uma parte da potência que é fornecida pela máquina motriz não é convertida em potência ativa para a carga e sim devolvida à rede elétrica, conforme o esquema da Figura 43. Assim, os valores de conjugado neste ensaio serão maiores ainda que para o caso de termos a potência que flui do rotor para o conversor de potência aproveitada pela carga.

Outra influência que esta configuração da bancada tem é que, como a alimentação do conversor de potência vem de outra fonte que não a máquina motriz, os valores dos conjugados no modo subsíncrono serão menores do que no caso do sistema convencional da Figura 42. Isto pode ser entendido comparando-se as duas curvas ensaiadas com o GEADA com um escorregamento de +10% e de +5%. A curva para o primeiro caso está abaixo da curva para o segundo caso, porque, quando se diminui o escorregamento, para esta configuração e mesma carga, menor será a contribuição do conversor de potência com a potência de escorregamento e maior será a potência mecânica necessária à carga.

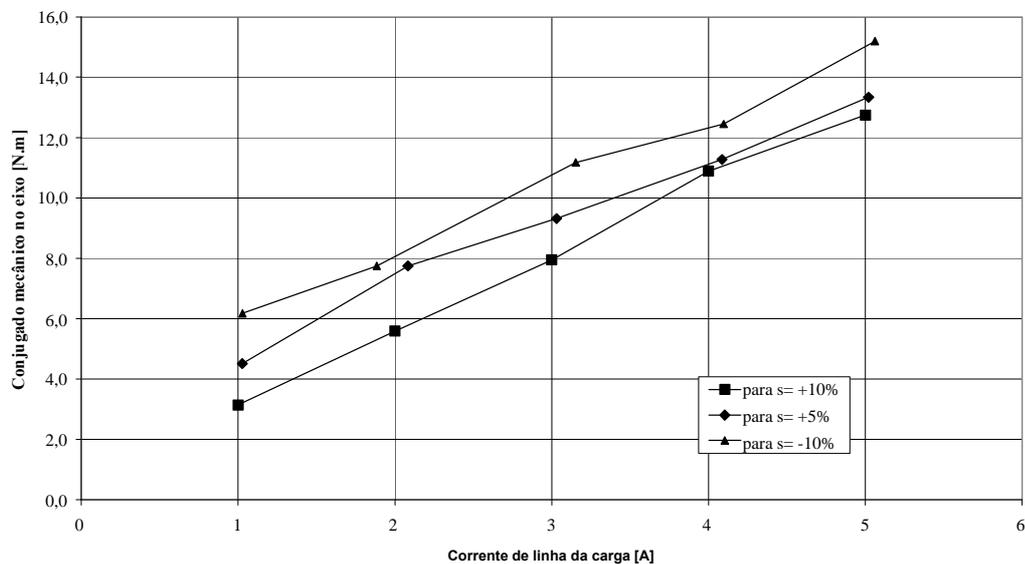


Figura 93 – Curva comparativa dos conjugados do GEADA para os escorregamentos de $s = +10\%$, $s = +5\%$ e $s = -10\%$, para fins de análise qualitativa.

Com estes ensaios conclui-se o trabalho em si, e passa-se ao capítulo das conclusões e recomendações.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões das análises teóricas e experimentais do GEADA, analisam-se as principais contribuições do trabalho para o conhecimento e sugerem-se assuntos para a continuidade deste trabalho.

8.1 CONCLUSÕES DAS ANÁLISES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS DO GERADOR ASSÍNCRONO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO

Este trabalho atende à sua proposta principal, de explorar a teoria acerca do gerador assíncrono de dupla alimentação, complementá-la com ensaios experimentais e propor um avanço para a sua operação em sistemas de energia, propondo a aplicação do conceito da curva de capacidade do gerador síncrono ao gerador assíncrono de dupla alimentação.

Como primeira conclusão que se tem é que os modelos de regime permanente para o gerador assíncrono de dupla alimentação são conhecidos, e seu desenvolvimento teórico a partir da teoria clássica das máquinas assíncronas apresenta os mesmos resultados que o desenvolvimento a partir da transformada de Park, conforme citado no Capítulo 3.

Outra conclusão importante é que, o gerador assíncrono de dupla alimentação em regime permanente, visto dos seus terminais, pode ser considerado com se fosse um gerador síncrono, e, por isto, a ele pode ser estendida a teoria dos geradores síncronos de rotor cilíndrico, assim como o conceito de reatância síncrona e tensão induzida, ambas dependentes da frequência variável que o conversor de potência impõe aos terminais do rotor.

Os conceitos de regiões de operação e curva de capacidade foram exploradas neste trabalho, tendo sido apresentado embasamento suficiente para que sejam aplicadas na operação dos geradores assíncronos de dupla alimentação, com uma tendência que se aplique com melhores resultados a adaptação proposta da curva de capacidade.

Foram apresentados critérios mínimos para a seleção e projeto do gerador assíncrono de dupla alimentação e seu conversor de potência, porém não se teve a intenção de esgotar este assunto, o que pode ser complementado pelas referências apresentadas no Capítulo 2.

Nos ensaios experimentais, pela falta de uma norma específica para o gerador assíncrono de dupla alimentação, propôs-se a utilização de normas aplicáveis ou às máquinas síncronas ou às assíncronas, em conjunto com metodologias apresentadas em livros texto, para o cálculo dos parâmetros do gerador assíncrono de dupla alimentação, tendo em vista que da correta definição dos parâmetros dependem todas as etapas seguintes de simulação e validação dos modelos em qualquer trabalho que compare a teoria com a experimentação.

Complementando a parte dos ensaios experimentais, explorou-se a curva de magnetização e sua dependência da frequência imposta ao circuito do rotor para a compensação do escorregamento, chegando-se à conclusão que a sua aplicação da curva de magnetização, com corrente alternada, no controle e operação do gerador assíncrono de dupla alimentação é importante, pois a diferença verificada entre a curva de magnetização levantada alimentando-se o circuito do rotor com corrente contínua e com corrente alternada não pode ser desprezada para o caso específico do GEADA, porém para outros geradores, principalmente aqueles que forem projetados e construídos com técnicas e materiais atuais, esta diferença deve ser levantada, conforme mais bem explorado na seção 7.5.3.

A realização dos ensaios experimentais neste trabalho foi possível utilizando-se um inversor de frequência convencional como conversor de potência, sem nenhuma alteração, de forma satisfatória, provando-se que, com determinados critérios atendidos pelo inversor, tem-se um conversor de potência de baixo custo. O grande benefício do inversor de frequência utilizado neste estudo, que já foi elencado no Capítulo 6, é a possibilidade de se ajustar a tensão imposta ao rotor de forma independente da sua frequência.

Outra conclusão importante é que este trabalho não extingue o assunto, abrindo caminho que cada vez mais se estude o gerador assíncrono de dupla alimentação e se viabilize a sua aplicação no Brasil.

8.2 CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DO GERADOR ASSÍNCRONO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO

Considero uma contribuição importante a proposta de, do entendimento do GEADA como sendo um gerador síncrono a partir dos seu estator, estudarem-se e aplicarem-se os conceitos utilizados nos estudos do gerador síncrono.

Ao enxergar o gerador assíncrono de dupla alimentação como um gerador síncrono, alguns dos conceitos sobre o primeiro deverão ser revistos por aqueles que

continuarem este trabalho, pois a exemplo do que aconteceu com todo o desenvolvimento das teorias do gerador síncrono desde o início do século XX, este caminho está iniciando.

Outra contribuição foi a exploração dos conceitos envolvidos na operação do gerador assíncrono de dupla alimentação, dos fluxos de potências.

8.3 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO TRABALHO

A continuidade dos estudos iniciados neste trabalho podem se dar da seguinte maneira:

1. Aprofundar a aplicação prática da curva de capacidade adaptada ao gerador assíncrono de dupla alimentação, verificando experimentalmente os limites tanto teórico quanto prático, aceitáveis para a estabilidade do gerador;

- 2 Explorar a possibilidade de se realimentar o conversor de potência de forma que se possa controlar a tensão e frequência de forma prática;

3. Estudar a possibilidade de se instalar em campo um sistema de geração com base no que foi estudado neste trabalho, para que possa avaliar o desempenho em condições reais de funcionamento;

4. Realizar ensaios de validação para o modelo desenvolvido;

5. Realizar um estudo técnico-econômico-financeiro para a verificação dos limites de escorregamento em que pode operar o gerador assíncrono de dupla alimentação com custos razoáveis;

6. Estudar a projeto da máquina assíncrona para ser usada como GEADA, uma vez que, via de regra, a máquina é projetada como motor e não como gerador.

REFERÊNCIAS

- ADIBI, M. M.; MILANICZ, D. P. Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9. n. 1, p. 29-40, Feb. 1994.
- ALOYS WOBLEN. **Ring Generator for a wind power installation**. United States Patent. Nr. 6,943,462 B2. 15/12/2000. 13/09/2005 (publicação).
- ALTINO, L. M. **Máquinas Síncronas: teoria e aplicações**. Recife: Editora Universitária da UFPE. 1984. 423p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383/1982**: máquinas elétricas girantes – máquinas de indução – determinação das características, método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 75 p.
- BANSAL, R. C.; BHATTI, T. S.; KOTHARI, D. P. Bibliography on the Application of Induction Generators in Nonconventional Energy Systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. 18, n. 3, p. 433-437, Sept. 2003.
- BAROUDI, J. A.; DINAHAHI, V. KNIGHT, A. M. A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p.458-465.
- BEATY, H. W.; KIRTLEY JR, J. L. **Electric Motor Handbook**. New York: Mc-Graw-Hill Book, 1998, 404p., ISBN: 0-07-035971-7.
- BENDL, J.; CHORMÁT, M.; SCHREIER, L. Adjustable-speed Operation of Doubly Fed Machines in Pumped Storage Power Plants. In: IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES, 9., 1999, [S. l.], **Conference Publication n. 468**. [S. l.]: IEE, 1999, p. 223-227.
- BENDL, J.; SCHREIER, L.; CHOMÁT, M. Analysis of Working Regions of Doubly Fed Generators/Motors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES – ICEM, 1998, Istanbul, Turkey. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 1998.
- BOGALECKA, F. Dynamics of the Power Control of a Double Fed Induction Generator Connected to the Soft Power Grid. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUMS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS – ISIE, 1993, Budapest. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 1993, p. 509-513.
- BROSAN, G. S.; HAYDEN J. T. **Advanced Electrical Power and Machines**. London: Sir Isaac Pitman and Sons Ltd., 1966, 915p.

BRUNE, C.; SPÉE, R.; WALLACE, A. K. Experimental Evaluation of a Variable Doubly-Fed Wind-Power Generation System. **IEEE Transactions on Industry Applications**. Piscataway, v. 30, n. 3, p.648-655, 1994.

ÇADIRCI, I.; AKÇAM, G.; ERMIS, M. Effects of Instantaneous Power-Supply Failure on the Operation of Slip-Energy Recovery Drives. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. 20, n. 1, p. 7-15, Mar. 2005.

ÇADIRCI, I.; ERMIS, M. Commutation Angle Analysis of a Double Output Induction Generator Operating in Sub- and Super-Synchronous Modes. In: IEEE MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE, 7., 1994, Antalya, Turquia. **Proceedings . . .** New York: IEEE, Apr. 1994, p. 793-796, v. 2.

ÇADIRCI, I.; ERMIS, M. Double-Output Induction Generator Operating at Subsynchronous and Supersynchronous Speeds: steady-state performance optimization and wind-energy recovery. **IEE PROCEEDINGS-B**. [S. 1.]: IEE, v. 139, n. 5, p. 429-442, Sept. 1992.

CAMPOS, F. G. R. DE. **Geração de Energia a partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono conectado a Conversor Estático Duplo**. 2004. 119f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2004.

CARDOSO, J. R.; JORDÃO, R. G. Operação Assíncrona da Máquina Síncrona. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 4., 1981, Balneário Camburiú. **Anais . . .** Rio de Janeiro: Cigré Brasil, 1981.

CARMELI, S.; DEZZA, F. C.; PERINI, R. Double Fed Induction Machine drive: proposal of a speed sensorless control based on a MRAS. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p.404-410.

CARNEIRO JÚNIOR, S.; CALDAS, F. P. Utilização do Gerador de Indução em Usinas Hidrelétricas de Pequeno Porte. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 4., 1981, Balneário Camburiú. **Anais . . .** Rio de Janeiro: Cigré Brasil, 1981.

CHAPALLAZ, J. M.; et al. **Manual on Induction Motors Used as Generators**. Braunschweig: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-Gate, 1992, (MHPG series harnessing water power on a small scale v. 10), 213p., ISBN: 3-528-02068-7.

CHOMÁT, M. **Curva de Capacidade de Geradores Assíncronos de Dupla Alimentação**. nov, 2006. [comunicação pessoal].

CONCORDIA, C.; CRARY, S. B.; KRON, G. The Doubly Fed Machine. **AIEE Transactions**. [S.1.], v. 61, p.286-289, 1942.

DATTA, R. RANGANATHAN, V. T. Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine – a comparison With Alternative Schemes. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v.17, n. 3, p. 414-421, Sept. 2002.

- DJUROVIĆ, M. et al. Double Fed Induction Generator with Two Pair of Poles. In: IEE ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES , 7., 1995, [S. l.], **Conference Publication N° 412**. [S. l.]: IEE, 1995, p. 449-452.
- DUNDING, Z. et al. Detailed Modeling and Simulation of Adjustable Speed Generator in Matlab/Simulink Environment. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, p. 2520-2524, 2000.
- EDVARSDEN, P. A. et. al. Steady-State Power Flow and frequency Optimizing Analysis a Variable Speed Constant Frequency Generating System. In: EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 7., 1997, Trondheim, Noruega. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.] , 1997. p. 2691-2694.
- EL HAGRY; M. T., MOHAMED, A. A.; ESKAMDER, M. N. Modes of Operation of the Slip Ring Induction Machine in Wind Energy Conversion Systems. **IEEE Transactions on Power Conversion**. Piscataway, p. 665-670, 1989.
- ERLICH, I.; BACHMANN, U. Dynamic Behavior of Variable Speed Pump Storage Units in the German Electric Power System. In: INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL - IFAC TRIENNIAL WORLD CONGRESS, 15., 2002, Barcelona, Spain. **Proceedings . . .** [S. l.]: IFAC, 2002.
- ESKANDER, M. Control of Losses in Double Fed Induction Generators Used in WECS. In: IEEE ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE – IECEC, 31., 1996, Washington, D.C. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 1996, p. 1786-1791.
- FARRET, F. A. **Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica**. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1999, 245 p. ISBN: 85-7391-014-3.
- FEIJÓO, A.; CIDRÁS, J.; CARRILLO, C. A Third Order Model for the Doubly-Fed Induction Machine. **Electric Power Systems Research**, Texas, USA, Elsevier, n. 56, p. 121-127, 2000.
- FERNÁNDEZ, L. M.; et al. Control System of Doubly Fed Induction Generators Based Wind Turbines With Production Limits. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p. 1936-1941.
- FERREIRA, A. C.; SOUZA, L. M. ; WATANABE, E. H. Variable Speed Synchronous Condenser using Doubly-fed Induction Machine. **Revista Controle & Automação**. São Paulo, v. 15, n. 2, p.172-180, abr./maio/jun. 2004, ISSN 0103-1759
- FITZGERALD, A. E. et al. **Electric Machinery**. New York: McGraw-Hill Book, 1990. 599 p. ISBN: 0-07-021134-5.
- GAGNON, R. et al. Modeling and Real-Time Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS – IPST, 2005, Montreal, Canada. **Proceedings . . .** Montreal, Canada: Hydro-Québec TransÉnergie, 2005, Paper n. IPST05-162. June 2005.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY - GE (Schenectady, NY, USA). Amir S. Mikhail, Craig L. Christenson, Kevin L. Cousineau, William L. Erdman, William E. Holley. **Variable Speed**

Wind Turbine Generator. United States Patent Nr. 6,856,039 B2. 26/06/2003. 15/02/2005 (publicação). 2005a.

GENERAL ELECTRIC COMPANY - GE (Schenectady, NY, USA). Thomas A. Wilkins, Nagwa M. Elkachouty, Reigh A. Walling, James P. Lyons, Robert W. Delmerico, Sumit Bose, Nicholas Wrigth Miller. **Continuous Reactive Power Support For Wind Turbine Generators.** United States Patent. Nr. 6,924,565 B2. 18/08/2003. 02/08/2005 (publicação). 2005b.

GISH, W. B.; et al. An Adjustable Speed Synchronous Machine for Hydroelectric Power Applications. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.** New York, v. PAS-100, n. 5, p. 2171-2176, May 1981.

GONZAGA, D. P.; BURIAN JR., Y. Small-Variation Linear Model of the Three-Phase Double-Fed induction Motor Under Synchronous Operation: Stability. **European Transactions on Electrical Power.** [S. l.]: John Wiley & Sons, 2005, p.15:325-342.

HABETLER, T. G. A Space Vector-Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters. **IEEE Transactions on Power Electronics.** Piscataway, v. 8, n. 1, p. 30-36, Jan., 1993.

HAWAIIAN ELECTRIC COMPANY, INC. Karl E. Stahlkopf. **Power Control Interface Between A Wind Farm And Power Transmission System.** United States Patent. Nr. 6,858,953 B2. 17/10/2003. 22/02/2005 (publicação).

HINDMARSH, J. **Electrical Machines and their Applications.** 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd. 1984, 662 p. ISBN: 0-7506-2794-8.

HOFMANN, W.; OKAFOR, F. Optimal Power Utilization with Doubly-Fed Full-Controlled Induction Generator. In: CONFERENCE IN AFRICA – IEEE Africon 2002, George, South Africa. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2002. p. 693-698.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE. **ANSI/IEEE Std 260-1978 (Reaffirmed 1985):** IEEE Standard Letter Symbols for Units of Measurement. New York: IEEE Standard Board, 1978b. 22 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE. **ANSI/IEEE Std 280-1985:** IEEE Standard Letter Symbols for Quantities Used in Electrical Science and Electrical Engineering. New York: IEEE Standard Board, 1985. 48 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE. **IEEE Std 118-1978:** IEEE Standard Test Code for Resistance Measurements. New York: IEEE Standard Board, 1978a. 35 p.

JEONG, S. G; PARK, M. H. Steady State Analysis of a Stand Alone Wound Rotor Induction Generator Excited by a PWM Inverter. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE - IAS Annual Meeting, 1987, Atlanta, USA. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 1987. p. 790-797.

JORDÃO, R. G. **Máquinas Síncronas.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Editora da Universidade de São Paulo, 1980. 213p.

- KAZACHKOV, Y.; STAPLETON, S. Modeling Wind Farms for Power System Stability Studies. **Shaw Power Technologies**, [S. l.], Inc. Power Technology Newsletter Issue, n. 95, p. 1-17, Apr. 2004.
- KOSTENKO, M. P.; PIOTROVSKY, L. M. **Electrical Machines - Part Two**. Moscou: Peace Publishers. 1965. 682 p.
- KRAUSE, P. C.; THOMAS, C. H. Simulation of Symmetrical Induction Machinery. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. New York, v. PAS-84, p. 1038-1053, Nov. 1965.
- KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; M. S. HILDEBRANDT. Reference Frame Analysis of a Slip Energy Recovery System. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. 3, n. 2, 1988. p. 404-408, June 1988.
- KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of Electric Machinery**. Piscataway: IEEE Press, 1995. 564 p. ISBN: 0-7803-1101-9.
- KUNZLER JR., J. V.; FLORES Filho, A. F. Projeto GEADA: gerador assíncrono de dupla alimentação excitado por conversor de frequência. In: FÓRUM DE ENERGIA 2003, Novo Hamburgo, RS. **Anais . . .** Novo Hamburgo: SEMC/RS , 2003. 5 p.
- KWON, C.; SUDHOFF, S. D. A Genetic Algorithm Based Induction Machine Characterization Procedure. . In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p.1358-1364.
- LANGSDORF, A. S. **Theory of Alternating Current Machinery**. Tokyo: McGraw-Hill Books, 1955. 666 p.
- LAUW, R. K. et. al. Variable-Speed Generation with the Series-Resonant Converter. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. 3, n. 4, p.755-764. Dec. 1988.
- LEMOS, F. B. **Curva de Capacidade de Geradores Assíncronos de Dupla Alimentação**. nov, 2006.[comunicação pessoal].
- LIU, J. HU, J. XU, L. Sliding mode Observer for Wide Speed Range Sensorless Induction Machine Drives: Considerations for Digital Implementation. . In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p.300-307.
- LOBOSCO, S. O. Conceptual Aspects of Equivalent Circuit for an Induction Machine. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2001, Cambridge. **Proceedings . . .** Piscataway: IEEE, 2001, p. 542-544.
- LOBOSCO, S. O. Curva de Operação de Gerador Síncrono. **Revista Mundo Elétrico**. [S. l], p. 57-60, out. 1984.
- LYSHEVSKI, S. E. **Electromechanical Systems, Electric Machines and Applied Mechatronics**. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2000. 782 p. ISBN: 0-8493-2275-8.
- MARTIGNONI, A. **Ensaio de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: Globo, 1980. 162 p.

MELO, J. A. F de. **Geradores Síncronos: curvas de capacidade**. Recife, PE: Publicações Técnicas da CHESF, 1977. 41p.

MEYER, A. C. et al. Máquinas de Dupla Alimentação: uma alternativa para a geração em rotação variável. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2., 2000, Canela/RS. **Anais . . .** Canela/RS: CEEE, 2000b, p.513-522.

MEYER, A. C.; et al. Hidrogeradores de Rotação Variável: aspectos técnicos e econômicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2., 2000, Canela/RS. **Anais . . .** Canela/RS: CEEE, 2000a, p. 503-512.

MIRANDA, A. P. R. Geração Eólica como Alternativa para Alimentar Redes de Distribuição de Eletricidade. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, Ano 33, n. 373. p.114-118. abr. 2005. ISSN 0100-2104.

MOHAMMED, O. A.; LIU Z.; LIU, S. Stator Power Factor Adjustable Direct Torque Control of doubly-Fed Induction Machines. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p. 572-578.

MOON, S. I.; KEYHANI, A. Estimation of Induction Machine Parameters from Standstill Time Domain Data. In: IEEE INTERNATIONAL APPARATUS SOCIETY - IAS Annual Meeting, 1993, Toronto, Canada. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 1993. p. 336-342.

MÜLLER, S.; DEIKE, M.; DONCKER, R. W. Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2000, Roma, Itália. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2000, v. 4. Oct. 2000. p. 2249-2254.

NICOLÁS, C. V. et. al. Guidelines for the Design and Control of Electrical Generator Systems for new Grid connected Wind Turbine Generators. In: IEEE ANNUAL CONFERENCE OF THE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 28., 2002, Sevilha, Espanha. **Proceedings . . .** New York: IEEE, v. 4, Nov. 2002, p. 3317-3325.

OLIVEIRA, R. G. **Controle e Integração à Rede Elétrica de um Sistema Eólico com Gerador de Indução Duplamente Excitado**. 2004. 192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

ONG, C. M. **Dynamic Simulation of Electric Machinery: using matlab/simulink**. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall Ptr, 1998. ISBN 0-1372-3785-5

PARK, R. H. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines: generalized method of analysis – Part I. **AIEE Transactions**. [S. l.], v. 48, p.716-727, July 1929.

PALLE, B.; SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. Dynamic Interaction of an Integrated Doubly Fed Induction Generator and a Fuel Cell Connected to Grid. In: IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), 36., 2005, Recife, Brazil. **Proceedings . . .** New York: IEEE, June, 2005. p. 185- 190.

PENA, R. S.; et al. A Constant Frequency Constant Voltage Variable Speed Stand Alone Wound Rotor Induction Generator. In: IEE OPPORTUNITIES AND ADVANTAGES IN INTERNATIONAL POWER GENERATION, 1996, [S. l.]. **Proceedings . . .** [S. l.]: IEE, 1996, Marc., 1996. p. 111-114.

REFOUFI, L.; ZAHAWI, B.A.T.; JACK, A. G. Analysis and Modeling of the Steady State Behavior of the Static Krames Induction Generator. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. 14, n. 3, p. 333-339, Sept. 1999.

RESENDE, J. T. **Operação Isolada e Interligada do Gerador de Indução**. 1994. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1994.

RONGVE, K. S. et. al. Overview of Torque control of a Doubly Fed Induction Generator. In: IEEE BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE. 2003, Bologna, Itália. **Proceedings . .** New York: IEEE, 2003, p.23-26.

RÜNCOS, F. **O Gerador Eólico**. 2000. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em: 01 junho 2004.

RÜNCOS, F.; et. al. Geração Eólica: características, vantagens e desvantagens das atuais tecnologias. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, Ano 33, n. 373, p.210-223, abr. 2005a. ISSN 0100-2104

RÜNCOS, F.; et. al. Gerador Assíncrono Trifásico sem Escovas: alternativa viável e de baixa manutenção. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, Ano 33, n. 374, p.48-69, maio 2005b. ISSN 0100-2104

RUPPERT Filho, E.; SÁNCHEZ, B.; ARMANDO, V. Control of Wound-Rotor Induction Machine. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND DRIVE SYSTEMS, 1997, [S.l.]. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 1997. p.97-102, v.1.

SAIDEL, M. A; REIS, L. B. A Operação de Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Perspectivas de Melhor Integração Ambiental do Aproveitamento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 1997, Belém. **Anais . . .** Rio de Janeiro: Cigré Brasil, 1997, GPH. 1 CD-ROM.

SALAMEH, Z. M.; KAZDA, L. F. Analysis of the Steady State Performance of the Double Output Induction Generator. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. EC-1, n. 1, p.26-32, Mar. 1986.

SANTOS, S. R. **Proposta para Implantação de Microcentrais Hidrelétricas Automatizadas com o emprego de Geradores Assíncronos**. 2003. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SAY, M. G. **Alternating Current Machines**. 5. ed. Singapore: Ed. Longman Scientific & Technical, 1983, 632 p. ISBN: 0-582-98875-6.

SCHREIER, L.; CHOMÁT, M.; BENDL, J. Working Regions of Adjustable-Speed Units with Doubly Fed Machines. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND

DRIVES CONFERENCE - IEMDC 1999, Seattle, Washington. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 1999. p. 457-459.

SCOTT, R. E. **Elements of Linear Circuits**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1965. 408 p.

SEMAN, S. et al. Analysis of a 1.7 MVA Doubly Fed Wind-Power Induction Generator during Power Systems Disturbances. In: NORDIC WORKSHOP ON POWER AND INDUSTRIAL ELECTRONICS. Trondheim, Noruega, 2004. **Proceedings . . .** Trondheim, Noruega: Norwegian University of Science and Technology, 2004.

SHIMA, K.; et. al. Finite Element Analysis for Field Currents and Reactances of doubly Fed Induction Generators for Wind Turbines. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p. 981-986.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Renewable Energy Systems: design and analysis with induction generators**. Boca Raton, Florida: CRC, 2004, 408 p. ISBN: 0-8493-2031-3.

SMITH, S.; et al. Improved Energy Conversion for Doubly-Fed Wind Generators. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2005, Fortieth IAS Annual Meeting. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005, v. 4, Oct. 2005, p. 2288-2295.

SPÉE, R.; BHOWMIK, S. Novel Control Strategies for Variable-Speed Doubly Fed Wind Power Generation Systems. **Renewable Energy**. [S. l.]: Elsevier, v. 6, n. 8, p. 907-915, 1995.

STANLEY, H. C. An Analysis of the Induction Machine. **AIEE Transactions**. [S. l.]: AIEE, 1938, v. 57 (supplement), p.751-755.

TAMURA, J.; et al. Analysis of the Steady-State Characteristics of Doubly Fed Synchronous Machines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. 4, n. 2. p. 250-256, June 1989.

TANG, Y.; XU, L. A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System. In: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 2003, Acapulco. **Proceedings . . .** New York: IEEE, June. 2003, p. 568-573.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE. **IEEE Std 67-1990: IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators**. New York: IEEE Standard Board, 1990. 64 p.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE. **IEEE Std 112-1996: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. New York: IEEE Standard Board, 1997. 58 p.

TURNER, N. L. **Teoria y Técnica del Bobinado de Máquinas Eléctricas: tratado práctico del bobinador**. Buenos Aires: Albatros, 1945. 464 p.

VICATOS, M. S.; TEGOPOULOS. Steady State Analysis of a Doubly-fed Induction Generator under Synchronous Operation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, n. 4, p. 495-501, 1989.

VICATOS, M. S.; TEGOPOULOS. Transient State Analysis of a Doubly-Fed Induction Generator under Three Phase Short Circuit. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Piscataway, v. 4, n. 1, p. 62-68, Mar. 1991.

WEGENER, R.; SOTER, S.; RÖSMANN, T. Operation of Double Fed Induction Generators with Unmodified Low Cost Standard Converters. In: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 2006, Jeju, Korea. **Proceedings . . .** New York: IEEE, June, 2006. p. 1-5.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION (Central Station Engineers). **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**. East Pittsburgh, Pa, USA: Westinghouse Electric Corporation, 1964. 824p.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. (East Pittsburgh, Pa, USA). William A. Munson. **Slip Recovery System For Wound Rotor Motor**. United States Patent Nr. 4,277,733. 05/03/1979. 07/07/1981 (publicação).

WILLIS, J. R.; BROCK, G. J.; EDMONDS, J. S. Derivation of Induction Motor Models from Standstill Frequency Response Tests. **IEEE Transactions on energy Conversion**. Piscataway, v. 4, n 4, p. 608-615, Dec. 1989.

WÜRFEL, M.; HOFMANN, W. Monitoring of the Transmission Properties of the Rotor Slip Ring System of Doubly-Fed Induction Generators. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE - IEMDC 2005, San Antonio, Texas. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2005. p. 295-299.

XUE, Y. et. al. A Stator Flux-Oriented Voltage Source Variable-Speed Drive Based on dc Link Measurement. **IEEE Transactions on Industry Applications**. Piscataway, v. 27, n. 5, p. 962-969 Sept./Oct. 1991.

YAMAMOTO, M.; MOTOYOSHI, O. Active and Reactive Power Control for Doubly-Fed Wound Rotor Induction Generator. **IEEE Transactions on Power Electronics**. [S. l.], v. 6, n. 4, p. 624-629, 1991.

APÊNDICE:

Projeto dos enrolamentos para o estator e rotor do GEADA

Gerador Assíncrono de Dupla Alimentação com Velocidade Variável e Freqüência Constante

por Eng.º Eletr. Júlio Vítor

1a. versão em 26/ago/2004 - versão inicial

2a. versão em 06/set/2004 - inclusão dos cálculos de kd, kp, kw p/ hamônicas

Cálculo de novos enrolamentos para a máquina assíncrona que será usada como gerador no PROJETO GEADA

Dados originais da máquina:

Estator:

Tipo de enrolamento: "em espiral", de uma camada, com 6 grupos de 3 bobinas

Número de ranhuras: $Q_e := 36$

Número de pólos: $p := 4$ $P := \frac{p}{2}$ $P = 2$

Passo de ranhura: 1-10

Rotor:

Tipo de enrolamento: "espiralado", de uma camada, com 6 grupos de 4 bobinas

Número de ranhuras: $Q_r := 48$

Passo de ranhura: 1-16, 1-14, 1-12, 1-10

Dados originais de placa:

Potência: 3kW (4hp) $Pot := 3000$ 3 anéis coletores

Tensão primário: 220V $V := 220$ Corrente primário: 11,1A em estrela

Freqüência: 50Hz Rotação: 1410 rpm

Cálculos Iniciais para o enrolamento do Estator:

Tipo de Enrolamento: Imbricado de dupla camada

Tensão: $V := 220$

Freqüência: $f := 60$ Rotação: $\omega_e := \frac{2 \cdot 60 \cdot f}{p}$ $\omega_e = 1.8 \times 10^3$

Enrolamento trifásico: $m_e := 3$

Número de ranhuras: $Q_e := 36$

Número de ranhuras por pólos e por fase: $q_e := \frac{Q_e}{m_e \cdot p}$ $q_e = 3$

Número de ranhuras por pólo: $r_{pe} := \frac{Q_e}{p}$ $r_{pe} = 9$

Dimensões do núcleo estatórico: $d_e := 0.145$ $L := 0.09$

Abertura das ranhuras do estator: 2,6 mm

Passo de bobina: $Y_e := \frac{Q_e}{p}$ $Y_e = 9$ (1 - 10) $p = 4$

Passo polar: $Y_{pe} := \frac{d_e \cdot \pi}{p}$ $Y_{pe} = 0.114$

Passo de Ranhura: $\alpha_e := \frac{180}{rpe}$ $\alpha_e = 20$ graus elétricos

Passo das fases: $\theta_{fe} := \frac{120}{\alpha_e}$ $\theta_{fe} = 6$ (a entrada da fase 2 encontra-se na 7ª ranhura a partir da entrada da fase 1)

Grupos de bobinas: $G_{pe} := m_e \cdot p$ $G_{pe} = 12$

Número total de bobinas: $B_{Te} := Q_e$ $B_{Te} = 36$

Bobinas por grupo: $B_{Ge} := \frac{B_{Te}}{G_{pe}}$ $B_{Ge} = 3$

Bobinas por fase: $B_{Fe} := \frac{Q_e}{m_e}$ $B_{Fe} = 12$

pitch factor: $pitch_e := \frac{Y_e}{rpe}$ $pitch_e = 1$

FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO

Assumindo $B_{ef} := 0.6$ valor médio

Fluxo Magnético por pólo e por fase: $\Phi := Y_{pe} \cdot L \cdot B_{ef}$ $\Phi = 6.15 \times 10^{-3}$

Fator de distribuição do enrolamento: $k_{de} := \frac{\sin\left(q_e \cdot \frac{\alpha_e \cdot \pi}{180}\right)}{q_e \cdot \sin\left(\frac{\alpha_e \cdot \pi}{180}\right)}$ $k_{de} = 0.96$

ou de duas outras formas: $k_{de} := \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot q_e}{2 \cdot rpe}\right)}{q_e \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 1}{2 \cdot rpe}\right)}$ (KOSTENKO , pág. 49)

$k_{de} := \frac{1}{2 \cdot q_e \cdot \sin\left(\frac{1 \cdot \pi}{6 \cdot q_e}\right)}$ (ANSALDO COEMSA)
(Marco Saltara)

Fator de encurtamento (pitch): $k_{pe} := \sin\left(\frac{180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot pitch_e}{2}\right)$

ou ainda: $k_{pe} := \cos\left(\frac{\pi - \frac{\pi \cdot Y_e}{3 \cdot q_e}}{2}\right)$ (KOSTENKO , pág. 54)

$k_{pe} = 1$

Fator de enrolamento: $k_{we} := k_{de} \cdot k_{pe}$ $k_{we} = 0.96$

Espiras por fase: $N_{ee} := \frac{V \cdot k_{de}}{4.44 \cdot k_{pe} \cdot \Phi \cdot f}$ $N_{ee} = 128.889$

Espiras por bobina: $N_{be} := \frac{N_{ee}}{B_{Fe}}$ $N_{be} = 10.741$

Para o PROJETO do ENROLAMENTO DO ESTATOR tem-se:

valor assumido para Espiras por bobina: $N_{be} := 11$

resultando num número de espiras por fase: $N_{ee} := N_{be} \cdot B_{Fe}$ $N_{ee} = 132$

então o Fluxo Magnético por pólo e por fase será $\Phi := \frac{V \cdot k_{de}}{4.44 \cdot k_{pe} \cdot N_{ee} \cdot f}$

$\Phi = 6.005 \times 10^{-3}$

Indução magnética no entreferro: $B_{ef} := \Phi \cdot \frac{1}{Y_{pe} \cdot L}$ $B_{ef} = 0.586$

CÁLCULO DA SEÇÃO DO CONDUTOR

Ranhura do estator: $le1 := 0.01$ $le2 := 0.019$

Área da ranhura do estator: $Are := le1 \cdot le2$ $Are = 1.9 \times 10^{-4}$

Área da ranhura para cada bobina do estator: $Arbe := \frac{Are}{2}$ $Arbe = 9.5 \times 10^{-5}$

área do círculo: $raio := 1$ $s_{círculo} := \pi \cdot raio^2$
 $s_{círculo} = 3.142$

área do quadrado: $lado := 2 \cdot raio$ $s_{quadrado} := lado \cdot lado$
 $s_{quadrado} = 4$

relação entre a área de um quadrado e um círculo circunscrito neste:

$s_{círculo} := \pi \cdot raio \cdot raio$ $s_{quadrado} := lado \cdot lado$

$rel_quad_circ := \frac{lado \cdot lado}{\pi \cdot raio \cdot raio}$

$rel_quad_circ := \frac{2 \cdot raio \cdot 2 \cdot raio}{\pi \cdot raio \cdot raio}$

$rel_quad_circ := \frac{4}{\pi}$ $rel_quad_circ = 1.273$

considerando-se a isolação dos fios e entre as duas bobinas que ocupam a mesma ranhura, tem-se como seção dos condutores (fios)

$isolantes := 2 \cdot 10^{-5}$

$s_{espira} := \frac{Arbe - isolantes}{N_{be} \cdot rel_quad_circ}$ $s_{espira} = 5.355 \times 10^{-6}$

A densidade de corrente em condutores de cobre está entre 2 A/mm² e 5A/mm², então, para a seção do condutor calculada corresponderá uma corrente máxima de

$$\text{dens}_I := 4 \quad I := s_{\text{espira}} \cdot \text{dens}_I \cdot 10^6 \quad I = 21.42$$

Na máquina em estudo temos a corrente máxima com a ligação em Δ :

$$\cos\phi := 0.709 \quad I_{\text{máx}} := \frac{\text{Pot}}{V \cdot \cos\phi} \quad I_{\text{máx}} = 19.233$$

Novo Fator de Potência:

$$\cos\phi := 0.85 \quad I_{\text{máx}} := \frac{\text{Pot}}{V \cdot \cos\phi} \quad I_{\text{máx}} = 16.043$$

Confirmando-se como corretas todas as considerações feitas, e a abertura das ranhuras de 2,6mm, o fio a ser utilizado para o enrolamento do estator deve ser o **10AWG**, pois o fio 12AWG não tem capacidade de condução de corrente de 16A.

Para o ENROLAMENTO DO ROTOR tem-se:

O número de pólos devem se manter iguais ao do Estator, assim como o número de fases

$$m_r := m_e \quad m_r = 3$$

$$p = 4$$

Também a relação de transformação RT deve se manter próxima a 1, então o número de espiras por fase deve ser aproximadamente a mesma

$$N_r := N_e \quad N_r = 132$$

O tipo de enrolamento será imbricado de dupla camada, então o número de bobinas será igual ao número de ranhuras

$$\text{Número de ranhuras:} \quad Q_r = 48$$

$$\text{Número de ranhuras por pólos e por fase:} \quad q_r := \frac{Q_r}{m_r \cdot p} \quad q_r = 4$$

$$\text{Número de ranhuras por pólo:} \quad r_{pr} := \frac{Q_r}{p} \quad r_{pr} = 12$$

$$\text{Dimensões do núcleo rotórico:} \quad d_r := 0.135 \quad L := 0.09$$

Abertura na ranhura do rotor: 1,6mm

$$\text{Passo de bobina:} \quad Y_r := \frac{Q_r}{p} \quad Y_r = 12 \quad (1 - 13)$$

$$\text{Passo polar:} \quad Y_{pr} := \frac{d_r \cdot \pi}{p} \quad Y_{pr} = 0.106$$

$$\text{Passo de Ranhura:} \quad \alpha_r := \frac{180}{r_{pr}} \quad \alpha_r = 15 \text{ graus elétricos}$$

$$\text{Passo das fases:} \quad \theta_{fr} := \frac{120}{\alpha_r} \quad \theta_{fr} = 8 \quad (\text{a entrada da fase 2 encontra-se na } 9^{\text{a}} \text{ ranhura a partir da entrada da fase 1)}$$

$$\text{Grupos de bobinas:} \quad G_{pr} := m_r \cdot p \quad G_{pr} = 12$$

$$\text{Número total de bobinas:} \quad B_{Tr} := Q_r \quad B_{Tr} = 48$$

Bobinas por grupo: $BGr := \frac{BTr}{Gpr}$ $BGr = 4$

Bobinas por fase: $BFr := \frac{Qr}{mr}$ $BFr = 16$

pitch factor: $pitch_r := \frac{Yr}{rpr}$ $pitch_r = 1$

Espiras por bobina: $Nbr := \frac{Ner}{BGr}$ $Nbr = 8.25$

Fator de distribuição do enrolamento: $kdr := \frac{\sin\left(\frac{\alpha r \cdot \pi}{qr \cdot \frac{180}{2}}\right)}{qr \cdot \sin\left(\frac{\alpha r \cdot \pi}{2}\right)}$ $kdr = 0.958$

Fator de encurtamento (pitch): $kpr := \sin\left(\frac{180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot pitch_r}{2}\right)$ $kpr = 1$

Fator de enrolamento: $kwr := kdr \cdot kpr$ $kwr = 0.958$

Para o PROJETO do ENROLAMENTO DO ROTOR tem-se:

valor assumido para Espiras por bobina: $Nbr := 9$

resultando num número de espiras por fase: $Ner := Nbr \cdot BFr$ $Ner = 144$

então o Fluxo Magnético por pólo e por fase será $\Phi := \frac{V \cdot kdr}{4.44 \cdot kpr \cdot Ner \cdot f}$
 $\Phi = 5.492 \times 10^{-3}$

Indução magnética no entreferro: $Bef := \Phi \cdot \frac{1}{Ypr \cdot L}$ $Bef = 0.576$

RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO: $RT := \frac{Ner}{Nee}$ $RT = 1.091$

CÁLCULO DA SEÇÃO DO CONDUTOR

Ranhura do rotor: $lr1 := 0.005$ $lr2 := 0.018$

Área da ranhura do rotor: $Arr := lr1 \cdot lr2$ $Arr = 9 \times 10^{-5}$

Área da ranhura para cada bobina do rotor: $Arbr := \frac{Arr}{2}$ $Arbr = 4.5 \times 10^{-5}$

considerando-se a isolamento dos fios e entre as duas bobinas que ocupam a mesma ranhura, tem-se como seção dos condutores (fios)

$$\text{isolantes} = 2 \times 10^{-5}$$

$$s_{\text{espirar}} := \frac{\text{Arbr} - \text{isolantes}}{\text{Nbr} \cdot \text{rel_quad_circ}} \quad s_{\text{espirar}} = 2.182 \times 10^{-6}$$

Confirmando-se como corretas todas as considerações feitas e a abertura nas ranhuras de 1,6mm, o fio a ser utilizado para o enrolamento do estator deve ser o **14AWG**, pois o fio 12AWG, com diâmetro de 2,11mm, não passa pela abertura.