

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO FUNCIONAMENTO EM
REGIME PERMANENTE DO GERADOR DE INDUÇÃO OPERANDO
COM GERADOR SÍNCRONO PARA APLICAÇÃO EM GERAÇÃO
ISOLADA**

WAGNER EDUARDO VANÇO

FEVEREIRO

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO FUNCIONAMENTO EM
REGIME PERMANENTE DO GERADOR DE INDUÇÃO OPERANDO COM
GERADOR SÍNCRONO PARA APLICAÇÃO EM GERAÇÃO ISOLADA**

Dissertação apresentada por **Wagner Eduardo Vanço**
à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos
requisitos necessários para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Banca examinadora:

Prof. Luciano Martins Neto, Dr. (UFU) – Orientador

Prof. Carlos Henrique Salerno, Dr. (UFU)

Prof. Rui Vagner Rodrigues da Silva, Dr. (IFG)

Uberlândia, 25 de Fevereiro de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

V272e
2016

Vanço, Wagner Eduardo, 1990-
Estudo teórico-experimental do funcionamento em regime permanente do gerador de indução operando com gerador síncrono para aplicação em geração isolada / Wagner Eduardo Vanço. - 2016.
133 f. : il.

Orientador: Luciano Martins Neto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Máquinas elétricas - Corrente alternada - Teses. 3. Dínamos - Corrente alternada - Teses. 4. Máquinas elétricas de indução - Teses. I. Martins Neto, Luciano, 1948-. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO FUNCIONAMENTO EM
REGIME PERMANENTE DO GERADOR DE INDUÇÃO OPERANDO COM
GERADOR SÍNCRONO PARA APLICAÇÃO EM GERAÇÃO ISOLADA**

WAGNER EDUARDO VANÇO

Dissertação apresentada por Wagner Eduardo Vanço à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Luciano Martins Neto, Dr.
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

*Dedico este trabalho a minha família,
especialmente a minha mãe pelo estímulo, carinho
e apoio aos estudos.*

*“As almas de todos os homens são imortais. Mas
as almas dos homens justos são imortais e
divinas” Sócrates.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela existência.

Ao Prof. Luciano Martins Neto pelo incentivo, motivação e orientação deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da Universidade Federal e do Núcleo de Máquinas e Aterramentos Elétricos em especial: Arthur Costa, Bruna Sousa, Daniel Tobias, Fabiana Alves, Felipe Adriano, Fernando Silva, João Paulo, Leandro Vieira, Rianne Brito, Thales Lima, Vinicius Lemes e Vinicius Sandovani, pelas muitas contribuições, companheirismo e amizade.

Ao funcionário Rubens Aparecido Assunção, por sua amizade e seus excelentes serviços prestados junto a Faculdade de Engenharia Elétrica.

À Cinara Fagundes P. Mattos pela presteza na realização dos serviços junto à secretaria da pós-graduação.

E por fim à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas - pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental do funcionamento em regime permanente do gerador de indução trifásico auto-excitado operando juntamente com o gerador síncrono de polos salientes para aplicação em geração isolada, em muitos locais distantes ou devido à ausência da rede elétrica de distribuição, entende-se da dificuldade para gerar energia elétrica e por isso propõe-se aqui, contribuir com o controle fino de tensão e reduzir custos de projetos na implementação e expansão de sistemas ilhados, devido preço para aquisição da máquina assíncrona de gaiola de esquilo ser menor que a síncrona.

A operação entre esses dois geradores em redes isoladas para o regime permanente é totalmente satisfatória, o controle de potência mecânica pode ser feito na prática com a injeção de água/vapor na turbina ou pelo motor diesel, e o controle de tensão terminal é realizado pela atuação do sistema de controle de excitação do gerador síncrono de polos salientes, dando uma margem tolerável e perfeitamente aceitável para a amplitude de tensão, mostrando que o gerador síncrono pode desempenhar o papel regulador de tensão, desde que uma parcela de sua capacidade esteja reservada para geração ou absorção de reativo, conforme rege a solicitação da carga.

Para validar a proposta, simulações computacionais são realizadas de acordo com os ensaios experimentais, comparando então, os resultados simulados e coletados na prática em laboratório.

Keywords: Auto-excitado, controle de tensão, gerador de indução, geração isolada, gerador isolado, gerador síncrono, regulação de tensão.

ABSTRACT

This work presents a theoretical-experimental study from steady-state functioning of a self-excited three-phase induction generator operating together with the synchronous generator of salient poles for application in isolated generation, in many remote locations or due to the absence of the electrical distribution network, it's known the difficulty to generate electricity, so it is proposed here, contribute to the fine control voltage and reduce project costs in the implementation and expansion of islanded systems, due price for acquisition the asynchronous squirrel cage machine is less than synchronous.

The operation between these two generators in isolated networks for steady-state is totally satisfactory, the mechanical power control can be done in practice by injecting water/steam in the turbine or diesel engine, and the terminal voltage control is accomplished by excitation system control of salient poles synchronous generator , giving a tolerable margin and perfectly acceptable for the voltage amplitude, showing that the synchronous generator can play regulatory role voltage, feeding or not the load together with the self-excited three-phase induction generator, since a portion of their capacity is reserved for generating or absorbing reactive, as rules the load request.

To validate the proposal, computer simulations are carried out according to the experimental tests, comparing the results simulated and collected in practice in the laboratory.

Palavras-chave: Induction generator, isolated generation, isolated generator, self-excited, synchronous generator, voltage control, voltage regulation.

SUMÁRIO

▪ CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais.....	1
1.2 – Justificativas e objetivos.....	2
1.3 – Revisão bibliográfica	3
1.4 – Organização do trabalho	8

▪ CAPÍTULO 2 – CONCEITOS BÁSICOS: MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES E INDUÇÃO

2.1 – Máquina síncrona de polos salientes.....	10
2.1.1 – Características construtivas	10
2.1.2 - Rendimento	14
2.1.3 Perdas mecânicas	14
2.1.4 Perdas ôhmicas	14
2.1.5 Perdas no ferro.....	15
2.1.6 – Perdas suplementares.....	16
2.1.7 – Vida útil	16
2.2 – Máquina de indução trifásica	16
2.2.1 – Características construtivas	17
2.2.2 – Representação clássica da máquina de indução trifásica.....	20
2.3 – Considerações finais	27

▪ CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 – Máquina Síncrona de polos salientes.....	28
3.1.1 – Equações elétricas.....	28
3.1.2 – Equação de torque elétrico pelas variáveis da máquina	34
3.1.3 – Equações de tensão em referência no rotor, transformada de Park	35

3.1.4 – Ação geradora.....	44
3.1.5 – Equação de torque eletromagnético em referência no rotor	46
3.1.6 – Valores em pu das equações elétricas e mecânicas	46
3.1.7 – Demais parâmetros elétricos da máquina síncrona de polos salientes	51
3.2 – Máquina de indução trifásica	53
3.2.1 – Equações elétricas.....	53
3.2.2 – Equação do torque elétrico pelas variáveis da máquina	58
3.2.3 – Equação de transformação para o circuito do rotor	59
3.2.4 – Equação mecânicas em dq0	66
3.3 – Considerações finais	67

▪ **CAPÍTULO 4 – TEÓRICO-EXPERIMENTAL: ANÁLISE DOS RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS**

4.1 – Introdução	68
4.2 – Simulação Digital.....	68
4.2.1 – Simulação carga resistiva	69
4.2.2 – Simulação carga indutiva.....	76
4.2.3 – Simulação carga indutiva com correção de fator de potência	82
4.3 – Ensaios experimentais	88
4.3.1 – Ensaio carga resistiva	93
4.3.2 – Ensaio carga indutiva.....	97
4.3.3 – Ensaio carga indutiva com correção de fator de potência	102
4.4 – Comparativo teórico-experimental	107
4.5 – Considerações finais	110

▪ **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

5.1 – Conclusões	111
5.2 – Sugestões.....	112

■ APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA O GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	
A.1 - Gerador de indução trifásico.....	113
A.2 - Gerador de indução trifásico auto-excitado.....	113
A.3 – Dimensionamento do banco de capacitores.....	116
A.4 – Cálculo do banco de capacitores	119
A.5 – Simulação do gerador de indução auto-excitado	120
■ APÊNDICE B – DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS	
B.1 – Harmônicos.....	124
B.2 – Distorções Harmônica Individual, Total, Valor Eficaz e Fator de Potência	125
B.3 – Cálculo de potência	127
■ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

■ CAPÍTULO 2 – CONCEITOS BÁSICOS: MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES E INDUÇÃO

Figura 2.1.1 – Geradores síncronos de polos salientes, Usina Hidrelétrica de Emborcação....	11
Figura 2.1.2 – Representação da máquina síncrona de polos salientes.	11
Figura 2.1.3 – Rotor de polos salientes.	12
Figura 2.1.4 – Construção do estator de um gerador síncrono de médio porte.....	13
Figura 2.2.1 – Estrutura física da máquina de indução trifásica.....	19
Figura 2.2.2 – Estator: (a) enrolamento sem bobinas; (b) Enrolamento com bobinas.	19
Figura 2.2.3 – Rotor de gaiola de esquilo de uma máquina de indução.....	20
Figura 2.2.4 – Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução polifásica.	20
Figura 2.2.5 – Curva de conjugado x escorregamento da máquina assíncrona.....	21
Figura 2.2.6 - Circuito equivalente do rotor.	23
Figura 2.2.7 – Circuito equivalente monofásico da máquina de indução.....	25

■ CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA

Figura 3.1.1 – Esquema representativo de eixos magnéticos e dos enrolamentos uma máquina síncrona de polos salientes ligado em estrela.....	29
Figura 3.1.2 – Relação das variáveis abc e dq0.....	36
Figura 3.1.3 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona de três fases com a referência no rotor: Equações de Park.....	39
Figura 3.1.4 – Esquema representativo de eixos magnéticos e dos enrolamentos um gerador síncrono de polos salientes ligado em estrela.....	44
Figura 3.1.5 – Circuito equivalente de um gerador síncrono de três fases com a referência no rotor: Equações de Park.....	45

Figura 3.2.1 – Esquema representativo de eixos magnéticos do estator e rotor de uma máquina de indução trifásica ligada em estrela.....	53
Figura 3.2.2 – Relação trigonométrica do circuito do rotor para eixo dq.....	60
Figura 3.2.3 – Circuito equivalente de transformação no rotor para máquina de indução trifásica.	
.....	63

■ CAPÍTULO 4 – TEÓRICO-EXPERIMENTAL: ANÁLISE DOS RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

Figura 4.2.1 – Modelagem computacional do gerador síncrono e de indução auto-excitado alimentando uma carga resistiva.....	70
Figura 4.2.2 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, simulação para carga resistiva.	
.....	71
Figura 4.2.3 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador síncrono, simulação para carga resistiva.	71
Figura 4.2.4 – Potência reativa de fase absorvida pelo gerador síncrono, simulação para carga resistiva.	71
Figura 4.2.5 – Velocidade mecânica do gerador síncrono, simulação para carga resistiva.	72
Figura 4.2.6 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono, simulação para carga resistiva.	72
Figura 4.2.7 – Fator de potência do gerador síncrono, simulação para carga resistiva.	72
Figura 4.2.8 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, simulação para carga resistiva.	
.....	73
Figura 4.2.9 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador de indução, simulação para carga resistiva.	73
Figura 4.2.10 – Potência reativa de fase fornecida pelo banco de capacitores, simulação para carga resistiva.	73
Figura 4.2.11 – Velocidade mecânica do gerador de indução, simulação para carga resistiva.	
.....	74

Figura 4.2.12 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador de indução, simulação para carga resistiva.	74
Figura 4.2.13 – Fator de potência do gerador de indução, simulação para carga resistiva.	74
Figura 4.2.14 - Tensão e corrente de fase na carga resistiva.	75
Figura 4.2.15 - Potência ativa de fase consumida pela carga resistiva.	75
Figura 4.2.16 – Fator de potência da carga resistiva.	75
Figura 4.2.17 – Modelagem computacional do gerador síncrono e de indução alimentando uma carga indutiva.	76
Figura 4.2.18 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, simulação para carga indutiva.	77
Figura 4.2.19 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva.	77
Figura 4.2.20 – Potência reativa de fase entregue pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva.	77
Figura 4.2.21 – Velocidade mecânica do gerador síncrono, simulação para carga indutiva....	78
Figura 4.2.22 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva.	78
Figura 4.2.23 – Fator de potência do gerador síncrono, simulação para carga indutiva.	78
Figura 4.2.24 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, simulação para carga indutiva.	79
Figura 4.2.25 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva.	79
Figura 4.2.26 – Potência reativa de fase fornecida pelo banco de capacitores, simulação para carga indutiva.	79
Figura 4.2.27 – Velocidade mecânica do gerador de indução, simulação para carga indutiva.	80
Figura 4.2.28 – Torque Eletromagnético desenvolvido pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva.	80
Figura 4.2.29 – Fator de potência do gerador de indução, simulação para carga indutiva.	80
Figura 4.2.30 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva.....	81
Figura 4.2.31 – Potência ativa de fase consumida pela carga indutiva.	81
Figura 4.2.32 – Potência reativa de fase consumida pela carga indutiva.	81
Figura 4.2.33 – Fator de potência da carga indutiva.	82

Figura 4.2.34 – Modelagem computacional na situação dos geradores síncrono e de indução alimentando uma carga indutiva com correção de fator de potência.	82
Figura 4.2.35 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	83
Figura 4.2.36 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	83
Figura 4.2.37 – Potência reativa de fase entregue pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	84
Figura 4.2.38 – Velocidade mecânica do gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	84
Figura 4.2.39 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	84
Figura 4.2.40 – Fator de potência do gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	85
Figura 4.2.41 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	85
Figura 4.2.42 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	85
Figura 4.2.43 – Potência reativa de fase fornecida pelo banco de capacitores, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	86
Figura 4.2.44 – Velocidade mecânica do gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	86
Figura 4.2.45 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	86
Figura 4.2.46 – Fator de potência do gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.	87
Figura 4.2.47 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva com correção de fator de potência.	87
Figura 4.2.48 – Potência ativa de fase consumida pela carga indutiva com correção de fator de potência.	87
Figura 4.2.49 – Potência reativa de fase consumida pela carga indutiva com correção de fator de potência.	88
Figura 4.2.50 – Fator de potência da carga indutiva com correção de fator de potência.	88

Figura 4.3.1 – Diagrama representativo da bancada de ensaios para o gerador síncrono e de indução auto-excitado, alimentando uma carga trifásica	89
Figura 4.3.2 – Diagrama implementado do controle de excitação.	90
Figura 4.3.3 – Diagrama de blocos do sistema de controle de excitação.	90
Figura 4.3.4 – Campo em derivação para controle de fluxo.....	91
Figura 4.3.5 – (a) Bancada de geradores para procedimentos experimentais; (b) Cargas trifásicas utilizadas nos ensaios: resistores, indutores e capacitores.....	92
Figura 4.3.6 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.....	93
Figura 4.3.7 – Espectro harmônico para gerador síncrono, ensaio carga resistiva.....	94
Figura 4.3.8 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.....	95
Figura 4.3.9 – Espectro harmônico para gerador de indução, ensaio carga resistiva.	95
Figura 4.3.10 – Tensão e corrente de fase na carga resistiva.	96
Figura 4.3.11 – Espectro harmônico para carga, ensaio carga resistiva.	97
Figura 4.3.12 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.....	98
Figura 4.3.13 – Espectro harmônico para gerador síncrono, ensaio carga indutiva.	98
Figura 4.3.14 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva.....	99
Figura 4.3.15 – Espectro harmônico para gerador de indução, ensaio carga resistiva.	100
Figura 4.3.16 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva.....	101
Figura 4.3.17 – Espectro harmônico para carga, ensaio carga indutiva.	101
Figura 4.3.18 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.....	102
Figura 4.3.19 – Espectro harmônico para gerador síncrono, ensaio carga indutiva com correção de fator de potência.....	103
Figura 4.3.20 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.....	104
Figura 4.3.21 – Espectro harmônico para gerador de indução, ensaio carga indutiva	104
Figura 4.3.22 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva com correção de fator de potência.	105

Figura 4.3.23 – Espectro harmônico para carga, ensaio carga indutiva com correção de fator de potência.....	106
---	-----

■ **APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA O GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Figura A. 1 – Ligação do banco de capacitores na máquina assíncrona.	114
Figura A.2 - Processo de auto excitação nos geradores de indução de gaiola de esquilo.	114
Figura A.3 – Circuito equivalente simplificado do gerador de indução auto-excitado.	115
Figura A.4 – Circuito equivalente monofásico do gerador de indução auto-excitado.	115
Figura A.5 – Diagrama fasorial da tensão induzida. (a) Ação motora; (b) Ação geradora....	115
Figura A.6 – Relação entre o $\operatorname{sen}(\phi)$ do gerador e do motor.	116
Figura A.7 – Simulação do gerador de indução alimentando carga nominal resistiva.	120
Figura A.8 – Velocidade de rotação para o gerador de indução auto-excitado para carregamento nominal.	121
Figura A.9 – Tensão terminal de fase do gerador de indução auto-excitado, dimensionamento segundo (CHAPALLAZ et al., 1992).	121
Figura A. 10 – Tensão terminal de fase do gerador de indução auto-excitado, dimensionamento pela reatância de magnetização.	122
Figura A.11 – Tensão terminal de fase do gerador de indução auto-excitado, dimensionamento por um fator de 1,35 da potência reativa mínima.	122
Figura A.12 - Curva de saturação da máquina assíncrona.	123

■ **APÊNDICE B – DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS**

Figura B.1 - Representação de cada ordem harmônica de uma onda de corrente distorcida por uma lâmpada compacta fluorescente.	125
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.3.1 – Cargas trifásicas utilizadas nos ensaios experimentais.....	92
Tabela 4.3.2 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.	94
Tabela 4.3.3 – Decomposição da onda de tensão do gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.	94
Tabela 4.3.4 – Decomposição da onda de corrente do gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.	94
Tabela 4.3.5 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.	96
Tabela 4.3.6 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.	96
Tabela 4.3.7 – Decomposição da onda de corrente do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.	96
Tabela 4.3.8 – Potência ativa, reativa e fator de potência para carga resistiva.	97
Tabela 4.3.9 – Decomposição da onda de tensão da carga resistiva.	97
Tabela 4.3.10 – Decomposição da onda de corrente da carga resistiva.	97
Tabela 4.3.11 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.....	98
Tabela 4.3.12 – Decomposição da onda de tensão do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.	99
Tabela 4.3.13 – Decomposição da onda de corrente do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.....	99
Tabela 4.3.14 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva.....	100
Tabela 4.3.15 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.	100
Tabela 4.3.16 – Decomposição da onda de corrente do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.	100
Tabela 4.3.17 – Potência ativa, reativa e fator de potência para carga indutiva.....	101
Tabela 4.3.18 – Decomposição da onda de tensão da carga indutiva.	102
Tabela 4.3.19 – Decomposição da onda de corrente da carga indutiva.....	102

Tabela 4.3.20 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	103
Tabela 4.3.21 – Decomposição da onda de tensão do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	103
Tabela 4.3.22 – Decomposição da onda de corrente do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	103
Tabela 4.3.23 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	104
Tabela 4.3.24 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	105
Tabela 4.3.25 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	105
Tabela 4.3.26 – Potência ativa, reativa e fator de potência para carga, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	106
Tabela 4.3.27 – Decomposição da onda de tensão na carga, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	106
Tabela 4.3.28 – Decomposição da onda de corrente na carga, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.	106
 Tabela 4.4.1 – Comparativo teórico-experimental para gerador síncrono, ensaio resistivo. .	107
Tabela 4.4.2 – Comparativo teórico-experimental para gerador de indução ensaio resistivo.	107
Tabela 4.4.3 – Comparativo teórico-experimental da carga resistiva.	108
Tabela 4.4.4 – Comparativo teórico-experimental para gerador síncrono, ensaio indutivo... Tabela 4.4.5 – Comparativo teórico-experimental para gerador do gerador de indução, ensaio indutivo.....	108
Tabela 4.4.6 – Comparativo teórico-experimental da carga indutiva.....	109
Tabela 4.4.7 – Comparativo teórico-experimental para gerador síncrono, ensaio indutivo com correção de fator de potência.....	109
Tabela 4.4.8 – Comparativo teórico-experimental do gerador de indução, ensaio indutivo com correção de fator de potência.....	109
Tabela 4.4.9 – Comparativo teórico-experimental da carga com correção do fator de potência.	109

**■ APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA
O GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Tabela A.1 – Relação de tensão e corrente trifásicas de acordo com ligação da máquina trifásica.	117
.....
Tabela A.2 – Bancos de capacitores utilizados para auto-excitação do gerador de indução...	120
.....

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FMM	Força magneto motriz
FEM	Força eletromotriz
FCEM	Força contra eletromotriz
MCC	Máquina de corrente contínua
GIT	Gerador de indução trifásico
GSPS	Gerador síncrono de polos salientes
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
S1	Chave 1
S2	Chave 2
S3	Chave 3
VP	Variável de processo
SP	<i>Setpoint</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulated</i>
mosfet	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PI	Controlador Proporcional-Integral
THD _v	Distorção harmônica total de tensão
THD _i	Distorção harmônica total de corrente
th	Taxa da ordem harmônica
Vrms	Valor eficaz de tensão
Irms	Valor eficaz de corrente
B1	Banco de capacitores 1
B2	Banco de capacitores 2
s	Segundos

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais

Atualmente, a crise energética brasileira agravada pela prolongada estiagem no país, está provocando uma redução dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas, deixando o sistema elétrico em estado alarmante, cuja consequência pode levar ao racionamento de energia elétrica, diante desta preocupação deve ser empregado metodologias racionais e eficientes para o uso e geração da energia elétrica.

A princípio, a solução encontrada é a geração síncrona acionada por um motor primário com combustão a óleo diesel como fonte energética alternativa, que podem ser utilizados grupos geradores a diesel em sistemas de emergência e operação isolada no horário de ponta, seja na indústria e estabelecimentos comerciais visando aumentar a confiabilidade e o fornecimento, também reduzir custos do preço na fatura de energia, justamente ao maior preço do kWh no horário de ponta, esta prática já é bastante comum em supermercados, shoppings e indústrias.

Segundo os números da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a expansão da geração síncrona isolada, devido à preocupação dos usuários residenciais quanto ao cenário preocupante atual de risco de apagão, os geradores de energia com funcionamento a diesel começam a ganhar cada vez mais espaço em prédios residenciais, casas e condomínios fechados, dedicados para atender toda a demanda em casos da perda do abastecimento de energia local. Esta expansão é justificada pelo fato da crise energética causada pela seca predominante no Brasil, fortalecendo cada vez mais a hegemonia das gerações isoladas, e na maioria delas é utilizada o gerador síncrono (DM, 2015).

Porém, o custo da geração síncrona é alto, devido as características construtivas e manutenção preventiva do gerador síncrono de polos salientes, em contrapartida a máquina de indução operando como gerador apresenta reduzido custo de fabricação, robustez, ausência de um sistema de excitação, não necessitando de troca de escovas e tendo manutenção barata (ANAGREH & AL-REFAE, 2003). Contudo, para produzir energia, o gerador de indução

necessita de elevada energia reativa, possui difícil regulação de tensão e controle de frequência, quando submetidos a velocidades oscilantes ou cargas variáveis (BANSAL, 2005).

A máquina de indução de gaiola de esquilo pode ser essencial para uso no processo de produção de energia e útil para evitar corte de abastecimento em interrupções não planejadas (VERUCCHI et al., 2005). Se o gerador de indução operar juntamente com o gerador síncrono de polos salientes, o controle de frequência pode ser realizado pelo regulador de velocidade da máquina síncrona, caso a potência do gerador síncrono seja consideravelmente superior ao do gerador de indução, senão, o controle de velocidade deve ser realizado em ambas máquinas. Quanto ao controle da tensão terminal, este é mantido pela atuação do sistema de controle de excitação do gerador síncrono de polos salientes, que fornece total parcela de potência reativa para o suprimento de fluxo magnético no estator do gerador de indução, caso seja adotado a auto-excitação do gerador de indução, a potência reativa consumida por esta máquina provém de bancos de capacitores. A desvantagem do gerador de indução trifásico é que exige potência reativa, pois não pode gera-la, como dito, para sistemas isolados a fonte de energia reativa pode provir do banco de capacitores ou de um gerador síncrono impulsionado a motor diesel (SIMÕES & FARRET, 2015), (ORS, 2008) e (TAMRAKAR et al., 2007).

1.2 – Justificativas e objetivos

O estudo da operação de geradores de indução em paralelo com o gerador síncrono de polos salientes para aplicação em geração isolada, foi motivada por dois fatores relevantes. O primeiro deve-se a atenção dada no empenho e desenvolvimento da geração de energia para regiões isoladas ou distantes da rede elétrica de distribuição, é fundamental para essas regiões existir técnicas simples que possibilitem minimização de custos tais como durabilidade de equipamentos, pouca manutenção exigida por mão de obra especializada e redução de custos de projeto para implementação de geração de energia em sistemas isolados ou também denominado ilhados, dessa forma a inclusão da geração assíncrona torna o projeto mais barato pelo preço de aquisição de uma máquina de indução trifásica comparado de uma máquina síncrona, a expansão da capacidade de geração nessas áreas pode ser realizada com geradores de indução operando juntamente com os geradores síncronos já existentes, a única necessidade é que possa-se ter controle da potência mecânica tal como em grupos de geradores a diesel,

caso a potência mecânica não seja controlável é necessário empregar eletrônica de potência para dissipar a potência ativa não consumida, o que não é o foco deste trabalho. O segundo fator releva-se pelo motivo que em geração distribuída, recentemente foi empregado o uso do gerador de indução trifásico entregando potência ativa para a rede de distribuição, acontece que quando existe a perda de rede elétrica, o gerador de indução deixa de gerar energia, devido à ausência de potência reativa, então surge a ideia de realizar a auto-excitação, assim o gerador de indução pode operar com ou sem auto-excitação quando estiver conectado ao barramento infinito, e quando não houver fornecimento da concessionária de energia, o gerador de indução pode operar isoladamente e ter o controle de tensão realizado pelo controle de excitação do gerador síncrono, e o controle de frequência seja feito pela máquina primária ou pela quantidade de água ou vapor nas turbinas, conforme variação da carga local, o mais interessante nesta situação, que possivelmente no caso de perda da concessionária já existe um gerador síncrono acionado a motor diesel para atender as cargas essências, tornando a aplicação deste assunto aqui tratado, seriamente viável.

Diante do exposto, destacam-se os objetivos da implementação de geradores de indução operando juntamente com geradores síncronos para contribuição de um controle fino de tensão, descartando a necessidade de controle eletrônico externo às máquinas para este fim, e mostrar que o controle da tensão terminal do circuito isolado, é mantido pela atuação do sistema de controle de excitação do gerador síncrono, dando uma margem tolerável para a amplitude de tensão no funcionamento em regime permanente, revelando que o gerador síncrono pode desempenhar o papel regulador de tensão.

1.3 – Revisão bibliográfica

Alguns trabalhos tratam da operação do gerador síncrono operando juntamente com gerador de indução trifásico auto-excitado para aplicação em geração isolada, quanto a regulação de tensão e controle de frequência do gerador de indução auto-excitado operando ou não juntamente com o gerador síncrono, a vasta literatura emprega fortemente o uso da eletrônica de potência.

Em (TAMRAKAR et al., 2007) mostra o estudo teórico-experimental de um gerador síncrono 16 kVA operando paralelamente com um gerador de indução de 4 kW alimentando

uma carga indutiva, dispensando do uso de controle de tensão e velocidade para os geradores que estão entregando potência máxima, pois utiliza-se um compensador síncrono estático (*STATCOM*) para compensação de energia reativa e dissipação da diferença da potência ativa solicitada pela carga e nominal entregue pelos geradores . Neste trabalho os autores afirmam que o gerador síncrono é responsável para a entrega de potência ativa conforme a variação da carga, já que na configuração tratada o carregamento é próximo do nominal para os geradores. Pelas simulações e a partir da experimental verifica-se que nesta arquitetura a aplicação prática é aceitável, e que a ligação de um gerador de indução em paralelo com o gerador síncrono é muito mais simples do que a ligação entre dois geradores síncronos, além do mais não é necessário realizar a sincronização, não precisando de um painel de hardware de controle. Outros 2 estudos de estabilidade sobre este trabalho são mostrados em conferências por (GAWANDE & PORATE, 2009) e (GAWANDE et al., 2010).

Um estudo computacional da aplicação de geradores de indução operando em paralelo com gerador síncrono para geração isolada é posto por (JANARDHAN & SINGH, 2014), os resultados da simulação mostram que quando um gerador de indução acionado por potência mecânica constante e conectado em paralelo com o gerador síncrono, sendo o gerador de indução com a velocidade mecânica pouco acima do gerador síncrono. Nesta arquitetura qualquer alteração de carga ou demanda de potência reativa por cargas indutivas é fornecida pelo gerador síncrono para manter o tensão praticamente próximo de 1 pu. O sistema de controle eletrônico de um gerador de indução trifásico auto-excitado é caro, desse modo, prevê-se que o uso da combinação de geradores síncronos e de indução pode reduzir o custo de equipamentos de controle, claro que dependendo da classe de potência dos geradores. Segundo os autores, controladores de carga sensíveis pela frequência devem ser implementados para proporcionar operação de cargas variáveis ao sistema, a fim de fazer a carga vista por dois geradores ser constante, desse modo garantindo o funcionamento de tensão e frequência constante para o sistema ilhado. Este sistema deve ser instalado em projetos de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), onde a potência de entrada por meio das turbinas é descontrolada e constante, uma vez que a potência de entrada é constante, a potência de saída também deve ser constante, caso contrário, o sistema pode ir para a instabilidade. No entanto, não é possível manter a potência de carga constante, já que a mesma varia com o tempo, logo deve haver um circuito de controle onde exatamente a potência ativa restante da operação máxima ou nominal possa ser dissipada.

O controle de tensão de um gerador de indução auto-excitado é realizado por um compensador síncrono estático em série (SSSC), apresentado em (CHAUHAN et al., 2010), tanto o controle de potência ativa, como reativa é possível , este compensador injeta uma tensão sincronizada em série, em cada fase entre gerador de indução e a carga (geração isolada), por meio de um transformador de relação de transformarção 1:1, mantendo o controle de tensão por circuito comparador gerando um *PWM*, que com a atuação de um controle *PI*, estabiliza-se na tensão nominal rapidamente com a variação de carga.

Outro trabalho sobre gerador de indução auto-excitado (SINGH et al., 2015) envolve uso do compensador síncrono estático (*STATCOM*) para controle de tensão e cargas desequilibradas, e redução de harmônicos ao alimentar cargas não lineares. No artigo os autores afirmam que “além da regulação de tensão, as características de qualidade de energia por meio do *STATCOM*, como a compensação de corrente harmônica e balanceamento de carga também tem sido demonstrada experimentalmente e provou ser satisfatório”. Outra publicação de (SINGH & SHILPAKAR, 1998) mostra o uso do *STATCOM* para condições de regulação de tensão de plena carga e a vazio.

Demais publicações, (CHAUHAN et al., 2013), (SINGH et al., 2006), (SINGH et al., 2004), (VENKATESA PERUMAL & CHATTERJEE, 2006), (CHEN et al., 2008), (SINGH et al., 2014), (PALWALIA, 2013), (SALIMIKORDKANDI & SURGEVIL, 2014), (GONG PINGPING et al., 2015) tratam da aplicação do *STATCOM* para controle de tensão e frequência do gerador de indução auto-excitado.

(BRAGA et al., 2015) apresenta controle de tensão e frequência para gerador de indução trifásico de 45 kW em uma pequena usina hidrelétrica, para suprir cargas típicas de áreas rurais, o gerador sempre enxerga uma mesma carga, pois é feito chaveamento por tiristores anti-paralelos em cada fase, alimentando um carga trifásica resistiva, ou também denominado controlador de carga eletrônico, dessa forma qualquer variação da carga, é possível eletronicamente aumentar ou diminuir a carga paralela de controle, permitindo valores aceitáveis de tensão e frequência nominal. O controle de tensão e frequência por eletrônica de potência de um gerador de indução auto-excitado sem controle da máquina primária é mostrado também por (DASTAGIR & LOPES, 2007).

(QUISPE, 1997) realiza chaveamentos de banco de capacitores para condição de operação em vazio, plena carga e partida de motores, a filosofia do regulador de tensão implementado utiliza técnicas digitais e eletrônica de potência, o controle fino de tensão é

realizado por um atuador de potência, conversor AC/DC com uma carga indutiva. Similarmente, utilizando técnicas digitais e de eletrônica de potência. Uma estratégia de controle de tensão e frequência é proposto por (SUAREZ & BORTOLOTTO, 1999), o objetivo de controlar, simultaneamente, a tensão de saída e a frequência de um gerador de indução auto-excitado, operando na região linear da curva de magnetização.

O uso de um reator saturado *shunt* para controle de tensão é mostrado por (ALGHUWAINEM, 1997), para análise do gerador de indução auto-excitado em regime permanente, enquanto a tensão terminal se eleva, o reator satura, absorvendo o excesso de reativo, auto-regulando e evitando sobre-tensões devido mal dimensionamento do banco de capacitores ou velocidade motriz elevada.

Em (MURTHY et al., 2003) mostra o controle eletrônico de carga de geradores de indução auto-excitados para pequenas centrais hidreletricas isoladas, sem algum tipo específico de controle único para velocidade e tensão, este controle eletrônico de carga, tem por função oferecer boa qualidade para cargas monofásicas com boa regulação de tensão, dessa forma o gerador de indução auto-excitado trifásico pode operar com variações de cargas monofásicas sem danos em regime permanente.

(DE RESENDE et al., 2003) apresenta um programa de simulação para o controle da tensão gerada de um gerador de indução auto-excitado por chaveamento de indutores controlados por tiristores. A comutação da corrente que circula para o indutor, em intervalos de tempos maiores ou menores, de acordo com a necessidade de energia reativa, ela é feita usando técnicas de controle por lógica *Fuzzy*. Mais sobre lógica *Fuzzy* para geradores de indução auto-excitado encontra-se em (KUMAR et al., 2010).

Um novo controlador de tensão para um gerador de indução trifásico auto-excitado é apresentado por (SPITSA et al., 2006), o controlador atua por meio de um inversor PWM que está ligado em paralelo com o gerador de indução e mantém a amplitude da tensão constante nos terminais do gerador. Além da regulação de tensão, o controlador elimina com sucesso distorções harmônicas causadas por cargas não-lineares. Ao contrário de controladores concebidos para um tal sistema, a controlador não se baseia por histerese, o modelo basea-se na solução por algoritmo genético, utilizando frequências de ressonância ajustáveis usando otimização genética combinada com design Hinfin (metodologia de projeto na moderna teoria de controle).

(PHUMIPHAK & CHAT-UTHAI, 2009) propõem determinar os valores ideais dos capacitores em shunt e em série (compensação série) pela técnica de algoritmo genético para o gerador de indução trifásico auto-excitado, obtendo uma regulação de tensão aceitável conforme variação da carga indutiva. Outro trabalho desenvolvido por (HASHEMNIA et al., 2010) utiliza o método da admitância nodal para compensação série, apresentando um bom desempenho em regime permanente para o gerador de indução trifásico auto-excitado.

Em (MURTHY & AHUJA, 2010) a solução dada é retificando a tensão gerada por meio de um conversor *BOOST DC-DC* e por meio de um conversor *CC-CA*, a tensão de carga é regulada independentemente da velocidade do rotor e de cargas variáveis, o esquema de controle não requer qualquer informação da posição e velocidade do rotor, tornando desnecessário sensores mecânicos, reduzindo custos. A estratégia de controle proposto tem uma boa regulação da tensão *AC* em todas as cargas e sem muitos problemas com harmônicas. Uma solução proposta combinando controle de espaço vetorial com controle de histerese é dado por (SEPSI & JARDAN, 2012), a modelagem do sistema são baseadas em análises teóricas e técnicas de simulação, quanto ao esquema de controle proposto mostrou-se simétricas as tensões e correntes trifásicas, boa regulação e distorção harmônica de tensão reduzida. Outros trabalhos empregando eletrônica de potência para controle de tensão e frequência, são apresentados por (TRAPP et al., 2011), (JAYARAMAIAH & FERNANDAS, 2004), (CHILIPPI et al., 2014) e (ORS, 2009).

Outra forma para melhorar a regulação de tensão do gerador de indução auto-excitado é por meio de chaveamento de banco de capacitores em paralelo, desse modo, um valor fixo de banco é definido para manter a tensão terminal em vazio, e quando a carga aumentar, é realizado o chaveamento de banco de capacitores em paralelo com o gerador, através de contadores, relés ou chaves semi condutoras, suprimindo a demanda de reativo no circuito. É um método simples desde que sejam permitidas operações com valores toleráveis da amplitude de tensão, já que o chaveamento possui valores discretos do banco de capacitores, no entanto, este método não controla a frequência, que será variável, a medida que a carga aumenta, deve-se portanto mantê-la constante, por meio de um regulador de velocidade, e ainda, com um conversor composto por um retificador e um inversor *PWM* (WU, 2010).

A dificuldade de controlar a tensão e a frequência sob diferentes condições de carga para o gerador de indução trifásico auto-excitado desmotivou seu uso no século passado, no entanto, os recentes avanços na eletrônica de potência possibilitou regular tensão e frequência

de muitas maneiras diferentes de forma satisfatória. Isto resultou num aumento interesse nos geradores de indução, particularmente em pequenas hidrelétricas e geração eólica. (RAJAKARUNA & BONERT, 1993).

1.4 – Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos e 2 apêndices.

O presente capítulo apresenta a introdução ao assunto e a motivação para realizar estudo teórico-experimental a ser desenvolvido sobre gerador de indução operando juntamente com gerador síncrono de polos salientes em regime permanente, uma revisão bibliográfica detalhada foi realizada, contemplando desse modo o estado da arte.

O capítulo 2, trata dos conceitos básicos e elementares, retirados da bibliográfica clássica de máquinas elétricas, para compreensão do funcionamento da máquina síncrona de polos salientes e para máquina de indução trifásica, são mostradas características construtivas dessas máquinas, perdas, potência gerada e rendimento. Um equacionamento simplificado pelo circuito equivalente da máquina de indução é apresentado neste capítulo.

O capítulo 3, expõe o desenvolvimento do equacionamento em “abc” para “dq0”, que pode representar o comportamento elétrico e eletromecânico da máquina síncrona de polos salientes e indução trifásica. Para máquina síncrona de polos salientes a modelagem matemática considerada é para resultados em valores por unidade (PU), e para máquina de indução trifásica resultados em valores pelo sistema internacional de unidades (SI).

O capítulo 4, mostra a análise dos resultados simulados e experimentais para 3 situações de carga, por fim é realizado um comparativo teórico-experimental da potência ativa, reativa, tensão, corrente, fator de potência, torque eletromagnético e velocidade de operação de cada gerador.

O capítulo 5, apresenta as conclusões do funcionamento do gerador de indução operando juntamente com o gerador síncrono de polos salientes para aplicação em geração isolada e indica algumas sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A, é mostrado um estudo para dimensionamento do banco de capacitores a ser colocado paralelamente com o gerador de indução, analisa-se 3 metodologias de dimensionamento para auto-excitação apontando quais delas são eficientes para carga nominal.

No apêndice B, abordagens sobre conteúdo harmônico são consideradas, uma vez que, faz-se necessário encontrar os valores verdadeiros (*true*) de tensão, corrente, potência e fator de potência contemplando a presença da distorção harmônica.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS: MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES E INDUÇÃO

2.1 – Máquina síncrona de polos salientes

Máquinas síncronas são predominantemente utilizadas como geradores, produzindo uma grande parcela da energia elétrica consumida no mundo. As necessidades de consumo de energia elétrica, na indústria, estabelecimentos comerciais e consumidores individuais são praticamente produzidas pela geração síncrona, sabe-se que podem ser operados facilmente em paralelo, fato é que em países industrializados existem centenas deles conectados por linhas de transmissão e fornecem energia elétrica a cargas espalhadas por áreas por milhares de quilômetros, mas também podem operar isoladamente, alimentando cargas para áreas de difícil acesso, e também como unidade emergencial em uma indústria, hospital, prédios comerciais, etc (FITZGERALD et al., 2006). Uma das características importantes da máquina síncrona é que o seu fator de potência pode ser controlado pela corrente de campo. Em outras palavras, o fator de potência da corrente do estator pode ser controlada alterando o campo de excitação. No entanto, o comportamento de um gerador síncrono conectado a um barramento infinito é muito diferente de um gerador síncrono de polos salientes operando isoladamente (GÖNEN, 2012).

2.1.1 – Características construtivas

Quando um gerador síncrono é conectado ao barramento infinito, a tensão e frequência nos terminais da armadura são valores fixos de acordo com o sistema, assim as correntes de armadura irão produzir uma componente do campo magnético de entreferro, que gira na velocidade síncrona em função da frequência do sistema (FITZGERALD et al., 2006).

$$n_s = \left(\frac{120}{P} \right) f_e \quad (2.1.1)$$

Onde,

n_s - Velocidade síncrona [rpm];

P - Número de polos;

f_e - Frequência do sistema [Hz].

A Figura 2.1.1 e 2.1.2 mostram os geradores síncronos de polos salientes presentes na Usina Hidrelétrica de Emborcação e a representação construtiva desses geradores, respectivamente.



Figura 2.1.1 – Geradores síncronos de polos salientes, Usina Hidrelétrica de Emborcação.

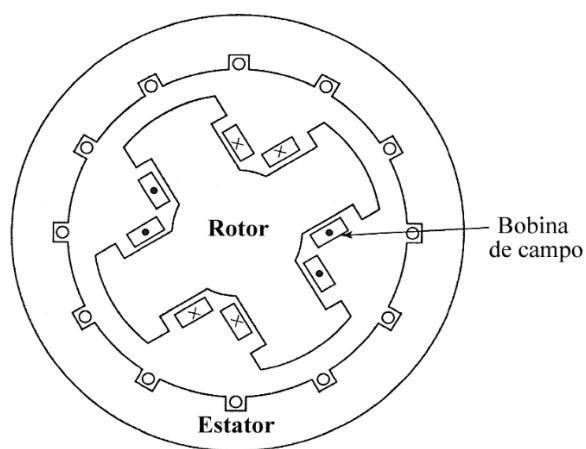


Figura 2.1.2 – Representação da máquina síncrona de polos salientes.

Fonte:(FITZGERALD et al., 2006).

O rotor de geradores de polos salientes, conforme pode ser visto pela Figura 2.1.3, são feitos por chapas laminadas de material magnético, que são justapostas, formando os polos magnéticos, e um enrolamento que é excitado com corrente contínua, é essa excitação que produz campo magnético. Vale lembrar que nos rotores de polos salientes, os enrolamentos de campo são alojados nas sapatas polares, ao contrário de máquinas com polos lisos, onde o enrolamento de campo é montado nas ranhuras da própria superfície do rotor (BORBA, 2011). Os rotores de polos salientes são constituídos de uma certa descontinuidade no entreferro ao longa da periferia do núcleo de ferro, a existência das regiões interpolares que possuem o entreferro significativo, mostra visivelmente a saliência dos polos (WEG, 2012). Os rotores das máquinas de polos salientes são fabricados de 4 polos ou mais, com maior número de polos são utilizados para operar em baixa rotação, um exemplo é em usinas hidrelétricas (FITZGERALD et al., 2006). Cabe, portanto a nível de projeto saber qual gerador com determinado números de polos é a melhor escolha.

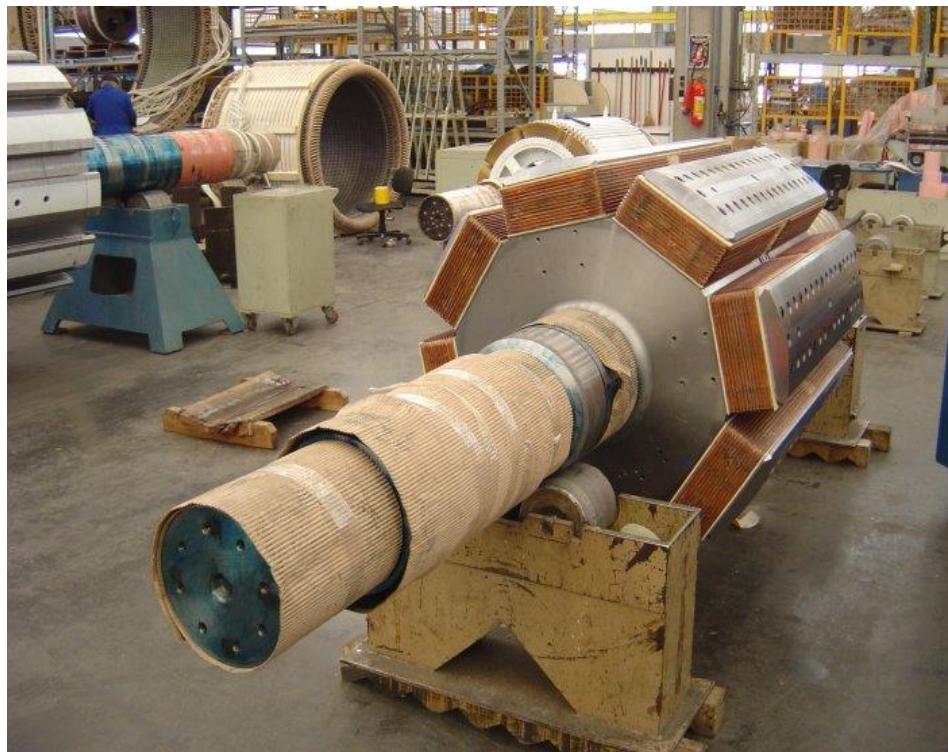


Figura 2.1.3 – Rotor de polos salientes.
Fonte: WEG.

O estator é composto do mesmo material do rotor, que estão arranjados para formação de ranhuras axiais, nesta forma pode-se colocar as bobinas que constituem o enrolamento estatórico (BORBA, 2011). É no estator que são induzidas as tensões alternadas, devido ao movimento do rotor com seu campo magnético contínuo (KOSOW, 1998). As características magnéticas do estator que são de alta permeabilidade, possibilita um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, dessa forma reduzindo o fluxo disperso (FITZGERALD et al., 2006). A Figura 2.1.4 mostra a construção do estator na carcaça da máquina síncrona.

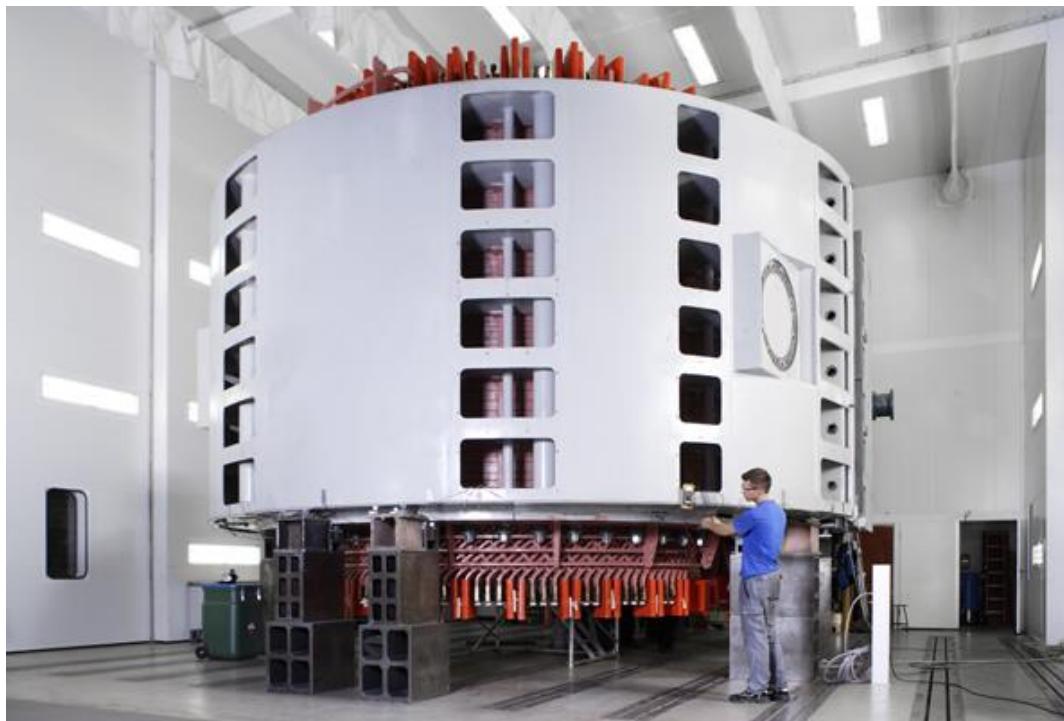


Figura 2.1.4 – Construção do estator de um gerador síncrono de médio porte.

Fonte: VOITH.

A carcaça, protege e apoia a máquina, é nela que os pacotes de chapas e enrolamentos são inseridos. São construídas carcaças horizontais e verticais, e com a necessidade de proteção conforme o ambiente, composta em chapas de aço soldada, formando um cilindro rígido e robusto para a ser a base da máquina síncrona (BORBA, 2011).

As escovas estacionárias de carvão têm por função conduzir a corrente contínua quando o enrolamento de campo é excitado, é por meio delas que ocorre o contato com os anéis coletores ou também conhecidos como anéis deslizantes girantes (FITZGERALD et al., 2006).

O enrolamento amortecedor, cuja função é amortecer as oscilações transitórias, como uma variação brusca de carga, alterações súbitas de tensão e variações de velocidade, mantendo

uma estabilidade melhor na máquina, vale lembrar que apenas na ocorrência de transitórios é que surge uma tensão induzida neste enrolamento, e consequentemente de corrente (JORDÃO, 2013). Em motores síncronos pode desenvolver o papel como dispositivo de arranque, similar a atuação do enrolamento em gaiola de esquilo em motores de indução (BORBA, 2011).

A característica construtiva mais importante e afins prático é possuir um enrolamento de campo único de potência menor no rotor, e o enrolamento de maior potência usualmente polifásico no estator (FITZGERALD et al., 2006).

2.1.2 – Rendimento

As perdas nas máquinas síncronas ocasionam a redução do rendimento, influenciam diretamente quanto ao seu custo de funcionamento (JORDÃO, 2013), o aquecimento ligado a potência de saída nominal sem danificar o isolamento da máquina, as principais perdas são mecânicas, ôhmicas, ferro e suplementares. O rendimento é alto quando a máquina opera em plena carga e menor com carregamento baixo (FITZGERALD et al., 2006). O rendimento é dado pela equação (2.1.2).

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de saída} + \text{Perdas}} = \frac{\text{Potência de Entrada} - \text{Perdas}}{\text{Potência de Entrada}} \quad (2.1.2)$$

2.1.3 – Perdas mecânicas

As perdas mecânicas são devidas ao atrito nas escovas e mancais, ventilação e na potência utilizada para refrigerar a máquina (sistema de ventilação, sendo ventiladores próprios ou externos (retirando a potência para forçar o ar para dentro da máquina por meio dos condutos externos). Perdas por atritos e ventilação são medidas pela potência de entrada quando a máquina síncrona estiver na velocidade adequada, sem a carga e excitação (ALVES, 2011). Geralmente as perdas mecânicas são calculadas com as perdas no núcleo (FITZGERALD et al., 2006).

2.1.4 – Perdas ôhmicas

Perdas pelo efeito Joule ou RI^2 , relacionada as resistências dos enrolamentos e das condições de fluxo, a resistência varia de acordo com a temperatura, elevação na temperatura

dos condutores implica em maior resistência e consequentemente pela relação joulica, maiores perdas (FITZGERALD et al., 2006).

2.1.5 – Perdas no ferro

Segundo (FITZGERALD et al., 2006) são as perdas pelas correntes de Foucault e histerese, perdas por correntes parasitas existem devido a alteração de densidades de fluxo no ferro da armadura quando somente a excitação da máquina está sendo alimentada, essas perdas podem ser calculadas pela expressão (2.1.3).

$$P_p = K_e (B_{máx} f \delta)^2 \quad (2.1.3)$$

Onde,

K_e - Dependente das unidades usadas, do volume e resistividade do ferro;

$B_{máx}$ - Densidade de fluxo máxima;

f - Frequência;

δ - Espessura das chapas.

Quanto as perdas por histerese, é usualmente calculada pela equação (2.1.4) deduzida por procedimentos experimentais.

$$P_h = K_h (B_{máx}^n f)^{\frac{1}{n}} \quad (2.1.4)$$

Onde,

K_h - Dependente das características e volume do ferro;

n - Variação do valor entre 1,5 a 2,5.

Em (2.1.3) e (2.1.4), a frequência e densidade de fluxo podem ser trocadas pela velocidade e tensão, respectivamente. Porém feito um ajuste pelas constantes de proporcionalidade K_e e K_h .

Quando a máquina estiver com carga, as perdas no núcleo se elevam consideravelmente devido as harmônicas de FMM levarem as perdas no ferro (ALVES, 2011).

2.1.6 – Perdas suplementares

Essas perdas são determinadas por ensaios é de difícil precisão, elas são originadas pela distribuição não uniforme de corrente no cobre e por perdas adicionais no núcleo, que é o efeito da distorção do fluxo magnético no ferro quando a máquina estiver com carga (correntes de carga) (FITZGERALD et al., 2006).

2.1.7 – Vida útil

A vida útil de um gerador síncrono está relacionado com sua ordem mecânica e térmica, quanto a primeira ordem é a velocidade máxima que o gerador pode suportar sem comprometer estruturalmente o rotor e mancais, quanto a segunda ordem, a temperatura, a corrente que nos enrolamentos não pode ultrapassar seu valor máximo projetado para que não danifique o isolamento e consequentemente a redução da vida útil, isso se deve pelo fato que a temperatura de funcionamento da máquina síncrona estar ligada com o tempo estimado de durabilidade do equipamento. A equação (2.1.5) relacionam duas constantes A e B, T que é a temperatura, o tempo estimado de vida útil é pela taxa de deterioração do isolamento, conforme esta equação uma curva exponencial resulta no tempo de vida do gerador (FITZGERALD et al., 2006).

$$\text{Vida útil} = A e^{B/T} \quad (2.1.5)$$

Outra forma grosseira de se avaliar a vida útil dos isoladores é pela regra dos 10°C, significa que a cada aumento da temperatura em 10°C a vida útil cai em torno de 50%.

2.2 – Máquina de indução trifásica

Máquinas de indução trifásica são geralmente utilizadas como motores, produzindo força mecânica a partir de potência elétrica, são equipamentos de relação peso/potência baixo, comparado a outras máquinas, robustez e característica simples de construção. Com a demanda

por energia em constante aumento devido ao crescimento populacional mundial, um número significativo de pessoas se afastaram de grandes concentrações urbanas, levando uma crescente necessidade de geração de energia em comunidades isoladas, onde não existe disponível nenhuma rede de distribuição próxima, a partir daí, surgiu o conceito de geração distribuída para pequenas redes isoladas, então em discussões de custo-benefício, a máquina de indução passou a ser vista, como um alternador, devido seu pequeno tamanho por kW gerado, passando a ser utilizado em velocidades constantes em centrais hidrelétricas, térmicas e grupos diesel, para velocidades variáveis utilizado na produção da energia dos ventos, graças ao avanço da eletrônica de potência (SIMÕES & FARRET, 2015).

Os geradores de gaiola de esquilo e bobinado, passaram a ser aplicados geralmente para velocidades constantes e variáveis, respectivamente. Aqui o estudo limita-se o uso da máquina assíncrona de rotor de gaiola de esquilo como gerador.

2.2.1 – Características construtivas

As máquinas de indução trifásica possuem, um enrolamento de campo e de armadura, a fonte de energia é fornecida pelo estator, sendo que por indução, assim como em um transformador, o rotor recebe energia, um campo magnético é gerado no entreferro, cujo campo gira na velocidade síncrona, considerando a velocidade do rotor que apresenta o mesmo sentido de rotação do campo girante do estator, a diferença entre estas velocidades é denominada escorregamento do rotor, e o escorregamento fracionário dado pela equação (2.2.2) (FITZGERALD et al., 2006).

$$s = n_s - n \quad (2.2.1)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2.2)$$

Onde,

s - Escorregamento;

n_s - Velocidade síncrona [rpm];

n - Velocidade do rotor [rpm].

A velocidade do rotor e a velocidade angular do rotor são dadas pelas equações (2.2.3) e (2.2.4), respectivamente. A velocidade do rotor, não pode igualar a velocidade síncrona, se isto ocorrer os condutores do rotor estariam estacionários em relação ao campo do estator, dessa forma, corrente alguma seria induzida no enrolamento de campo e nenhum conjugado seria desenvolvido (FITZGERALD et al., 2006).

$$n = (1 - s)n_s \quad (2.2.3)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_s \quad (2.2.4)$$

Em que,

ω_m - Velocidade angular mecânica [rad/s];

ω_s - Velocidade síncrona angular [rad/s].

A diferença entre o movimento entre o fluxo do estator e os condutores do rotor, induzem tensões de frequência de escorregamento no rotor. O comportamento elétrico de uma máquina de indução é equivalente de um transformador, porém com característica adicional da transformação produzida pelo movimento relativo entre os enrolamentos de armadura e de campo (FITZGERALD et al., 2006).

$$f_r = sf_e \quad (2.2.5)$$

Onde,

f_r - Frequência de escorregamento, no rotor [Hz];

f_e - Frequência elétrica [Hz].

A máquina de indução trifásica de gaiola de esquilo, é composta por um circuito magnético estático, que é formada de chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas uma da outra, chamado estator, este é alocado na carcaça, sendo esta construída de um material resistente a corrosão tais como ferro fundido, aço ou alumínio injetado. As bobinas são inseridas nas cavas abertas do estator que são alimentadas por energia elétrica alternada. O rotor é formando por um núcleo ferromagnético laminado, onde são construídos por enrolamentos

paralelos e curto circuitados em sua extremidade, característica do rotor de gaiola de esquilo, o rotor, enrolamento girante, é apoiado dentro do estator com uma distância mínima de entreferro, sendo o mínimo possível visando reduzir a corrente em vazio, diminuindo as perdas, porém provoca o aumento do fator de potência à vazio (FRANCHI, 2009). As Figura 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 mostram a estrutura construtiva da máquina de indução de gaiola de esquilo, seu enrolamento estatórico e rotórico, respectivamente.

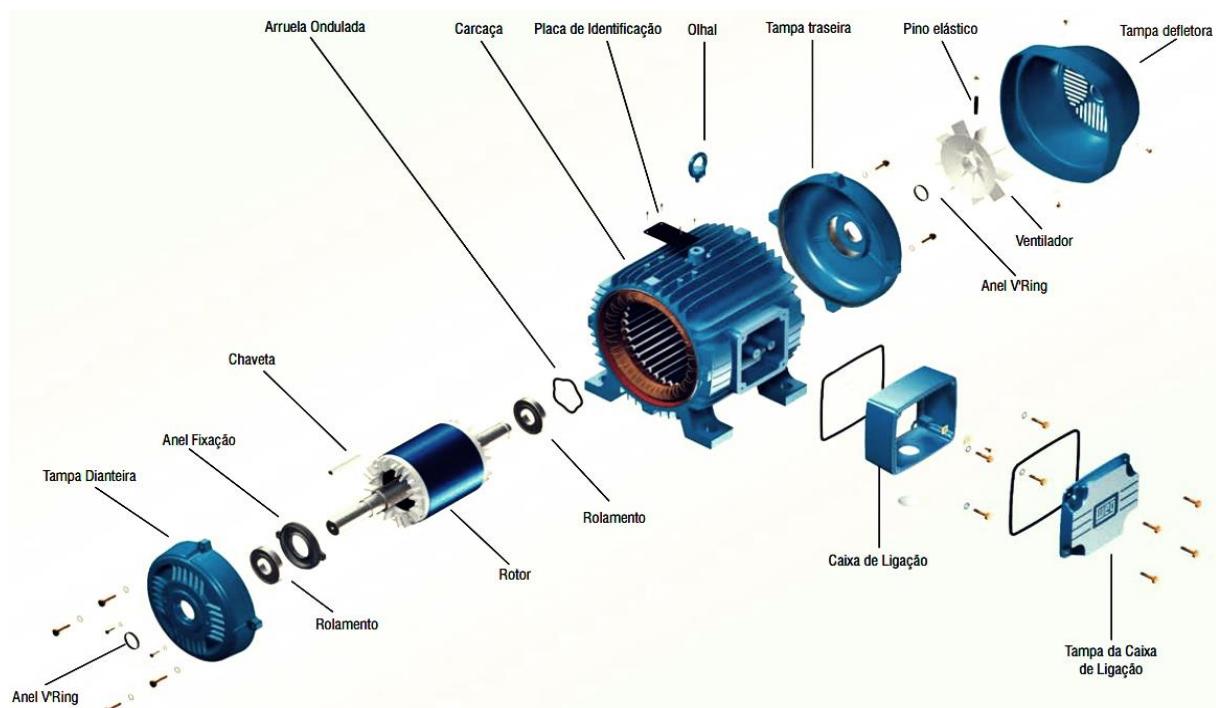


Figura 2.2.1 – Estrutura física da máquina de indução trifásica.
Fonte: WEG.

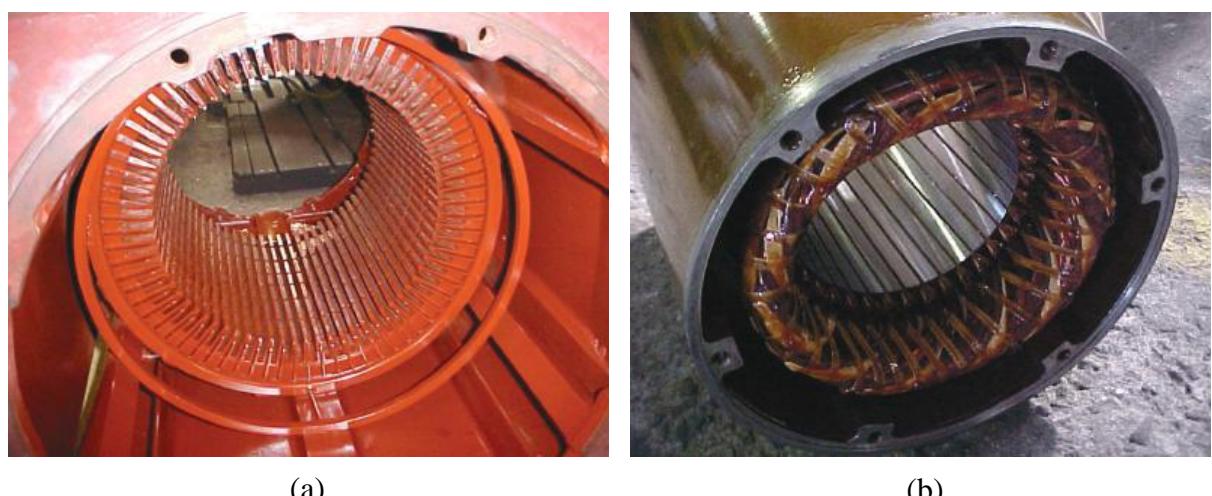


Figura 2.2.2 – Estator: (a) Enrolamento sem bobinas; (b) Enrolamento com bobinas.
Fonte: (SIMÕES & FARRET, 2015).



Figura 2.2.3 – Rotor de gaiola de esquilo de uma máquina de indução.
Fonte: (SIMÕES & FARRET, 2015).

2.2.2 – Representação clássica da máquina de indução trifásica

O modelo clássico da máquina de indução trifásica é mostrado pela Figura 2.2.4, esta representação contempla apenas regime senoidal equilibrado.

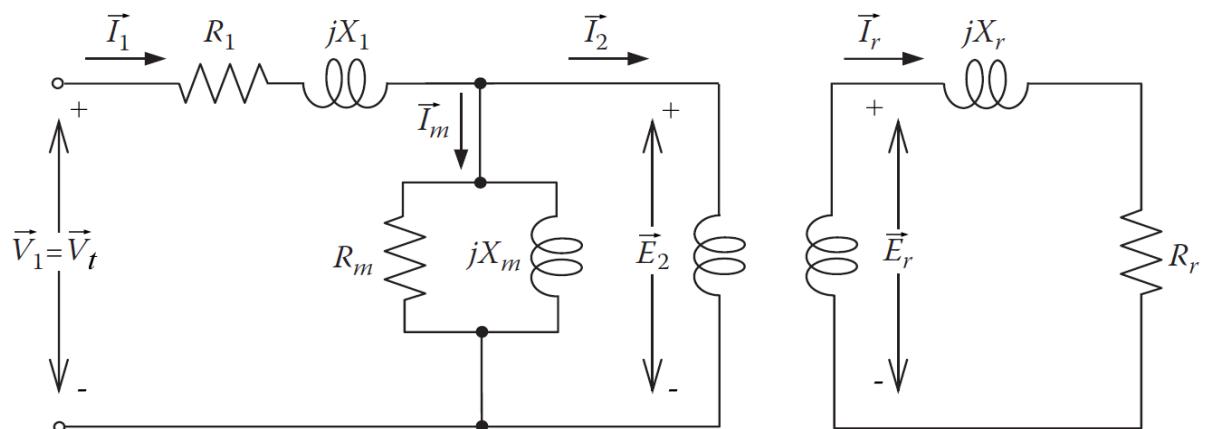


Figura 2.2.4 – Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução polifásica.
Fonte: Adaptado de (SIMÕES & FARRET, 2015).

Na imagem,

R_1 - Resistência do estator;

X_1 - Reatância de dispersão do estator;

R_m - Resistência de perdas no núcleo;

- X_m - Reatância de magnetização;
- R_r - Resistência do rotor;
- X_r - Reatância de dispersão do rotor;
- V_t - Tensão terminal;
- E_2 - Tensão interna do estator;
- E_r - Tensão secundária ou tensão do rotor.

O circuito equivalente do gerador de indução, representado por fase, é equivalente de um transformador, a diferença singular é que em um gerador de indução, a tensão do rotor está sujeita a uma frequência variável, tornando E_r , R_r e X_r também variável. Tudo depende do escorregamento, isto é, pela diferença entre a velocidade do rotor e a velocidade de rotação do campo girante magnético do estator. Com a rotação do rotor da máquina assíncrona abaixo da velocidade síncrona, comporta-se como motor, se a velocidade do rotor for superior a síncrona a máquina funciona como gerador. Quando a velocidade mecânica se iguala a velocidade síncrona, a menor tensão induzida no rotor acontece neste momento, a partir do aumento do escorregamento negativo, maior será a tensão induzida no rotor, respeitando a característica da curva de conjugado *versus* escorregamento fracionário, conforme mostrado pela figura abaixo (SIMÕES & FARRET, 2015).

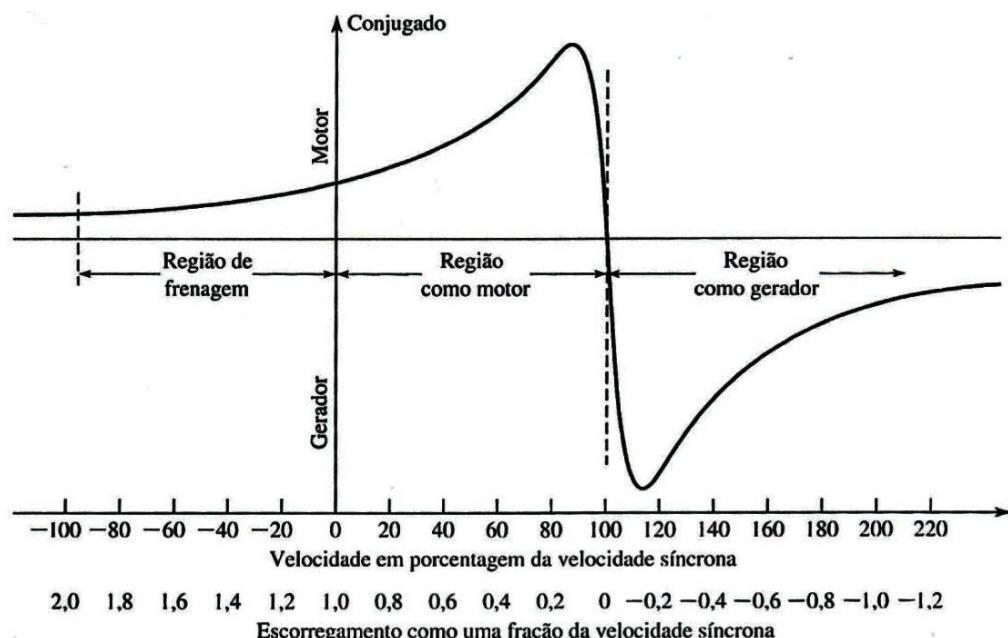


Figura 2.2.5 – Curva de conjugado x escorregamento da máquina assíncrona.

Fonte: (FITZGERALD et al., 2006).

Sabe-se que o enrolamento secundário de um transformador, pode ser referido ao enrolamento primário, tornando-o circuito em um único modelo equivalente primário, pela relação de espiras do primário e secundário, analogamente, em máquina de indução, o mesmo pode ser feito. Segundo (FITZGERALD et al., 2006), sendo o rotor de gaiola de esquilo, curto-circuitado, a impedância vista pela tensão induzida é a impedância de curto-círcuito do rotor. O circuito equivalente do rotor é dado pela equação (2.2.6), a transformação da impedância de dispersão do rotor para o estator é dado por (2.2.7).

$$Z_2 = \frac{\vec{E}_2}{\vec{I}_2} \quad (2.2.6)$$

$$Z_{2s} = \frac{\vec{E}_{2s}}{\vec{I}_{2s}} = N_{ef}^2 \left(\frac{\vec{E}_r}{\vec{I}_r} \right) = N_{ef}^2 Z_r \quad (2.2.7)$$

Em que,

N_{ef} - Relação de espiras efetivas entre o enrolamento do estator e o enrolamento do rotor real;

\vec{E}_{2s} - Tensão induzida pelo fluxo de entreferro resultante no rotor equivalente;

\vec{I}_{2s} - Corrente induzida;

O subscrito s, indica grandeza referida do rotor ao estator.

Quanto as tensões e correntes do rotor real, a transformação a partir do número de espiras deve ser conhecida, porém para estudo simplificado da máquina de indução, envolvendo mais questões de perdas, não há necessidade dessa transformação real, e sim a simplificação pela transformação baseada no rotor equivalente, podendo representar sem nenhum problema, tanto máquinas assíncronas de rotores bobinados e de gaiola de esquilo. Considerando o escorregamento afim de substituir as variáveis do rotor real, as tensões e correntes na base da frequência de escorregamento, considerando um rotor equivalente estacionário, cujas tensões e correntes devem estar na frequência do estator, a impedância de dispersão no rotor é agora escrita na frequência de escorregamento, por (2.2.8).

$$Z_{2s} = \frac{\vec{E}_{2s}}{\vec{I}_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (2.2.8)$$

Onde,

- R_2 - Resistência de dispersão do rotor referida ao estator;
- sX_2 - Resistência de dispersão do rotor referida ao estator, na frequência de escorregamento.

O circuito equivalente dado em (2.2.8) é representado pela Figura 2.2.6, que é o circuito equivalente do rotor visto, na frequência de escorregamento. Como a frequência do rotor real é expressa por (2.2.5), o mesmo é feito para a reatância de dispersão do rotor.

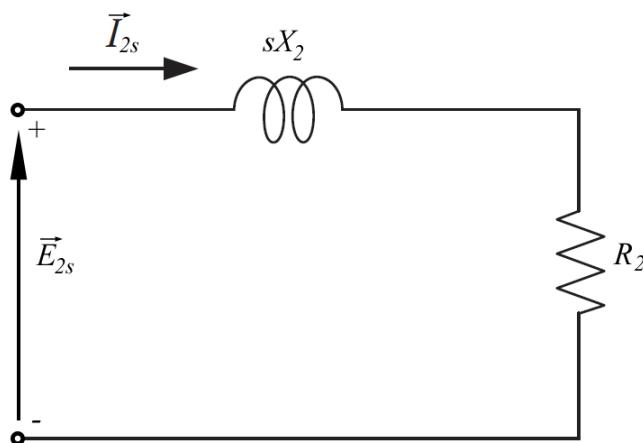


Figura 2.2.6 - Circuito equivalente do rotor.

A onda da FMM produzida no entreferro pelos efeitos combinados da corrente do estator \vec{I}_1 , e da corrente de carga \vec{I}_2 , pode ser expressa pela corrente de estator e de rotor equivalente \vec{I}_{2s} , pois estas correntes são idênticas em magnitude e fase. Em magnitude devido a corrente de um rotor equivalente possuir o mesmo número de espiras por fase do estator, em fase por causa da FFM resultante de entreferro ser a soma fasorial da corrente do estator e rotor, real ou equivalente, assim define-se (2.2.9).

$$\vec{I}_{2s} = \vec{I}_2 \quad (2.2.9)$$

Considerando que onda de fluxo resultante induz na frequência de escorregamento, a FEM no rotor referido \vec{E}_{2s} , e induz também a FCEM no estator \vec{E}_2 . Sabe-se que se não fosse pelo escorregamento, estas tensões teriam o mesmo valor devido o rotor referido ter o mesmo número de espiras por fase do enrolamento do estator, fica, portanto, que a velocidade da onda

de fluxo em relação ao rotor é s vezes a sua velocidade relacionada ao estator, podendo ser a partir desta premissa, escrita como:

$$E_{2s} = sE_2 \quad (2.2.10)$$

Como o ângulo de fase entre cada tensão descrita em (2.2.10), e a onda de fluxo resultante é de 90° , estas duas tensões são iguais em fase na respectiva frequência elétrica, dessa forma tem-se (2.2.11).

$$\vec{E}_{2s} = s\vec{E}_2 \quad (2.2.11)$$

Dividindo a expressão (2.2.11) por (2.2.9) e substituindo em (2.2.8), obtém-se (2.2.12).

$$Z_{2s} = \frac{\vec{E}_{2s}}{\vec{I}_{2s}} = \frac{s\vec{E}_2}{\vec{I}_2} = R_2 + jsX_2 \quad (2.2.12)$$

Fazendo a divisão em (2.2.12) pelo escorregamento, escreve-se a relação final da impedância do rotor estacionário por (2.2.13).

$$Z_{2s} = \frac{\vec{E}_{2s}}{\vec{I}_{2s}} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2.2.13)$$

Assim o circuito equivalente monofásico é representado pela Figura 2.2.7, a carga no eixo e a própria resistência do rotor são expressas pela resistência refletida R_2 / s , função do escorregamento, isto posto, da carga mecânica. Note que as tensões e corrente do rotor são refletidas no estator, desse modo, a frequência do rotor também é alterada para frequência do estator. Todas as variáveis elétricas do rotor, quando vistas a partir do estator, são agora variáveis elétricas do estator, em consequência de o enrolamento do estator, ver-se deslocando na velocidade síncrona as ondas de FMM e fluxo.

Em regime permanente, por meio do circuito equivalente representado pela Figura 2.2.7, pode-se calcular potência e perdas na máquina de indução polifásica de acordo com o torque exercido no eixo, para condição geradora e motora.

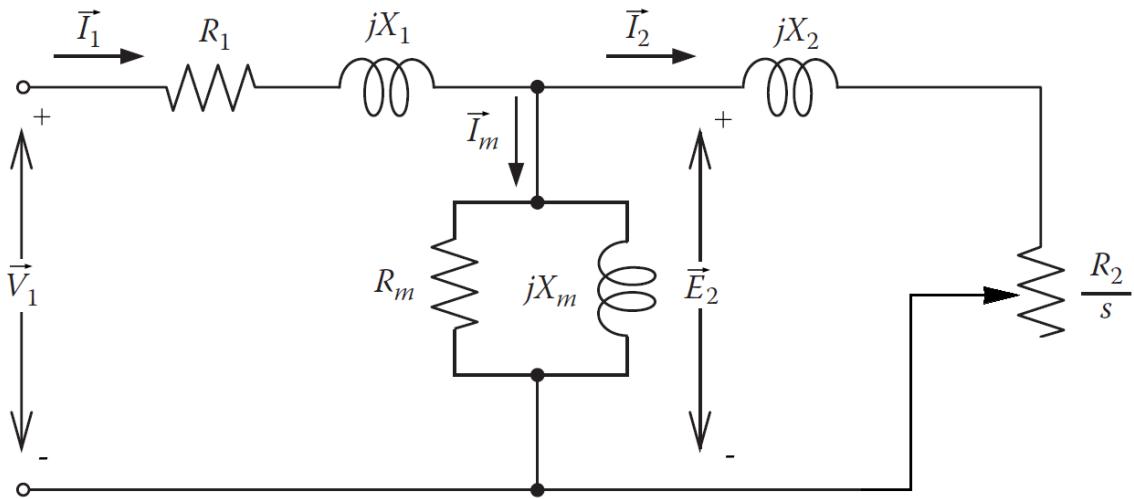


Figura 2.2.7 – Circuito equivalente monofásico da máquina de indução.
Fonte: Adaptado de (SIMÕES & FARRET, 2015).

Pelo circuito equivalente para motor, a potência total transferida através do entreferro desde o estator é calculada por (2.2.14).

$$P_g = 3I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \quad (2.2.14)$$

A perdas no enrolamento do rotor é dada pela equação (2.2.15).

$$P_{rotor} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.2.15)$$

A potência eletromagnética desenvolvida no eixo do motor, ou a potência mecânica é calculada pela expressão (2.2.16).

$$P_{mec} = P_g - P_{rotor} = 3I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) - 3I_2^2 R_2 = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (2.2.16)$$

Comparando (2.2.16) com a equação (2.2.14), pode-se escrever (2.2.17) e (2.2.18).

$$P_{mec} = (1-s)P_g \quad (2.2.17)$$

$$P_{rotor} = sP_g \quad (2.2.18)$$

As perdas no ferro ou também chamadas perdas a vazio no núcleo são calculadas por (2.2.19).

$$P_{núcleo} = \frac{3E_2^2}{R_m} \quad (2.2.19)$$

As perdas rotacionais (P_{av}) que envolvem as perdas por atrito e ventilação, são encontradas pelo ensaio a vazio, outros parâmetros do circuito equivalente podem ser calculados por meio do ensaio de rotor bloqueado e vazio. Tais ensaios podem ser consultados na bibliografia clássica de máquinas de indução.

Segundo (SIMÕES & FARRET, 2015), as perdas por histerese e pelas correntes parasitas, estão incluídas nas perdas no ferro. As perdas no cobre do enrolamento do estator são calculadas pela equação (2.2.20).

$$P_{estator} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.2.20)$$

Para ação geradora, a potência trifásica transferida do rotor para o estator, através do entreferro pode ser obtida por (2.2.21).

$$P_g = \sqrt{3}V_l I_l \cos\phi + 3I_1^2 R_1 + \frac{3E_2^2}{R_m} \quad (2.2.21)$$

A potência mecânica convertida em eletricidade, para escorregamento negativo, pode ser calculada agora por (2.2.16). A potência de saída do gerador de indução é obtida por (2.2.23).

$$P_{saída} = P_{mec} - P_{totais} \quad (2.2.22)$$

$$P_{saída} = -3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) - 3I_1^2 R_1 - \frac{3E_2^2}{R_m} - 3I_2^2 R_2 - P_{av} \quad (2.2.23)$$

A eficiência do gerador de indução é alta, conforme pode-se deduzir da equação (2.2.24) de rendimento.

$$\eta = \frac{-3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) - 3I_1^2 R_1 - \frac{3E_2^2}{R_m} - 3I_2^2 R_2 - P_{av}}{-3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)} \quad (2.2.24)$$

2.3 – Considerações finais

O princípio básico de funcionamento da máquina síncrona de polos salientes e indução trifásica foi apresentado neste capítulo, buscando mostrar os conceitos elementares tais como, potência desenvolvida ou gerada, perdas e rendimento. O presente capítulo mostra equacionamentos simplificados e definições essenciais para compreensão de cada máquina enunciada, que são encontrados na literatura clássica de máquinas elétricas. Aspectos de operação em regime permanente da máquina de indução comportando como motor e gerador foram destacados no tópico de máquina de indução trifásica, já que usualmente, quando trata-se de geração de energia elétrica em velocidade constante, surge primeiramente em mente, a geração síncrona.

O capítulo seguinte trata do equacionamento de máquinas síncronas e assíncronas, a modelagem apresentada no capítulo 4 é desenvolvida pelas referências utilizadas para criação de cada máquina no Simulink®. A referência principal de todo equacionamento descrito é segundo (KRAUSE et al., 2013) e para valores em unidade por (KUNDUR, 1993).

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 – Máquina Síncrona de polos salientes

O comportamento elétrico e eletromecânico de grande parte das máquinas síncronas, podem ser representadas pelas equações da máquina síncrona de polos salientes, estas equações podem prever o desempenho de motores e geradores síncronos, diante de diversas situações. O rotor de uma máquina síncrona possui um enrolamento de campo, um ou mais enrolamentos amortecedores, e cada um destes enrolamentos, possuem diferentes características elétricas.

3.1.1 – Equações elétricas

Considere a Figura 3.1.1, que representa uma máquina síncrona de polos salientes, composta pelo enrolamento de armadura e o enrolamento de campo. O enrolamento de armadura é representado por N_s bobinas e sua resistência equivalente r_s (de cada fase). O enrolamento de campo possui N_f bobinas e sua resistência r_f . O enrolamento amortecedor é representado por 2 enrolamentos, ditos q_1 e q_2 . O enrolamento de eixo direto (d) é paralelo ao eixo magnético do enrolamento de campo e o enrolamento de eixo em quadratura (q), está adiantado de 90° do enrolamento de campo, em relação ao eixo positivo da rotação do rotor.

O enrolamentos q_1 e q_2 possuem N_{q1} e N_{q2} bobinas, com resistências r_{q1} e r_{q2} , respectivamente. Pelas leis de Ohm e Faraday, as equações do estator e rotor podem ser descritas por:

$$v_i = r_i i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (3.1.1)$$

Onde:

v_i - Tensão;

r_i - Resistência;

λ_i - Concatenamento total de fluxo.

Dessa forma as equações de tensão da máquina síncrona podem ser expressas em forma de matriz, em que “ T ” significa transposto de matriz.

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (3.1.2)$$

$$\mathbf{v}_{dqr} = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{dqr} + \frac{d\lambda_{dqr}}{dt} \quad (3.1.3)$$

$$(\mathbf{f}_{abc})^T = [f_a \ f_b \ f_c] \quad (3.1.4)$$

$$(\mathbf{f}_{dqr})^T = [f_{q1} \ f_{q2} \ f_{fd} \ f_d] \quad (3.1.5)$$

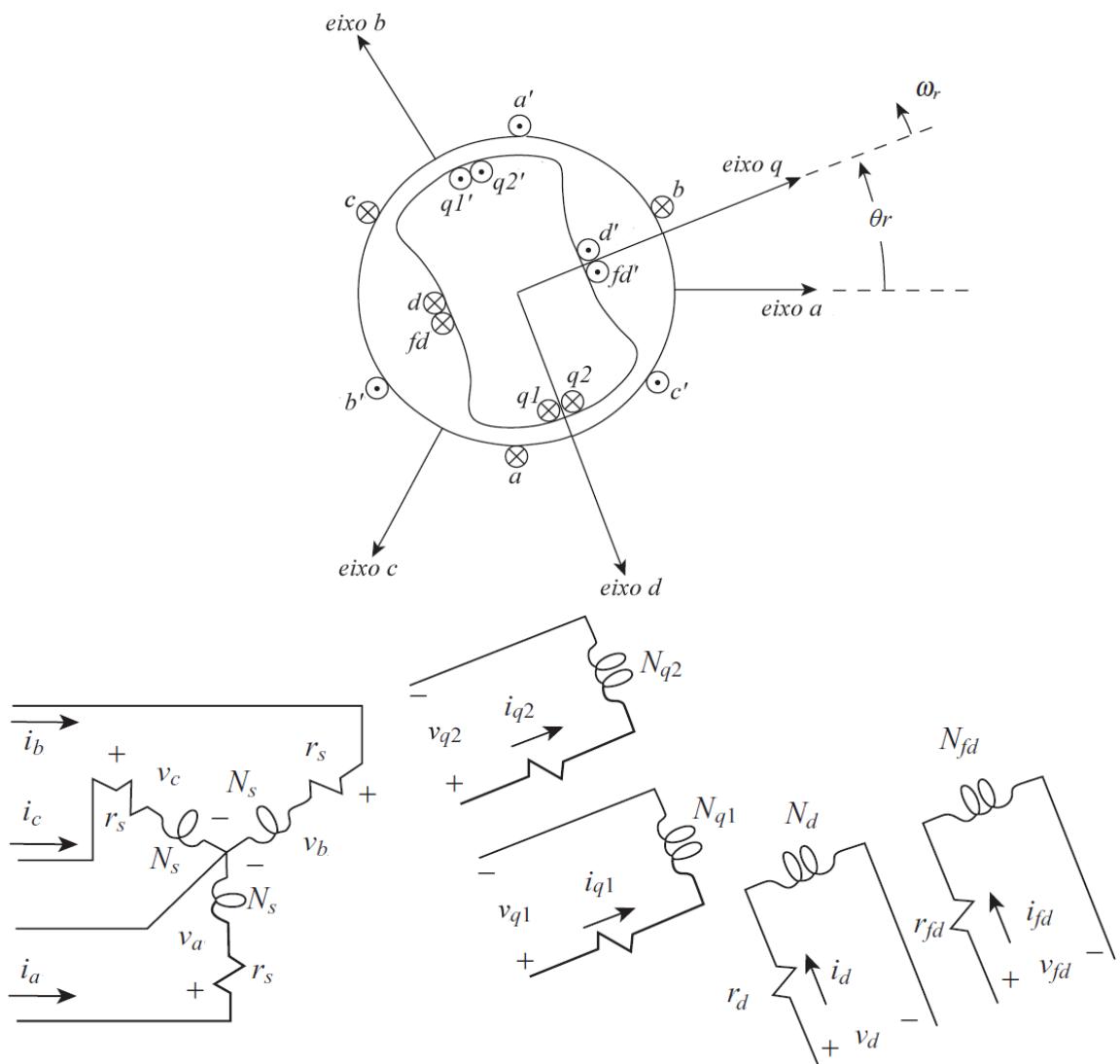


Figura 3.1.1 – Esquema representativo de eixos magnéticos e dos enrolamentos uma máquina síncrona de polos salientes ligado em estrela. Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

Os índices s e r denotam as variáveis associadas aos enrolamentos do estator e do rotor respectivamente. Sendo \mathbf{r}_s e \mathbf{r}_r matrizes diagonais indicadas por (3.1.6) e (3.1.7).

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (3.1.6)$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} r_{q1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{q2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{fd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_d \end{bmatrix} \quad (3.1.7)$$

As equações para os fluxos concatenados para a região magnética linear, tornam-se:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{dqr} \end{bmatrix} \quad (3.1.8)$$

Desconsiderando as indutâncias mutuas entre as bobinas do estator, as matrizes \mathbf{L}_s , \mathbf{L}_{sr} e \mathbf{L}_r são representadas por (3.1.9), (3.1.10) e (3.1.11). Sabendo que \mathbf{L}_s representa a matriz das indutâncias próprias dos enrolamentos do estator, \mathbf{L}_{sr} as indutâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e rotor, e \mathbf{L}_r as indutâncias dos enrolamentos do rotor.

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.1.9)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sq1} \cos \theta_r & L_{sq2} \cos \theta_r & L_{sf1} \sin \theta_r & L_{sd} \sin \theta_r \\ L_{sq1} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sq2} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sf1} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sd} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sq1} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sq2} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sf1} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sd} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.1.10)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lq1} + L_{mq1} & L_{q1q2} & 0 & 0 \\ L_{q1q2} & L_{lq2} + L_{mq2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lfd} + L_{mfd} & L_{fdd} \\ 0 & 0 & L_{fdd} & L_{ld} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (3.1.11)$$

Sendo,

$$L_A = \left(\frac{N_s}{P} \right)^2 \pi \mu_0 r l \alpha_1 \quad (3.1.12)$$

$$L_B = \frac{1}{2} \left(\frac{N_s}{P} \right)^2 \pi \mu_0 r l \alpha_2 \quad (3.1.13)$$

$$L_{sfd} = \left(\frac{N_s}{P} \right) \left(\frac{N_f}{P} \right) \pi \mu_0 r l (\alpha_1 + \alpha_2 / 2) \quad (3.1.14)$$

$$L_{mfd} = \left(\frac{N_f}{P} \right)^2 \pi \mu_0 r l (\alpha_1 + \alpha_2 / 2) \quad (3.1.15)$$

$$L_{q1} = L_{lq1} + L_{mq1} \quad (3.1.16)$$

$$L_{q2} = L_{lq2} + L_{mq2} \quad (3.1.17)$$

$$L_{fd} = L_{lfd} + L_{mfd} \quad (3.1.18)$$

$$L_d = L_{ld} + L_{md} \quad (3.1.19)$$

Onde,

P - Número de polos;

N_s - Número de espiras em uma bobina por fase do estator;

N_f - Número de espiras do enrolamento de campo por polo;

μ_0 - Permeabilidade magnética do ar;

α_1 e α_2 - Valores em que $1/(\alpha_1 + \alpha_2) = g_{mín}$ e $1/(\alpha_1 - \alpha_2) = g_{máx}$, sendo g o comprimento do entreferro;

r - Raio interno do estator;

l - Comprimento axial do estator ou do cilindro rotórico.

Em (3.1.9), $L_A > L_B$ e L_B é zero se for rotor cilíndrico ou de polos lisos. Os subscritos “ l ” e “ m ” denotam a indutância de dispersão e magnetização, respectivamente. E “ $sq1$ ”, “ $sq2$ ”, “ sfd ” e “ sd ”, referem-se as indutâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e os enrolamentos do rotor.

As indutâncias de magnetização são definidas por (3.1.20) e (3.1.21).

$$L_{mq} = \frac{3}{2}(L_A - L_B) \quad (3.1.20)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2}(L_A + L_B) \quad (3.1.21)$$

De posse de (3.1.20) e (3.1.21), pode-se expressar as indutâncias de (3.1.22) a (3.1.31).

$$L_{sq1} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_{qI}}{N_s} \right) L_{mq} \quad (3.1.22)$$

$$L_{sq2} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_{q2}}{N_s} \right) L_{mq} \quad (3.1.23)$$

$$L_{sfd} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_{fd}}{N_s} \right) L_{md} \quad (3.1.24)$$

$$L_{sd} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_d}{N_s} \right) L_{md} \quad (3.1.25)$$

$$L_{mq1} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_{q1}}{N_s} \right)^2 L_{mq} \quad (3.1.26)$$

$$L_{mq2} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_{q2}}{N_s} \right)^2 L_{mq} \quad (3.1.27)$$

$$L_{mfd} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_{fd}}{N_s} \right)^2 L_{md} \quad (3.1.28)$$

$$L_{md} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_d}{N_s} \right)^2 L_{md} \quad (3.1.29)$$

$$L_{q1q2} = \left(\frac{N_{q2}}{N_{q1}} \right) L_{mq1} = \left(\frac{N_{q1}}{N_{q2}} \right) L_{mq2} \quad (3.1.30)$$

$$L_{fd} = \left(\frac{N_d}{N_{fd}} \right) L_{mfd} = \left(\frac{N_{fd}}{N_d} \right) L_{md} \quad (3.1.31)$$

Referindo as variáveis que representam os enrolamentos do rotor para o estator, têm-se as relações pelas equações (3.1.32) a (3.1.34).

$$i'_j = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_j}{N_s} \right) i_j \quad (3.1.32)$$

$$v'_j = \left(\frac{N_s}{N_j} \right) v_j \quad (3.1.33)$$

$$\lambda'_j = \left(\frac{N_s}{N_j} \right) \lambda_j \quad (3.1.34)$$

Em que “ j ” denota os enrolamentos “ $q1$ ”, “ $q2$ ”, “ fd ” e “ d ”. Assim, a matriz de fluxo pode ser reescrita em (3.1.35).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda'_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}'_{dqr} \end{bmatrix} \quad (3.1.35)$$

Onde \mathbf{L}_s é expresso em (3.1.9), as matrizes \mathbf{L}'_{sr} e \mathbf{L}'_r são representadas por (3.1.36) e (3.1.37).

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq} \cos \theta_r & L_{mq} \cos \theta_r & L_{md} \sin \theta_r & L_{md} \sin \theta_r \\ L_{mq} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{mq} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{mq} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{mq} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (3.1.36)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L'_{lq1} + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L'_{lq2} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{fd} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L'_{ld} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (3.1.37)$$

As equações de tensão em termos das variáveis do rotor referidas ao estator são dadas pela matriz em (3.1.38).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}'_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s + \frac{d\mathbf{L}_s}{dt} & \frac{d\mathbf{L}'_{sr}}{dt} \\ \left(\frac{2}{3}\right) \frac{d(\mathbf{L}'_{sr})^T}{dt} & \mathbf{r}'_r + \frac{d\mathbf{L}'_r}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}'_{dqr} \end{bmatrix} \quad (3.1.38)$$

Sendo novamente “ j ” índice referente a “ $q1$ ”, “ $q2$ ”, “ fd ” e “ d ”. Têm-se as relações (3.1.39) e (3.1.40).

$$r'_j = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 r_j \quad (3.1.39)$$

$$L'_{lj} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 L_{lj} \quad (3.1.40)$$

3.1.2 – Equação de torque elétrico pelas variáveis da máquina

A energia armazenada no campo magnético da máquina síncrona pode ser escrito:

$$W_f = \frac{1}{2} (\mathbf{i}_{abc})^T \mathbf{L}_s \mathbf{i}_{abc} + (\mathbf{i}_{abc})^T \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}'_{dqr} + \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{3}{2}\right) (\mathbf{i}'_{dqr})^T \mathbf{L}'_r \mathbf{i}'_{dqr} \quad (3.1.41)$$

Como o sistema magnético da máquina é adotado como linear, e considerando a posição mecânica do rotor por (3.1.42), o torque elétrico em função da posição do rotor é dado por (3.1.43).

$$\theta_r = \left(\frac{P}{2}\right) \theta_m \quad (3.1.42)$$

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left\{ \frac{1}{2} (\mathbf{i}_{abc})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}_s] \mathbf{i}_{abc} + (\mathbf{i}_{abc})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_{dqr} \right\} \quad (3.1.43)$$

Expandindo-se (3.1.43), tem-se (3.1.44).

$$\begin{aligned}
 T_e = & \left(\frac{p}{2} \right) \left\{ \frac{(L_{md} - L_{mq})}{3} \left[\left(i_a^2 - \frac{1}{2} i_b^2 - \frac{1}{2} i_c^2 - i_a i_b - i_a i_c + 2 i_b i_c \right) \sin 2\theta_r \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b^2 - i_c^2 - 2 i_a i_b + 2 i_a i_c) \cos 2\theta_r \right] \right. \\
 & + L_{mq} (i'_{q1} + i'_{q2}) \left[\left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right) \sin \theta_r - \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \cos \theta_r \right] \\
 & \left. \left. - L_{md} (i'_{fd} + i'_d) \left[\left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right) \cos \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \sin \theta_r \right] \right\} \right. \tag{3.1.44}
 \end{aligned}$$

Para a expressão acima, o torque elétrico é positivo para motor, o torque e a velocidade do rotor estão relacionadas por (3.1.45).

$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d}{dt} \omega_r + T_L \tag{3.1.45}$$

Onde,

J - Momento de inércia do rotor [Kg.m²] ou [J.s²];

T_L - Torque mecânico ou de carga [N.m];

ω_r - Velocidade angular do rotor [rad/s].

3.1.3 – Equações de tensão em referência no rotor, transformada de Park

As equações apresentadas no início do capítulo, foram desenvolvidas por coordenadas de fase (abc), o que torna sua solução um tanto complexa, para facilitar a solução, R.H. Park criou um novo modelo visando uma solução analítica simplificada, o modelo consiste em 2 eixos coplanares ortogonais, anulando assim alguns coeficientes de indução mútua, e estes eixos devem rotacionar na mesma velocidade do rotor, permanecendo constante o ângulo entre o referencial em que está referido o estator e o referencial rotórico, fazendo que as indutâncias sejam independentes do ângulo de posição do rotor ou do movimento do rotor (KIMPARA, 2012). A Figura 3.1.2, mostra a relação das variáveis de eixos abc e dq0 para transformação de Park.

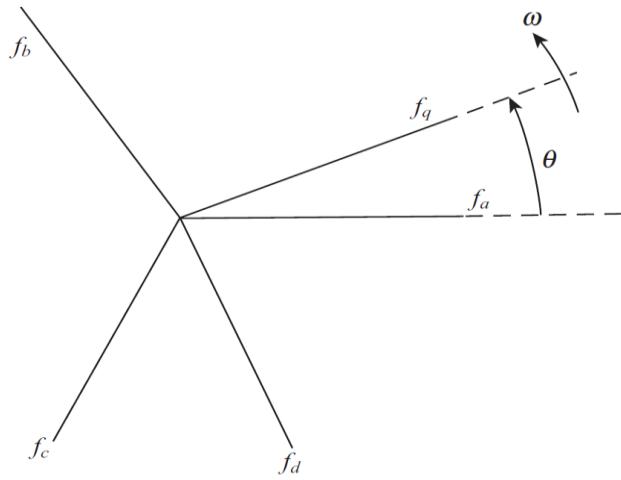


Figura 3.1.2 – Relação das variáveis abc e dq0. Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

A transformada de Park possibilitou uma transformação das variáveis no referencial do sistema abc associadas ao estator para o referencial dq fictício no rotor. A matriz da transformada de Park é dada pela equação (3.1.46).

$$\mathbf{f}_{dq0} = \mathbf{K}\mathbf{f}_{abc} \quad (3.1.46)$$

Onde,

$$(\mathbf{f}_{abc})^T = [f_a \quad f_b \quad f_c] \quad (3.1.47)$$

$$(\mathbf{f}_{dq0})^T = [f_d \quad f_q \quad f_0] \quad (3.1.48)$$

$$\mathbf{K} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.1.49)$$

$$\mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.50)$$

Em que \mathbf{f} representa o vetor a ser transformado tais como tensão, corrente, fluxo, dentre outros.

A velocidade arbitrária aqui definida por ω , é relacionada pela posição angular de referência girante por (3.1.51).

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3.1.51)$$

Assim, com as variáveis da máquina síncrona referenciadas ao rotor no novo sistema dq, pode-se escrever as seguintes equações abaixo. Lembre-se que o subscrito s, representa as variáveis do estator e r, as variáveis do rotor. Em (3.1.52), tem-se a equação de tensão para variáveis do estator e em (3.1.53), as variáveis do rotor que foram referidas ao estator no novo referencial dq. Assumindo a velocidade arbitrária igual a velocidade do rotor $\omega = \omega_r$ e definindo $\theta = \theta_r$, pode-se escrever as demais equações abaixo.

$$\mathbf{v}_{dq0s} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{dq0s} + \omega_r \boldsymbol{\lambda}_{dqs} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_{dq0s}}{dt} \quad (3.1.52)$$

$$\mathbf{v}'_{dqr} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{dqr} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}'_{dqr}}{dt} \quad (3.1.53)$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{dq0s} \\ \boldsymbol{\lambda}'_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} \mathbf{L}_s (\mathbf{K})^{-1} & \mathbf{K} \mathbf{L}'_{sr} \\ \frac{2}{3} (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K})^{-1} & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq0s} \\ \mathbf{i}'_{dqr} \end{bmatrix} \quad (3.1.54)$$

Sendo,

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^r \quad (3.1.55)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{L}_s (\mathbf{K})^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (3.1.56)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{L}'_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.57)$$

$$\frac{2}{3}(\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K})^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.58)$$

Sabendo a relação (3.1.59) e (3.1.60), pode-se expandir (3.1.52) e (3.1.53), obtendo as equações de tensões (3.1.61) a (3.1.67).

$$(\lambda_{dq0s})^T = \begin{bmatrix} \lambda_{ds} & -\lambda_{ds} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.59)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = \begin{bmatrix} \lambda'_{dr} & -\lambda'_{dr} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.60)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (3.1.61)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (3.1.62)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (3.1.63)$$

$$v'_{q1} = r'_{q1} i'_{q1} + \frac{d\lambda'_{q1}}{dt} \quad (3.1.64)$$

$$v'_{q2} = r'_{q2} i'_{q2} + \frac{d\lambda'_{q2}}{dt} \quad (3.1.65)$$

$$v'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\lambda'_{fd}}{dt} \quad (3.1.66)$$

$$v'_d = r'_d i'_d + \frac{d\lambda'_d}{dt} \quad (3.1.67)$$

Substituindo (3.1.56)-(3.1.58) em (3.1.54), têm-se em sua forma expandida os fluxos concatenados.

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (3.1.68)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_{md} (i_{ds} + i'_{fd} + i'_d) \quad (3.1.69)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (3.1.70)$$

$$\lambda'_{q1} = L'_{lq1} i'_{q1} + L_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (3.1.71)$$

$$\lambda'_{q2} = L'_{lq2} i'_{q2} + L_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (3.1.72)$$

$$\lambda'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_{qs} + i'_{fd} + i'_d) \quad (3.1.73)$$

$$\lambda'_d = L'_{ld} i'_d + L_{md} (i_{ds} + i'_{fd} + i'_d) \quad (3.1.74)$$

A Figura 3.1.3, mostra o circuito relativo as equações acima de tensão e fluxo.

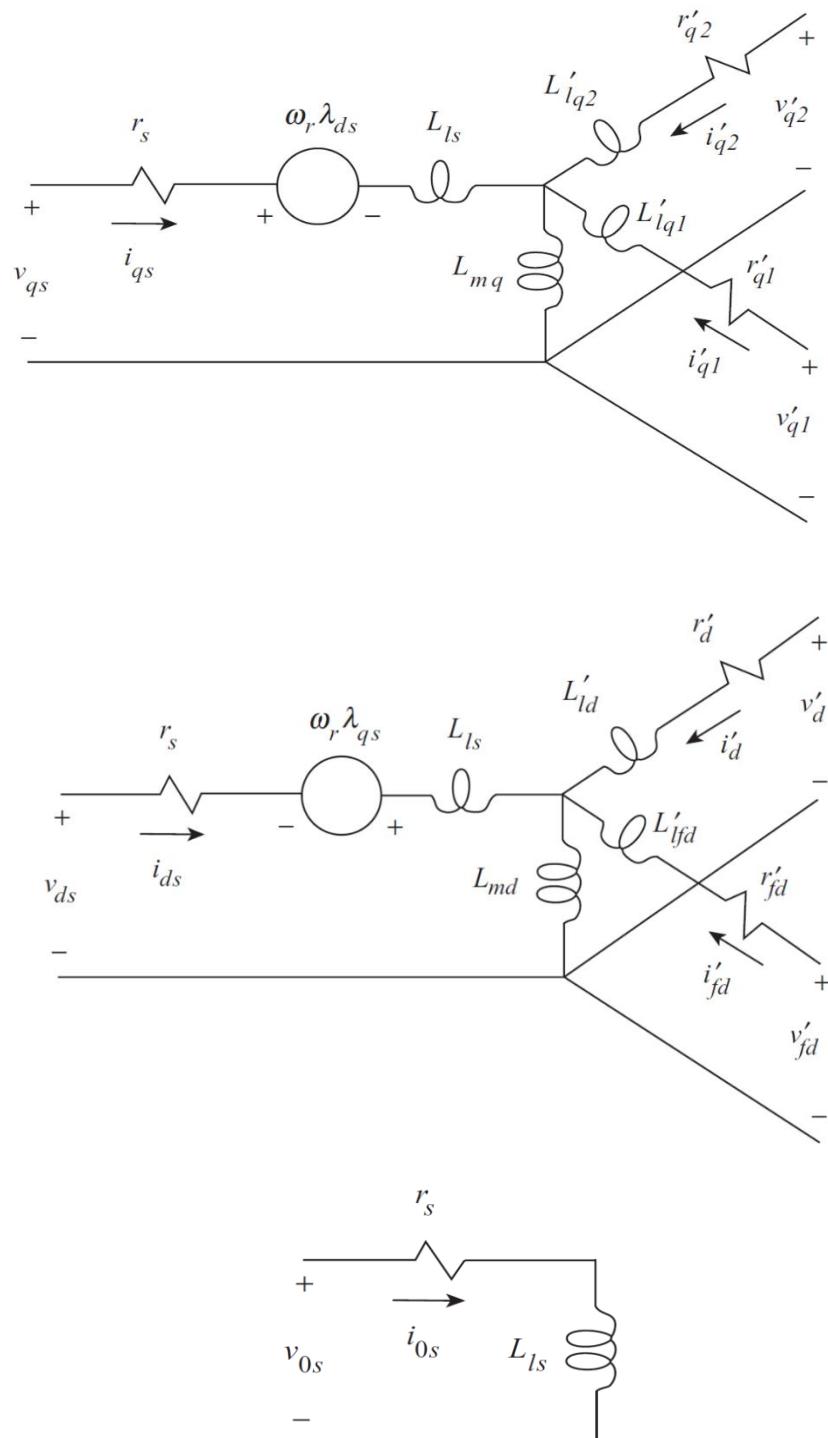


Figura 3.1.3 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona de três fases com a referência no rotor: Equações de Park. Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

Expressando as equações de tensão (3.1.61)-(3.1.67) e as equações de fluxo concatenado (3.1.68)-(3.1.74) pelas reatâncias, em vez de indutâncias, pode-se escrever as equações de tensão (3.1.75)-(3.1.81) e fluxo por (3.1.82)-(3.1.88).

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \lambda_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (3.1.75)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \lambda_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (3.1.76)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (3.1.77)$$

$$v'_{q1} = r'_{q1} i'_{q1} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{q1}}{dt} \quad (3.1.78)$$

$$v'_{q2} = r'_{q2} i'_{q2} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{q2}}{dt} \quad (3.1.79)$$

$$v'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{fd}}{dt} \quad (3.1.80)$$

$$v'_d = r'_d i'_d + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_d}{dt} \quad (3.1.81)$$

Sendo, ω_b a velocidade elétrica angular de base síncrona.

$$\lambda_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (3.1.82)$$

$$\lambda_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_{md} (i_{ds} + i'_{fd} + i'_d) \quad (3.1.83)$$

$$\lambda_{0s} = X_{ls} i_{0s} \quad (3.1.84)$$

$$\lambda'_{q1} = X'_{lq1} i'_{q1} + X_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (3.1.85)$$

$$\lambda'_{q2} = X'_{lq2} i'_{q2} + X_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (3.1.86)$$

$$\lambda'_{fd} = X'_{lfd} i'_{fd} + X_{md} (i_{qs} + i'_{fd} + i'_d) \quad (3.1.87)$$

$$\lambda'_d = X'_{ld} i'_d + X_{md} (i_{ds} + i'_{fd} + i'_d) \quad (3.1.88)$$

Quanto ao enrolamento do rotor, podemos definir (3.1.89).

$$e'_{fd} = v'_{fd} \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \quad (3.1.89)$$

Substituindo a tensão de campo v'_{fd} representada por (3.1.80) em (3.1.89), obtém-se (3.1.90).

$$e'_{fd} = \left(r'_{fd} i'_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{fd}}{dt} \right) \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \quad (3.1.90)$$

Como pode ser visto, a corrente e fluxo estão relacionados e não são variáveis independentes, nem variáveis de estado. Para solução computacional é necessário expressar o fluxo e corrente em função da corrente em forma matricial, a derivada agora é representada pelo operador p nas matrizes. As equações de tensão (3.1.75)-(3.1.81) e fluxo (3.1.82)-(3.1.88), podem ser reescritas pelas matrizes abaixo.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{q1} \\ v'_{q2} \\ e'_{fd} \\ v'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_q & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_d & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md} \\ -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_q & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_d & 0 & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{mq} & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{mq} & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & \frac{p}{\omega_b} X_{md} \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & 0 & 0 & r'_{q1} + \frac{p}{\omega_b} X'_{q1} & \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & 0 & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & r'_{q2} + \frac{p}{\omega_b} X'_{q2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \left(\frac{p}{\omega_b} X_{md} \right) & 0 & 0 & 0 & \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \left(r'_{fd} + \frac{p}{\omega_b} X'_{fd} \right) & \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \left(\frac{p}{\omega_b} X_{md} \right) \\ 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & 0 & 0 & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & r'_d + \frac{p}{\omega_b} X'_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{q1} \\ i'_{q2} \\ i'_{fd} \\ i'_d \end{bmatrix} \quad (3.1.91)$$

Onde,

$$X_q = X_{ls} + X_{mq} \quad (3.1.92)$$

$$X_d = X_{ls} + X_{md} \quad (3.1.93)$$

$$X'_{k1} = X'_{lq1} + X_{mq} \quad (3.1.94)$$

$$X'_{k2} = X'_{lq2} + X_{mq} \quad (3.1.95)$$

$$X'_{fd} = X'_{lfd} + X_{md} \quad (3.1.96)$$

$$X'_d = X'_{ld} + X_{md} \quad (3.1.97)$$

As reatâncias X_d e X_q são as reatâncias do eixo d e q, respectivamente. Os fluxos representados em (3.1.82)-(3.1.88) são agora representados pela matriz (3.1.98).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{q1} \\ \lambda'_{q2} \\ \lambda'_{fd} \\ \lambda'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_q & 0 & 0 & X_{mq} & X_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & X_d & 0 & 0 & 0 & X_{md} & X_{md} \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{mq} & 0 & 0 & X'_{q1} & X_{mq} & 0 & 0 \\ X_{mq} & 0 & 0 & X_{mq} & X'_{q2} & 0 & 0 \\ 0 & X_{md} & 0 & 0 & 0 & X'_{fd} & X_{md} \\ 0 & X_{md} & 0 & 0 & 0 & X_{md} & X'_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{q1} \\ i'_{q2} \\ i'_{fd} \\ i'_d \end{bmatrix} \quad (3.1.98)$$

Se os fluxos são ditos variáveis independentes, é conveniente primeiramente expressar (3.1.98) em (3.1.99), (3.1.100) e (3.1.101).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda'_{q1} \\ \lambda'_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_q & X_{mq} & X_{mq} \\ X_{mq} & X'_{q1} & X_{mq} \\ X_{mq} & X_{mq} & X'_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i'_{q1} \\ i'_{q2} \end{bmatrix} \quad (3.1.99)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda'_{fd} \\ \lambda'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{md} & X_{md} \\ X_{md} & X'_{fd} & X_{md} \\ X_{md} & X_{md} & X'_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i'_{fd} \\ i'_d \end{bmatrix} \quad (3.1.100)$$

$$\lambda_{0s} = X_{ls} i_{0s} \quad (3.1.101)$$

Resolvendo as equações acima para as correntes de campo, tem-se (3.1.102), (3.1.103) e (3.1.104).

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i'_{q1} \\ i'_{q2} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_q} \begin{bmatrix} X'_{q1}X'_{q1} - X_{mq}^2 & -X_{mq}X'_{q2} + X_{mq}^2 & -X_{mq}X'_{q1} + X_{mq}^2 \\ -X_{mq}X'_{q2} + X_{mq}^2 & X_qX'_{q2} - X_{mq}^2 & -X_qX_{mq} + X_{mq}^2 \\ -X_{mq}X'_{q1} + X_{mq}^2 & -X_qX_{mq} + X_{mq}^2 & X_qX'_{q1} - X_{mq}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda'_{q1} \\ \lambda'_{q2} \end{bmatrix} \quad (3.1.102)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i'_{fd} \\ i'_d \end{bmatrix} = \frac{1}{D_d} \begin{bmatrix} X'_{fd}X'_d - X_{md}^2 & -X_{md}X'_d + X_{md}^2 & -X_{md}X'_{fd} + X_{md}^2 \\ -X_{md}X'_d + X_{md}^2 & X_dX'_d - X_{md}^2 & -X_dX_{md} + X_{md}^2 \\ -X_{md}X'_{fd} + X_{md}^2 & -X_dX_{md} + X_{md}^2 & X_dX'_{fd} - X_{md}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda'_{fd} \\ \lambda'_d \end{bmatrix} \quad (3.1.103)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ls}} \lambda_{0s} \quad (3.1.104)$$

Sendo,

$$D_q = -X_{mq}^2 (X_q - 2X_{mq} + X'_{q1} + X'_{q2}) + X_q X'_{q1} X'_{q2} \quad (3.1.105)$$

$$D_d = -X_{md}^2 (X_d - 2X_{md} + X'_{fd} + X'_d) + X_q X'_{fd} X'_d \quad (3.1.106)$$

Substituindo as correntes representadas por (3.1.102)-(3.1.104) nas equações de tensão (3.1.75)-(3.1.79), (3.1.81) e (3.1.90) em (3.1.91), resulta-se (3.1.107).

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{q1} \\ v'_{q2} \\ e'_{fd} \\ v'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s A_{11} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega_r}{\omega_b} & 0 & -r_s A_{12} & -r_s A_{13} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_r}{\omega_b} & r_s B_{11} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 & -r_s B_{12} & -r_s B_{13} \\ 0 & 0 & \frac{r_s}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r'_{q1} A_{21} & 0 & 0 & r'_{q1} A_{22} + \frac{p}{\omega_b} & r'_{q1} A_{32} & 0 & 0 \\ r'_{q2} A_{31} & 0 & 0 & r'_{q2} A_{32} & r'_{q2} A_{33} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 \\ 0 & X_{md} B_{21} & 0 & 0 & 0 & X_{md} B_{22} + \frac{X_{md}}{r'_{fd}} + \frac{p}{\omega_b} & X_{md} B_{23} \\ 0 & r'_d B_{31} & 0 & 0 & 0 & r'_d B_{32} & r'_d B_{33} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{q1} \\ \lambda'_{q2} \\ \lambda'_{fd} \\ \lambda'_d \end{bmatrix} \quad (3.1.107)$$

Sendo, A_{ij} e B_{ij} elementos da matriz 3x3 dada em (3.1.102) e (3.1.103), respectivamente.

3.1.4 – Ação geradora

Para análise da máquina síncrona como gerador é convencionado as correntes do estator com sentido para fora da máquina, denotando ação geradora. Esta notação é usada predominantemente em análise de sistemas elétricos, e aqui será tratada da mesma forma. A Figura 3.1.4, representa as correntes saindo do estator como sentido positivo. Cabe aqui lembrar que no enrolamento de campo e amortecedor as correntes são tratadas como positivas dentro da máquina síncrona. Não é necessário alterar todo equacionamento até a matrizes finais, basta nas equações de estado, mudar o sinal das correntes do estator, ou mudando o sinal das variáveis de substituição i_{qs} e i_{ds} , conforme mostra a Figura 3.1.5.

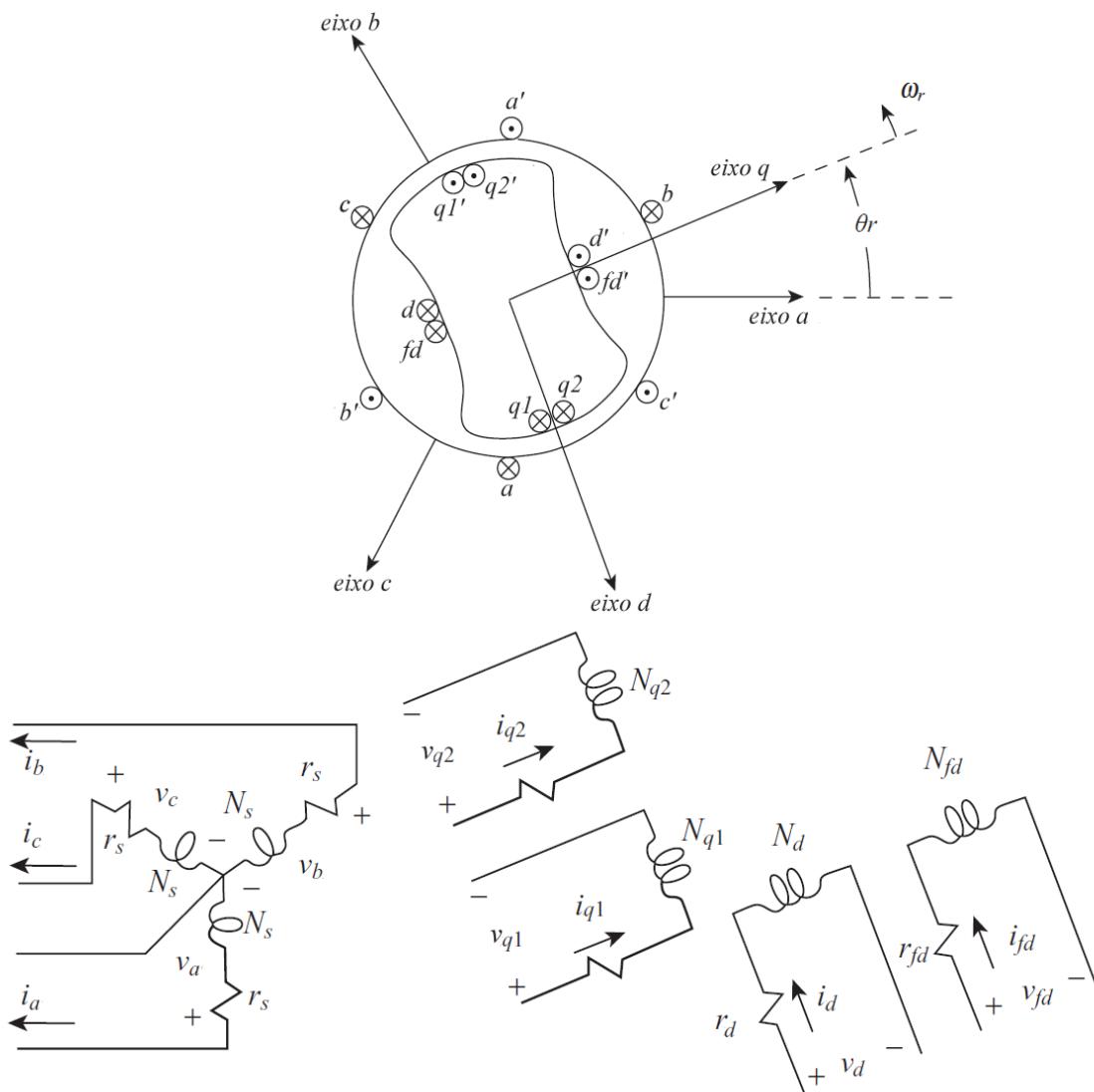


Figura 3.1.4 – Esquema representativo de eixos magnéticos e dos enrolamentos um gerador síncrono de polos salientes ligado em estrela. Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

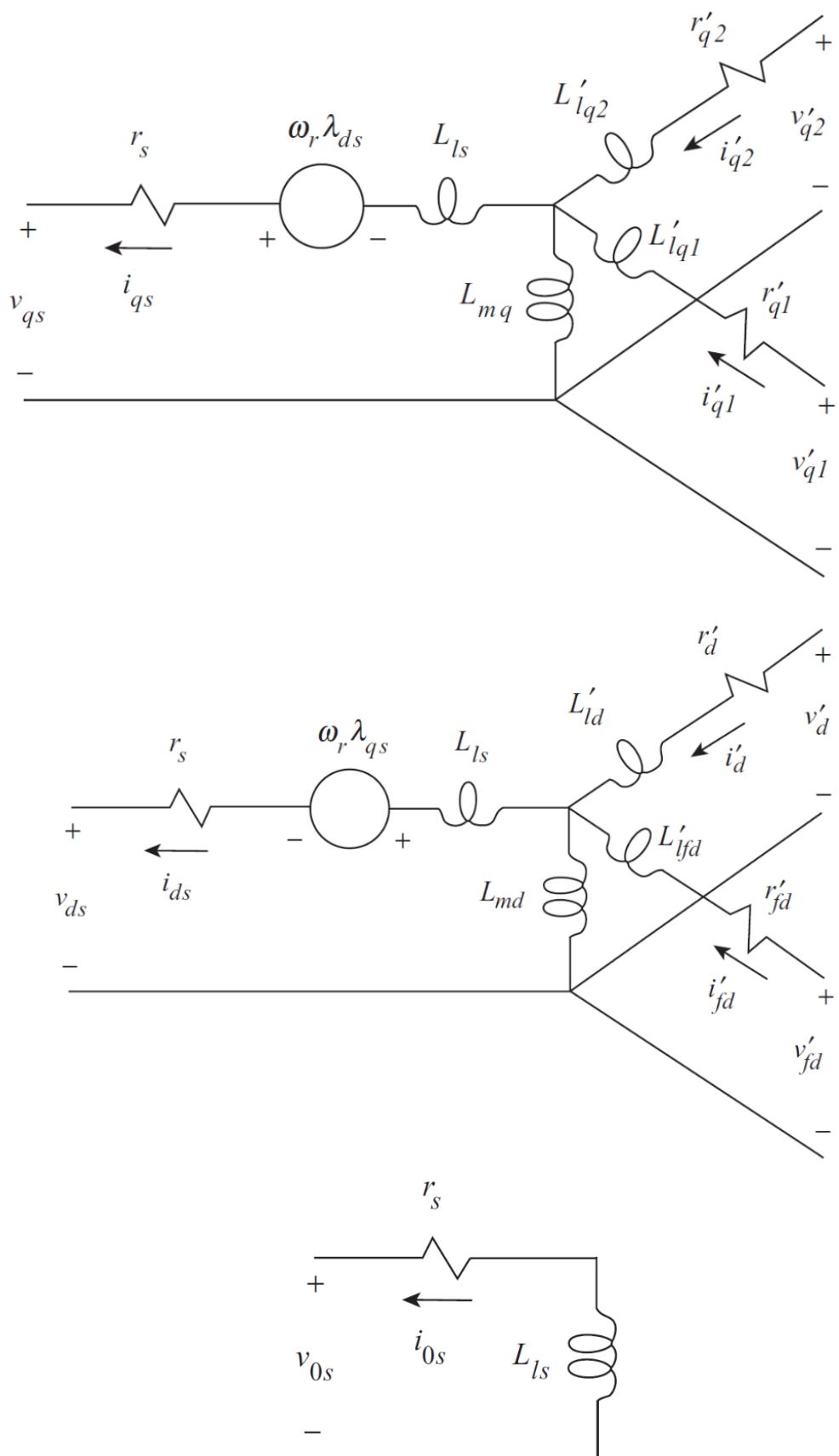


Figura 3.1.5 – Circuito equivalente de um gerador síncrono de três fases com a referência no rotor: Equações de Park. Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

Pelo tópico 3.1.2, tem-se a equação de torque elétrico relacionado ao torque mecânico e a velocidade do rotor. Para ação geradora, a equação (3.1.45) se torna:

$$T_e = -J \left(\frac{p}{2} \right) \frac{d}{dt} \omega_r + T_L \quad (3.1.108)$$

Dada a equação acima, o torque elétrico é positivo para gerador e negativo para motor.

3.1.5 – Equação de torque eletromagnético em referência no rotor

Considerando a corrente como positiva para dentro da máquina, ou seja, para ação motora, o torque eletromagnético em termos das variáveis referenciadas ao rotor pode ser escrito por (3.1.109).

$$T_e = \left(\frac{p}{2} \right) [(\mathbf{K})^{-1} \mathbf{i}_{dq0s}]^T \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}_s] (\mathbf{K})^{-1} \mathbf{i}_{dq0s} + \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_{dqr} \right\} \quad (3.1.109)$$

A equação (3.1.109) pode ser simplificada após cálculos, resultando em (3.1.110).

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{p}{2} \right) [L_{md}(i_{ds} + i'_{fd} + i'_d) i_{qs} - L_{mq}(i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) i_{ds}] \quad (3.1.110)$$

Que pode ser resumida pelo princípio de fluxo concatenado na velocidade de base, por (3.1.111).

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{p}{2} \right) \left(\frac{1}{\omega_b} \right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (3.1.111)$$

3.1.6 – Valores em pu das equações elétricas e mecânicas

Os valores de base para o estator são dadas pelas equações (3.1.112) a (3.1.116)

$$V_{s_{base}} = \frac{V_n \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (3.1.112)$$

$$I_{s_{base}} = \frac{P_n \sqrt{2}}{V_n \sqrt{3}} \quad (3.1.113)$$

$$Z_{s_{base}} = \frac{V_{s_{base}}}{I_{s_{base}}} = \frac{V_n^2}{P_n} \quad (3.1.114)$$

$$\omega_{s_{base}} = 2\pi f_n \quad (3.1.115)$$

$$L_{s_{base}} = \frac{Z_{s_{base}}}{\omega_{base}} \quad (3.1.116)$$

Em que,

$V_{s_{base}}$ - Tensão base nominal de pico de fase [V];

$I_{s_{base}}$ - Corrente base nominal de pico de fase [A];

$Z_{s_{base}}$ - Impedância base [Ω];

$L_{s_{base}}$ - Indutância base [H];

$\omega_{s_{base}}$ - Frequência angular de base [rad/s];

P_n - Potência trifásica nominal [VA];

V_n - Tensão de linha [Vrms];

f_n - Frequência nominal [Hz].

Os valores em pu para os parâmetros abaixo são dadas pelas equações por (3.1.17) a (3.1.120).

$$r_{s_{pu}} = \frac{r_s}{Z_{s_{base}}} \quad (3.1.117)$$

$$L_{l_{pu}} = \frac{L_l}{L_{s_{base}}} \quad (3.1.118)$$

$$L_{md_{pu}} = \frac{L_{md}}{L_{s_{base}}} \quad (3.1.119)$$

$$L_{mq\ pu} = \frac{L_{mq}}{L_{sbase}} \quad (3.1.120)$$

Em que,

$r_s\ pu$ - Resistência de uma das fases do estator [pu];

$L_l\ pu$ - Indutância de dispersão do estator em [pu];

$L_{md}\ pu$ - Indutância de magnetização do eixo direto em [pu];

$L_{mq}\ pu$ - Indutância de magnetização do eixo de quadratura em [pu];

r_s - Resistência do estator [Ω];

L_l - Indutância de dispersão do estator [H];

L_{md} - Indutância do eixo direto [H];

L_{mq} - Indutância do eixo de quadratura [H].

Os valores de base e pu para o enrolamento de campo são expressos em (3.1.121) a (3.1.126), em que “f” denota os enrolamentos “q1”, “q2”, “fd” e “d”.

$$I_{fbase} = i_{fn} L_{md\ pu} \quad (3.1.121)$$

$$V_{fbase} = \frac{P_n}{I_{fbase}} \quad (3.1.122)$$

$$Z_{fbase} = \frac{V_{fbase}}{I_{fbase}} \quad (3.1.123)$$

$$L_{fbase} = \frac{Z_{fbase}}{\omega_{base}} \quad (3.1.124)$$

$$r_{fpu} = \frac{r_f}{Z_{fd_{base}}} \quad (3.1.125)$$

$$L_{fd_{pu}} = \frac{L_{fd}}{L_{f_{base}}} \quad (3.1.126)$$

Em que,

- r_{fpu} - Resistência de campo [pu];
- $L_{fd_{pu}}$ - Indutância de dispersão do enrolamento de campo [pu];
- $I_{f_{base}}$ - Corrente de campo base [A];
- $V_{f_{base}}$ - Tensão de campo base [V];
- $Z_{f_{base}}$ - Impedância de campo base [Ω];
- $L_{f_{base}}$ - Indutância base [H];
- i_{fn} - Corrente de campo nominal para produzir tensão nominal a vazio [A];
- r_f - Resistência de campo [Ω];
- L_{fd} - Indutância de dispersão do enrolamento de campo [H].

De acordo com as equações (3.1.22)-(3.1.25), pode-se escrever a relação (3.1.127).

$$L_{sf_{d}} = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_f}{N_s} \right) L_{md} = \frac{V_{s_{base}}}{i_{fn} \omega_{base}} \quad (3.1.127)$$

Para valores das variáveis do rotor, referidas ao estator, as equações (3.1.32), (3.1.33), (3.1.39) e (3.1.40) podem ser também calculadas de maneira simplificada a partir da equação (3.1.128). Da última igualdade, após substituições pelas equações apresentadas acima neste tópico e fazendo algumas manipulações algébricas, chega-se a relação final dada em (3.1.128).

$$\frac{N_s}{N_f} = \frac{2}{3} \frac{I_{fd_{base}}}{I_{s_{base}}} \quad (3.1.128)$$

A resistência e a indutância de dispersão referidas ao estator do enrolamento de campo, podem ser calculadas por (3.1.129) e (3.1.130), respectivamente.

$$r'_{fd} = r_{fd_{pu}} Z_{s_{base}} \quad (3.1.129)$$

$$L'_{fd} = L_{fd_{pu}} L_{s_{base}} \quad (3.1.130)$$

Para encontrar o valor da tensão de campo nominal, que é suficiente para excitar a máquina síncrona na tensão terminal sem carga ou a vazio, determina-se pela equação (3.1.131), em casos em que não possua o valor específico da corrente de campo nominal, calcula-se a tensão e corrente de campo nominal referida do rotor para o estator por (3.1.132) e (3.1.133), respectivamente.

$$V_{fn} = r_{fd} i_{fn} \quad (3.1.131)$$

$$V'_{fn} = \left(\frac{r_{fd_{pu}}}{L_{md_{pu}}} \right) V_{s_{base}} = \left(\frac{r'_{fd}}{L_{md_{base}} \omega_{base}} \right) V_{s_{base}} \quad (3.1.132)$$

$$I'_{fn} = \frac{I_{s_{base}}}{L_{md_{pu}}} = \frac{I_{s_{base}}}{I_{fd_{base}}} \quad (3.1.133)$$

O torque de base pode ser descrito pela equação (3.1.134).

$$T_{base} = \frac{P_{base}}{\left(\frac{2}{P}\right)\omega_{base}} = \frac{\left(\frac{3}{2}\right)V_{base_{dq0}} I_{base_{dq0}}}{\left(\frac{2}{P}\right)\omega_{base}} \quad (3.1.134)$$

Em que,

P_{base} - Potência base [W];

$V_{base_{dq0}}$ - Tensão base de pico [V];

$I_{base_{dq0}}$ - Corrente base de pico [A].

Dividindo a equação (3.1.111) por (3.1.134), tem-se o torque em valor unitário pela equação (3.1.135).

$$T_{e_{pu}} = \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} \quad (3.1.135)$$

A velocidade mecânica em pu pode ser desenvolvida a partir da equação (3.1.45), (3.1.136) e (3.1.137), resultando em (3.1.137). A posição mecânica em pu é dada por (3.1.139).

$$T_{e_{pu}} = 2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_{base}} \right) + T_{L_{pu}} \quad (3.1.136)$$

$$\omega_m = \left(\frac{2}{P} \right) \omega_r \quad (3.1.137)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_{e_{pu}} - T_{L_{pu}}) \quad (3.1.138)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (3.1.139)$$

A constante de inércia H cuja unidade é em segundos, pode ser calculada por (3.1.140).

$$H = \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{2}{P} \right)^2 \frac{J \omega_{base}^2}{P_{base}} \quad (3.1.140)$$

3.1.7 – Demais parâmetros elétricos da máquina síncrona de polos salientes

As reatâncias transitórias de eixo direto e quadratura podem ser calculadas pelas equações (3.1.141) e (3.1.142), respectivamente.

$$X'_q = X_{ls} + \frac{X_{mq} X'_{lq1}}{X'_{lq1} + X_{mq}} \quad (3.1.141)$$

$$X'_d = X_{ls} + \frac{X_{md} X'_{lfd}}{X'_{lfd} + X_{md}} \quad (3.1.142)$$

As reatâncias subtransitórias de eixo direto e quadratura podem ser calculadas pelas equações (3.1.143) e (3.1.144), respectivamente.

$$X''_q = X_{ls} + \frac{X_{mq} X'_{lq1} X'_{lq2}}{X_{mq} X'_{lq1} + X_{mq} X'_{lq2} + X'_{lq1} X'_{lq2}} \quad (3.1.143)$$

$$X''_d = X_{ls} + \frac{X_{md} X'_{lfd} X'_{ld}}{X_{md} X'_{lfd} + X_{md} X'_{ld} + X'_{lfd} X'_{ld}} \quad (3.1.144)$$

Vale lembrar que essas reatâncias atuam sobre um tempo muito curto, sendo substituídas pelas reatâncias de eixo direto e quadratura, assim que a máquina síncrona entra em regime permanente. As constantes de tempo transitória e subtransitória de circuito aberto, são dadas por (3.1.145)-(3.1.146) e (3.1.147)-(3.1.148), respectivamente.

$$\tau'_{qo} = \frac{1}{\omega_b r'_{q1}} (X'_{lq1} + X_{mq}) \quad (3.1.145)$$

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) \quad (3.1.146)$$

$$\tau''_{qo} = \frac{1}{\omega_b r'_{q2}} \left(X'_{lq2} + \frac{X_{mq} X'_{lq1}}{X'_{lq1} + X_{mq}} \right) \quad (3.1.147)$$

$$\tau''_{do} = \frac{1}{\omega_b r'_{d}} \left(X'_{ld} + \frac{X_{md} X'_{lfd}}{X'_{lfd} + X_{md}} \right) \quad (3.1.148)$$

E por fim, as constantes de tempo transitória e subtransitória de curto circuito, são dadas por (3.1.149)-(3.1.150) e (3.1.151)-(3.1.152), respectivamente.

$$\tau'_q = \frac{1}{\omega_b r'_{q1}} \left(X'_{lq1} + \frac{X_{ls} X_{mq}}{X_{ls} + X_{mq}} \right) \quad (3.1.149)$$

$$\tau'_d = \frac{1}{\omega_b r'_{q1}} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{ls} X_{md}}{X_{ls} + X_{md}} \right) \quad (3.1.150)$$

$$\tau''_q = \frac{1}{\omega_b r'_{q2}} \left(X'_{lq2} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lq1}}{X_{mq} X_{ls} + X_{mq} X'_{lq1} + X_{ls} X'_{lq1}} \right) \quad (3.1.151)$$

$$\tau''_d = \frac{1}{\omega_b r'_{d}} \left(X'_{ld} + \frac{X_{md} X_{ls} X'_{lfd}}{X_{md} X_{ls} + X_{md} X'_{lfd} + X_{ls} X'_{lfd}} \right) \quad (3.1.152)$$

3.2 – Máquina de indução trifásica

A máquina de indução trifásica possui as mesmas características de uma máquina síncrona para o enrolamento do estator, difere quanto ao enrolamento do rotor, possuindo uma gaiola (até mesmo um rotor sólido) ou um conjunto de enrolamento no rotor (rotor bobinado), neste tópico trata-se das variáveis elétricas e mecânicas para a máquina de indução trifásica.

3.2.1 – Equações elétricas

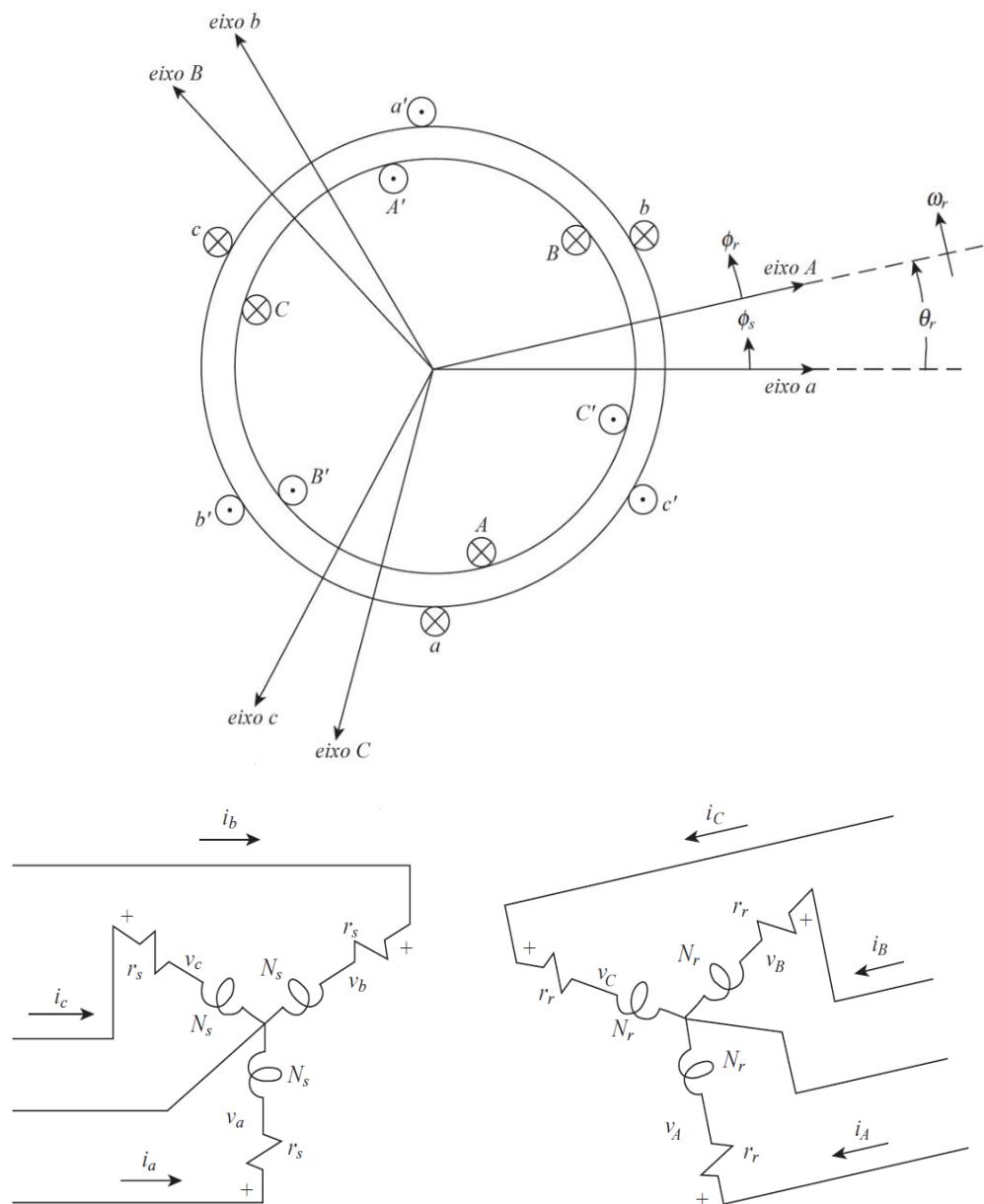


Figura 3.2.1 – Esquema representativo de eixos magnéticos do estator e rotor de uma máquina de indução trifásica ligada em estrela. Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

A máquina de indução trifásica, mostrada pela Figura 3.2.1, possui as fases ou bobinas enroladas no estator que são distribuídas simetricamente 120° entre si, da mesma forma é feito para o rotor bobinado. Os subscritos minúsculos e maiúsculos referem-se as variáveis do estator e rotor, respectivamente.

As equações de tensão para estator e rotor são descritas abaixo por (3.2.1) e (3.2.2).

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (3.2.1)$$

$$\mathbf{v}_{ABC} = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{ABC} + \frac{d\lambda_{ABC}}{dt} \quad (3.2.2)$$

Considerando que os índices s e r denotam as variáveis associadas aos enrolamentos do estator e do rotor, respectivamente. As matrizes de resistências \mathbf{r}_s e \mathbf{r}_r são matrizes diagonais indicadas por (3.2.3) e (3.2.4).

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

Considerando,

$$(\mathbf{f}_{abc})^T = [f_a \quad f_b \quad f_c] \quad (3.2.5)$$

$$(\mathbf{f}_{ABC})^T = [f_A \quad f_B \quad f_C] \quad (3.2.6)$$

Em que f representa variáveis de tensão, corrente, e fluxo. As equações para os fluxos concatenados, tanto do rotor como estator são dados por (3.2.7).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{ABC} \end{bmatrix} \quad (3.2.7)$$

Desprezando as indutâncias mútuas entre o enrolamento do estator e do rotor, pode-se escrever (3.2.8).

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (3.2.8)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (3.2.9)$$

$$\mathbf{L}_r = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (3.2.10)$$

Sendo,

$$L_{ms} = \left(\frac{N_s}{P}\right)^2 \frac{\pi\mu_0 rl}{g} \quad (3.2.11)$$

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{P}\right)^2 \frac{\pi\mu_0 rl}{g} \quad (3.2.12)$$

$$L_{sr} = \frac{N_s}{P} \frac{N_r}{P} \frac{\pi\mu_0 rl}{g} \quad (3.2.13)$$

Onde,

L_{ms} - Indutância de magnetização do estator;

L_{mr} - Indutância de magnetização do rotor;

L_{sr} - Indutância mútua entre o estator e rotor;

L_{ls} - Indutância de dispersão do estator;

L_{lr} - Indutância de dispersão do rotor;

P - Número de polos;

N_s - Número de espiras em uma bobina por fase do estator;

N_r - Número de espiras do enrolamento por fase do rotor;

μ_0 - Permeabilidade magnética do ar;

g - Comprimento mínimo do entreferro;

r - Raio interno do estator;

l - Comprimento axial do estator ou do cilindro rotórico.

Por ser máquina de gaiola de esquilo, aparentemente, a indutância mútua entre o enrolamento do estator e rotor não poderia ser da forma expresso em (3.2.10), mas cabe aqui ressaltar, que na maioria dos casos, um enrolamento uniformemente distribuído é normalmente descrito pela componente fundamental senoidal e pode ser representado por um enrolamento trifásico equivalente. Cabe lembrar que o modelo é simplificado e não trata das componentes harmônicas, devido a não consideração da saturação magnética.

Referenciando as variáveis do rotor da máquina de indução para o estator, obtém-se:

$$\mathbf{i}'_{ABC} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{i}_{ABC} \quad (3.2.14)$$

$$\mathbf{v}'_{ABC} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{v}_{ABC} \quad (3.2.15)$$

$$\boldsymbol{\lambda}'_{ABC} = \frac{N_s}{N_r} \boldsymbol{\lambda}_{ABC} \quad (3.2.16)$$

Associando o fluxo mutuo com o fluxo magnetizante, tem-se a relação dada em (3.2.17).

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (3.2.17)$$

Considerando a indutância mútua referenciada para o estator em (3.2.18) e pela relação dada por (3.2.17), pode-se escrever (3.2.19).

$$\mathbf{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{L}_{sr} \quad (3.2.18)$$

$$\mathbf{L}'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (3.2.19)$$

A indutância de magnetização do rotor é dada por (3.2.20).

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 L_{ms} \quad (3.2.20)$$

Definindo (3.2.21), a partir de (3.2.9), obtém-se (3.2.22) que é a matriz indutância do rotor referenciada ao estator.

$$\mathbf{L}'_r = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 \mathbf{L}_r \quad (3.2.21)$$

$$\mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (3.2.22)$$

Onde,

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr} \quad (3.2.23)$$

Agora o fluxo do estator e do rotor podem ser escritos por (3.2.24).

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \\ \boldsymbol{\lambda}'_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}'_{ABC} \end{bmatrix} \quad (3.2.24)$$

As equações de tensão são dadas em (3.2.25), em termos das variáveis da máquina de indução referidos ao enrolamento do estator.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}'_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s + \frac{d\mathbf{L}_s}{dt} & \frac{d\mathbf{L}'_{sr}}{dt} \\ \frac{d(\mathbf{L}'_{sr})^T}{dt} & \mathbf{r}'_r + \frac{d\mathbf{L}'_r}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}'_{ABC} \end{bmatrix} \quad (3.2.25)$$

Onde,

$$\mathbf{r}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 r_r \quad (3.2.26)$$

3.2.2 – Equação do torque elétrico pelas variáveis da máquina

A energia armazenada no campo magnético da máquina indução é dada por (3.2.27).

$$W_f = \frac{1}{2} (\mathbf{i}_{abc})^T \mathbf{L}_s \mathbf{i}_{abc} + (\mathbf{i}_{abc})^T \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}'_{ABC} + \left(\frac{1}{2} \right) (\mathbf{i}'_{ABC})^T \mathbf{L}'_r \mathbf{i}'_{ABC} \quad (3.2.27)$$

Considerando o sistema magnético da máquina como linear, a posição mecânica do rotor é dada pela equação (3.2.28). Por \mathbf{L}_s e \mathbf{L}'_r não ser função de θ_r , o torque elétrico em função da posição do rotor é dado por (3.2.29).

Como o sistema magnético da máquina é adotado como linear, e considerando a posição mecânica do rotor por (3.2.28), o torque elétrico em função da posição do rotor é escrito por (3.2.29).

$$\theta_r = \left(\frac{P}{2} \right) \theta_m \quad (3.2.28)$$

$$T_e = \left(\frac{P}{2} \right) (\mathbf{i}_{abc})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_{ABC} \quad (3.2.29)$$

Expandindo-se (3.2.29), obtém-se (3.2.30).

$$T_e = -\left(\frac{p}{2}\right)L_{ms} \left\{ \left[i_a \left(i'_A - \frac{1}{2}i'_B - \frac{1}{2}i'_C \right) + i_b \left(i'_B - \frac{1}{2}i'_A - \frac{1}{2}i'_C \right) + i_c \left(i'_C - \frac{1}{2}i'_B - \frac{1}{2}i'_A \right) \right] \sin\theta_r \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} [i_a(i'_B - i'_C) + i_b(i'_C - i'_A) + i_c(i'_A - i'_B)] \cos\theta_r \right\} \quad (3.2.30)$$

Para a expressão acima, o torque é positivo para motor e negativo para ação geradora, a velocidade do rotor e o torque estão relacionados pela equação (3.2.31), cabe lembrar se o torque mecânico for positivo, o modelo será de correntes para dentro da máquina, conforme Figura 3.2.1, se for negativo, as correntes terão sentido para fora, indicando funcionamento como gerador.

$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + T_L \quad (3.2.31)$$

Onde,

J - Momento de inércia do rotor [Kg.m²] ou [J.s²];

T_L - Torque mecânico ou de carga [N.m];

ω_r - Velocidade angular do rotor [rad/s].

3.2.3 – Equação de transformação para o circuito do rotor

Foi mostrado no equacionamento da máquina síncrona a associação das variáveis estacionárias para a referência dos eixos dq, no entanto para a máquina de indução, é necessário fazer a mesma associação para transformação das três fases do circuito do rotor para os eixos arbitrários dq, cujo substrito r indica transformação do circuito rotativo, conforme indica Figura 3.2.2, assim define-se (3.2.32).

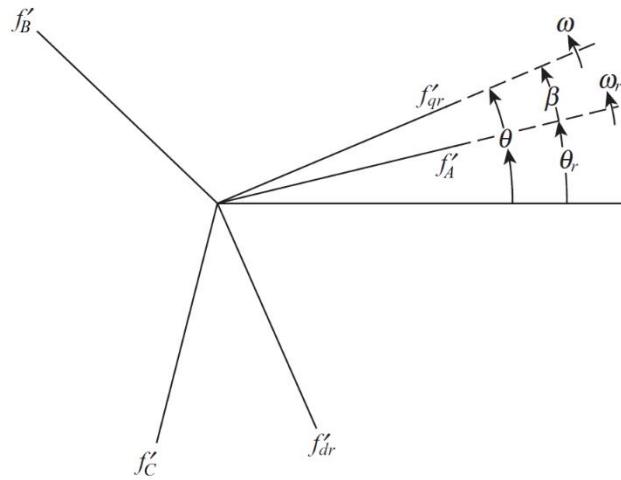


Figura 3.2.2 – Relação trigonométrica do circuito do rotor para eixo dq.
Fonte: Adaptado (KRAUSE et al., 2013).

$$\mathbf{f}'_{dq0r} = K_r \mathbf{f}'_{ABC} \quad (3.2.32)$$

Sendo,

$$(\mathbf{f}'_{dq0r})^T = [f'_{qr} \quad f'_{dr} \quad f'_{0r}] \quad (3.2.33)$$

$$(\mathbf{f}'_{ABC})^T = [f'_A \quad f'_B \quad f'_C] \quad (3.2.34)$$

Em que \mathbf{f}'_{ABC} representa o vetor das variáveis do rotor referenciadas ao estator a ser transformada para o eixo dq.

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\beta & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\beta & \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2.35)$$

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (3.2.36)$$

A velocidade angular e a posição angular de θ estão relacionadas pela equação (3.1.51), para a máquina de indução, de forma análoga para θ_r , pode-se escrever (3.2.37).

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (3.2.37)$$

A matriz inversa de (3.2.35) é dada por (3.2.38).

$$K_r^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 1 \\ \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.38)$$

As equações de transformação acima para os circuitos do rotor, são as mesmas equações para o circuito do estator, utilizando aqui o angulo β como o descolamento angular de referência entre fase A e o eixo em quadratura, em máquinas síncronas a denotação é o ângulo θ . Na verdade, as equações de transformação para circuitos do estator e do rotor são casos especiais de uma transformação para todos os circuitos, sejam eles, fixos ou rotativos.

As equações de tensão transformadas em dq0 são apresentadas o estator por (3.2.39), e do rotor por (3.2.40).

$$\mathbf{v}_{dq0s} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{dq0s} + \omega \boldsymbol{\lambda}_{dqs} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_{dq0s}}{dt} \quad (3.2.39)$$

$$\mathbf{v}'_{dq0r} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{dq0r} + (\omega - \omega_r) \boldsymbol{\lambda}'_{dqr} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}'_{dq0r}}{dt} \quad (3.2.40)$$

Onde,

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}'_{dqs} \end{pmatrix}^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{ds} \quad 0] \quad (3.2.41)$$

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}'_{dqr} \end{pmatrix}^T = [\lambda'_{dr} \quad -\lambda'_{dr} \quad 0] \quad (3.2.42)$$

Aplicando as equações de transformação (3.1.46) e (3.1.32) em (3.2.24), resulta em (3.2.43).

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{dq0s} \\ \boldsymbol{\lambda}'_{dq0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{KL}_s(\mathbf{K})^{-1} & \mathbf{KL}'_{sr}(\mathbf{K})^{-1} \\ \mathbf{K}_r(\mathbf{L}'_{sr})^T(\mathbf{K})^{-1} & \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r(\mathbf{K}_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq0s} \\ \mathbf{i}'_{dq0r} \end{bmatrix} \quad (3.2.43)$$

Sendo,

$$\mathbf{KL}_s(\mathbf{K})^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (3.2.44)$$

Onde,

$$L_M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (3.2.45)$$

$$\mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (3.2.46)$$

$$\mathbf{KL}'_{sr}(\mathbf{K})^{-1} = \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K})^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.47)$$

Expandindo (3.2.39) e (3.2.40), obtêm-se as equações de tensão (3.2.48)-(3.2.53).

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (3.2.48)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (3.2.49)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (3.2.50)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \quad (3.2.51)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \quad (3.2.52)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{d\lambda'_{0r}}{dt} \quad (3.2.53)$$

Substituindo (3.2.44), (3.2.46) e (3.2.47) em (3.2.43), encontram-se os fluxos concatenados na sua forma expandida em (3.2.54) a (3.2.59).

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.2.54)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.2.55)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (3.2.56)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.2.57)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.2.58)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{0r} \quad (3.2.59)$$

As equações de tensão e fluxo concatenado são representadas por seu circuito equivalente pela Figura 3.2.3

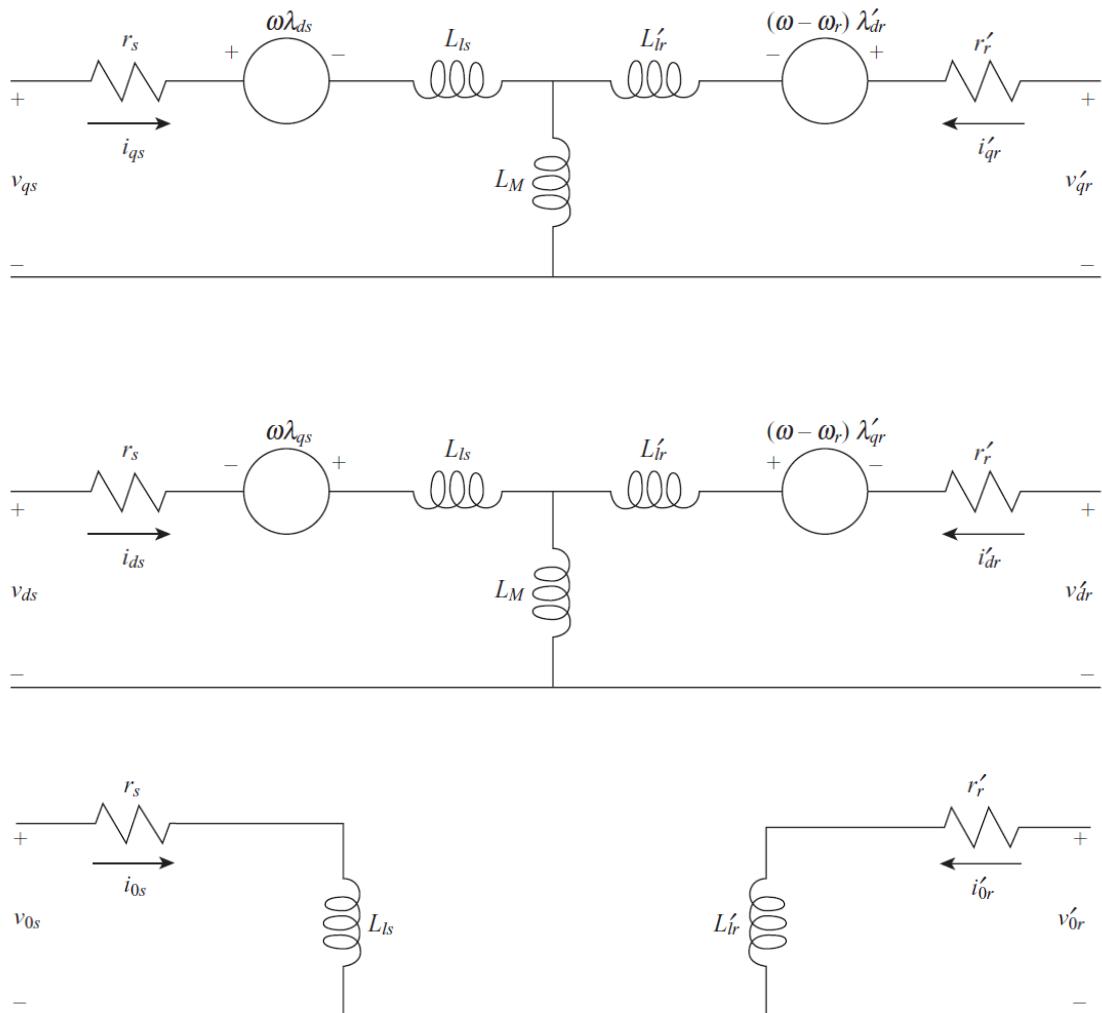


Figura 3.2.3 – Circuito equivalente de transformação no rotor para máquina de indução trifásica.
Fonte: (KRAUSE et al., 2013).

Escrevendo as equações de tensão (3.2.48)-(3.2.53) e de fluxo concatenado (3.2.54)-(3.2.59) em função das reatâncias, já que é bem mais usual na bibliografia geral, comparado em função das indutâncias, obtém-se as novas equações de tensão (3.2.60)-(3.2.65) e fluxo concatenado por (3.2.66)-(3.2.71).

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \lambda_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (3.2.60)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \lambda_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (3.2.61)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (3.2.62)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \lambda'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \quad (3.2.63)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \lambda'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \quad (3.2.64)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{0r}}{dt} \quad (3.2.65)$$

$$\lambda_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.2.66)$$

$$\lambda_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.2.67)$$

$$\lambda_{0s} = X_{ls} i_{0s} \quad (3.2.68)$$

$$\lambda'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.2.69)$$

$$\lambda'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.2.70)$$

$$\lambda'_{dr} = X'_{lr} i'_{0r} \quad (3.2.71)$$

Novamente, visando diminuir o espaço nos elementos da matriz, será considerado a derivada $\frac{d}{dt}$ pelo operador p .

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\omega}{\omega_b} X_M & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X_M & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X'_{rr} & 0 \\ -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X'_{rr} & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.2.72)$$

Onde,

$$X_{ss} = X_{ls} + X_M \quad (3.2.73)$$

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \quad (3.2.74)$$

Os fluxos podem ser obtidos por (3.2.75) e isolando as correntes a partir dos fluxos concatenados, obtém-se (3.2.76).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.2.75)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 & 0 \\ 0 & X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{X'_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.2.76)$$

Onde,

$$D = X_{ss} X'_{rr} - X_M^2 \quad (3.2.77)$$

Realizando a substituição das correntes dadas em (3.2.76) nas equações (3.2.60)-(3.2.65), obtém-se na matriz (3.2.78) relacionando tensão e fluxo.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_s}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & 0 & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) & 0 \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r'_r}{X'_{lr}} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.2.78)$$

Para a máquina de gaiola de esquilo, as tensões do rotor são dadas nulas ou zero, isto se deve ao enrolamento de campo ser curto circuitado.

3.2.4 – Equações mecânicas em dq0

A equação de torque eletromagnético em termos das variáveis dq, podem ser descritos por substituição das equações de transformação em (3.2.29), resultando em (3.2.79).

$$T_e = \left(\frac{p}{2} \right) \left[(\mathbf{K})^{-1} \mathbf{i}_{dq0s} \right]^\top \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] (\mathbf{K}_r)^{-1} \mathbf{i}'_{dq0r} \quad (3.2.79)$$

A equação (3.2.79) pode ser simplificada após cálculos, sendo as variáveis em referência ao rotor, considerando a máquina de gaiola de esquilo, o torque eletromagnético é calculado por (3.2.80). A velocidade e a posição mecânica são relacionadas pelas equações (3.2.81) e (3.2.82), respectivamente.

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{p}{2} \right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (3.2.80)$$

$$\omega_m = \left(\frac{2}{P} \right) \omega_r \quad (3.2.81)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (3.2.82)$$

3.3 – Considerações finais

Este capítulo tratou do equacionamento da máquina síncrona de polos salientes e máquina de indução trifásica, fez-se a apresentação do modelo matemático para simulação digital, contemplando o comportamento elétrico e eletromecânico. A princípio a modelagem é considerada convencionalmente como a corrente entrando pelo estator, ou seja, como ação motora. Como o que distingue ação motora, da ação geradora ser o sentido da corrente entrando ou saindo do enrolamento do estator, computacionalmente para máquina síncrona de polos salientes, define-se o parâmetro de entrada, o torque mecânico ou potência mecânica, como sendo positivo para gerador, e negativo para motor, para a máquina assíncrona o torque mecânico de entrada é dado positivo para motor, e negativo para gerador, também pode se referenciar como parâmetro de entrada a velocidade acima da síncrona como gerador, conforme mostra a curva de conjugado *versus* velocidade. Dessa forma quando a máquina tiver que operar como gerador, as correntes nas duas primeiras linhas matriz de estado recebem sinal negativo, conforme indica o parâmetro de entrada, provando dessa forma uma queda de tensão em módulo negativa, no enrolamento de armadura.

O próximo capítulo mostra os resultados das simulações e dados dos ensaios experimentais em regime permanente do funcionamento do gerador de indução operando juntamente com o gerador síncrono de polos salientes, alimentando cargas com fator de potência unitário, indutivo e indutivo com correção de fator de potência.

CAPÍTULO 4

TEÓRICO-EXPERIMENTAL: ANÁLISE DOS RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

4.1 – Introdução

O presente capítulo tem por propósito apresentar os resultados dos ensaios experimentais efetuados em laboratório e realizar simulações computacionais para confrontação teórico-experimental, sendo o gerador síncrono atuando como regulador de tensão para o gerador de indução auto-excitado em operação isolada.

As simulações computacionais foram desenvolvidas na arquitetura do Simulink, da plataforma de software para modelagem do Matlab® e os parâmetros de entrada dos geradores para as simulações foram levantados a partir de ensaios em laboratório na máquina síncrona e de indução, o dimensionamento do banco de capacitores para o gerador de indução, encontra-se no Apêndice A. Da teoria apresentada no capítulo 2 para simulações, e pelo material permanente existente no laboratório, foi possível fazer o estudo de três casos, sendo, os geradores operando isoladamente alimentando carga resistiva, indutiva e carga indutiva com correção de fator de potência.

4.2 – Simulação Digital

As Tabelas 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, mostram os parâmetros do gerador de indução e síncrono. Os ensaios e metodologias para levantamento de parâmetros para simulações digitais encontram-se na literatura clássica, os ensaios do gerador síncrono encontram-se em (SILVA, 2015).

Tabela 4.2.1 – Dados e parâmetros do gerador de indução

PARÂMETROS	VALORES
Potência	3 [cv]
Tensão	380/220 [V]
Corrente	4,96/8,57 [A]
Ligaçāo	Y/Δ
Polos	4
Fator de potência	0,85
Rendimento	0,793
Frequência	60 [Hz]
Resistência do estator	2,85 [Ω]

Resistência do rotor	2,58 [Ω]
Reatância de magnetização	79,47 [Ω]
Reatância de dispersão do estator	1,66 [Ω]
Reatância de dispersão do rotor	3,54 [Ω]
Inércia do rotor	0,0075 [kg.m ²]

Tabela 4.2.2 – Parâmetros do gerador síncrono

PARÂMETROS	VALORES
Resistência do estator	0,0546 [pu]
Reatância de eixo direto	1,85 [pu]
Reatância de eixo quadratura	1,43 [pu]
Reatância transitória de eixo direto	0,37 [pu]
Reatância subtransitória de eixo direto	0,22 [pu]
Reatância subtransitória de eixo quadratura	0,20 [pu]
Reatância de dispersão	0,077 [pu]
Constante de inércia	0,4387 [s]
Constante de tempo transitória de circuito aberto – eixo direto	4,4849 [s]
Constante de tempo subtransitória de circuito aberto – eixo direto	0,0681 [s]
Constante de tempo subtransitória de circuito aberto – eixo quadratura	0,1 [s]
Constante de tempo transitória de curto circuito – eixo direto	2,4 [s]
Constante de tempo subtransitória de curto circuito – eixo direto	0,02 [s]
Constante de tempo subtransitória de curto circuito – eixo quadratura	0,02 [s]

Tabela 2.2.3 – Dados do gerador síncrono

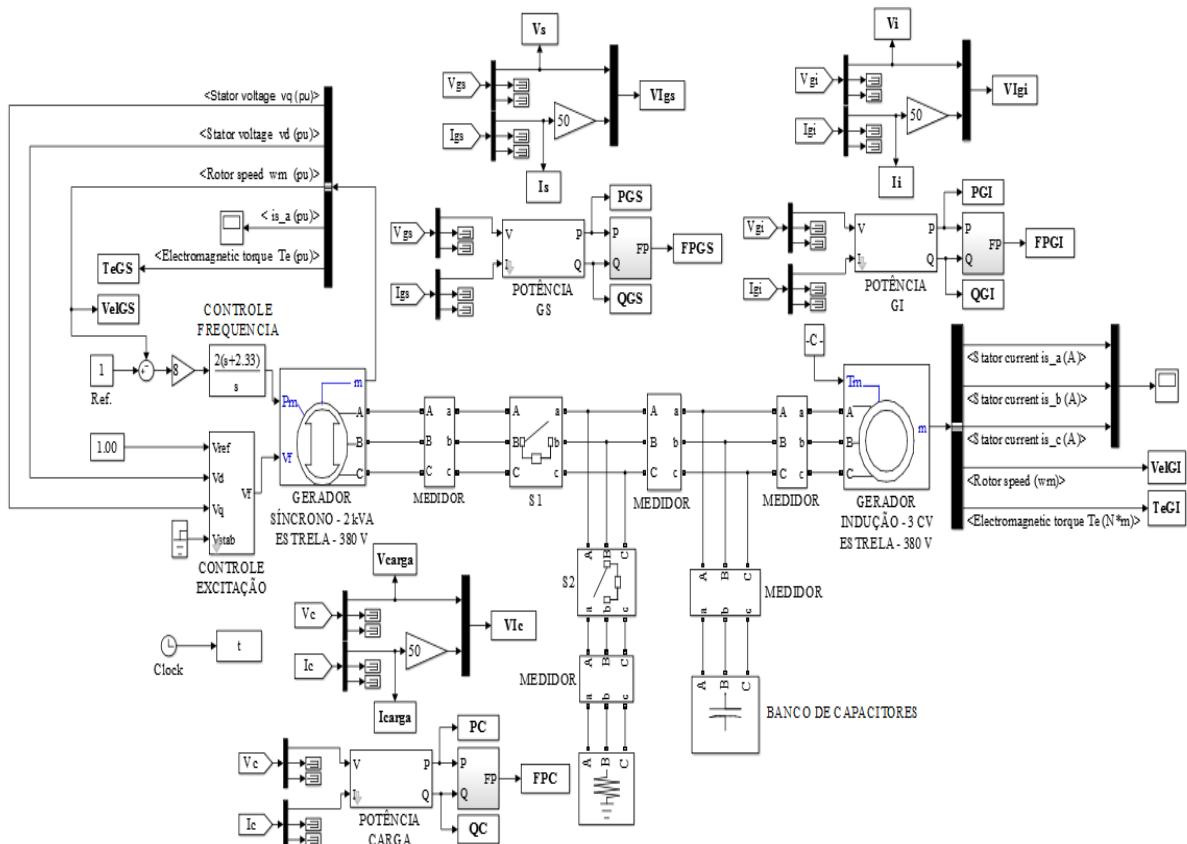
PARÂMETROS	VALORES
Vn - YY/ΔΔ e Y/Δ	230/133 V e 460/266 V
In - YY/ΔΔ e Y/Δ	5/8,8 A e 2,4/4,4 A
Corrente de Campo Máx	0,6 A
Potência	2 [kVA]
Fator de potência	0,8
Polos	4
Frequência	60 [Hz]
Isolação	A

4.2.1 – Simulação carga resistiva

Este caso consiste na simulação do gerador de indução auto-excitado juntamente com o gerador síncrono alimentando uma carga resistiva. A Figura 4.2.1 mostra a arquitetura da simulação em Matlab/Simulink® . As manobras da simulação são dadas pela Tabela 4.2.4.

Tabela 4.2.4 – Manobras realizadas na simulação

TEMPO (s)	CHAVEAMENTOS (MANOBRAS)
0	Partida do sistema. Início da simulação.
3	Liga-se chave S1, gerador síncrono opera em paralelo com gerador de indução a vazio.
4	Liga-se chave S2, gerador síncrono opera em paralelo com gerador de indução suprido a carga
10	Desliga o sistema. Fim da simulação

**Figura 4.2.1 – Modelagem computacional do gerador síncrono e de indução auto-excitado alimentando uma carga resistiva.**

Os resultados da simulação para o gerador síncrono, indução e carga são dados pelas Figuras 4.2.2-4.2.7, Figuras 4.2.8-4.2.13 e Figuras 4.2.14-4.2.16, respectivamente. Nota-se que a potência ativa entregue pelo gerador síncrono a carga é mínima, conforme mostrado pela Figura 4.2.3, ou seja, o gerador síncrono tem por função realizar o controle de tensão para o gerador de indução e entregar o mínimo de potência ativa possível. A Figura 4.2.4, mostra que o gerador síncrono está absorvendo reativo excedente (devido carga ser menor que a nominal) do banco de capacitores do gerador de indução, realizando assim o controle da tensão terminal.

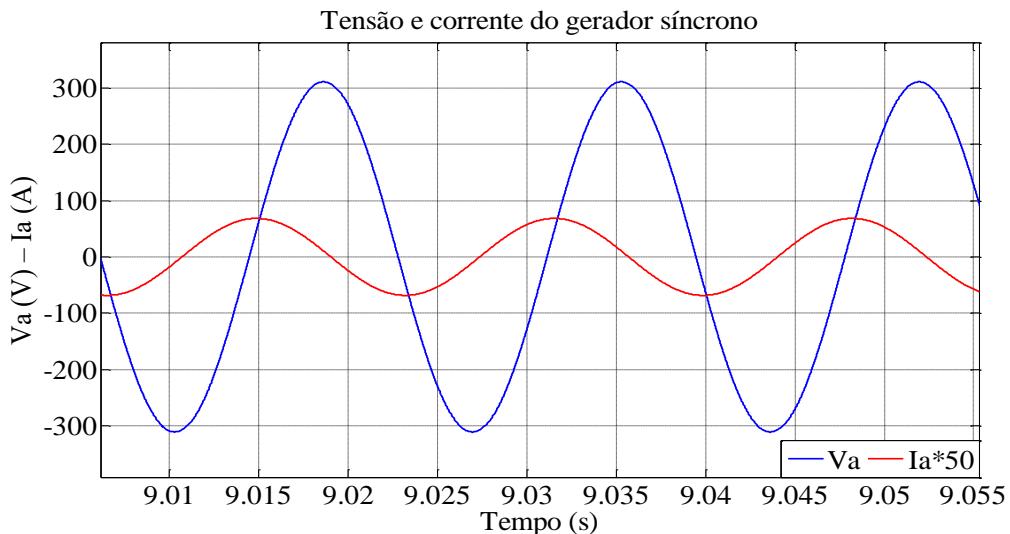


Figura 4.2.2 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, simulação para carga resistiva.

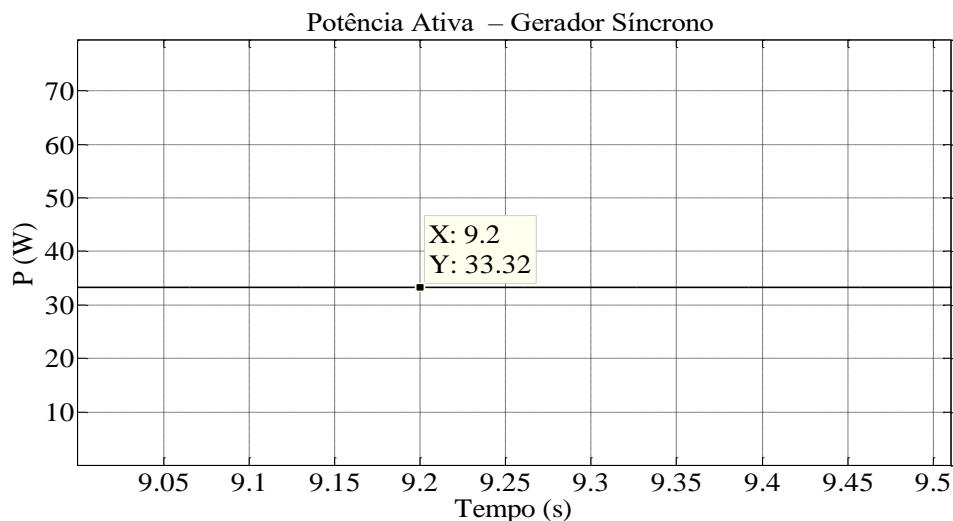


Figura 4.2.3 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador síncrono, simulação para carga resistiva.

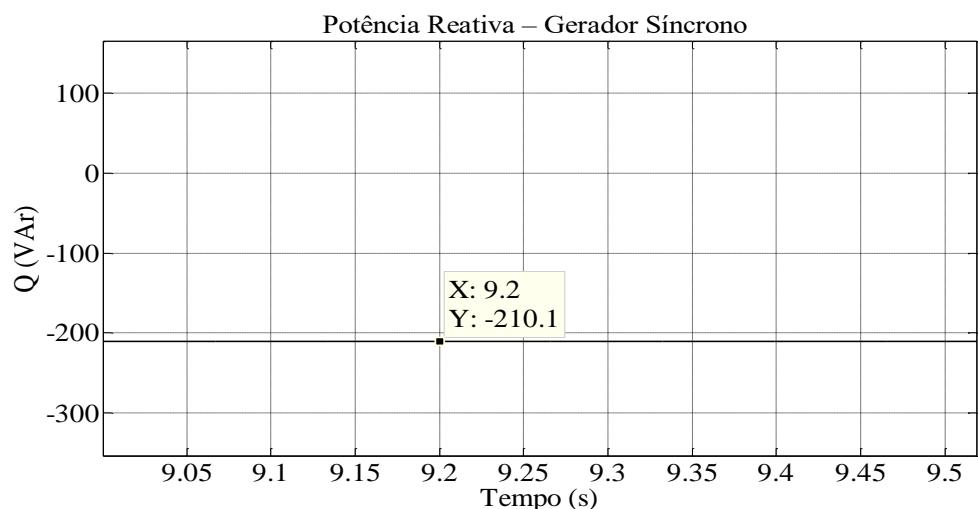


Figura 4.2.4 – Potência reativa de fase absorvida pelo gerador síncrono, simulação para carga resistiva.

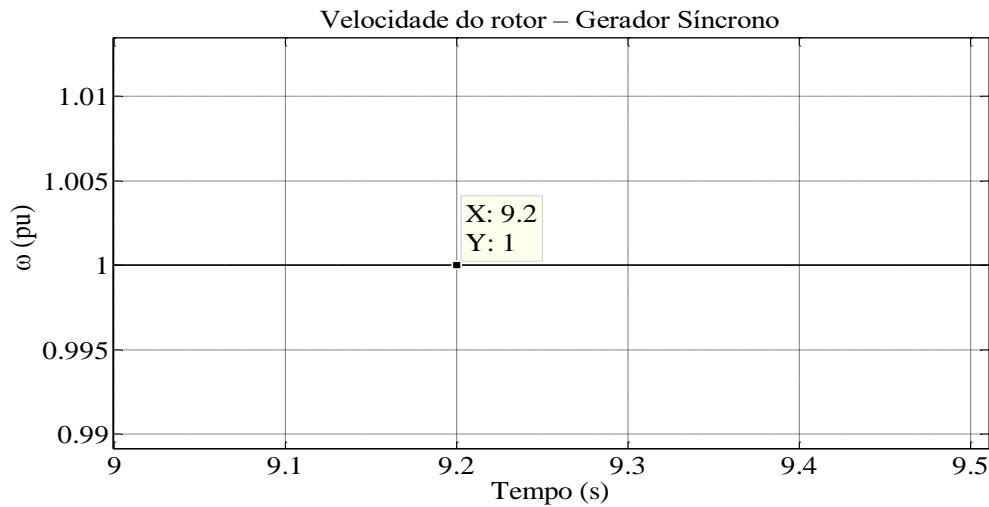


Figura 4.2.5 – Velocidade mecânica do gerador síncrono, simulação para carga resistiva.

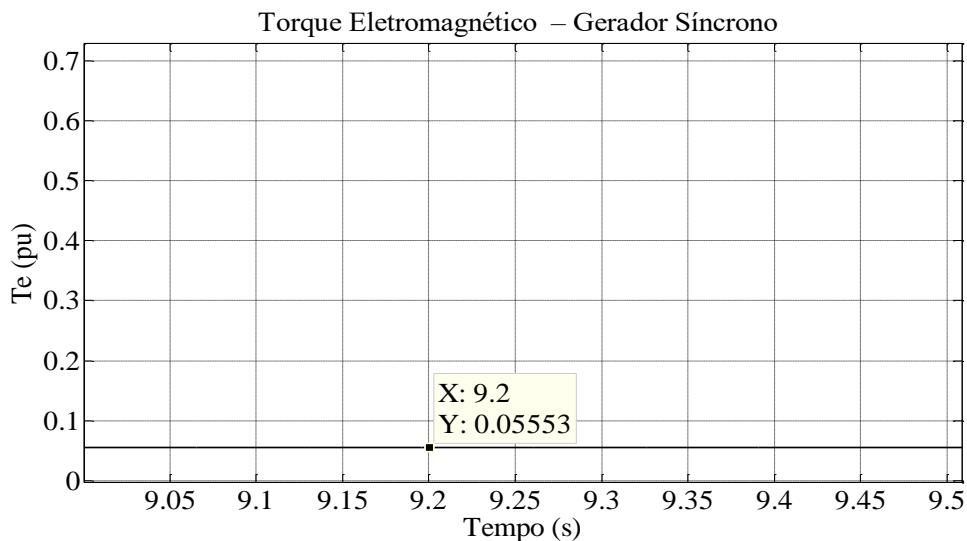


Figura 4.2.6 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono, simulação para carga resistiva.

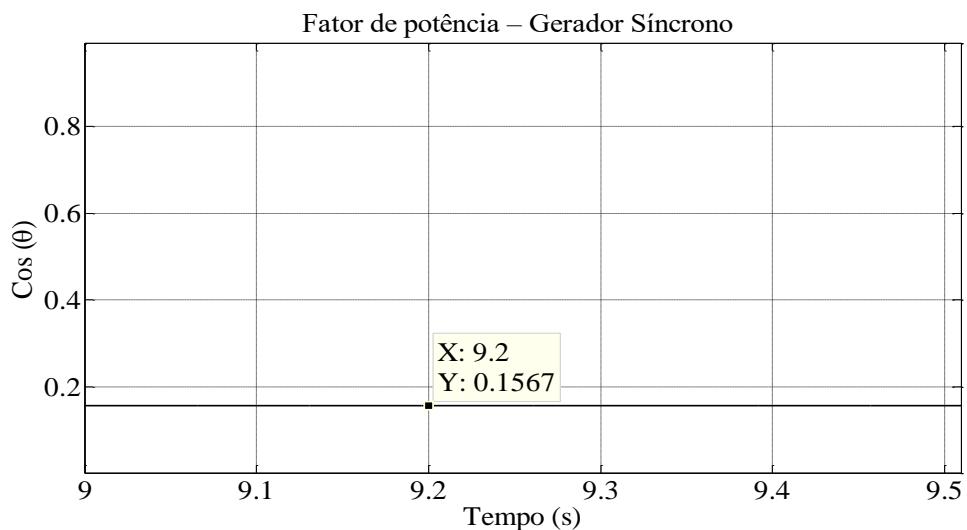


Figura 4.2.7 – Fator de potência do gerador síncrono, simulação para carga resistiva.

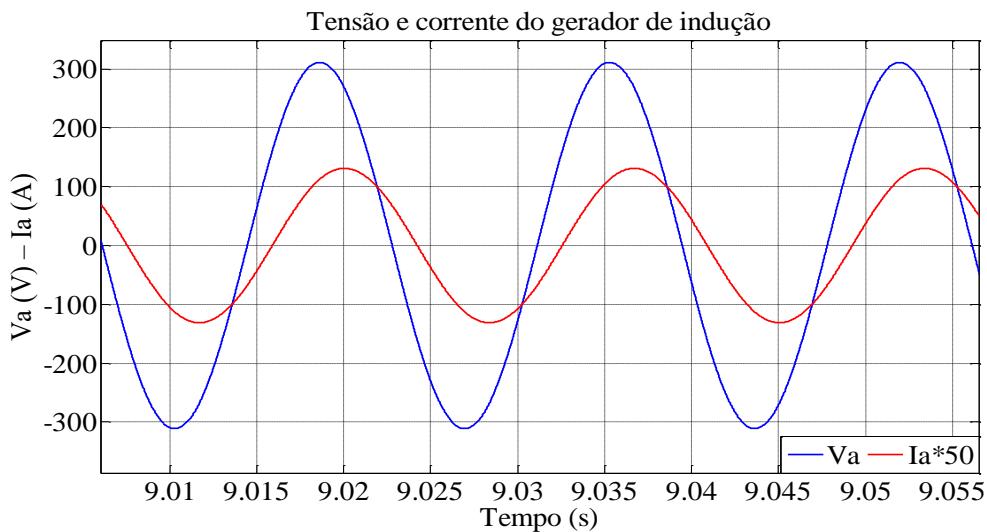


Figura 4.2.8 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, simulação para carga resistiva.

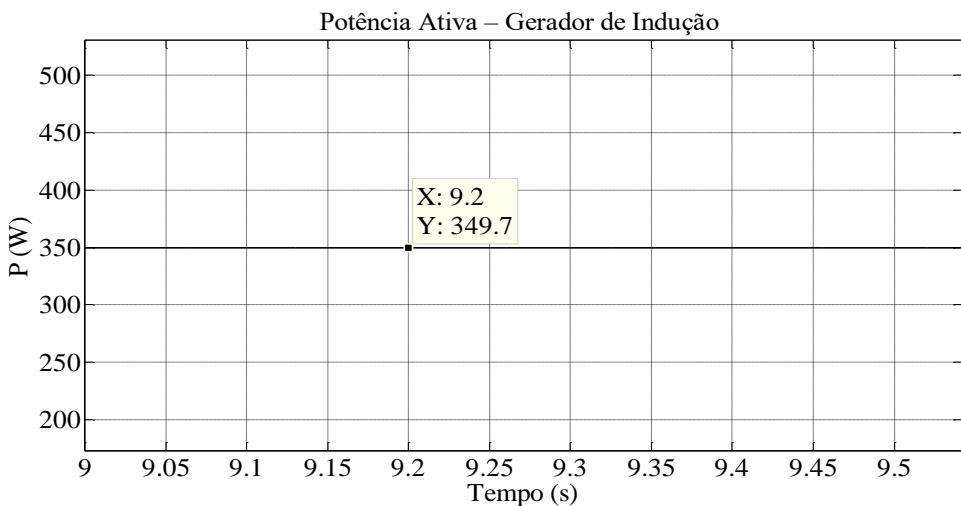


Figura 4.2.9 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador de indução, simulação para carga resistiva.

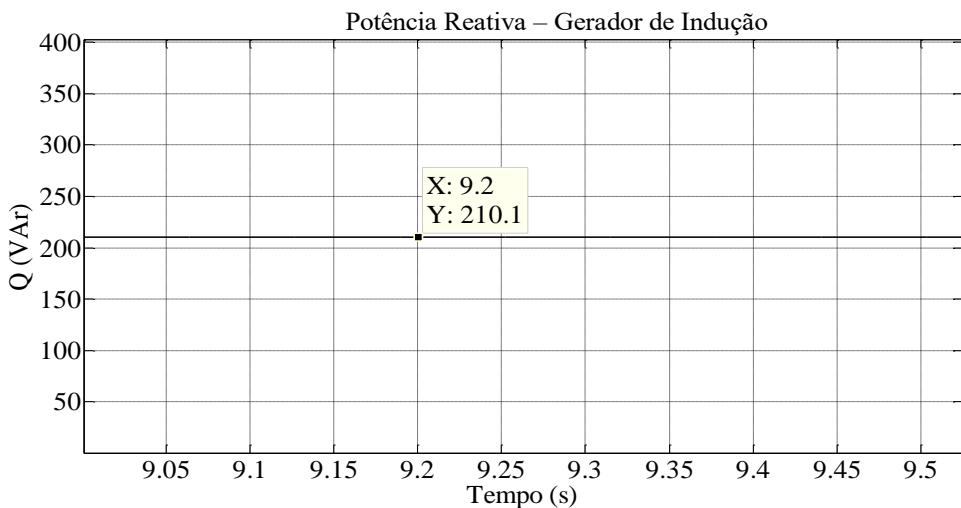


Figura 4.2.10 – Potência reativa de fase fornecida pelo banco de capacitores, simulação para carga resistiva.

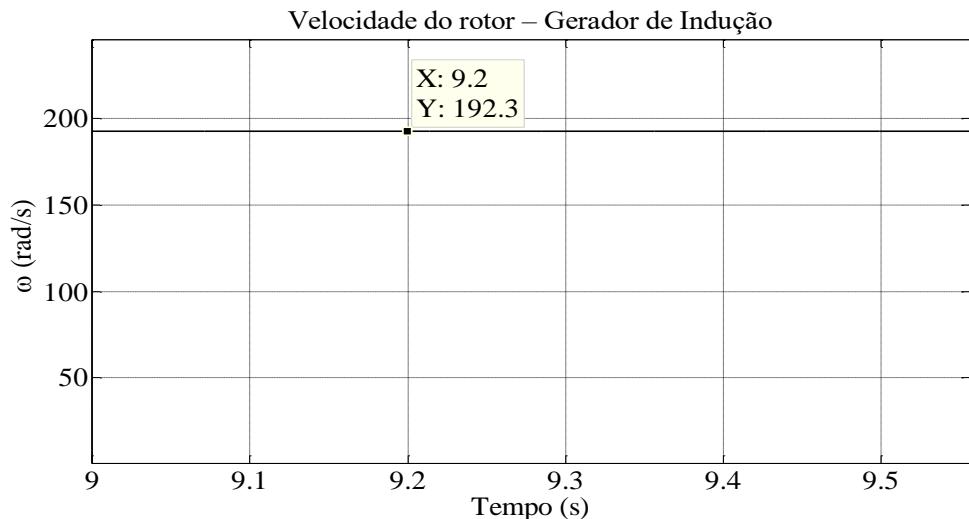


Figura 4.2.11 – Velocidade mecânica do gerador de indução, simulação para carga resistiva.

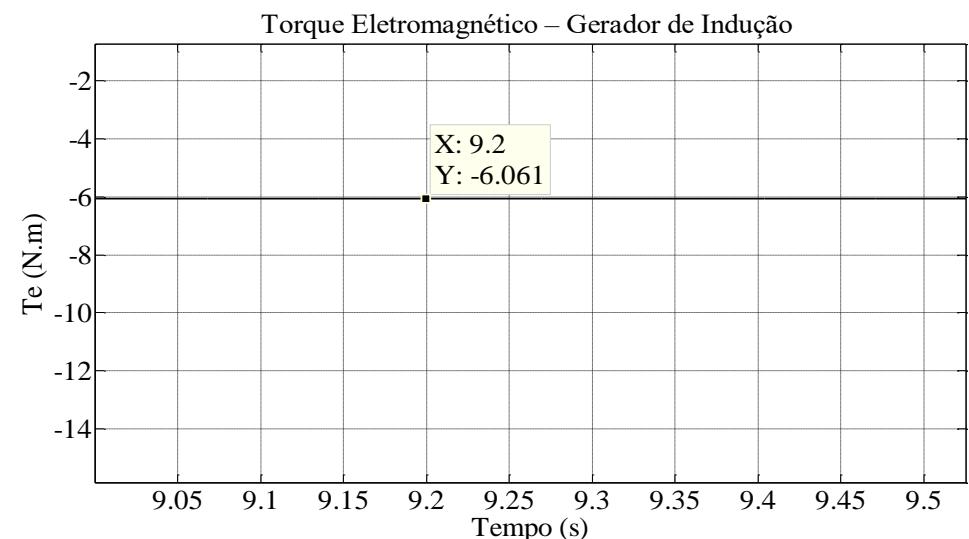


Figura 4.2.12 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador de indução, simulação para carga resistiva.

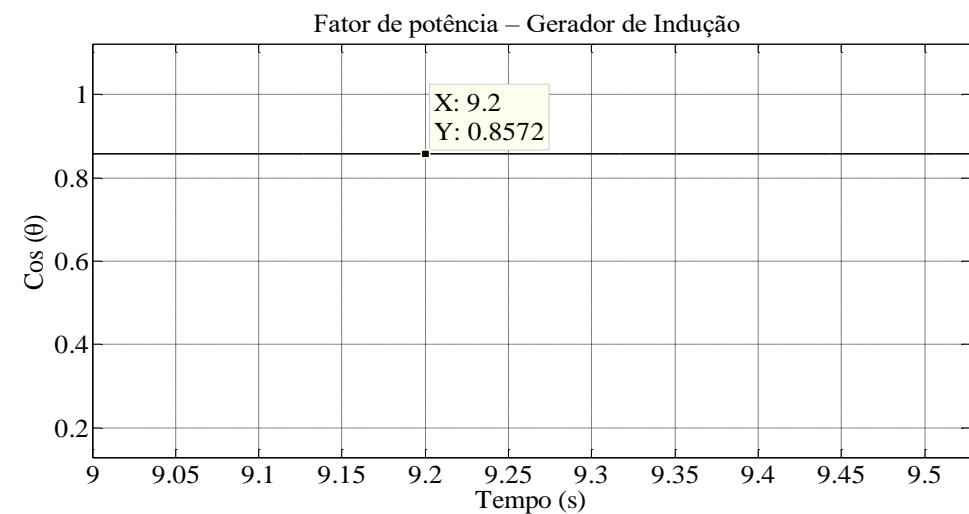


Figura 4.2.13 – Fator de potência do gerador de indução, simulação para carga resistiva.

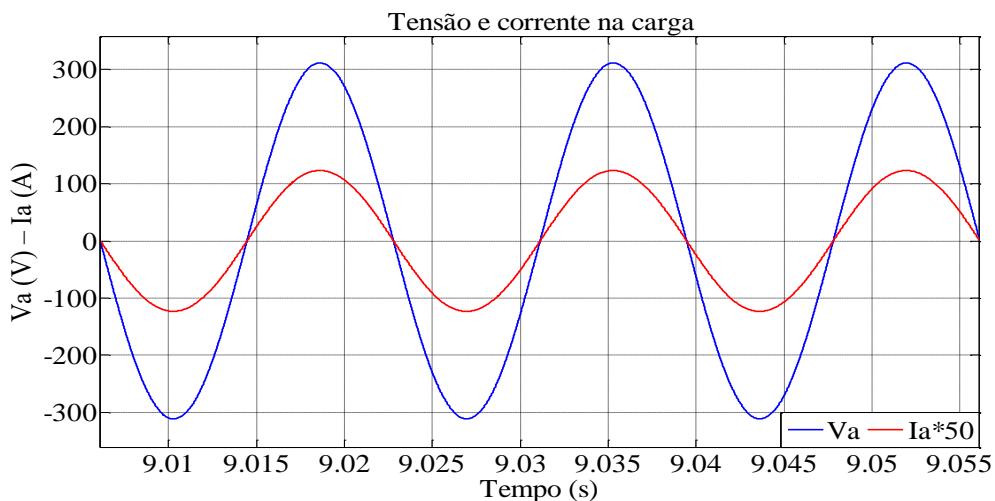


Figura 4.2.14 - Tensão e corrente de fase na carga resistiva.

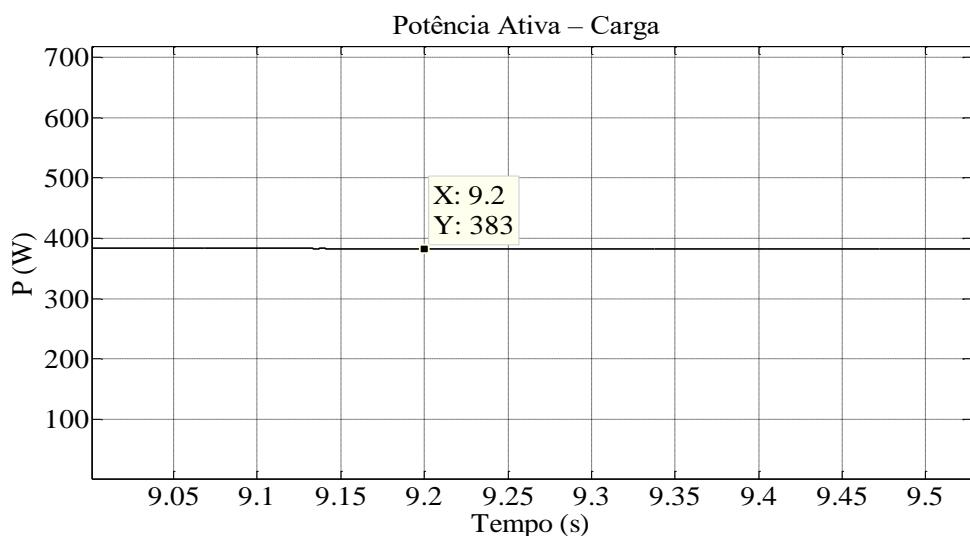


Figura 4.2.15 - Potência ativa de fase consumida pela carga resistiva.

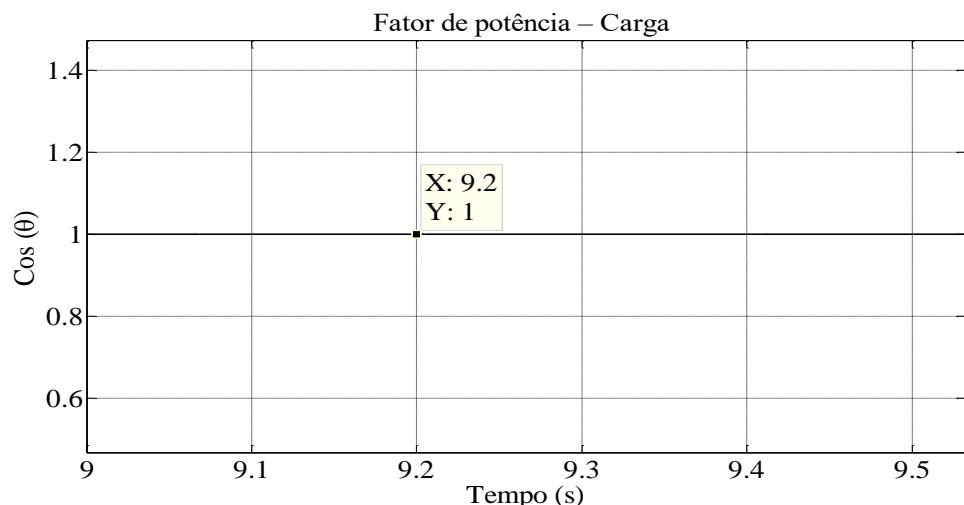


Figura 4.2.16 – Fator de potência da carga resistiva.

Por ser carga resistiva, a potência reativa é zero, e o fator de potência unitário.

4.2.2 – Simulação carga indutiva

Devido as cargas em sua maioria serem indutiva, neste caso simula-se o gerador de indução auto-excitado juntamente com o gerador síncrono alimentando uma carga indutiva. A Figura 4.2 mostra a arquitetura da simulação em Matlab/Simulink®.

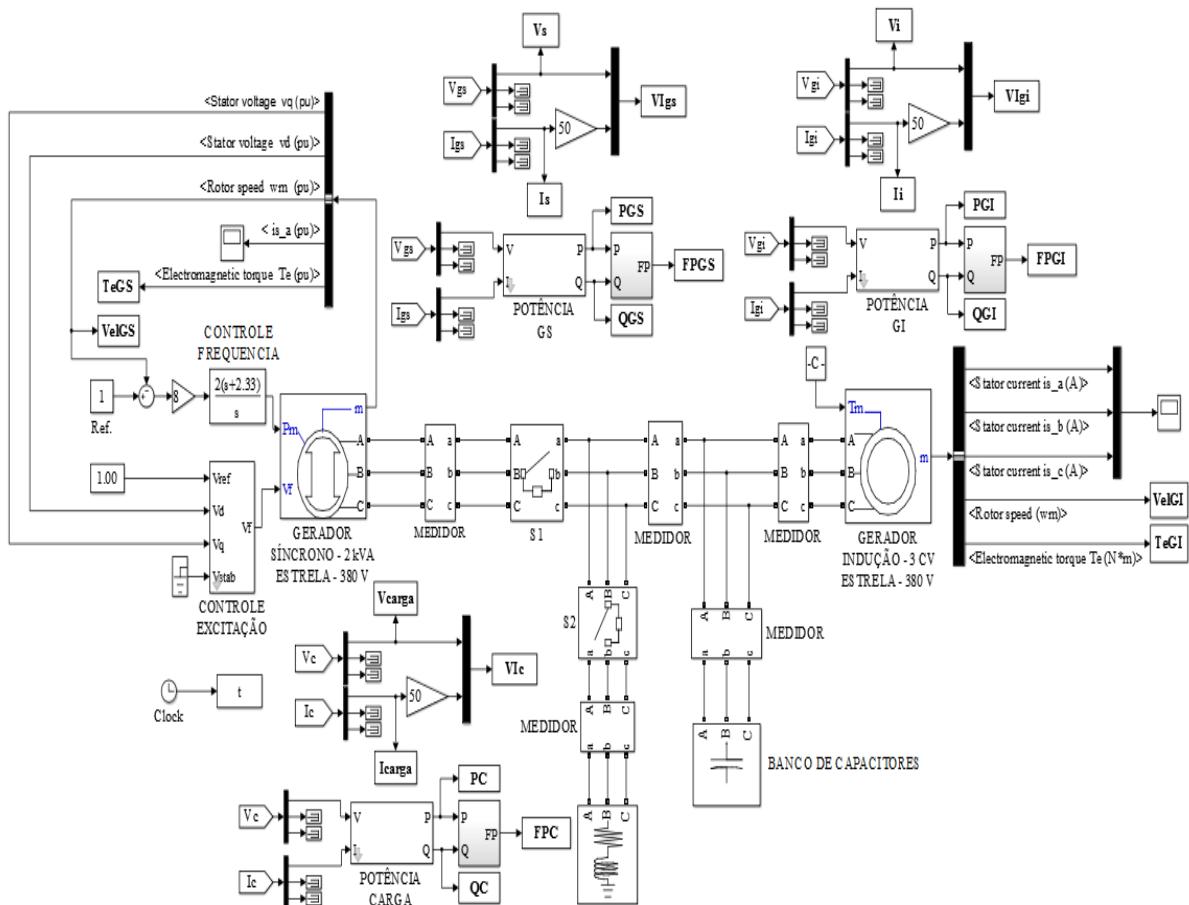


Figura 4.2.17 – Modelagem computacional do gerador síncrono e de indução alimentando uma carga indutiva.

Os resultados da simulação para o gerador síncrono, indução e carga são dados pelas Figuras 4.2.18-4.2.23, Figuras 4.2.24-4.2.29 e Figuras 4.2.30-4.2.33, respectivamente. Percebe-se que aqui também, a potência ativa entregue pelo gerador síncrono para a carga é mínima, conforme mostrado pela Figura 4.2.19. A Figura 4.2.20, mostra que o gerador síncrono está entregando reativo para suprir a carga indutiva, nota-se que o reativo do banco de capacitores do gerador de indução excedente devido ao não carregamento nominal, também contribui para entrega de reativo para carga.

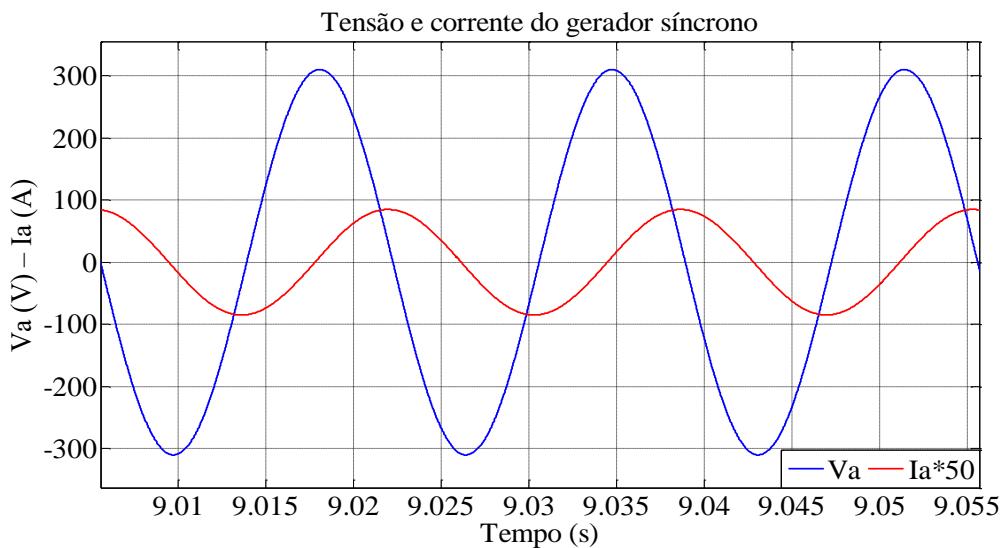


Figura 4.2.18 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, simulação para carga indutiva.

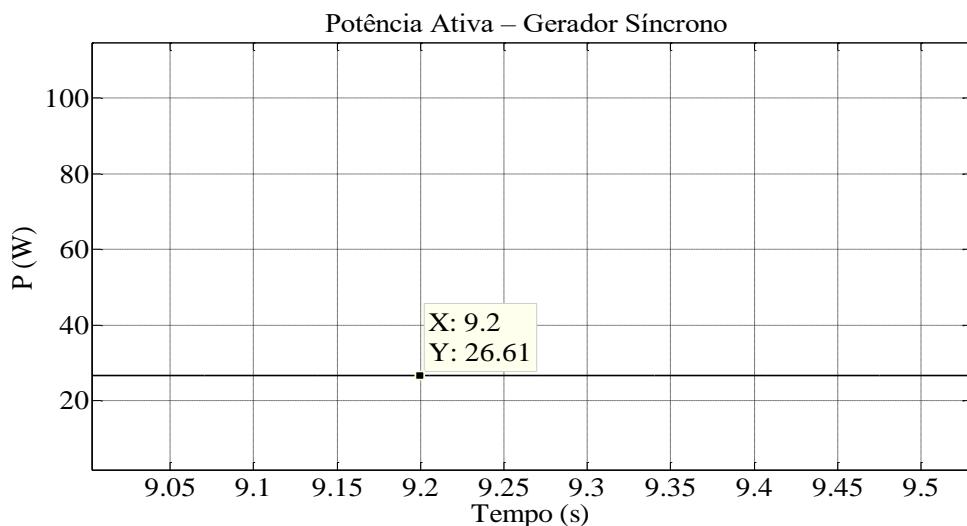


Figura 4.2.19 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva.

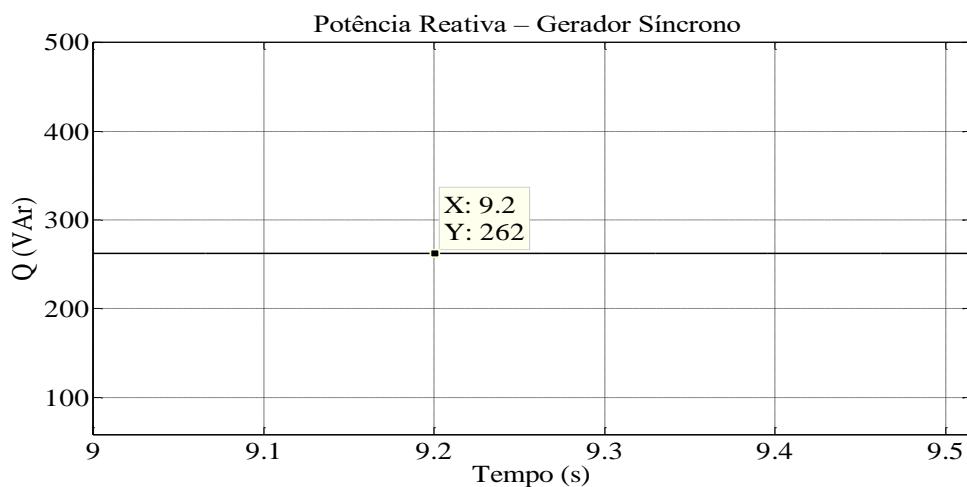


Figura 4.2.20 – Potência reativa de fase entregue pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva.

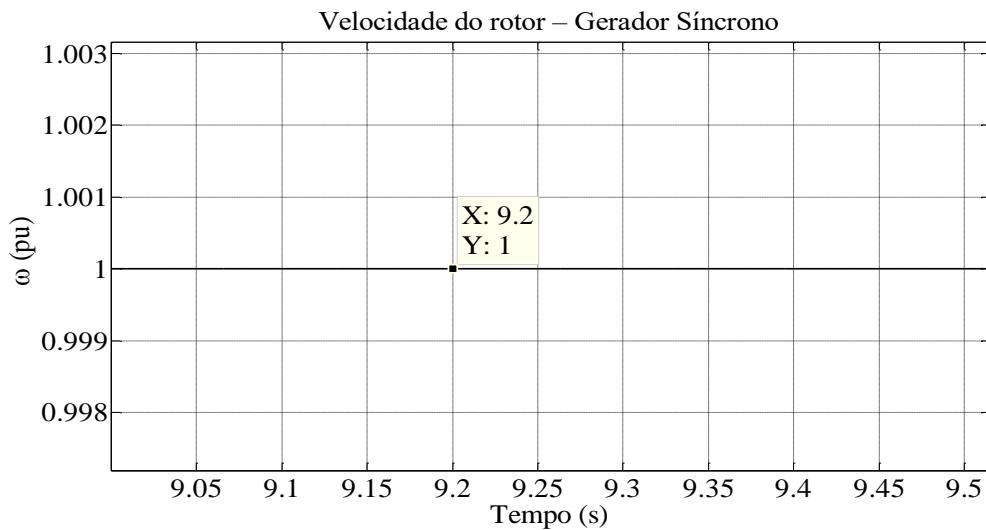


Figura 4.2.21 – Velocidade mecânica do gerador síncrono, simulação para carga indutiva.

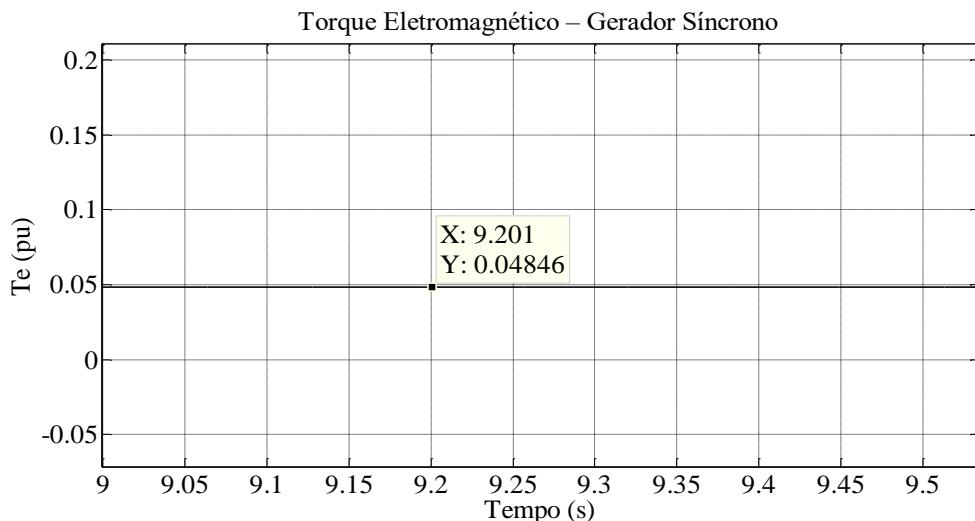


Figura 4.2.22 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva.

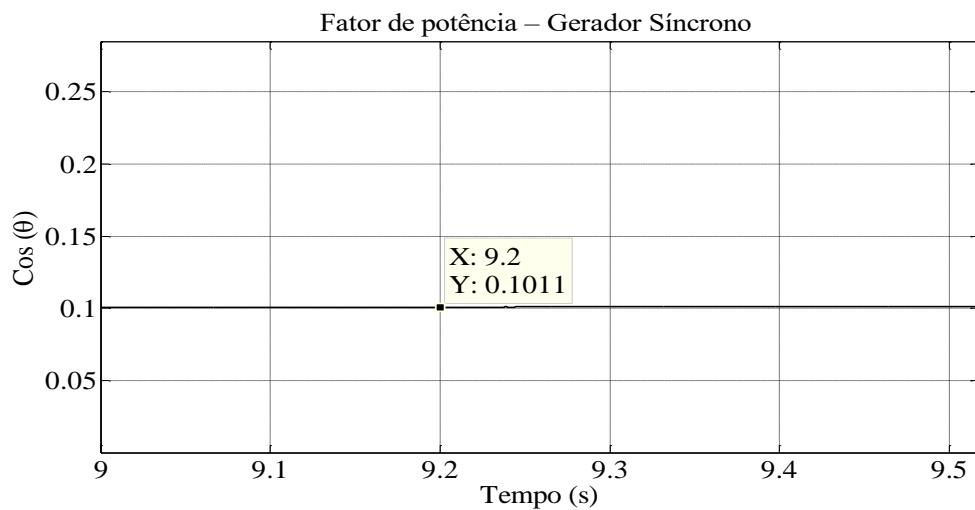


Figura 4.2.23 – Fator de potência do gerador síncrono, simulação para carga indutiva.

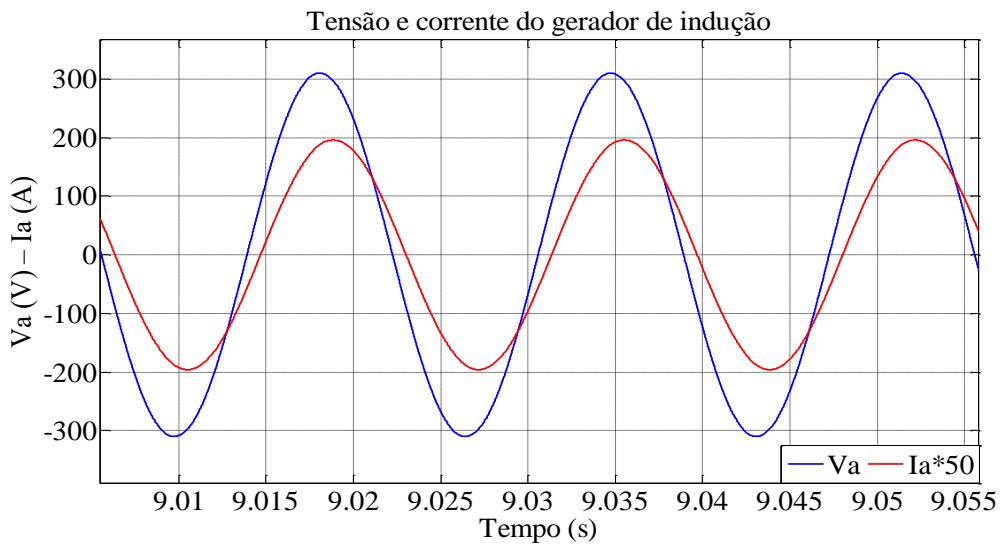


Figura 4.2.24 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, simulação para carga indutiva.

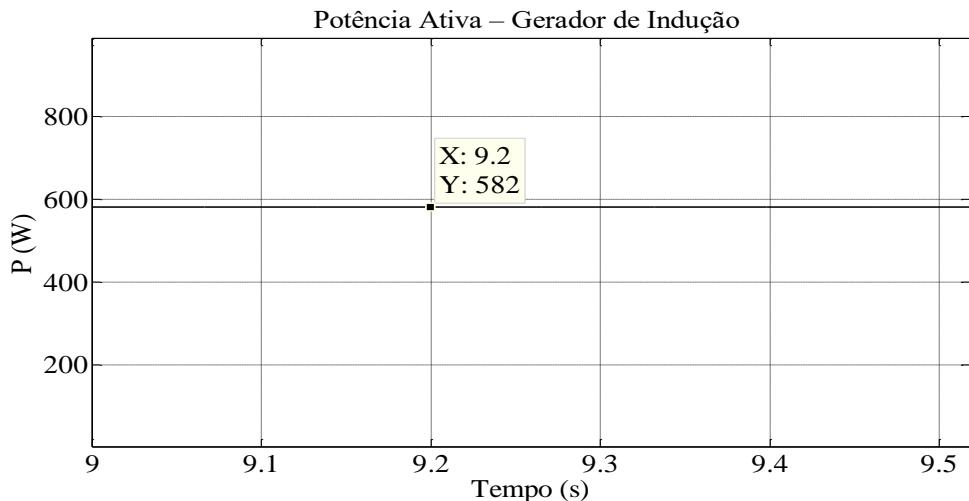


Figura 4.2.25 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva.

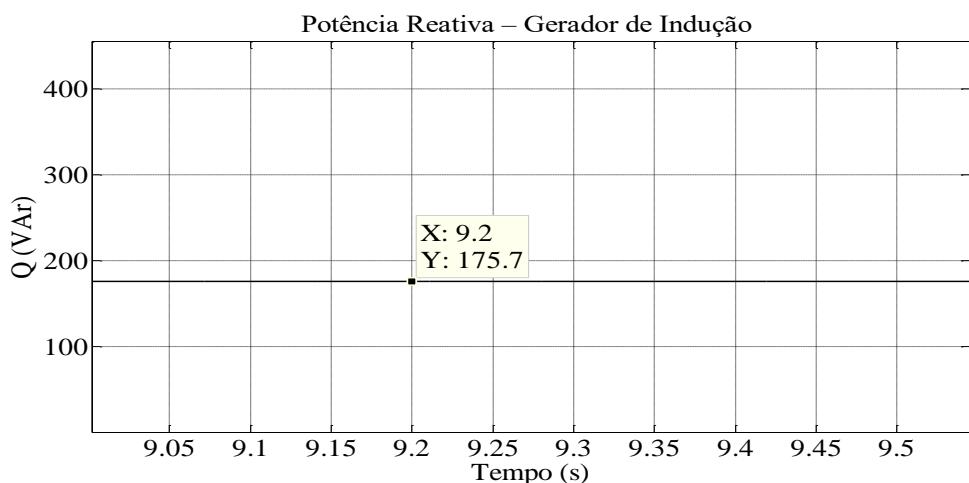


Figura 4.2.26 – Potência reativa de fase fornecida pelo banco de capacitores, simulação para carga indutiva.

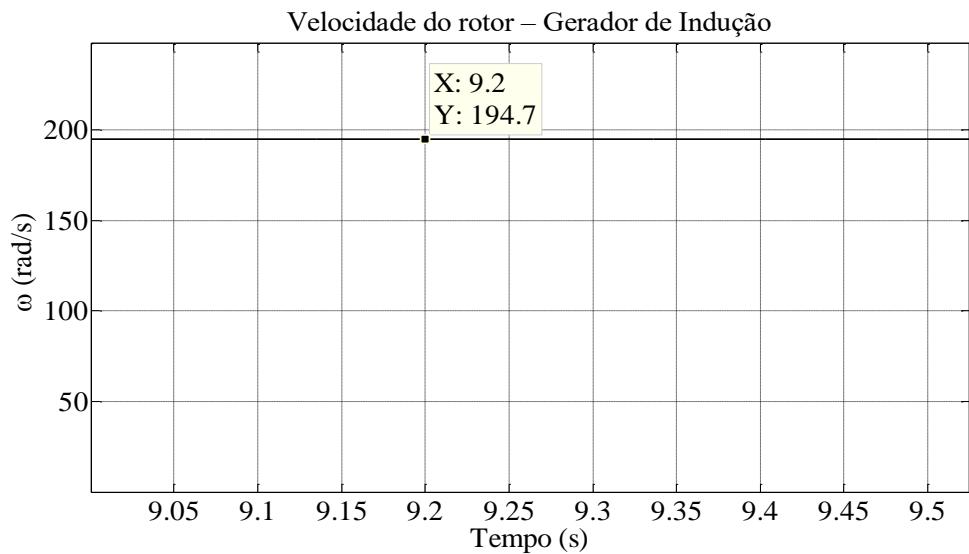


Figura 4.2.27 – Velocidade mecânica do gerador de indução, simulação para carga indutiva.

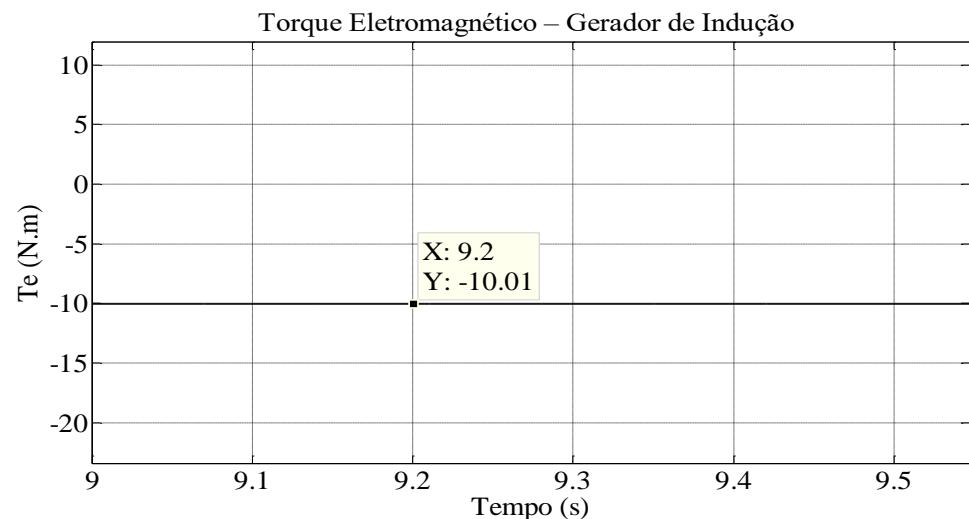


Figura 4.2.28 – Torque Eletromagnético desenvolvido pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva.

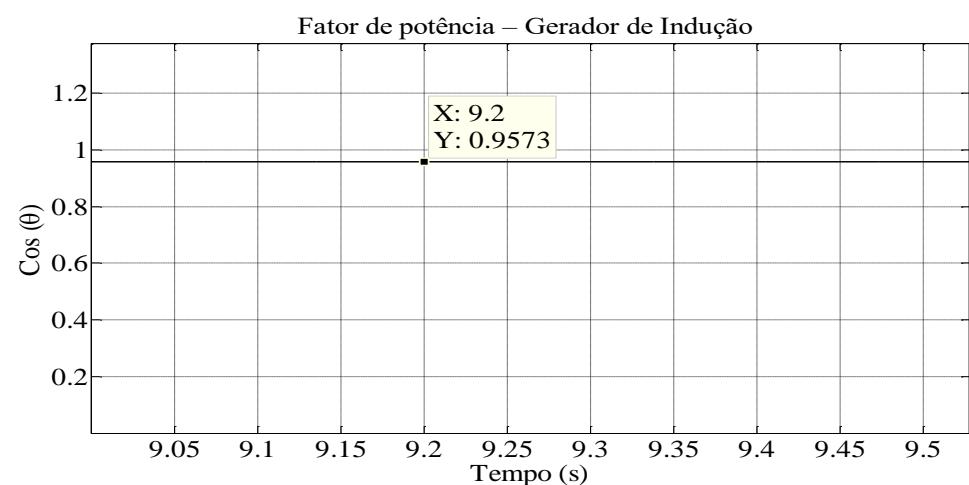
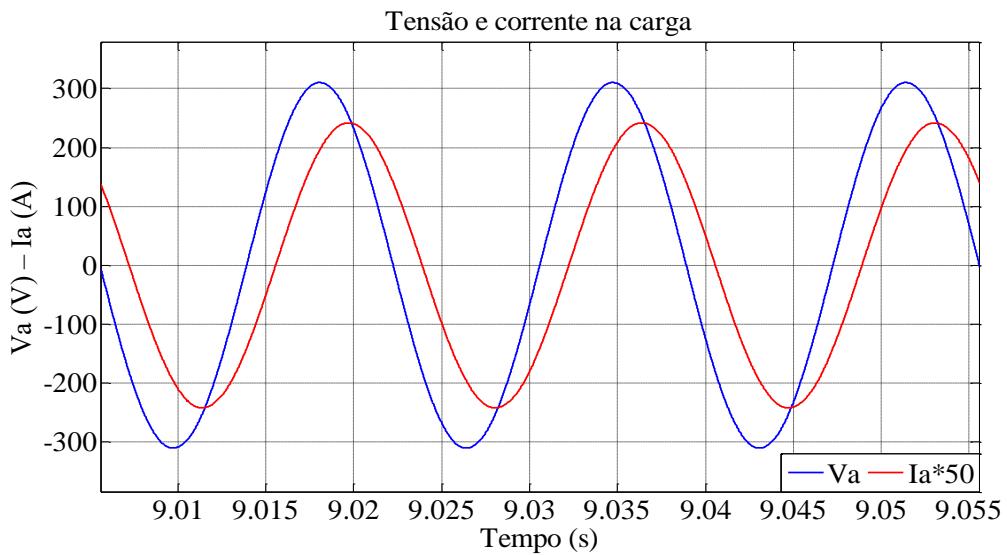
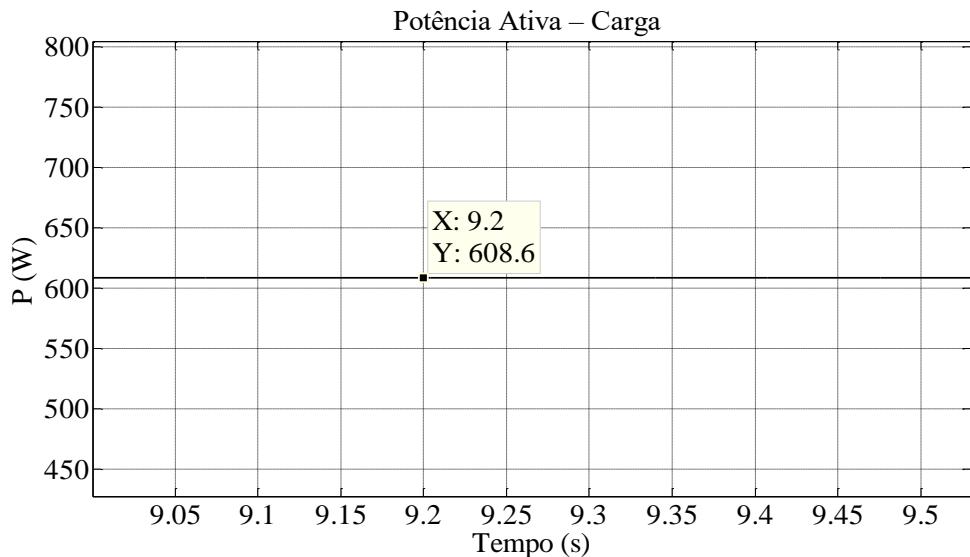
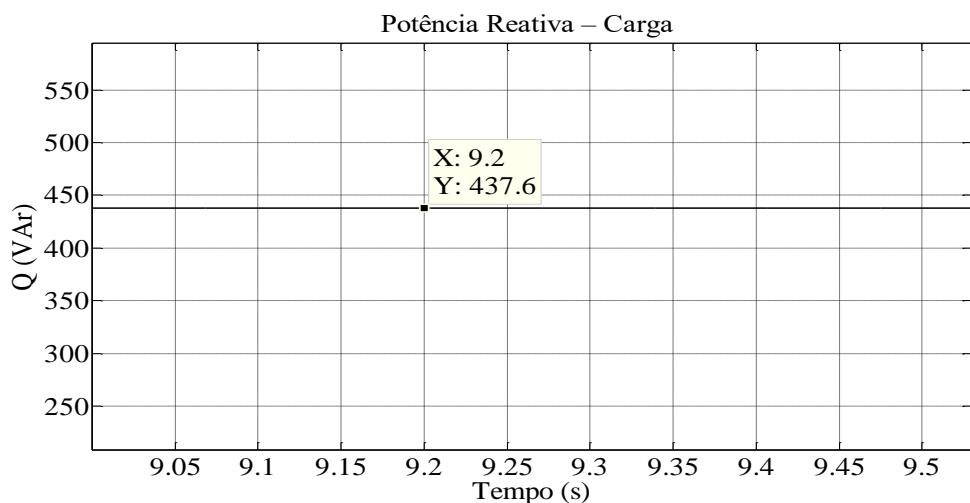


Figura 4.2.29 – Fator de potência do gerador de indução, simulação para carga indutiva.

**Figura 4.2.30 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva.****Figura 4.2.31 – Potência ativa de fase consumida pela carga indutiva.****Figura 4.2.32 – Potência reativa de fase consumida pela carga indutiva.**

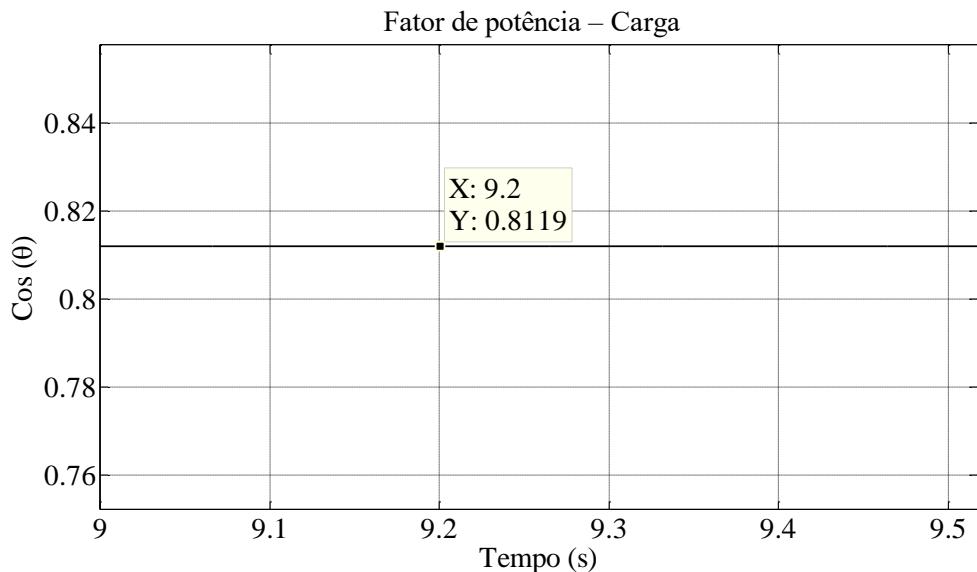


Figura 4.2.33 – Fator de potência da carga indutiva.

4.2.3 – Simulação carga indutiva com correção de fator de potência

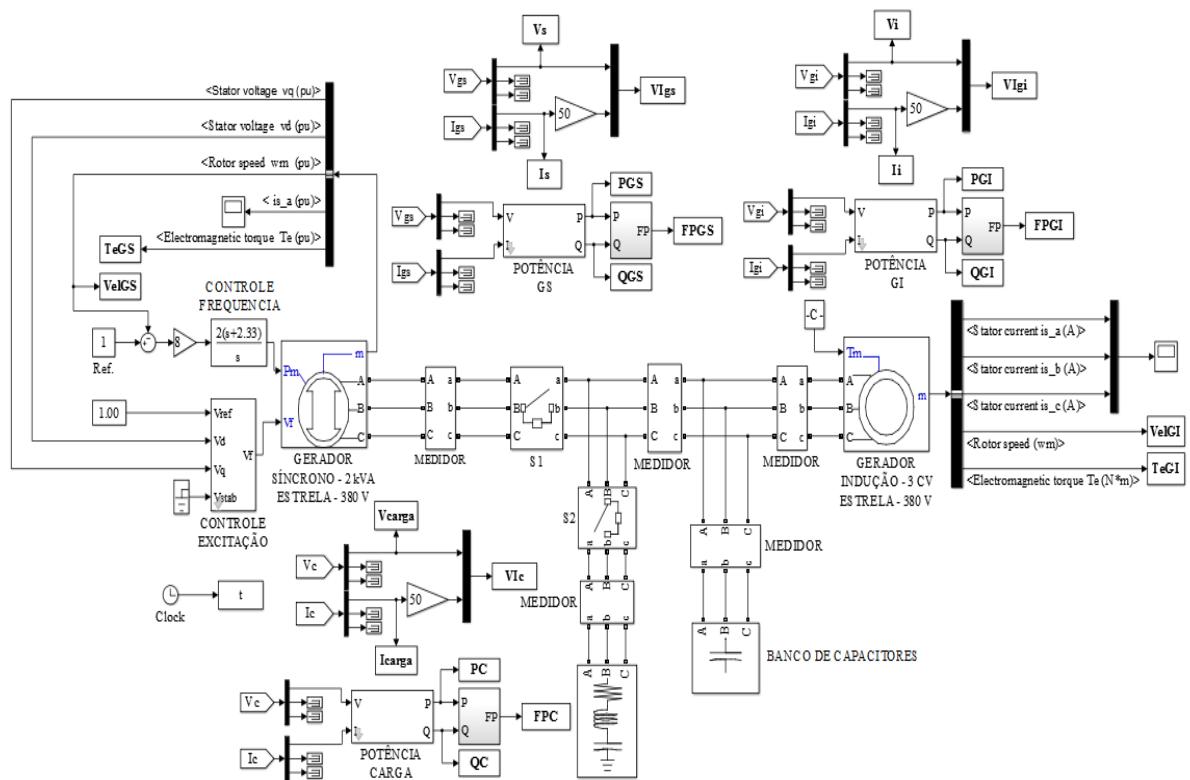


Figura 4.2.34 – Modelagem computacional na situação dos geradores síncrono e de indução alimentando uma carga indutiva com correção de fator de potência.

Adicionalmente foi realizada esta simulação, onde o gerador de indução auto-excitado juntamente com o gerador síncrono alimenta uma carga indutiva (fator de potência 0,6) com correção de fator de potência. O intuito deste caso é realizar uma simulação composta por indutores e capacitores com fator de potência próximo de 0,8. A Figura 4.3.34 mostra a arquitetura da simulação em Matlab/Simulink®. Os resultados da simulação para o gerador síncrono, indução e carga são dados pelas Figuras 4.2.35-4.2.40, Figuras 4.2.41-4.2.46 e Figuras 4.2.47-4.2.50, respectivamente.

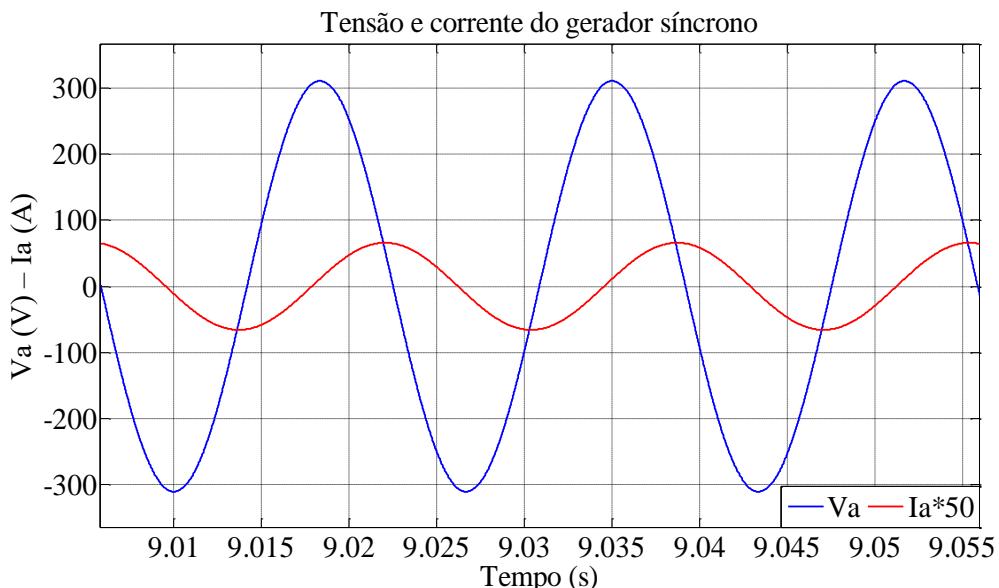


Figura 4.2.35 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

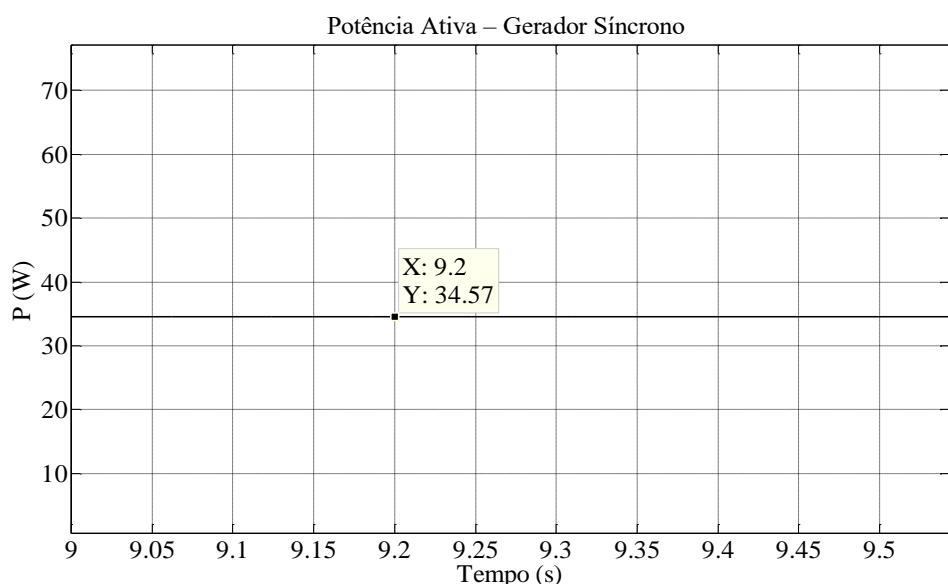


Figura 4.2.36 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

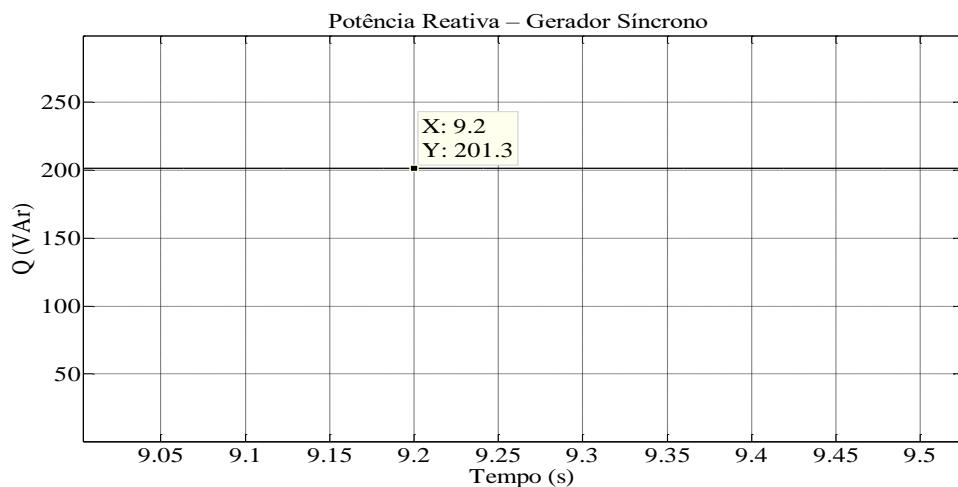


Figura 4.2.37 – Potência reativa de fase entregue pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

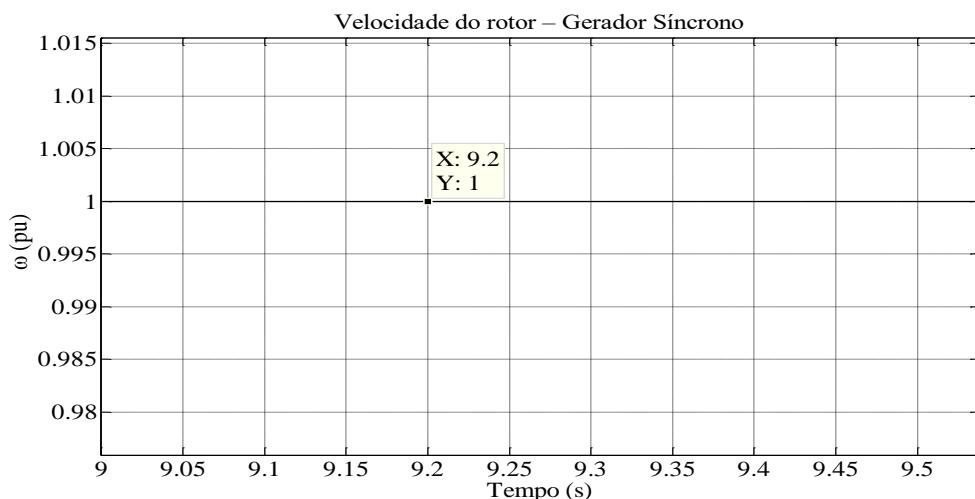


Figura 4.2.38 – Velocidade mecânica do gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

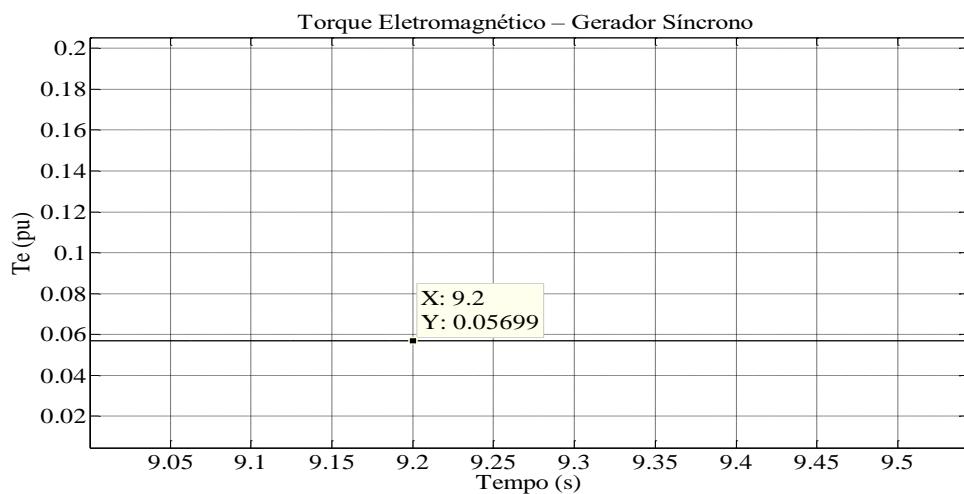


Figura 4.2.39 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

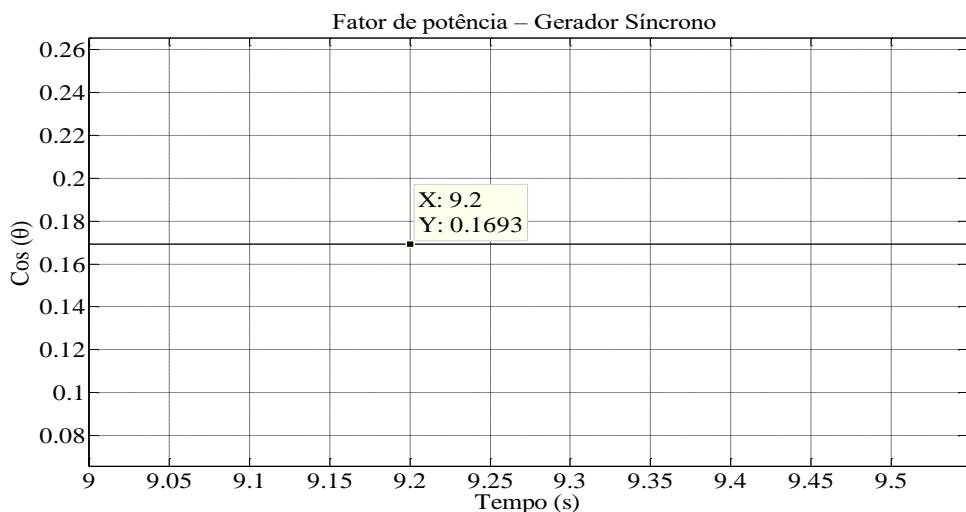


Figura 4.2.40 – Fator de potência do gerador síncrono, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

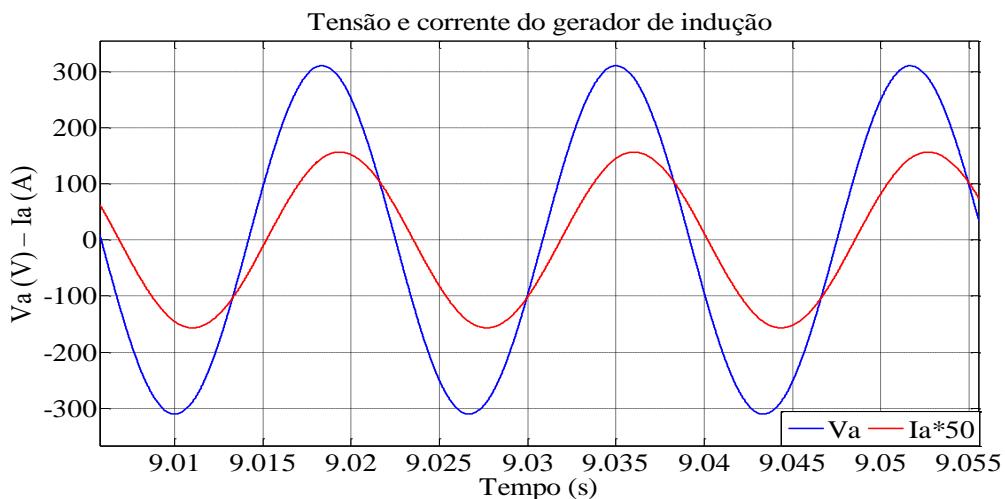


Figura 4.2.41 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

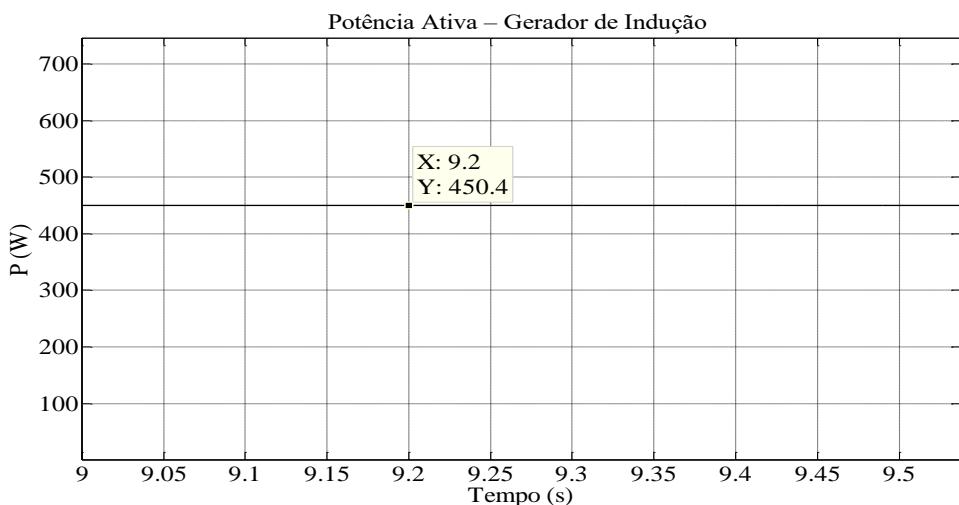


Figura 4.2.42 – Potência ativa de fase entregue a carga pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

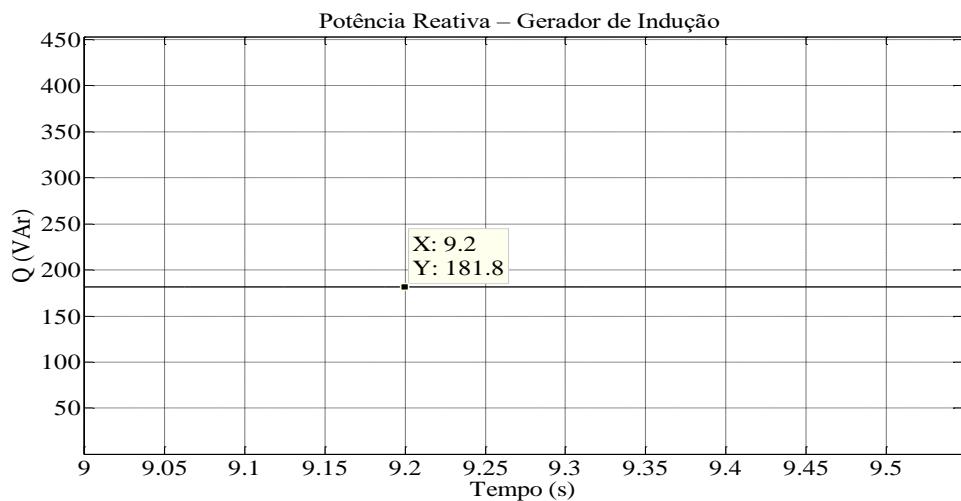


Figura 4.2.43 – Potência reativa de fase fornecida pelo banco de capacitores, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

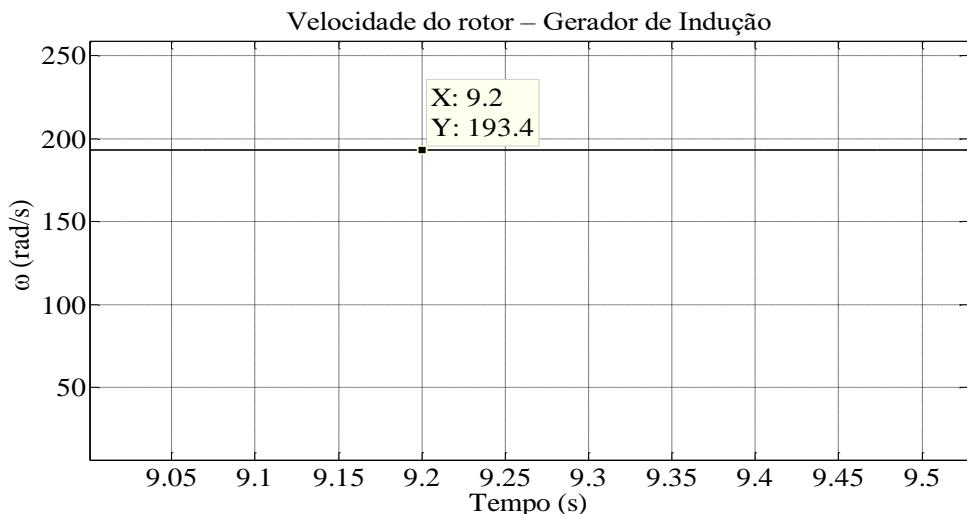


Figura 4.2.44 – Velocidade mecânica do gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

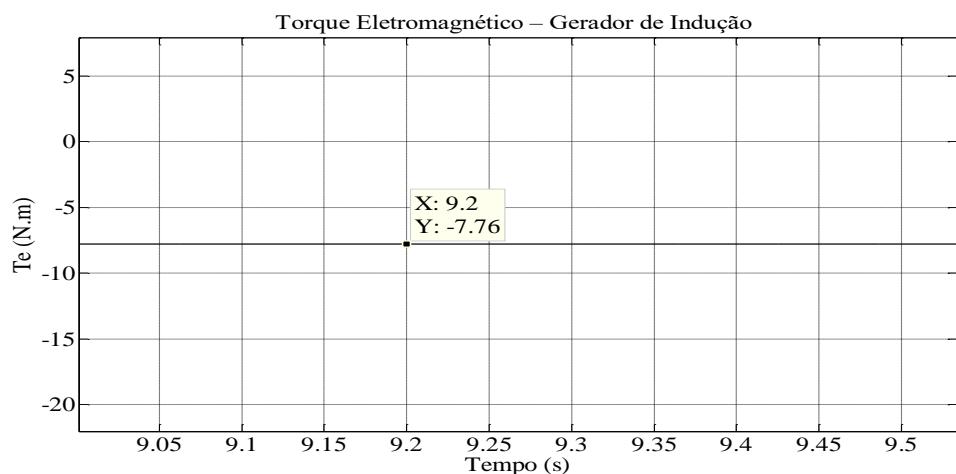


Figura 4.2.45 – Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

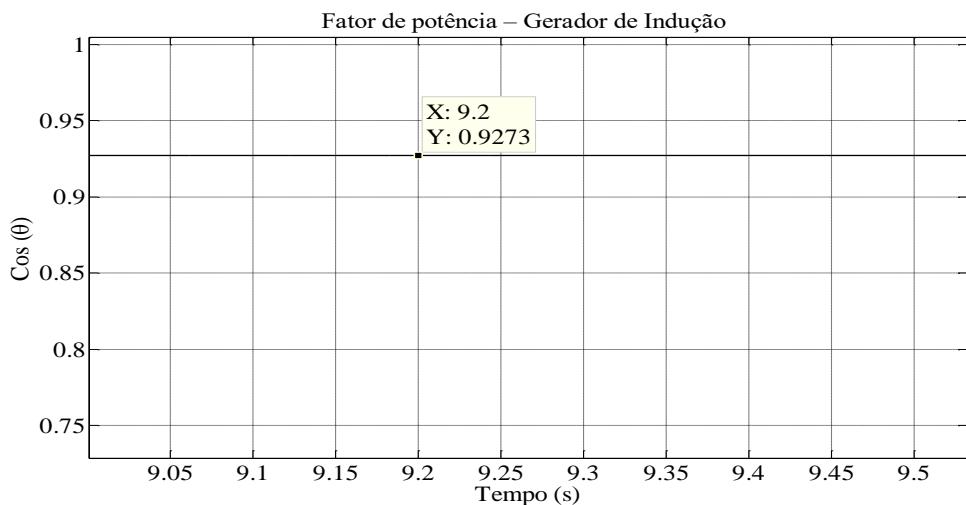


Figura 4.2.46 – Fator de potência do gerador de indução, simulação para carga indutiva com correção de fator de potência.

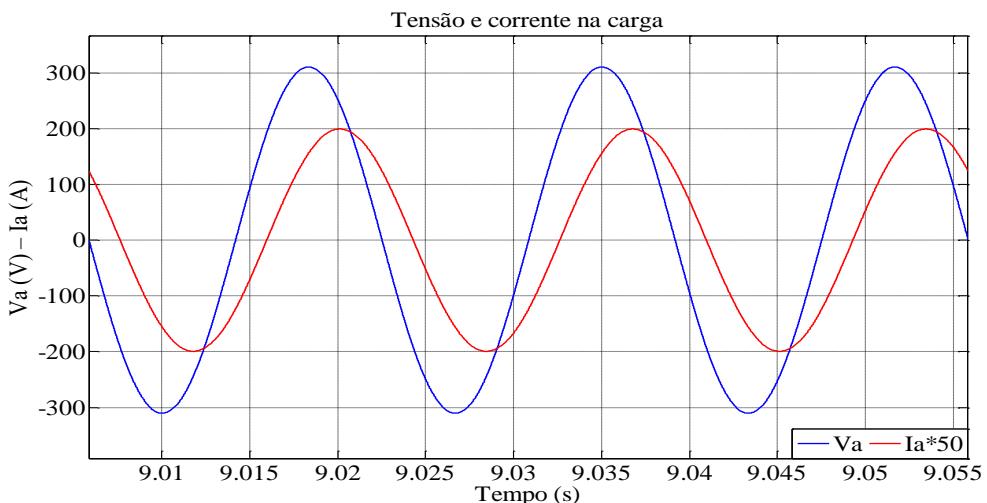


Figura 4.2.47 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva com correção de fator de potência.

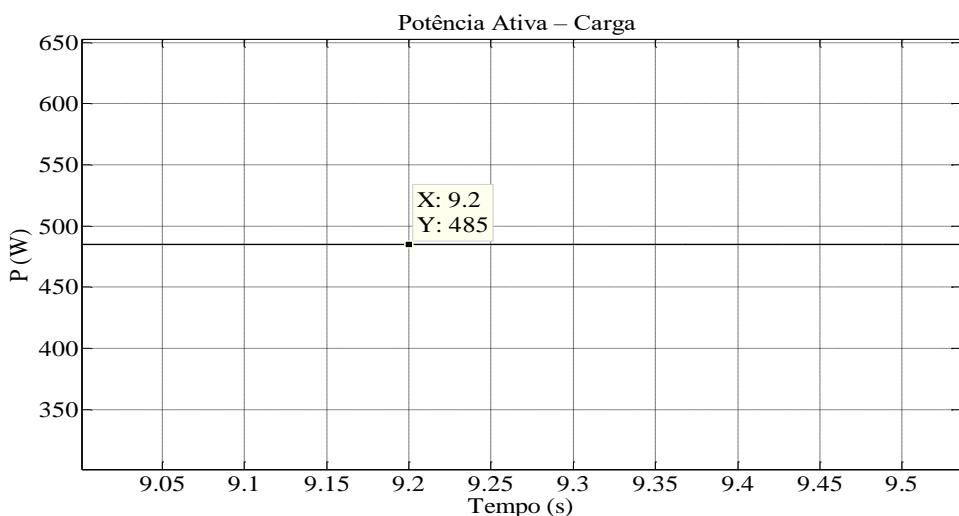


Figura 4.2.48 – Potência ativa de fase consumida pela carga indutiva com correção de fator de potência.

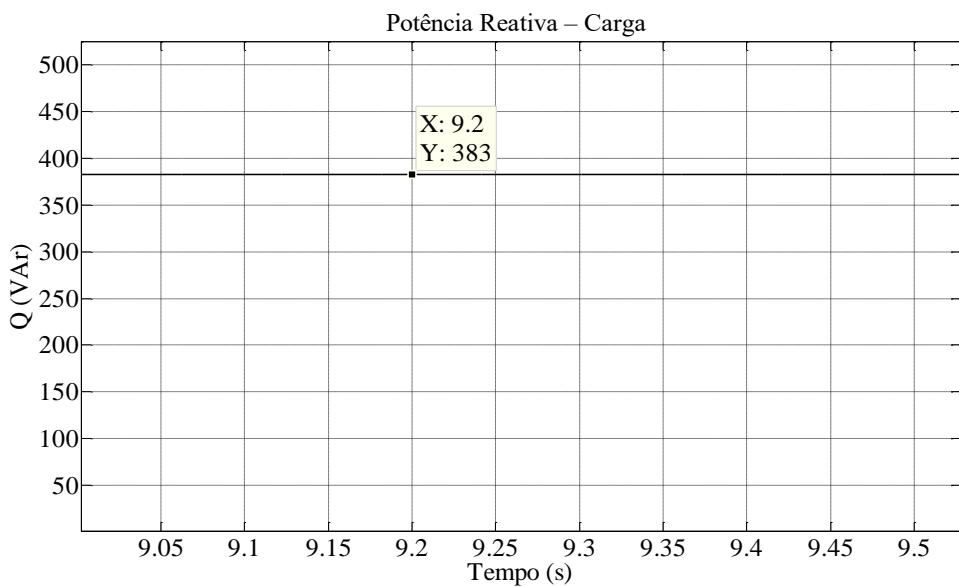


Figura 4.2.49 – Potência reativa de fase consumida pela carga indutiva com correção de fator de potência.

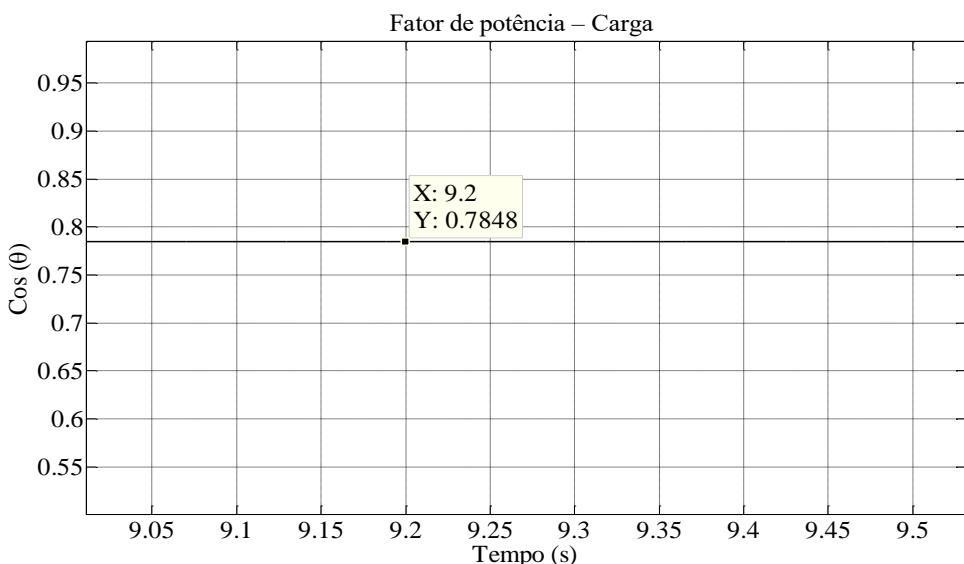


Figura 4.2.50 – Fator de potência da carga indutiva com correção de fator de potência.

4.3 – Ensaios experimentais

Os ensaios experimentais foram efetuados em bancada no laboratório, que é composta por um gerador síncrono acionado por um motor de corrente contínua e o mesmo para o gerador de indução auto-excitado. O diagrama representativo para os experimentos realizados dos grupos motores-geradores é dado pela Figura 4.3.1.

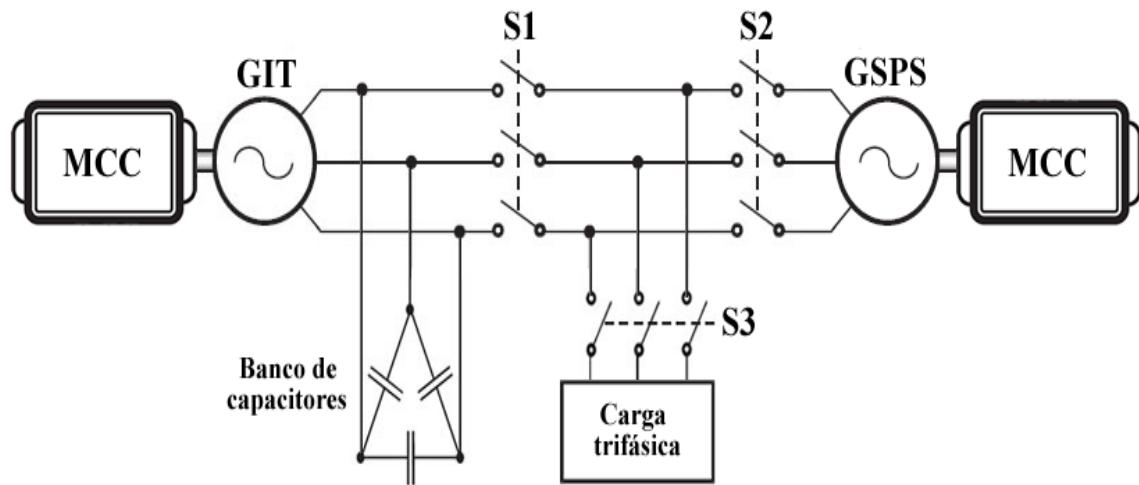


Figura 4.3.1 – Diagrama representativo da bancada de ensaios para o gerador síncrono e de indução auto-excitado, alimentando uma carga trifásica .

Inicialmente, acionam-se os motores de corrente contínua para que o gerador síncrono permaneça na velocidade síncrona em vazio, e para o gerador de indução, velocidade superior a síncrona em vazio, e logo após, fecham-se as chaves S1 e S2, colocando os geradores em paralelo, caso a máquina de indução, motorize, é necessário aumentar o escorregamento, ou seja, aumentar a velocidade do eixo do gerador de indução por uma velocidade um pouco maior que a síncrona (de 1830 a 1850 rpm). Se a máquina de indução estiver comportando como gerador, fecha-se finalmente a chave S3, e então é realizado o controle de tensão terminal por meio do circuito de controle de excitação do gerador síncrono, o torque de eixo fornecido pelas máquinas primárias, é controlado de tal forma que o gerador de indução forneça o máximo de potência ativa para a carga e o gerador síncrono forneça potência mínima, regulando assim, a tensão do gerador de indução, absorvendo ou fornecendo reativo conforme variação da carga, garantindo assim valores sempre próximos do valor da tensão nominal.

O controle de excitação utilizado no ensaio experimental para controle de fluxo no campo do gerador síncrono é estático ou estacionário, as Figuras 4.3.2 e 4.3.3 exemplificam resumidamente o controle de excitação.

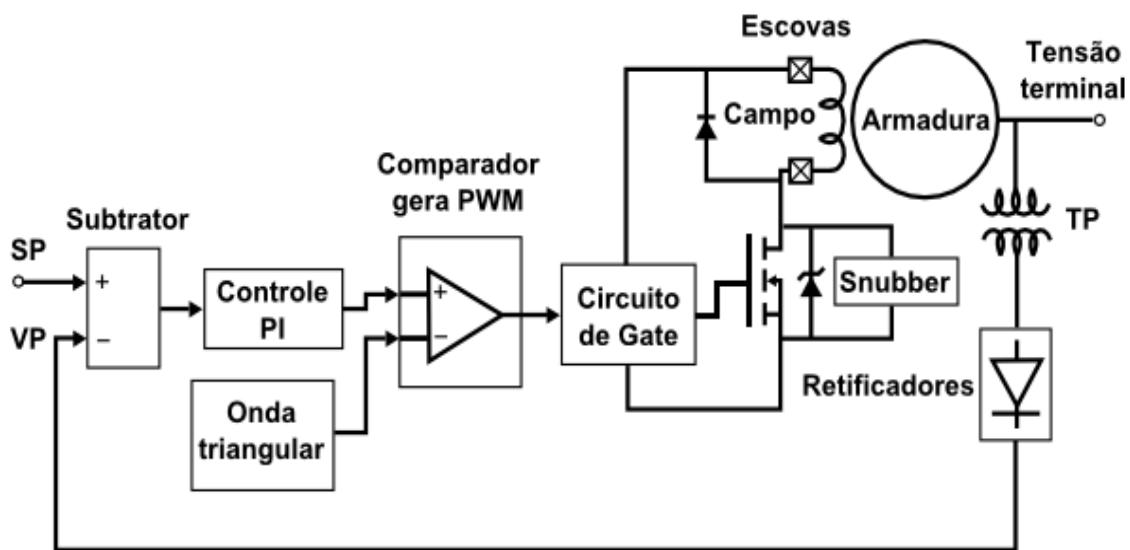


Figura 4.3.2 – Diagrama implementado do controle de excitação.

Fonte: (SILVA, 2015).

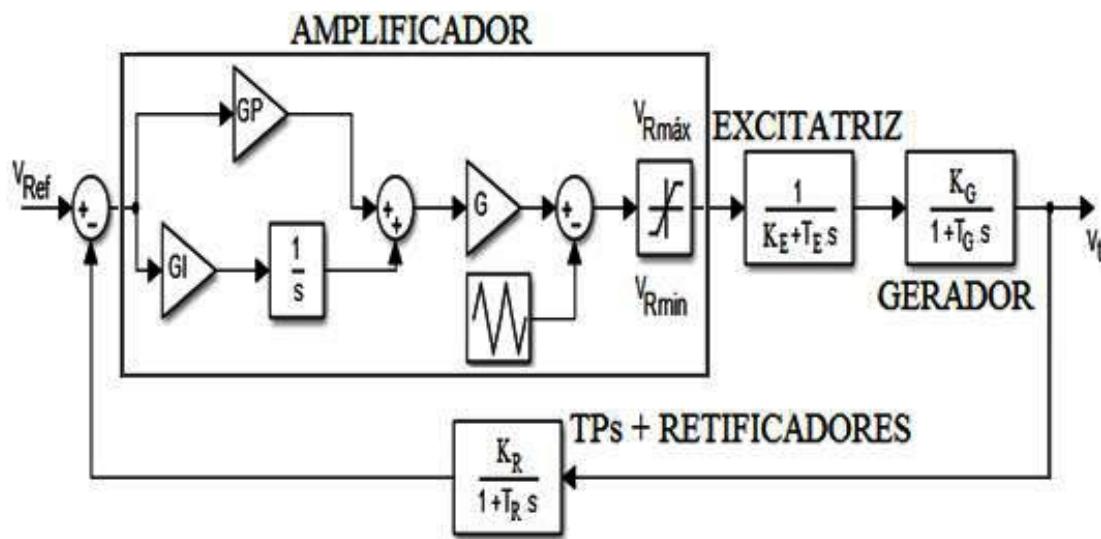


Figura 4.3.3 – Diagrama de blocos do sistema de controle de excitação.

Fonte: (SILVA, 2015).

As Figuras acima, mostram que a leitura da tensão terminal é realizada por transformadores de potencial, estes são conectados em estrela e delta no lado primário e secundário, respectivamente. A tensão terminal então é retificada e reduzida em amplitude, gerando uma tensão denominada VP, que é uma variável do processo, esta tensão VP é comparada com a tensão de referência SP ou tensão nominal do gerador síncrono convertida em referência contínua em um circuito subtrator. A diferença entre o SP e VP é erro gerado

para que o controlador *PI* (com ganho proporcional e integrador) apresente um sinal ao circuito somador inversor que amplifica o sinal de tensão com um determinado ganho, a saída deste circuito é um nível *DC* de tensão positivo, que é finalmente comparado por uma onda triangular, gerando o *PWM*. O sinal *PWM* é conduzido ao *mosfet* por um drive (circuito de disparo), realizando assim o chaveamento de uma tensão média no enrolamento de campo do gerador síncrono (excitatriz), gerando uma nova tensão terminal *AC* no gerador síncrono, que constantemente é comparada até o erro ser tão pequeno a fim da tensão terminal estabilizar-se em 380 V (tensão de linha) (SILVA, 2015).

Devido ausência de controle digital nas bancadas para controle de velocidade das máquinas primárias, os motores de corrente contínua foram ligados em shunt conforme ilustra a Figura 4.3.4, um reostato externo R_V , é ligado em série com a resistência de campo.

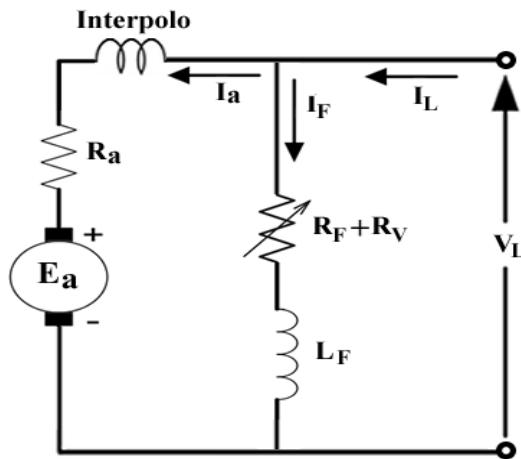


Figura 4.3.4 – Campo em derivação para controle de fluxo.

O intuito desta ligação, é realizar o controle do torque no eixo e velocidade, para entender melhor o funcionamento, suponha que houve um aumento resistência do campo, isto implica que a corrente de campo I_F , diminui.

$$\downarrow I_F = \frac{V_L}{\uparrow R_V + R_F} \quad (4.3.1)$$

Dessa forma, o fluxo de campo também irá reduzir, provocando uma queda instantânea da tensão interna gerada e o aumento da corrente de armadura.

$$\downarrow E_a = K\Phi\omega \quad (4.3.2)$$

$$\uparrow I_a = \frac{(V_T - \downarrow E_a)}{R_a} \quad (4.3.3)$$

O aumento da corrente da armadura, prevalece sobre a redução de fluxo, assim o torque mecânico aumenta.

$$\uparrow T_{mec} = K \downarrow \Phi \uparrow I_a \quad (4.3.4)$$

Se o torque mecânico for maior que a carga, ou seja, maior que a potência solicitada pelo eixo de um dos geradores, a velocidade do grupo motor-gerador irá subir, ou a frequência gerada aumentará, em contrapartida, pela equação (3.4.2), com o aumento da velocidade resultará no aumento da tensão interna, que por (4.3.3) resulta na redução da corrente de armadura, consequentemente em (4.3.4) o torque mecânico reduz, até estabilizar com o torque da carga solicitada por um dos geradores, porém com uma velocidade superior a anterior, e assim é feito o controle de potência mecânica. O contrário do exposto acima é válido, caso a resistência do reostato externo seja reduzida.



Figura 4.3.5 – (a) Bancada de geradores para procedimentos experimentais; (b) Cargas trifásicas utilizadas nos ensaios: resistores, indutores e capacitores.

A figura acima, mostra as bancadas do gerador síncrono e indução auto-excitado acionados por um motor de corrente contínua e a carga utilizada nos procedimentos experimentais no laboratório.

Tabela 4.3.1 – Cargas trifásicas utilizadas nos ensaios experimentais.

	Carga Resistiva	Carga Indutiva	Carga Capacitativa
Potência	1150 [W] 1000 - 2000 [W]	1500 [Var]	270 [Var]
Tensão de linha	380 V	380 V	380 V
Ligaçāo	Estrela	Estrela	Estrela

A justificativa do uso do banco de capacitores em ligação estrela é devido o propósito da carga estar com correção de fator de potência no valor de 0,8 para o estudo dos geradores no âmbito do fator de potência comum presente na indústria. Para uma correção maior, o banco de capacitores em baixa tensão, devem logicamente, estar conectados em delta, fornecendo assim 3 vezes mais reativo do que na ligação em estrela.

Foi utilizado um osciloscópio digital TPS2024B da Tektronix®, para aquisição dos sinais de tensão e corrente. O cálculo do valor de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e fator de potência são realizados pelo osciloscópio e verificado computacionalmente pela teoria de componentes harmônicas contida no Apêndice B. É considerado o cálculo devido ao conteúdo harmônico no ensaio experimental por causa da presença da distorção harmônica nas ondas de tensão e corrente, provocada pelos harmônicos espaciais do gerador síncrono de polos salientes, e do gerador de indução devido a saturação magnética.

4.3.1 – Ensaio carga resistiva

Neste ensaio experimental o gerador de indução auto-excitado, juntamente com o gerador síncrono suprem uma carga resistiva. A análise de potência de fase para o gerador síncrono é dada pela Tabela 3.4.2, as formas de onda de tensão e corrente gerada, assim como o respectivo espectro harmônico, são mostrados pelas Figura 4.3.6 e 4.3.7. As Tabelas 4.3.3 e 4.3.4, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

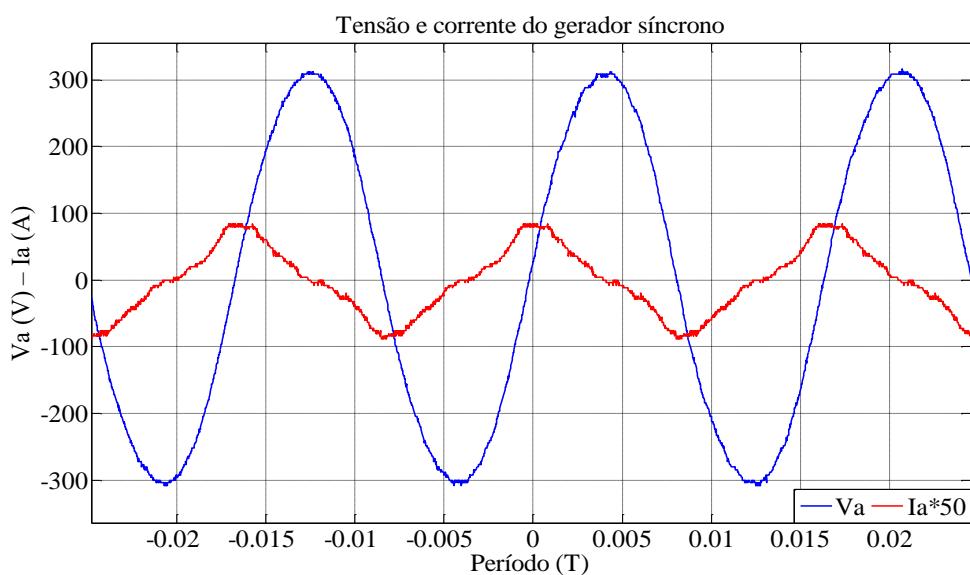


Figura 4.3.6 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.

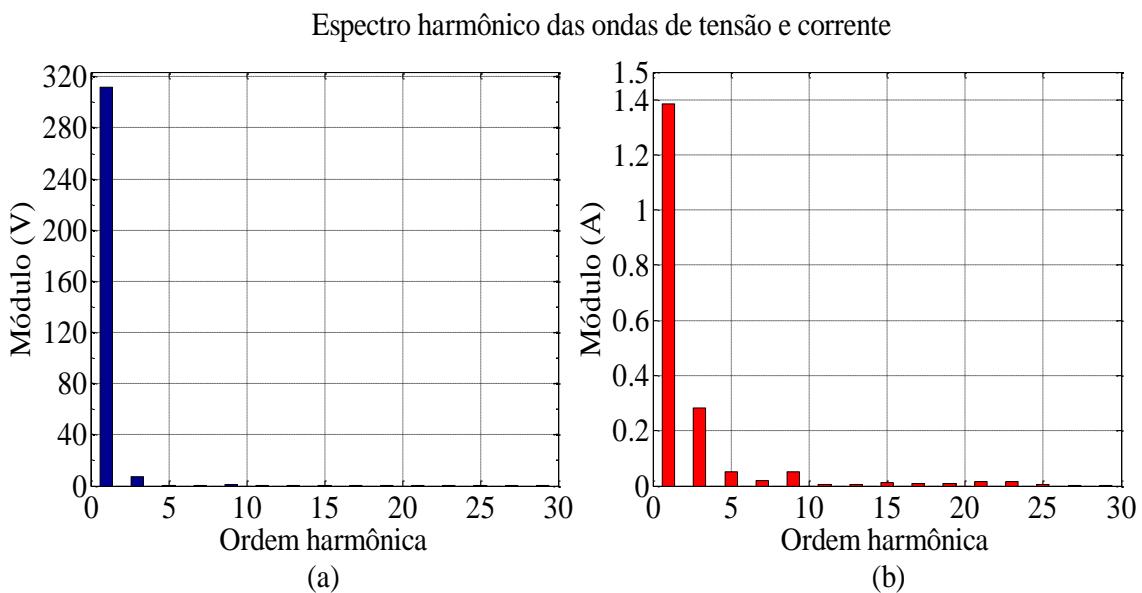


Figura 4.3.7 – Espectro harmônico para gerador síncrono, ensaio carga resistiva.
(a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.2 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Real	Potência Reativa	Fator de potência
33,1 [W]	-218 [VAr]	0,1495

Tabela 4.3.3 – Decomposição da onda de tensão do gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.

THDv aproximado = 2,66 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
1,60	312,05	7,19	0,35	0,63	0,99	0,41	0,15
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,62	0,28	0,17	0,49	0,29	0,40	0,23	0,24

Tabela 4.3.4 – Decomposição da onda de corrente do gerador síncrono, ensaio experimental para carga resistiva.

THDi aproximado = 21,41%							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
-0,04	1,38	0,28	0,05	0,02	0,05	0,00	0,01
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00

A análise de potência de fase para o gerador de indução é dada pela Tabela 4.3.5, as formas de onda de tensão e corrente gerada, assim como o respectivo espectro harmônico, são mostrados pelas Figura 4.3.8 e 4.3.9. As Tabelas 4.3.6 e 4.3.7, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

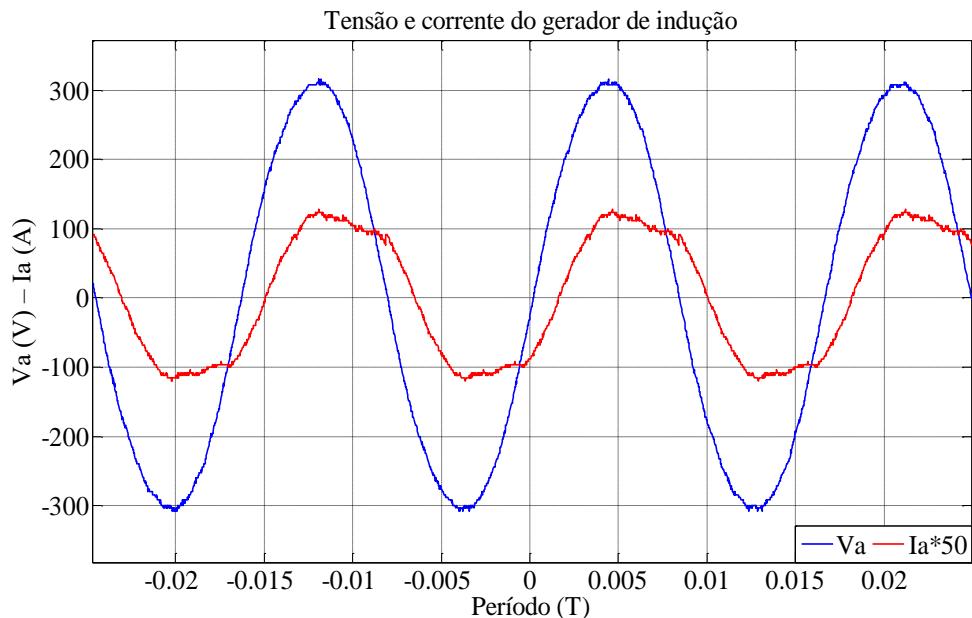


Figura 4.3.8 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.

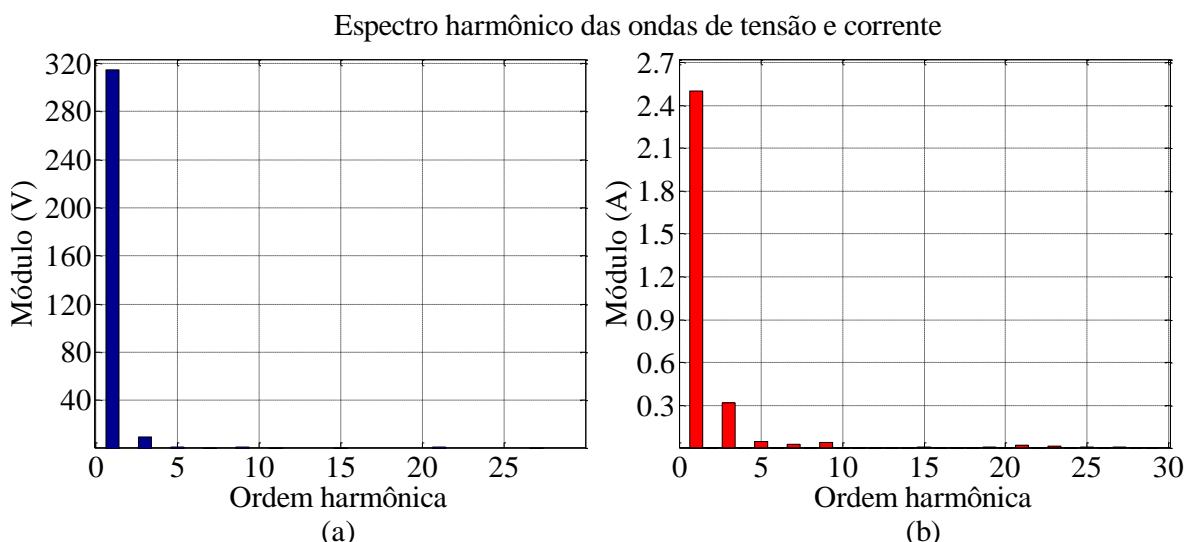


Figura 4.3.9 – Espectro harmônico para gerador de indução, ensaio carga resistiva.
(a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.5 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Ativa	Potência Reativa	Fator de potência
349 [W]	210 [VAr]	0,857

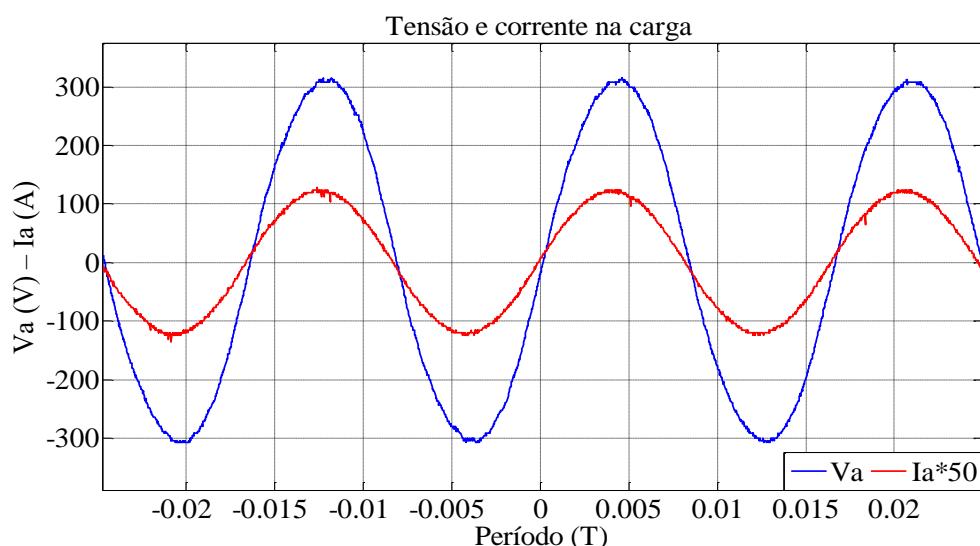
Tabela 4.3.6 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.

THD _V aproximado = 3,33%							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
2,07	314,30	10,04	1,28	0,36	1,04	0,33	0,17
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,81	0,12	0,08	1,42	0,14	0,18	0,29	0,04

Tabela 4.3.7 – Decomposição da onda de corrente do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.

THD _I aproximado = 13,16 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
0,05	2,56	0,32	0,05	0,03	0,04	0,00	0,00
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00

A análise de potência de fase na carga resistiva é dada pela Tabela 4.3.8, as formas de onda de tensão e corrente, assim como o respectivo espectro harmônico, é mostrado pelas Figura 4.3.10 e 4.3.11. As Tabelas 4.3.9 e 4.3.10, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

**Figura 4.3.10 – Tensão e corrente de fase na carga resistiva.**

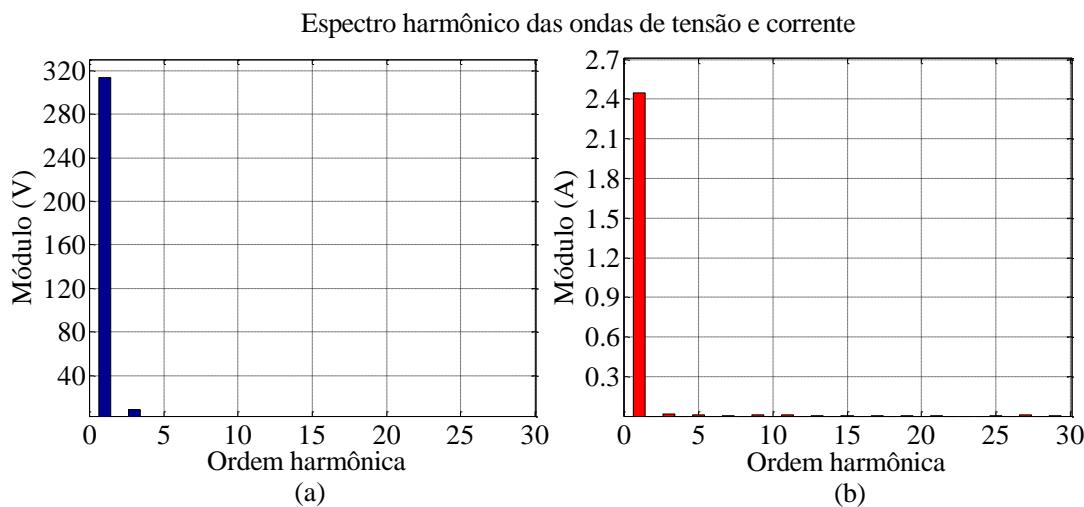


Figura 4.3.11 – Espectro harmônico para carga, ensaio carga resistiva.
(a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.8 – Potência ativa, reativa e fator de potência para carga resistiva.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Ativa	Potência Reativa	Fator de potência
383 [W]	42,8 [VAr]	0,994

Tabela 4.3.9 – Decomposição da onda de tensão da carga resistiva.

THDv aproximado = 3,26 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
1,87	313,82	8,51	0,36	0,84	1,29	0,50	0,33
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,66	0,29	0,35	1,54	0,44	0,13	0,06	0,21

Tabela 4.3.10 – Decomposição da onda de corrente da carga resistiva.

THDi aproximado = 1,98 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
0,0	2,45	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00

4.3.2 – Ensaio carga indutiva

Neste experimento o gerador de indução auto-excitado, atuando paralelamente com o gerador síncrono alimentam uma carga indutiva. A análise de potência de fase para o gerador síncrono é dada pela Tabela 4.3.11, as formas de onda de tensão e corrente gerada, assim como

o respectivo espectro harmônico, são mostrados pelas Figuras 4.3.12 e 4.3.13. As Tabelas 4.3.12 e 4.3.13, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

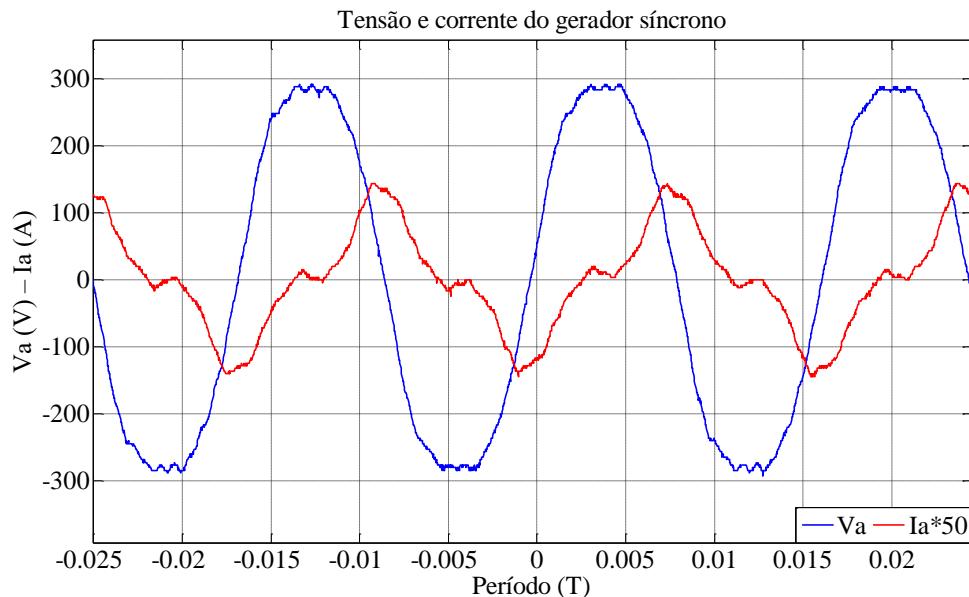


Figura 4.3.12 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.

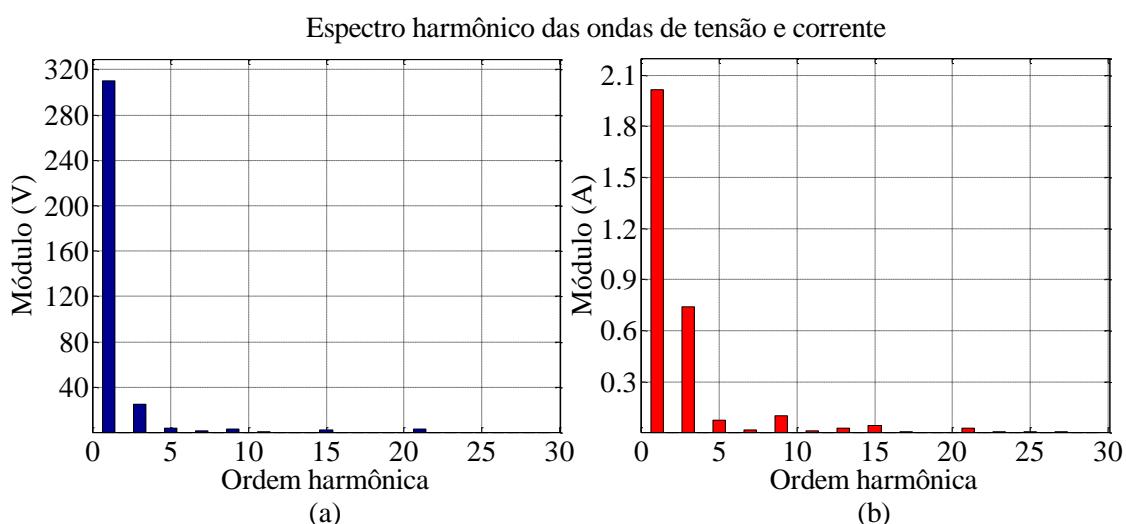


Figura 4.3.13 – Espectro harmônico para gerador síncrono, ensaio carga indutiva.
(a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente;

Tabela 4.3.11 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Real	Potência Reativa	Fator de potência
28,7 [W]	332 [VAr]	0,086

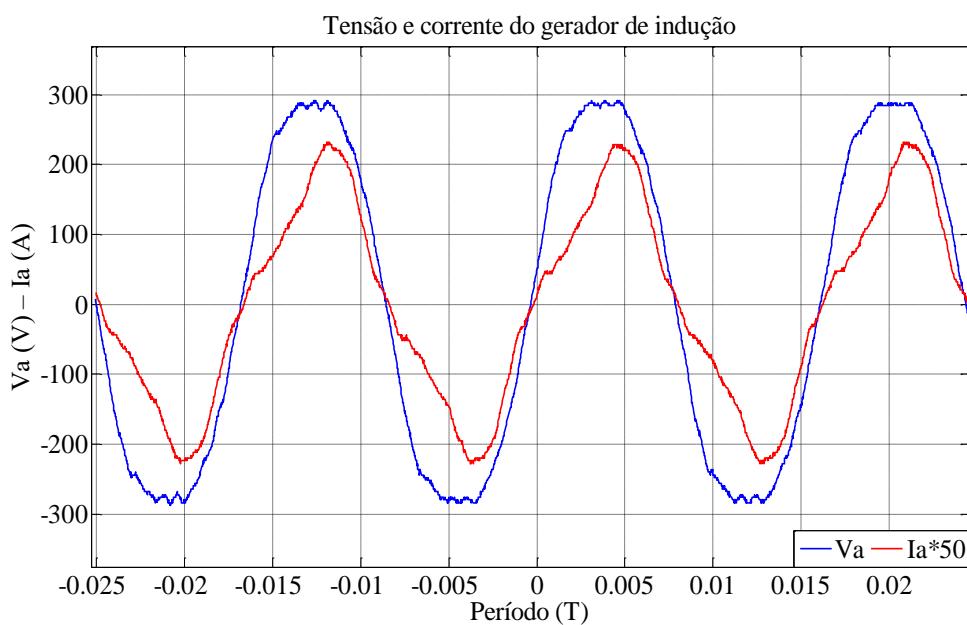
Tabela 4.3.12 – Decomposição da onda de tensão do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.

THDv aproximado = 1,98 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
2,11	309,99	25,21	4,12	1,45	3,56	0,57	0,05
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
2,17	0,41	0,29	3,41	0,37	0,22	0,45	0,31

Tabela 4.3.13 – Decomposição da onda de corrente do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva.

THDi aproximado = 37,36 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
0,00	2,02	0,74	0,08	0,02	0,10	0,01	0,03
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00

A análise de potência de fase para o gerador de indução é dada pela Tabela 4.3.14, as formas de onda de tensão e corrente gerada, assim como o respectivo espectro harmônico, são mostrados pelas Figura 4.3.14 e 4.3.15. As Tabelas 4.3.15 e 4.3.16, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

**Figura 4.3.14 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva.**

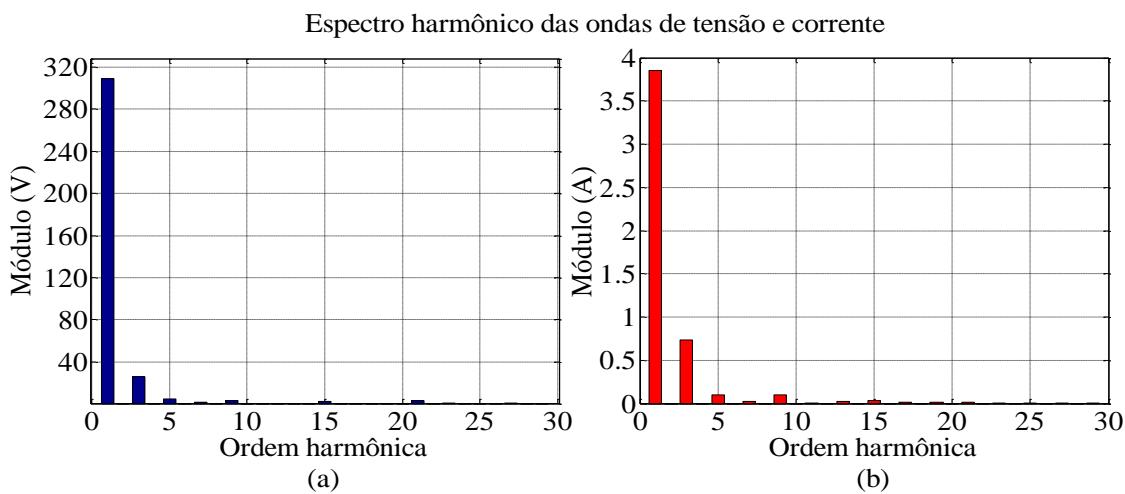


Figura 4.3.15 – Espectro harmônico para gerador de indução, ensaio carga resistiva.
(a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.14 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Ativa	Potência Reativa	Fator de potência
582 [W]	182 [VAr]	0,955

Tabela 4.3.15 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.

THDv aproximado = 8,57 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
1,99	308,96	25,45	4,46	1,23	3,08	0,43	0,05
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
2,28	0,19	0,13	3,38	0,74	0,14	0,53	0,41

Tabela 4.3.16 – Decomposição da onda de corrente do gerador de indução, ensaio experimental para carga resistiva.

THDi aproximado = 19,46 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
0,02	3,85	0,73	0,10	0,02	0,10	0,01	0,02
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,03	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00

A análise de potência de fase na carga indutiva é dada pela Tabela 4.3.17, as formas de onda de tensão e corrente, assim como o respectivo espectro harmônico, são mostrados pelas Figura 4.3.16 e 4.3.17. As Tabelas 4.3.18 e 4.3.19, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

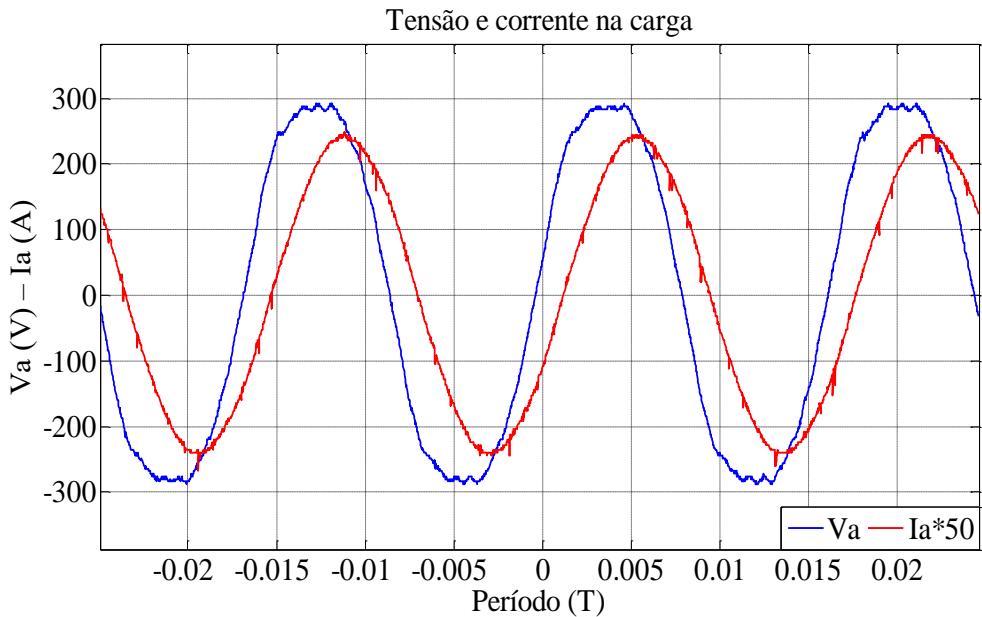


Figura 4.3.16 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva.

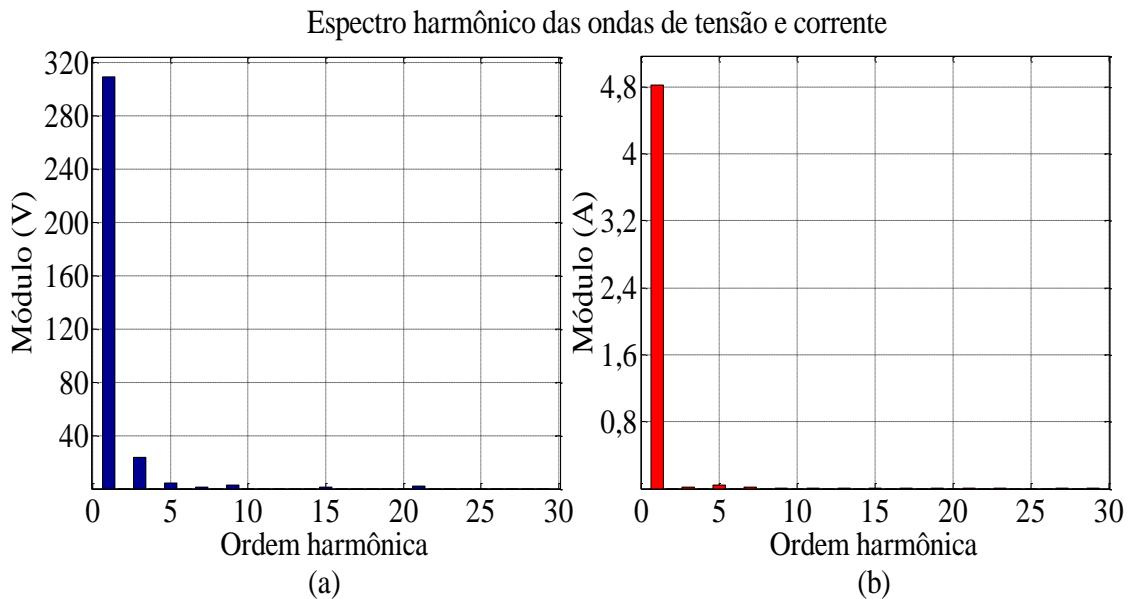


Figura 4.3.17 – Espectro harmônico para carga, ensaio carga indutiva.
(a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.17 – Potência ativa, reativa e fator de potência para carga indutiva.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Real	Potência Reativa	Fator de potência
608.6 [W]	437.6 [VAr]	0.8119

Tabela 4.3.18 – Decomposição da onda de tensão da carga indutiva.

THDv aproximado = 8,24 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
2,10	309,54	24,48	4,92	1,51	3,38	0,27	0,06
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
1,98	0,13	0,15	2,60	0,22	0,22	0,29	0,24

Tabela 4.3.19 – Decomposição da onda de corrente da carga indutiva.

THDi aproximado = 1,17 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
0,01	4,83	0,02	0,05	0,02	0,00	0,01	0,00
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00

4.3.3 – Ensaio carga indutiva com correção de fator de potência

Neste experimento o gerador de indução auto-excitado, atuando paralelamente com o gerador síncrono, alimentam uma carga indutiva com correção de fator de potência próximo de 0,8. A análise de potência de fase para o gerador síncrono é dada pela Tabela 4.3.11, as formas de onda de tensão e corrente gerada, assim como o respectivo espectro harmônico, são mostrados pelas Figuras 4.3.18 e 4.3.19. As Tabelas 4.3.21 e 4.3.22, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

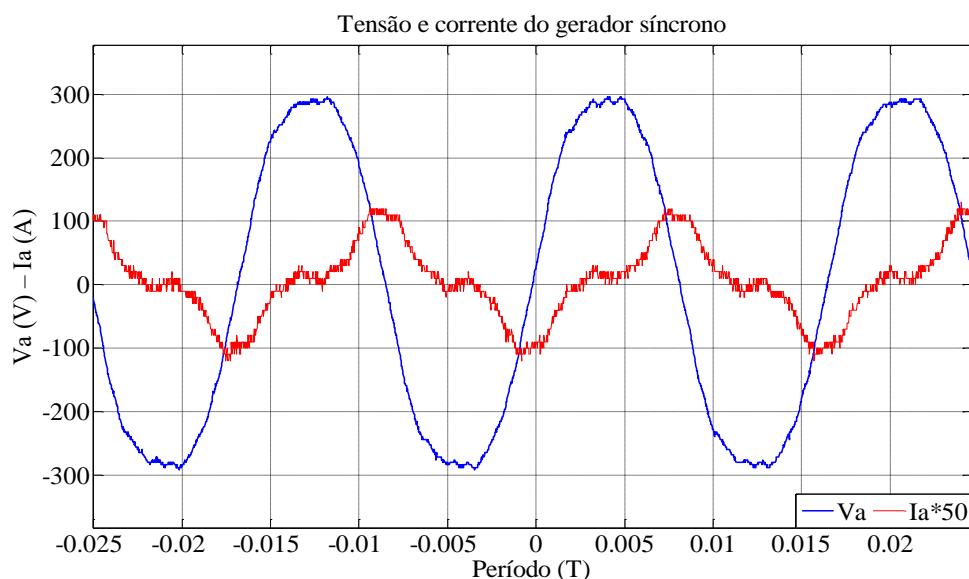


Figura 4.3.18 – Tensão e corrente de fase do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

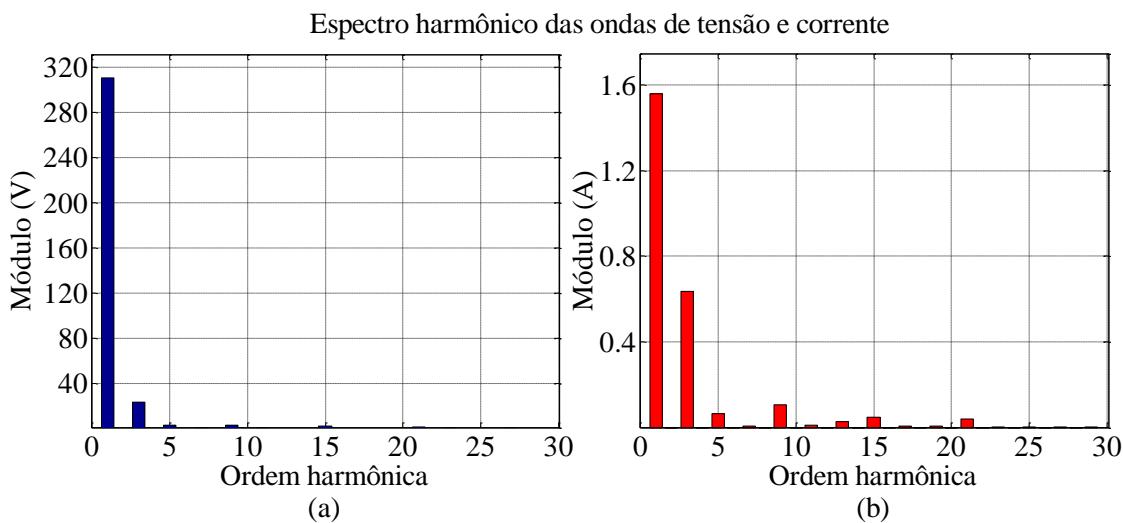


Figura 4.3.19 – Espectro harmônico para gerador síncrono, ensaio carga indutiva com correção de fator de potência. (a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.20 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Real	Potência Reativa	Fator de potência
38,5 [W]	265 [VAr]	0,144

Tabela 4.3.21 – Decomposição da onda de tensão do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

THDv aproximado = 7,89 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
1,83	311,08	23,82	3,43	0,77	3,34	0,35	0,10
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
2,10	0,21	0,28	1,80	0,40	0,31	0,35	0,29

Tabela 4.3.22 – Decomposição da onda de corrente do gerador síncrono, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

THDi aproximado = 42,17 %							
Cc	1 th	3 th	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th
0,098	1,56	0,64	0,07	0,01	0,11	0,01	0,03
15 th	17 th	19 th	21 th	23 th	25 th	27 th	29 th
0,05	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01

Análise de potência de fase para o gerador de indução é dada pela Tabela 3.4.23, as formas de onda de tensão e corrente gerada, assim como o respectivo espectro harmônico, são

mostrados pelas Figuras 3.4.20 e 3.4.21. As Tabelas 3.4.24 e 3.4.25, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

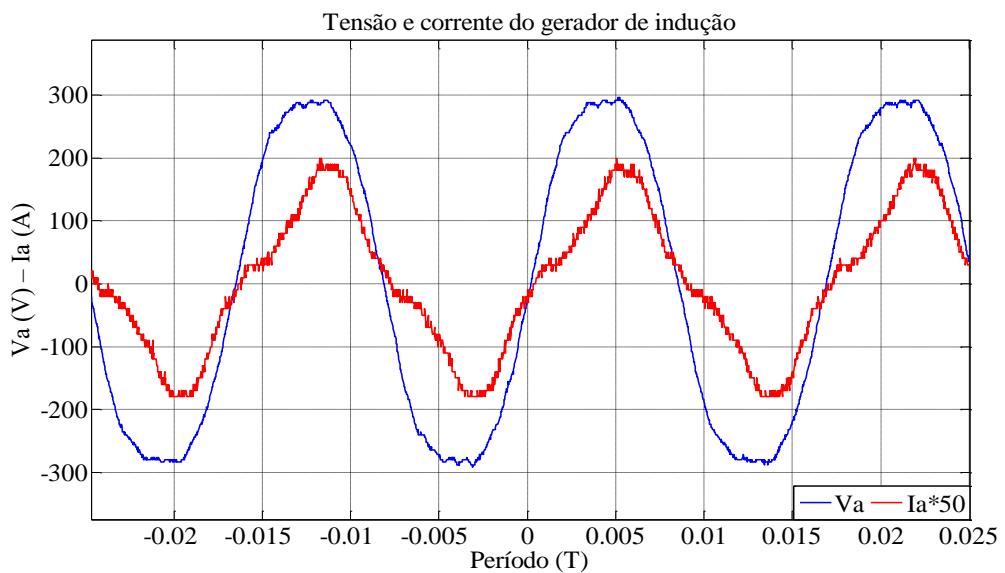


Figura 4.3.20 – Tensão e corrente de fase do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

Espectro harmônico das ondas de tensão e corrente

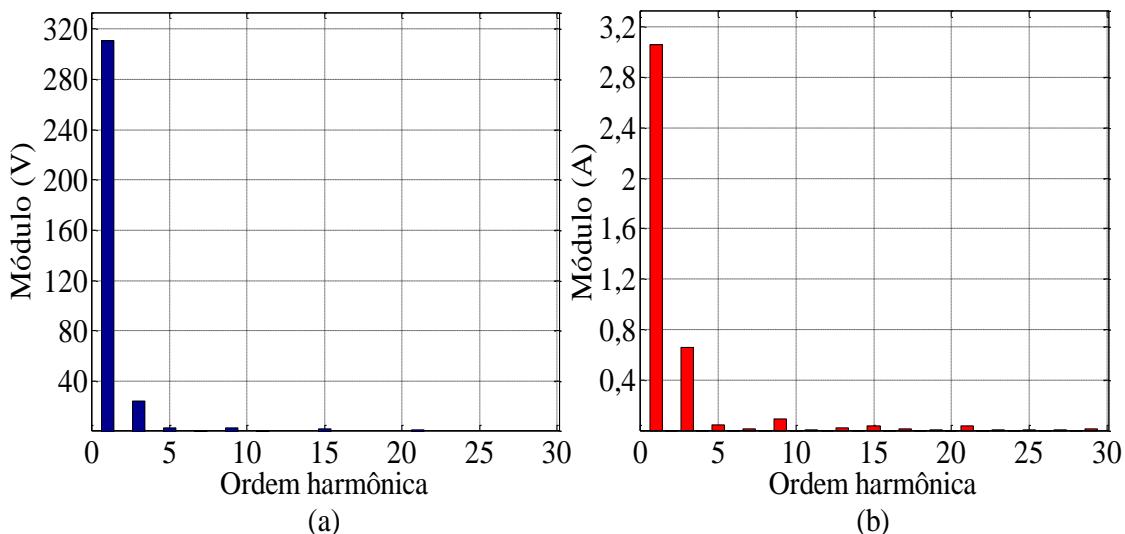


Figura 4.3.21 – Espectro harmônico para gerador de indução, ensaio carga indutiva com correção de fator de potência. (a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.23 – Potência ativa, reativa e fator de potência para gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Ativa	Potência Reativa	Fator de potência
453 [W]	182 [VAr]	0,928

Tabela 4.3.24 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

$THDv$ aproximado = 8,05 %							
Cc	1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}	11^{th}	13^{th}
1,91	310,38	24,27	3,50	0,67	3,22	0,38	0,24
15^{th}	17^{th}	19^{th}	21^{th}	23^{th}	25^{th}	27^{th}	29^{th}
2,14	0,23	0,10	1,75	0,31	0,16	0,33	0,07

Tabela 4.3.25 – Decomposição da onda de tensão do gerador de indução, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

$THDi$ aproximado = 21,95 %							
Cc	1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}	11^{th}	13^{th}
0,09	3,06	0,66	0,04	0,01	0,09	0,01	0,02
15^{th}	17^{th}	19^{th}	21^{th}	23^{th}	25^{th}	27^{th}	29^{th}
0,03	0,01	0,01	0,04	0,01	0,00	0,01	0,01

A análise de potência de fase na carga indutiva com correção de fator de potência é dada pela Tabela 4.3.26, as formas de onda de tensão e corrente, assim como o respectivo espectro harmônico, são mostrados pelas Figura 4.3.22 e 4.3.23. As tabelas 4.3.27 e 4.3.28, mostram a decomposição da forma de onda de tensão e corrente, respectivamente.

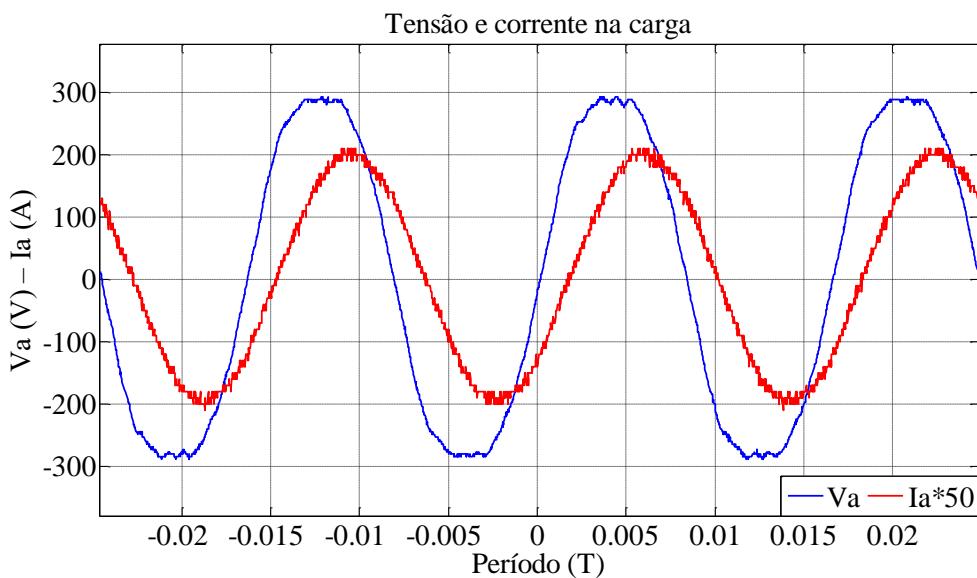


Figura 4.3.22 – Tensão e corrente de fase na carga indutiva com correção de fator de potência.

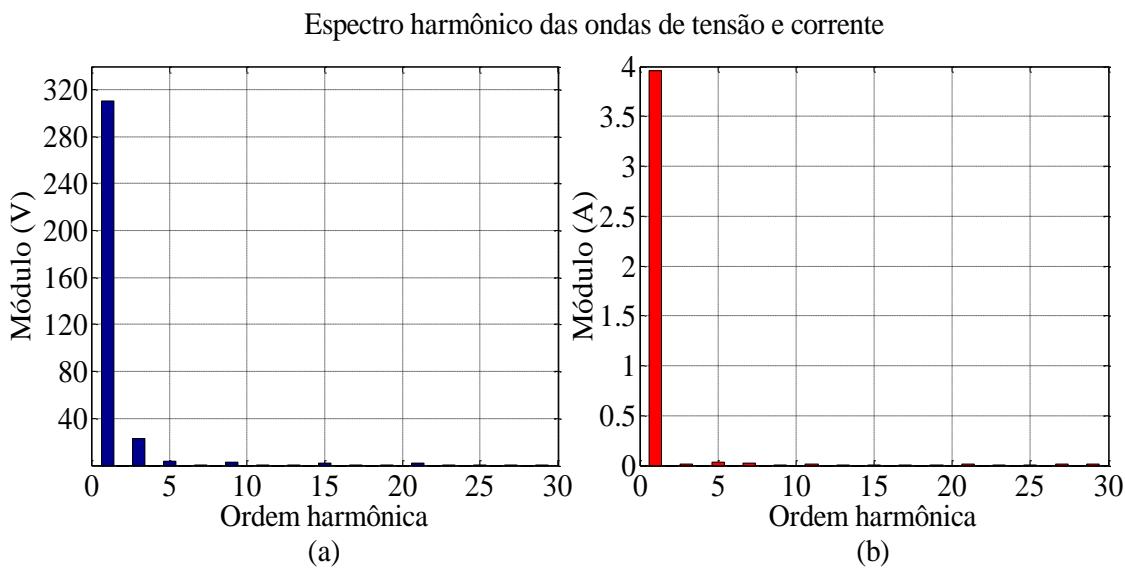


Figura 4.3.23 – Espectro harmônico para carga, ensaio carga indutiva com correção de fator de potência.
(a) Espectro de tensão; (b) Espectro de corrente.

Tabela 4.3.26 – Potência ativa, reativa e fator de potência para carga, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

ANÁLISE DE POTÊNCIA		
Potência Real	Potência Reativa	Fator de potência
485 [W]	383 [VAr]	0,785

Tabela 4.3.27 – Decomposição da onda de tensão na carga, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

$THDv$ aproximado = 7,76 %							
Cc	1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}	11^{th}	13^{th}
1,89	310,60	23,26	4,00	0,79	3,22	0,40	0,24
15^{th}	17^{th}	19^{th}	21^{th}	23^{th}	25^{th}	27^{th}	29^{th}
1,85	0,36	0,24	2,31	0,46	0,10	0,26	0,35

Tabela 4.3.28 – Decomposição da onda de corrente na carga, ensaio experimental para carga indutiva com correção de fator de potência.

$THDi$ aproximado = 1,99 %							
Cc	1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}	11^{th}	13^{th}
0,07	3,96	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00
15^{th}	17^{th}	19^{th}	21^{th}	23^{th}	25^{th}	27^{th}	29^{th}
0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

4.4 – Comparativo teórico-experimental

No ensaio resistivo, percebe-se pela Tabela 3.4.29, que o gerador síncrono absorve reativo excedente do banco de capacitores para manter a tensão nominal (Tabela 4.3.30), isso ocorre porque não foi solicitado carregamento nominal do gerador de indução, os dados simulados e experimentais estão muito próximos, o erro é aceitável comparado com a técnica de controle de velocidade utilizado na prática, uma vez que a resistência de campo externa variável aquece, mudando constantemente seu valor, fazendo que a velocidade oscile entre ± 10 rpm nas máquinas primárias ao longo do ensaio, caracterizando uma reatância capacitiva e indutiva um pouco diferente da frequência de 60 Hz, devido esta oscilação na velocidade, valores da potência reativa podem ser um pouco diferentes entre as tabelas (a) e (b).

Tabela 4.4.1 – Comparativo teórico-experimental para gerador síncrono, ensaio resistivo.
(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	33,01 [W]	Potência ativa	33,3 [W]
Potência reativa	-218 [VAr]	Potência reativa	-210,1 [VAr]
Fator de potência	0,1495	Fator de Potência	0,1567
Irms	1,0004 [A]	Irms	0,967 [A]
Vrms	220,7123 [V]	Vrms	220,0 [V]
Velocidade	1800 [rpm]	Velocidade	1800 [rpm]

(a)

(b)

O gerador síncrono entrega uma parcela mínima de potência ativa para a carga, podendo ser reduzida significativamente, se usado controle de velocidade em malha fechada, para o motor de corrente contínua. O gerador de indução entrega grande parte da potência ativa para suprir a carga resistiva, conforme pode ser visto na Tabela 4.3.30. A Tabela 4.3.31 mostra que existe uma pequena parcela de reativo na carga resistiva, isso se dá, por causa da qualidade das resistências utilizadas como carga no laboratório.

Tabela 4.4.2 – Comparativo teórico-experimental para gerador de indução ensaio resistivo.
(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	349 [W]	Potência ativa	349,7 [W]
Potência reativa	210 [VAr]	Potência reativa	210,1 [VAr]
Fator de potência	0,857	Fator de Potência	0,8572
Irms	1,8293 [A]	Irms	1,854 [A]
Vrms	222,3629 [V]	Vrms	220,0 [V]
Velocidade	1837 [rpm]	Velocidade	1836 [rpm]

(a)

(b)

Tabela 4.4.3 – Comparativo teórico-experimental da carga resistiva.
(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	383 [W]	Potência ativa	383 [W]
Potência reativa	42,8 [VAr]	Potência reativa	0 [VAr]
Fator de potência	0,994	Fator de Potência	1,00
Irms	1,731 [A]	Irms	1,741 [A]
Vrms	221,99 [V]	Vrms	220,0 [V]

(a)

(b)

Para o ensaio com fator de potência indutivo, mostrado pelas Tabelas 4.3.32, 4.3.33 e 4.3.34, o gerador síncrono comporta-se nesta arquitetura tratada, disponibilizando o mínimo de potência ativa e neste caso, entregando potência reativa para alimentar a carga mantendo tensão nominal, o excedente de reativo do banco de capacitores devido ao meio carregamento, também supri a carga indutiva, o gerador síncrono não necessita de absorver este reativo, já que está sendo consumido pela carga, quanto ao gerador de indução, este desempenha o papel de entregar máxima potência ativa. Nota-se aqui, que é possível fazer a correção do fator de potência pelo próprio banco de capacitores do gerador de indução, desde que a classe de potência do gerador síncrono, possa absorver o reativo excedente em caso da operação com carga para fator de potência mais alto, ou até mesmo, próximo do unitário.

Tabela 4.4.4 – Comparativo teórico-experimental para gerador síncrono, ensaio indutivo.
(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	28,7 [W]	Potência ativa	26,61 [W]
Potência reativa	332 [VAr]	Potência reativa	262 [VAr]
Fator de potência	0,086	Fator de Potência	0,1011
Irms	1,5218 [A]	Irms	1,201 [A]
Vrms	219,9784 [V]	Vrms	219,3 [V]
Velocidade	1804 [rpm]	Velocidade	1800 [rpm]

(a)

(b)

Tabela 4.4.5 – Comparativo teórico-experimental para gerador do gerador de indução, ensaio indutivo. (a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	582 [W]	Potência ativa	582 [W]
Potência reativa	182 [VAr]	Potência reativa	175,7 [VAr]
Fator de potência	0,955	Fator de Potência	0,9573
Irms	2,7769 [A]	Irms	2,773 [A]
Vrms	219,2647 [V]	Vrms	219,3 [V]
Velocidade	1857 [rpm]	Velocidade	1859 [rpm]

(a)

(b)

Tabela 4.4.6 – Comparativo teórico-experimental da carga indutiva.
(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	608,6 [W]	Potência ativa	608,6 [W]
Potência reativa	437,6 [VAr]	Potência reativa	437,6 [VAr]
Fator de potência	0,8119	Fator de Potência	0,8119
Irms	3,4135 [A]	Irms	3,419 [A]
Vrms	219,6185 [V]	Vrms	219,3 [V]

(a)

(b)

As Tabelas 4.3.35, 4.3.36 e 4.3.37, mostram os dados do ensaio da carga com correção de fator de potência para o gerador síncrono, indução e carga respectivamente. Em todos os estudos, a carga foi ajustada como referência entre simulação e prática, é devido a isto que os valores das tabelas do comparativo teórico-experimental para a carga são muito próximos, comparado ao do gerador síncrono e do gerador de indução.

Tabela 4.4.7 – Comparativo teórico-experimental para gerador síncrono, ensaio indutivo com correção de fator de potência.
(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	38,5 [W]	Potência ativa	34,57 [W]
Potência reativa	265 [VAr]	Potência reativa	201,3 [VAr]
Fator de potência	0,144	Fator de Potência	0,1693
Irms	1,1934 [A]	Irms	0,9308 [A]
Vrms	220,6443 [V]	Vrms	219,4 [V]
Velocidade	1802 [rpm]	Velocidade	1800 [rpm]

(a)

(b)

Tabela 4.4.8 – Comparativo teórico-experimental do gerador de indução, ensaio indutivo com correção de fator de potência.

(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	453 [W]	Potência ativa	450,4 [W]
Potência reativa	182 [VAr]	Potência reativa	181,2 [VAr]
Fator de potência	0,928	Fator de Potência	0,9273
Irms	2,2127 [A]	Irms	2,214 [A]
Vrms	220,1749 [V]	Vrms	219,4 [V]
Velocidade	1851 [rpm]	Velocidade	1847 [rpm]

(a)

(b)

Tabela 4.4.9 – Comparativo teórico-experimental da carga com correção do fator de potência.
(a) Dados experimentais; (b) Dados simulados.

Potência ativa	485 [W]	Potência ativa	485 [W]
Potência reativa	383 [VAr]	Potência reativa	383 [VAr]
Fator de potência	0,785	Fator de Potência	0,7848
Irms	2,7986 [A]	Irms	2,817 [A]
Vrms	220,2848 [V]	Vrms	219,4 [V]

(a)

(b)

4.5 – Considerações finais

Este capítulo mostrou os resultados simulados e dados experimentais coletados nos ensaios em laboratório para o estudo do comportamento em regime permanente do gerador síncrono de polos salientes em operação paralela com o gerador de indução auto-excitado para aplicação na geração isolada, fazendo do gerador síncrono um regulador de tensão para o gerador de indução, tornando a tensão do sistema ilhado, aqui caracterizado, como estável, independente de qualquer variação da carga. O comparativo teórico-experimental possui um erro aceitável, mediante o material permanente utilizado no laboratório para realizar os procedimentos experimentais.

Quanto ao fato do gerador síncrono de polos salientes entregar o mínimo de potência ativa para a carga, deixando literalmente totalizada para o gerador de indução trifásico auto-excitado, deve-se que em algumas ocasiões, um pequeno gerador síncrono ser capaz de controlar a tensão de um gerador de indução auto-excitado de maior classe de potência, fica evidenciado que não é regra o gerador entregar potência mínima, o gerador síncrono pode entregar potência ativa, desde que uma parcela de sua capacidade seja destinada para controle de reativo do sistema isolado.

Quanto ao controle da tensão terminal, este é mantido pela atuação do sistema de controle de excitação do gerador síncrono, pode-se notar que no estudo dos três casos, a tensão na fase a, ficou em uma margem tolerável para funcionamento em regime permanente, mostrando que o gerador síncrono pode desempenhar o papel regulador de tensão.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões

A proposta deste trabalho é validada conforme pode ser visto pela confrontação dos resultados de simulações e de ensaios realizados na prática em laboratório, esta metodologia é uma nova sugestão para implementação em geração isolada no mercado de usuários que usufruem de sistemas ilhados.

Qualquer variação no carregamento, a tensão terminal do conjunto gerador síncrono e indução, será controlada por meio do regulador de tensão do gerador síncrono e a frequência pelo ajuste dos reguladores de velocidade de ambas as máquinas, aqui não foi realizado estudo com regulador de velocidade, apenas em algumas condições de carga em regime permanente, controlou-se manualmente a frequência elétrica por meio das máquinas primárias.

Para aplicação desta proposta, é completamente necessário o controlador de velocidade, dessa forma o gerador síncrono deve sempre permanecer na velocidade síncrona e o gerador de indução na velocidade sobre-síncrona. Tanto o controle de velocidade de um gerador de indução e um síncrono operando em paralelo em um circuito isolado, como 2 ou mais geradores de indução e/ou síncrono, é imprescindível controle motriz, o que proporciona um controle fino de frequência, o regulador de tensão pode ser realizado unicamente pelas máquina(s) síncrona(s), pela corrente de excitação, controlando assim, a tensão terminal do conjunto.

Quanto ao dimensionamento do banco de capacitores necessário para auto-excitacão do gerador assíncrono, qualquer metodologia para dimensionamento tratada no apêndice A, é funcional, não há problemas, pois, o gerador síncrono pode fornecer o reativo necessário para o gerador de indução, independendo do carregamento, desde que o gerador síncrono esteja dimensionado para tal. Todo reativo para auto-excitacão do gerador de indução pode ser fornecido pelo gerador síncrono, porém é economicamente mais viável comprar capacitores, do que adquirir um gerador síncrono de maior

capacidade para esta operação citada, o mesmo é valido para correção de fator de potência.

A aplicação de geradores de indução operando juntamente com geradores síncronos possui viabilidade econômica significante, uma vez que o custo de aquisição e manutenção da máquina assíncrona de gaiola de esquilo (devido sua simplicidade construtiva, robustez e ausência de excitação), ser bem menor que o custo da síncrona. As potências dos geradores podem ser maiores ou menores de um para o outro, a única exigência é que uma parcela da potência aparente disponível do gerador síncrono seja reservada afim de consumir ou fornecer reativo para o controle de tensão.

No caso, como realizado neste trabalho, provou-se ser possível utilizar a menor parcela de potência ativa possível, deixando-a próxima da totalidade para o gerador de indução, tornando o gerador síncrono um gerador ou absorvedor de potência reativa, desenvolvendo o papel único de controle de tensão, dessa forma, pode-se aumentar a capacidade de geração de energia elétrica do gerador assíncrono a medida mínima do gerador síncrono.

5.2 – Sugestões

Para sugestões de trabalhos futuros a partir desta linha de pesquisa, as seguintes ideias propostas podem ser desenvolvidas:

- Modelo matemático que comtemple a saturação magnética e harmônicos espaciais da máquina síncrona de polos salientes.
- Modelo matemático que inclua a saturação magnética da máquina assíncrona.
- Desenvolver controle de velocidade para operação em paralelo de geradores de indução trifásico com geradores síncronos de polos salientes.
- Estudo em regime permanente não senoidal, principalmente das perdas e perturbações provocadas pela distorção harmônica.
- Realizar o estudo de estabilidade transitória dinâmica de maiores geradores, proteção contra faltas, partida direta de motores de indução, curto-circuito, rejeição de carga, dentre outras eventualidades.
- Desempenho e confiabilidade de geradores grupo diesel, gasolina e gás.

APÊNDICE A

DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA O GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A.1 - Gerador de indução trifásico

O gerador de indução trifásico utilizado nos ensaios experimentais é uma máquina de indução com rotor de gaiola de esquilo, onde o enrolamento consiste em barras condutoras colocadas nas ranhuras no ferro do rotor e são curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores. Para gerar energia, o rotor da máquina de indução deve ter velocidade superior a velocidade síncrona, caso esteja conectado na rede elétrica, sendo dependente do número de polos da máquina (FITZGERALD et al., 2006). A velocidade síncrona é expressa pela equação abaixo:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (\text{A.1})$$

A diferença entre a velocidade síncrona e a do rotor é denominada como escorregamento ou escorregamento fracionário, que usualmente é expresso em porcentagem, igual a 100 vezes o escorregamento fracionário.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{A.2})$$

Como dito, a velocidade do rotor deve ultrapassar a velocidade síncrona, quando gerador operar com o barramento infinito, resultando em um escorregamento negativo, significando que a máquina de indução produzirá um conjugado negativo, operando então como gerador. Para produzir energia, o gerador de indução deve receber energia reativa, que poderá vir de um banco de capacitores, conforme mostrado na Figura A.1.

A.2 - Gerador de indução trifásico auto-excitado

Com o magnetismo residual presente no rotor do gerador de indução, devido a rotação irá induzir uma força eletromotriz no estator, que por sua vez, gera uma pequena

corrente no banco de capacitores, fornecendo energia reativa, provocando um acréscimo da força eletromotriz inicial, e partir daí, inicia o processo de auto excitação do gerador de indução, lembrando que o valor da tensão induzida é limitado devido a saturação magnética da máquina assíncrona (BANSAL, 2005). O processo de auto excitação e o circuito equivalente do gerador de indução é representado pelas Figuras A.2 e A.3, respectivamente.

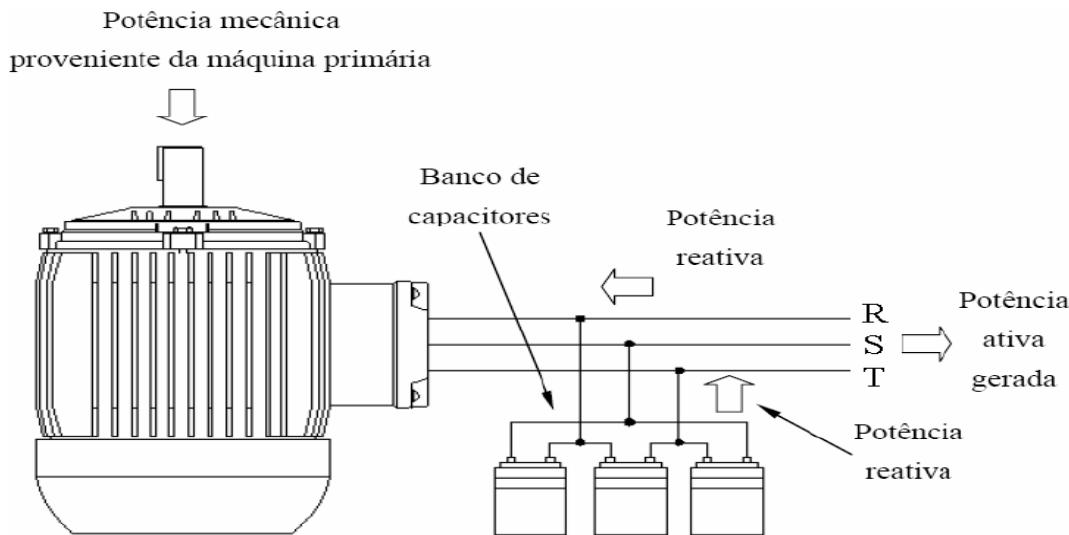


Figura A. 1 – Ligação do banco de capacitores na máquina assíncrona.
Fonte: (NASCIMENTO, 2010).

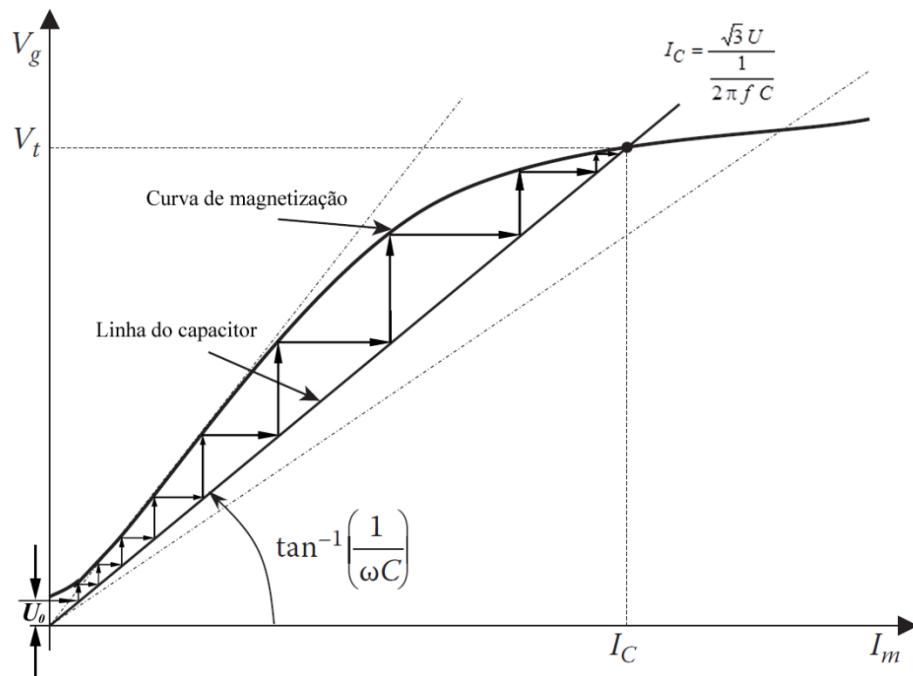
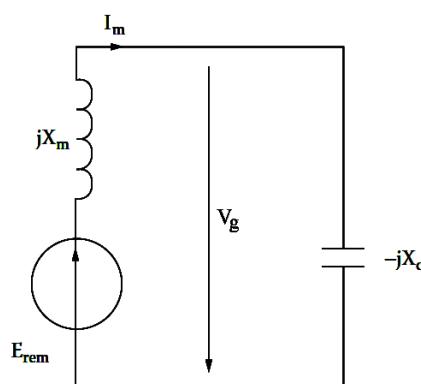
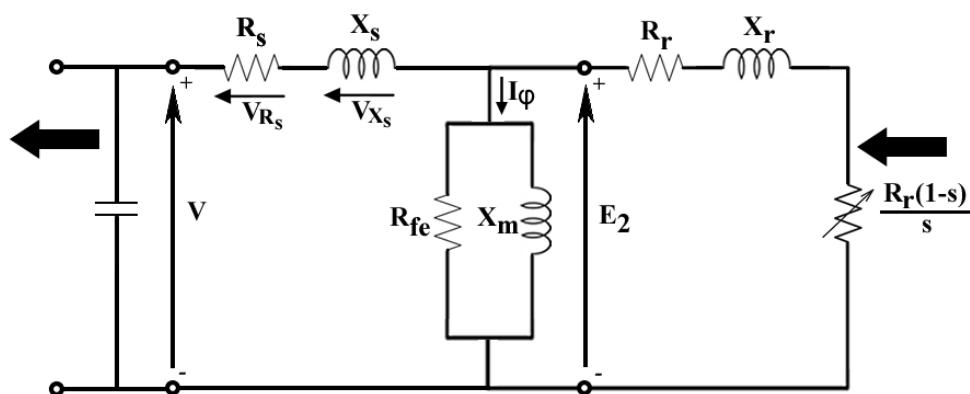


Figura A.2 - Processo de auto excitação nos geradores de indução de gaiola de esquilo.
Fonte: Adaptado de (SIMÕES & FARRET, 2015).

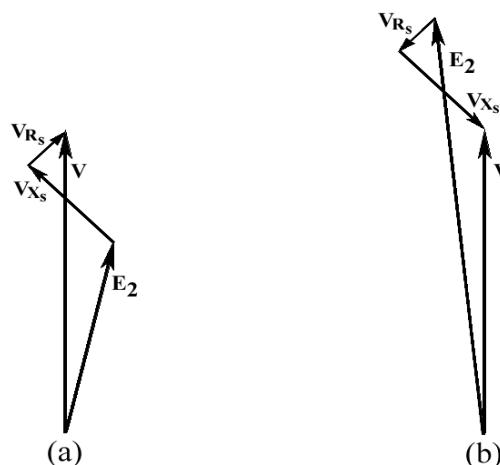
**Figura A.3 – Circuito equivalente simplificado do gerador de indução auto-excitado.**

Fonte: (BOLDEA, 2005).

**Figura A.4 – Circuito equivalente monofásico do gerador de indução auto-excitado.**

Fonte: Redesenhado e adaptado de (CHAPALLAZ et al., 1992).

O valor da tensão induzida através do entreferro E_2 , é menor que a tensão terminal V , sendo a máquina assíncrona operando como motor, no funcionamento como gerador o contrário ocorre, para que dessa forma, possa manter a mesma tensão terminal.

**Figura A.5 – Diagrama fasorial da tensão induzida. (a) Ação motora; (b) Ação geradora.**

Fonte: Redesenhado de (CHAPALLAZ et al., 1992).

A.3 – Dimensionamento do banco de capacitores

Segundo (CHAPALLAZ et al., 1992) para calcular a capacidade do banco de capacitores na ligação delta a serem ligados em paralelo com o gerador de indução, utiliza-se a equação (A.3).

$$C_{\Delta \text{ por fase}} = \frac{Q_g}{3 \times V^2 \times 2 \times \pi \times f} \quad (\text{A.3})$$

Inicialmente, encontra-se a energia reativa que a máquina assíncrona consome enquanto opera como motor, sendo dada por:

$$Q_m = \frac{P_n}{\eta_m} \times \tan g(\cos^{-1} \phi_m) \quad (\text{A.4})$$

De posse da equação (A.4) e da Figura A.4, calcula-se a potência reativa do gerador, esta é função da potência nominal da máquina que anteriormente funcionava como motor.

$$Q_g = \frac{\sin(\phi_g)}{\sin(\phi_m)} \times Q_m \quad (\text{A.5})$$

Na ausência na curva de magnetização, pode-se ensaiar a máquina em laboratório, obtendo então os parâmetros ideais para o dimensionamento do banco de capacitores.

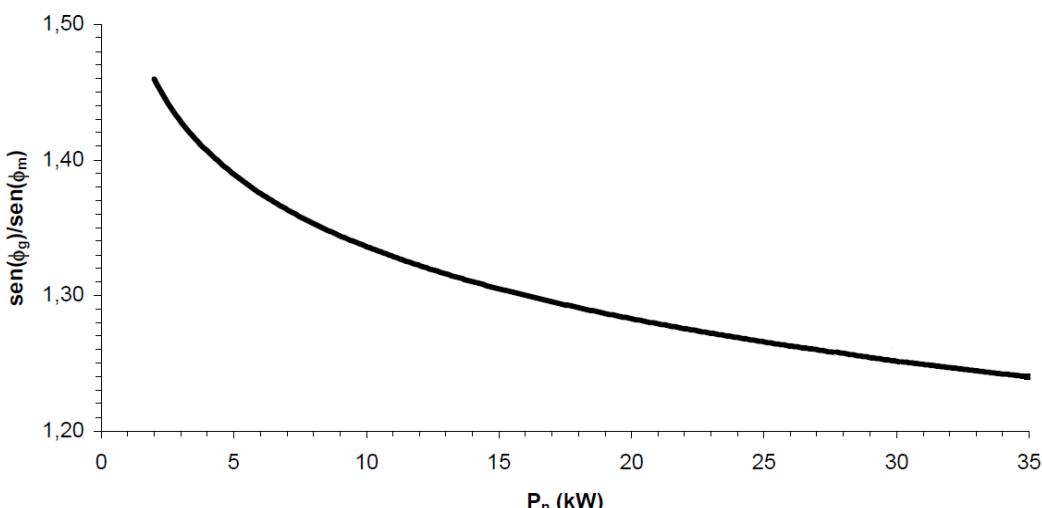


Figura A.6 – Relação entre o $\sin(\phi)$ do gerador e do motor.

Fonte: (VIANA et al., 2004).

Para calcular a relação entre a ligação do gerador é preciso considerar as tensões e correntes trifásicas (FERNANDES, 2006), conforme indicado pela Tabela A.1.

Tabela A.1– Relação de tensão e corrente trifásicas de acordo com ligação da máquina trifásica.

GRANDEZA	ESTRELA	DELTA
Tensão	$V_{linha} = \sqrt{3} \times V_{fase}$	$V_{linha} = V_{fase}$
Corrente	$I_{linha} = I_{fase}$	$I_{linha} = \sqrt{3} \times I_{fase}$

Levando em consideração as grandezas em fase, tem-se:

$$V_{c\Delta} = \sqrt{3} \times V_{cY} \quad (\text{A.6})$$

$$I_{c\Delta} = \frac{I_{cY}}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.7})$$

$$X_{c\Delta} = \frac{V_{c\Delta}}{I_{c\Delta}} = \frac{\sqrt{3} \times V_{cY}}{\frac{I_{cY}}{\sqrt{3}}} = \frac{3 \times V_{cY}}{I_{cY}} = 3 \times X_{cY} \quad (\text{A.8})$$

Como,

$$C = \frac{1}{\omega \times X_c} \quad (\text{A.9})$$

Logo,

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3} \quad (\text{A.10})$$

Em se tratando de custo, o preço do banco de capacitores com gerador ligado em delta é mais vantajoso que ligado em estrela por precisar três vezes menos capacidade.

Para realizar correção de fator de potência incluindo no mesmo banco do gerador de indução, com carregamento desejado pode-se utilizar as equações (A.11)-(A.18).

$$S = \sqrt{3} \times V_{linha} \times I_{linha} \quad (\text{A.11})$$

$$P = S \times \cos(\phi) \quad (\text{A.12})$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{A.13})$$

Sendo,

$$Q_{fase} = \frac{Q}{3} \quad (\text{A.14})$$

$$V_{fase} = \frac{V_{linha}}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.15})$$

Calcula-se:

$$I_{fase} = \frac{Q_{fase}}{V_{fase}} \quad (\text{A.16})$$

$$Xc_{fase} = \frac{V_{fase}}{I_{fase}} = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C_{fase}} \quad (\text{A.17})$$

$$C_{fase} = \frac{I_{fase}}{2 \times \pi \times f \times V_{fase}} \quad (\text{A.18})$$

Caso desconheça o carregamento nominal imposto pelas cargas que serão supridas pelo gerador de indução, aconselha-se dimensionar um banco de capacitores para a capacidade nominal do gerador de indução, com fator de potência indutivo de 0,8. Caso não se conheça ou não possa ter uma relação da curva de magnetização da máquina assíncrona, para encontrar o valor do banco de capacitores, pode-se calcular pela reatância de magnetização, que seria o valor mínimo de potência reativa trifásica, dada pela equação (A.20), o dimensionamento pela reatância de magnetização deve ser feito preferencialmente para geradores de indução de gaiola de esquilo ligados à rede elétrica. Uma vez que o valor mínimo da reatância é para operação à vazio, caso o dimensionamento seja realizado desta forma, para operação em ilha, resultará em queda de tensão terminal para cargas resistivas, se a carga for indutiva, um pequeno valor pode ser suficiente para desmagnetizar a máquina, para cargas resistivas com carregamento nominal, a desmagnetização também ocorre.

$$C_{mín} = \frac{3}{\omega X_M} \quad (\text{A.19})$$

$$Q = 3 \left(\frac{\frac{V_{fase}^2}{1}}{\omega C_{min}} \right) \quad (A.20)$$

A.4 – Cálculo do banco de capacitores

Calculando segundo (CHAPALLAZ et al., 1992), a energia reativa quando a máquina assíncrona estiver operando como motor pela equação (A.4), tem-se:

$$Q_m = \frac{P_n}{\eta_m} \times \tan g(\cos^{-1} \phi_m) = \frac{2200}{0,793} \times \tan g(31,788^\circ)$$

$$Q_m = j1.719,35 \text{ [VAR]}$$

Encontrada a relação $\sin(\phi_g)/\sin(\phi_m)$ na Figura A.5, e com o valor de Q_m na equação (A.5):

$$Q_g = \frac{\sin(\phi_g)}{\sin(\phi_m)} \times Q_m = 1,455 \times 1.719,35 = -j2.501,6 \text{ [VAR]}$$

Logo, será usado um banco de capacitores ligados em delta (380V) de 2,5 kVAR em paralelo com o gerador de indução.

Realizando o dimensionamento pela reatância de magnetização, presente na Tabela 4.2.1, tem-se a potência reativa mínima para auto-excitação do gerador de indução.

$$C_{min} = \frac{1}{377 \times 79,47} = 3,3377 \times 10^{-5} \text{ [F]}$$

$$Q = 3 \left(\frac{\frac{V_{fase}^2}{1}}{\omega C_{min}} \right) = 3 \left(\frac{\frac{220^2}{1}}{377 \times 3,3377 \times 10^{-5}} \right) = -j1827,1 \text{ [Var]}$$

Lembrando que para carregamento nominal deve-se estimar de 30 a 35% da potência reativa mínima para auto-excitação para geradores de indução de classe de potência pequena.

Tabela A.2 – Bancos de capacitores utilizados para auto-excitação do gerador de indução.

PARÂMETROS	Valores B1	Valores B2
Potência	1,0 [kVAr]	1,5 [kVAr]
Ligaçāo	Δ	Δ
Tensāo de linha	380 [V]	380 [V]
Frequêncāa	60 [Hz]	60 [Hz]
Reatâncāa capacitiva	433,2 [Ω /fase]	288,8 [Ω /fase]
Capacitâncāa	3x6,0 [μ F]	3x9,0 [μ F]

A.5 – Simulação do gerador de indução auto-excitado

Para verificar o método de auto-excitāção citado acima, realizou-se uma simulaçāo computacional em Matlab/Simulink®, conforme mostra a Figura A.7, do gerador de indução auto-excitado alimentando uma carga resistiva com potência nominal. A velocidade de rotação permaneceu constante em todo tempo da simulaçāo a 1800 rpm, indicado na Figura A.8.

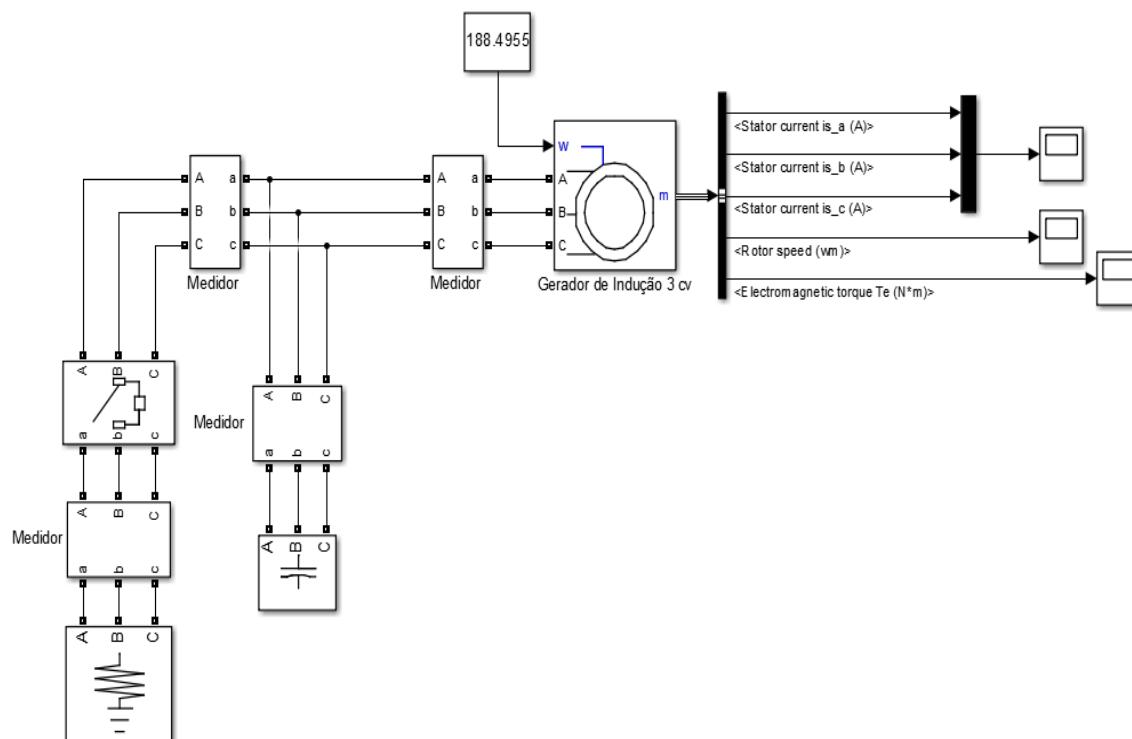


Figura A.7 – Simulação do gerador de indução alimentando carga nominal resistiva.

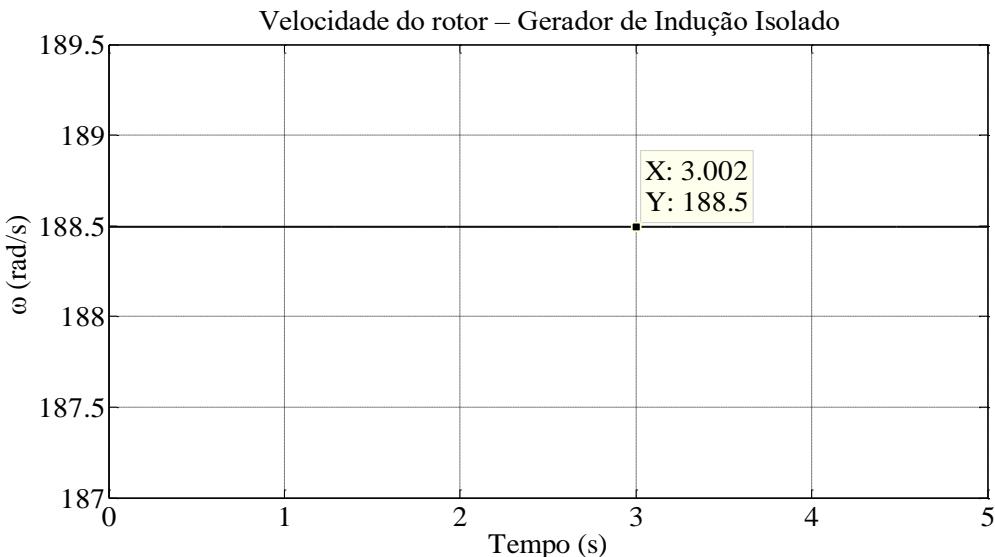


Figura A.8 – Velocidade de rotação para o gerador de indução auto-excitado para carregamento nominal.

As Figuras A.9, A.10 e A.11, mostram a tensão terminal do gerador de indução auto-excitado alimentando uma carga resistiva para carregamento nominal. O dimensionamento segundo (CHAPALLAZ et al., 1992) é apropriado, conforme indicada na Figura A.9, após chaveamento da carga (1s), a tensão está próxima da nominal.

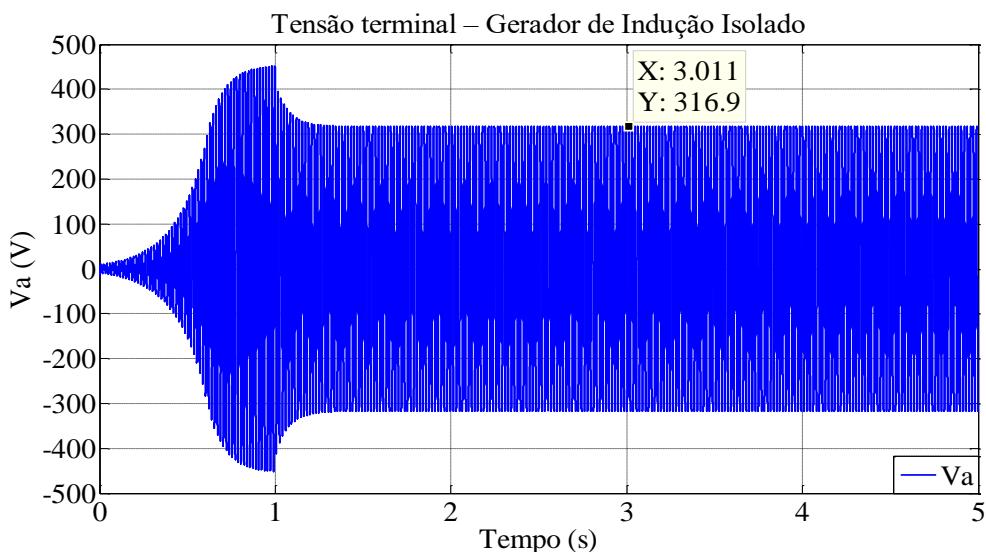


Figura A.9 – Tensão terminal de fase do gerador de indução auto-excitado, dimensionamento segundo (CHAPALLAZ et al., 1992).

A Figura A.10, mostra que o dimensionamento do banco de capacitores pela reatância de magnetização, deixando perceptível que à vazio, a tensão permanece na

nominal, porém logo após o chaveamento da carga (4s), o gerador de indução desmagnetiza-se, sendo este método não recomendado para operação isolada.

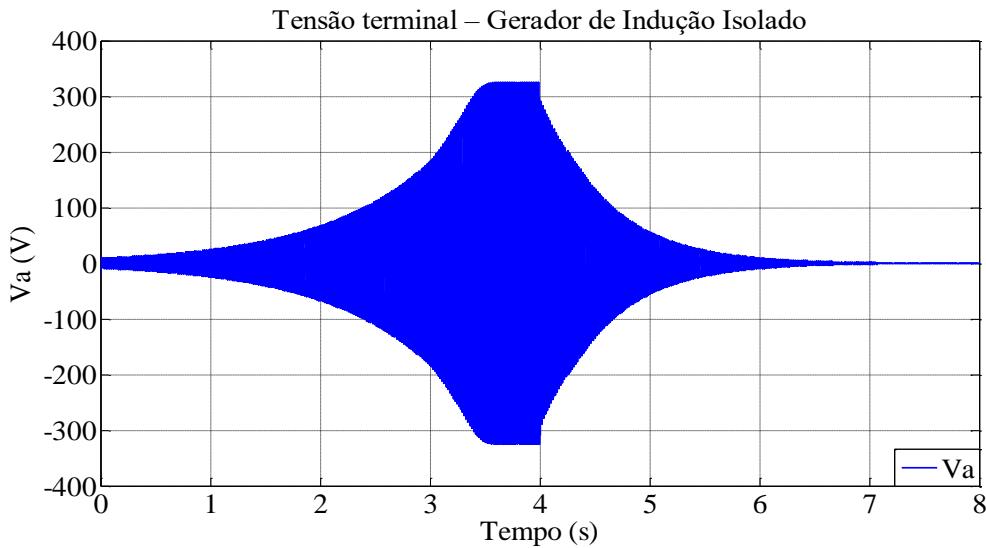


Figura A. 10 – Tensão terminal de fase do gerador de indução auto-excitado, dimensionamento pela reatância de magnetização.

O dimensionamento do banco de capacitores pela reatância de magnetização, pode ser realizado, desde que, seja considerando de 30 a 35% o fator de aumento da potência reativa a ser incluída no banco de capacitores. A Figura A.11, indica que um fator de 1,35 é adequado para operação do gerador de indução auto-excitado, após ligar a carga em (1s), a tensão terminal ficou muito próxima da nominal.

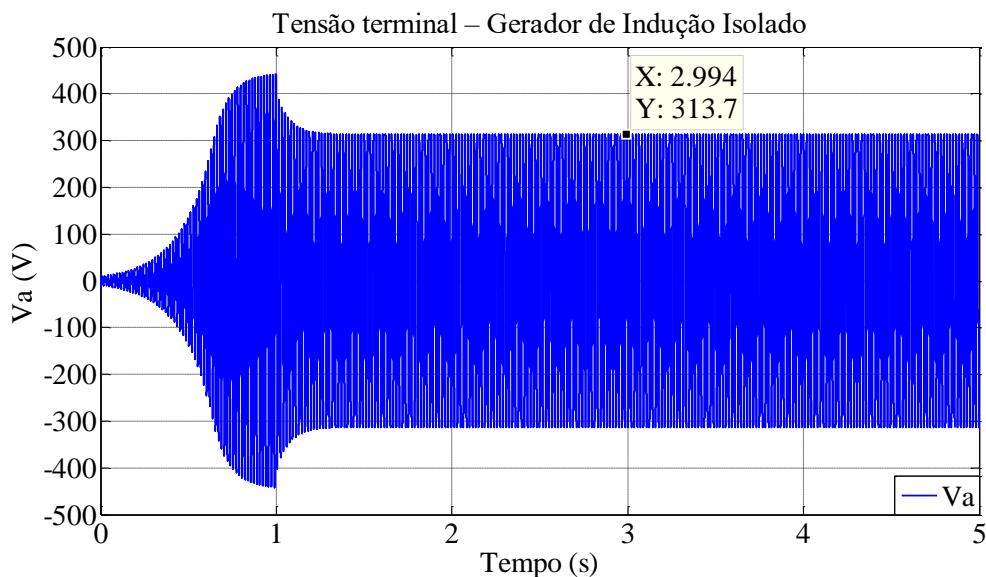


Figura A.11 – Tensão terminal de fase do gerador de indução auto-excitado, dimensionamento por um fator de 1,35 da potência reativa mínima.

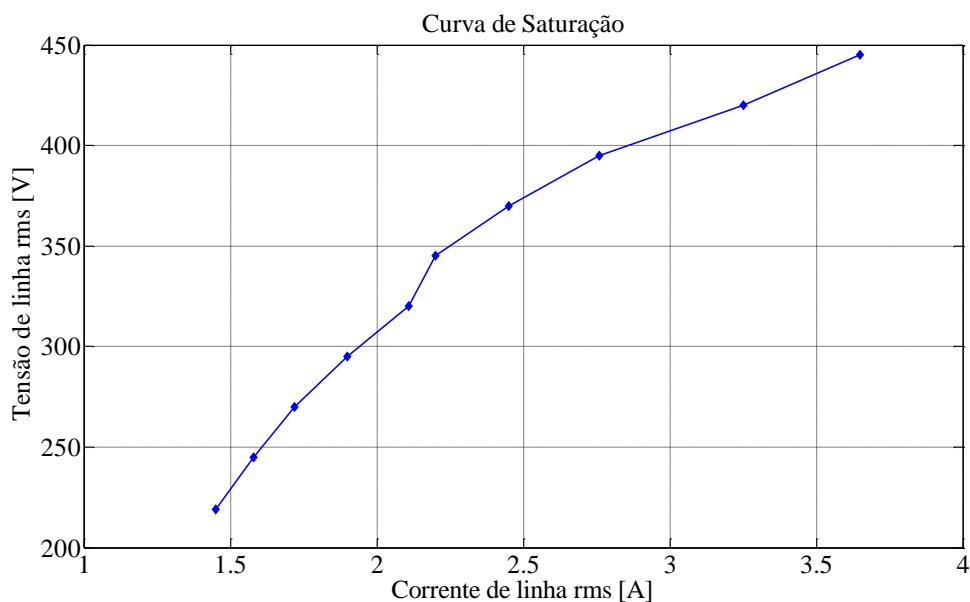


Figura A.12 - Curva de saturação da máquina assíncrona.

A curva de saturação mostrada na Figura A.12, é levantada a partir dos valores de tensão e corrente de linha, assim a curva de saturação é obtida experimentalmente da máquina assíncrona, operando como motor sem carga e em regime permanente. Na simulação é necessário incluir esta curva, conforme o princípio de funcionamento do gerador de indução auto-excitado mostrado pela Figura A.2.

APÊNDICE B

DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

B.1 – Harmônicos

Devido aos harmônicos espaciais gerados pelo gerador síncrono de polos salientes e pela saturação magnética do gerador de indução, faz-se necessário nos procedimentos experimentais, encontrar os valores verdadeiros, incluindo a distorção harmônica presente na tensão e corrente, para cálculo correto da potência gerada pelos geradores. Devido ao funcionamento em ilha, as distorções apresentam valores significativo para análise dos resultados experimentais, e é por isso importante considerar os harmônicos existentes, a teoria apresentada encontra-se em (CHATTOPADHYAY et al., 2011).

O conceito de harmônico surgiu nas pesquisas sobre “movimento harmônico simples” da eletricidade, acústica, dentre outros fenômenos físicos, uma onda senoidal não periódica pode ser representada pela soma de ondas senoidais de diferentes frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental de um sistema.

Os harmônicos podem ser representados pela soma de senóides pela Série de Fourier.

$$v(t) = V_{cc} + \sum_{n=1}^{\infty} V_{nm} \times \text{sen}(n\omega t + \alpha_n) \quad (\text{B.1})$$

Onde:

sen - Seno;

n - Ordem harmônica;

V_{cc} - Componente de tensão contínua;

V_{nm} - Tensão máxima;

ω - Velocidade de rotação em radianos por segundo (rad/s);

α_n - Ângulo de fase da ordem harmônica.

A representação da forma de onda distorcida por uma série de senóides pode ser representada pela teoria convencional de análise de circuitos elétricos, tendo a necessidade de se analisar cada frequência em particular. A distorção harmônica da tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância de um determinado circuito elétrico, para cada respectivo harmônico existe uma queda de tensão de mesma frequência, dessa forma, totalizando a distorção. A Figura B.1 representa a decomposição de cada ordem harmônica de uma onda de corrente.

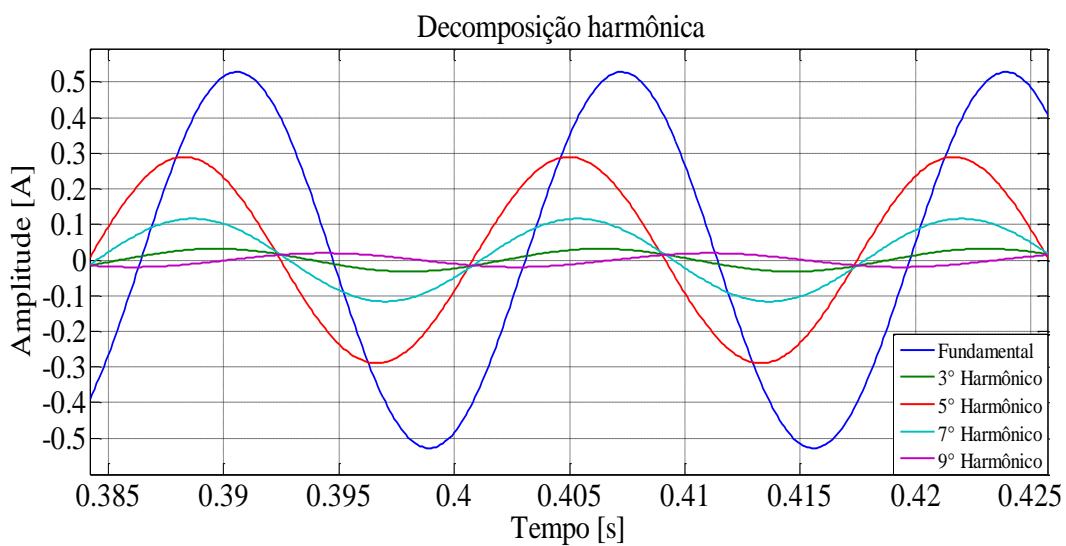


Figura B.1 - Representação de cada ordem harmônica de uma onda de corrente distorcida por uma lâmpada compacta fluorescente.

B.2 – Distorções Harmônica Individual, Total, Valor Eficaz e Fator de Potência

A distorção harmônica individual (DHI) é um parâmetro para calcular o conteúdo de cada ordem harmônica, sendo a divisão do valor da ordem harmônica desejada pelo valor da fundamental multiplicado por 100, pode ser usada tanto para o cálculo dos harmônicos de tensão e corrente.

- Para tensão

$$DHI_v(\%) = \left(\frac{V_h}{V_1} \right) \times 100 \quad (\text{B.2})$$

- Para corrente

$$DHI_i(\%) = \left(\frac{I_h}{I_1} \right) \times 100 \quad (\text{B.3})$$

É bastante usual constar o nível de distorção harmônica total (*THD*) representando a distorção total da poluição harmônica. É calculado pela raiz do somatório das tensões harmônicas desejadas ao quadrado divido pelo valor da componente fundamental, para expressar em porcentagem, basta multiplicar por 100.

- Para tensão

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=n} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (\text{B.4})$$

- Para Corrente

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=n} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (\text{B.5})$$

O valor eficaz da tensão e corrente que possuem várias componentes harmônicas não é a soma aritmética de cada componente, mas conforme apresentado por (B.6) e (B.7).

- Para tensão

$$V_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} V_h^2} \quad (\text{B.6})$$

- Para Corrente

$$I_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} I_h^2} \quad (\text{B.7})$$

O fator de potência também sofre mudança de valor com o conteúdo harmônico presente, é calculado por (B.8).

$$fp_h = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (B.8)$$

Onde:

\cos - Cosseno;

φ - Defasagem entre a tensão e corrente da componente fundamental.

B.3 – Cálculo de potência

A potência de fase ativa, reativa e aparente, incluindo as componentes harmônicas são calculadas pelas equações (B.9), (B.10) e (B.11), respectivamente. A potência trifásica pode ser obtida multiplicando três vezes a respectiva potência de fase.

$$P_{fase} = V_{ef} I_{ef} fp_h \quad (B.9)$$

$$S_{fase} = \frac{P_{fase}}{fp_h} \quad (B.10)$$

$$Q_{fase} = \sqrt{S_{fase}^2 + P_{fase}^2} \quad (B.11)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (ALGHUWAINE, 1997) Alghuwainem, S.M. Steady-state analysis of a self-excited induction generator self-regulated by a shunt saturable reactor. *Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International*. Milwaukee, WI.
- (ALVES, 2011) Manoel Berto. *Análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal*. 2011. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Uberlândia.
- (ANAGREH & AL-REFAE, 2003) Yaser N. Anagreh, & Imadden M. Al-Refae. (Janeiro de 2003). Teaching the Self-Excited Induction Generator Using Matlab. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 40(1), 55 - 57.
- (BANSAL, 2005) Bansal, R.C. . (23 de Maio de 2005). Three-phase self-excited induction generators: an overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 292 - 299.
- (BOLDEA, 2005) Ion Boldea. *Variable Speed Generators (The Electric Generators Handbook)* (1º ed.). Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 550 p.
- (BORBA, 2011) Lucio Aparecido Borda. *Estudo dos harmônicos entre diferentes sistemas de excitação de máquinas síncronas*. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- (BRAGA et al., 2015) A.V. Braga, A.J.J. Rezek, V.F. Silva, A.N.C. Viana, E.C. Bortoni, W.D.C. Sanchez, & P.F. Ribeiro. (Novembro de 2015). Isolated induction generator in a rural Brazilian area: Field performance tests. *Renewable Energy*, 83, 1352–1361.
- (CHAPALLAZ et al., 1992) Jean-Marc Chapallaz, Jacques Dos Ghali, Peter Eichenberger, & Gerhard Fischer. *Manual on Induction Motors Used as Generators: A Publication of Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien — GATE A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH*. Eschborn, HESSE, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1992. 213p.
- (CHATTOPADHYAY et al., 2011) Surajit Chattopadhyay, Madhuchhanda Mitra, & Samarjit Sengupta. *Electrical Power Systems Quality*. Calcutta, West Bengal, Índia: Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011. 182 p.
- (CHAUHAN et al., 2010) Chauhan, Y.K. , Jain, S.K, & Singh, B. Performance of a three-phase Self-Excited Induction Generator with Static Synchronous Series Compensator. *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India* (pp. 1 - 6). New Delhi: IEEE.

- (CHAUHAN et al., 2013) Yogesh K. Chauhan, Sanjay K. Jain, & Bhim Singh. (Julho de 2013). Operating performance of static series compensated three-phase self-excited induction generator. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 49, Pages 137–148.
- (CHEN et al., 2008) Woei-Luen Chen , Yung-Hsiang Lin, Hrong-Sheng Gau, & Chia-Hung Yu. (7 de Maio de 2008). STATCOM Controls for a Self-Excited Induction Generator Feeding Random Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2207 - 2215.
- (CHILIPPI et al., 2014) Chilipi, R.R. , Singh, B, & Murthy, S.S. (29 de Maio de 2014). Performance of a Self-Excited Induction Generator With DSTATCOM-DTC Drive-Based Voltage and Frequency Controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(3), 545 - 557.
- (DASTAGIR & LOPES, 2007) Dastagir, G., & Lopes, L.A.C. Voltage and Frequency Regulation of a Stand-Alone Self-Excited Induction Generator. *Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada*, (pp. 502 - 506). Montreal, Que.
- (DE RESENDE et al., 2003) de Resende, J.T. , Schelb, Antônio J. H.C., Ferreira, Robson., & Jhnior, ManassCs E. P. Control of the generated voltage by a three-phase induction generator self-excited by capacitors using control techniques. *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003*, (pp. 530 - 535 Vol.1).
- (DM, 2015). (29 de Janeiro de 2015). *Geradores voltam com tudo após crise energética*. Acesso em 18 de 02 de 2015, disponível em PORTAL PCH: <http://www.portalpch.com.br/noticias-e-opnião/notícias-gerais-do-segmento/4718-29-01-2015-geradores-voltam-com-tudo-apos-crise-energetica.html>
- (FERNANDES, 2006) Reginaldo Barbosa. “Viabilidade de conjunto motor de indução e bomba centrífuga operando como turbina e gerador para pequenos aproveitamentos de potencial hídrico. 2006. 53f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- (FITZGERALD et al., 2006) A. E. Fitzgerald, C. K., & S. D. MÁQUINAS ELÉTRICAS – Com introdução à eletrônica de potência (6º ed.). Porto Alegre: Tradução Anatólio Laschuk – 6.ed. Bookman, 2006. 648 p.
- (FRANCHI, 2009) Claiton Moro. *Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações* (2º ed.). São Paulo, SP: Érica Itaú, 2009. 192 p.
- (GAWANDE & PORATE, 2009), Gawande, S.P. , & Porate, K.B. Review of Parallel Operation of Synchronous Generator and Induction Generator for Stability. *2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET)*, (pp. 716 - 721). Nagpur.
- (GAWANDE et al., 2010) Gawande, S.P. , Porate, K.B. , Thakre, K.L., & Bodhe, G.L. Synchronization of Synchronous Generator and Induction Generator for Voltage & Frequency Stability Using STATCOM. *3rd International Conference on*

- Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET)* (pp. 407 - 412). Goa: IEEE.
- (GÖNEN, 2012) Turan Gonen. *Electrical Machines with MATLAB®*. Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 654 p.
- (GONG PINGPING et al., 2015) Gong Pingping , Lu Ziguang, Li Zhuo, & Wang Di. PI-PSO algorithm based voltage controller of STATCOM for self-excited induction generator. *34th Chinese Control Conference (CCC), 2015*, (pp. 4349 - 4354). Hangzhou.
- (HASHEMNIA et al., 2010) Hashemnia, M.N. , Kashiha, A., & Ansari, K. (3-5 de Outubro de 2010). A novel approach for the steady-state analysis of a three-phase self excited induction generator including series compensation. *2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA)*, (pp. 371 - 375). Penang.
- (JANARDHAN & SINGH, 2014) Janardhan Reddy, P. , & Singh, S.P. Voltage and frequency control of parallel operated synchronous and induction generators in micro hydro scheme. *2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, (pp. 124 - 129). Chennai.
- (JAYARAMAIAH & FERNANDAS, 2004) Jayaramaiah, G.V. , & Fernandas, B.G. Analysis of voltage regulator for a 3 - /spl Phi/ self-excited induction generator using current controlled voltage source inverter. *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004. 3*, pp. 1404 - 1408 . Xi'an: IEEE.
- (JORDÃO, 2013) Rubens Guedes Jordão. *Máquinas Síncronas* (2º ed.). São Paulo/Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,2013. 229 p.
- (KIMPARA, 2012) Marcio Luiz Macri . *Modelagem e análise de geradores síncronos utilizando o método de reconstrução de campo*. 2012. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande.
- (KOSOW, 1998) Irving L. Kosow. *Máquinas Elétricas e Transformadores* (15 ed.). Porto Alegre, RS: Globo Livros.
- (KRAUSE et al., 2013) Krause, Paul C., O. W., S. S., & S. P. *Analysis of electric machinery and drive systems* (Third ed.). Hoboken, New Jersey, EUA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE PRESS, 2013. 632 p.
- (KUMAR et al., 2010) Kumar, M.S. , Kumaresan, N., & Subbiah, M. Performance evaluation of self excited induction generator using fuzzy logic. *2010 India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, (pp. 1 - 6). New Delhi.
- (KUNDUR, 1993) Prabha Kundur. *Power System Stability and Control* (1º ed.). Toronto, Ontario, Canadá: McGraw-Hill Education, 2003. 1200 p.
- (MURTHY & AHUJA, 2010) Murthy, S.S. , & Ahuja, R.K. A novel solid state voltage controller of three phase Self Excited Induction Generator for decentralized power

- generation. *2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*, (pp. 1 - 6). Allahabad.
- (MURTHY et al., 2003) Murthy, S.S. , Singh, B., Ashish Kulkarni , Sivarajan, R, & Gupta, S. Field experience on a novel picohydel system using self excited induction generator and electronic load controller. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003.*, (pp. 842 - 847 Vol.2).
- (NASCIMENTO, 2010) Carlos Sonier Cardoso. *Proposta para Implementação de Microcentrais de Geração a Gás com Utilização de Geradores de Indução*. 2010. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- (ORS, 2008) Ors, M. Voltage control of a self-excited induction generator. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008.*, 3, pp. 281 - 286. Cluj-Napoca.
- (ORS, 2009) Ors, M. Voltage control of self excited induction generator using look-up table. *2009 European Control Conference (ECC)* (pp. 4211 - 4216). Budapest: IEEE.
- (PALWALIA, 2013) Palwalia, D.K. STATCOM based voltage and frequency regulator for self excited induction generator. *2013 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE)*, (pp. 102 - 107). Kuala Lumpur.
- (PHUMIPHAK & CHAT-UTHAI, 2009) Phumiphak, P. , & Chat-uthai, C. Optimal capacitances compensation for short-shunt self-excited induction generator under inductive load. *International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009.*, (pp. 1 - 5). Tokyo.
- (QUISPE, 1997) Quispe, E.C. A new voltage regulator for self-excited induction generator-design, simulation, and experimental results. *Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International*. Milwaukee, WI.
- (RAJAKARUNA & BONERT, 1993) Rajakaruna, S. , & Bonert, R. (Dezembro de 1993). A technique for the steady-state analysis of a self-excited induction generator with variable speed. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 8(4), 757 - 761.
- (SALIMIKORDKANDI & SURGEVIL, 2014), Salimikordkandi, C. , & Surgevil, T. Modeling and analysis of self-excited induction generator with fixed capacitor excitation and shunt voltage regulation. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, 2014, (pp. 149 - 155). Antalya.
- (SEPSI & JARDAN, 2012) Sepsi, D.T, & Jardan, R.K. Vector based hysteresis control for self-excited induction generators. *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*. Novi Sad.
- (SILVA, 2015) Fernando Bento. *Atenuação do afundamento de tensão em geradores síncronos isolados quando submetidos a partida direta de motores de indução*.

- 2015 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- (SIMÕES & FARRET, 2015) M. Godoy Simões, & Felix A. Farret. *Modeling and Analysis with Induction Generators* (Third Edition ed.). Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 466 p.
- (SINGH & SHILPAKAR, 1998) Singh, B., & Shilpakar, L.B. (7 de Novembro de 1998). Analysis of a novel solid state voltage regulator for a self-excited induction generator. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 145(6), 647 - 655.
- (SINGH et al., 2004) Singh, B. , Murthy, S.S., & Gupta, S. (22 de Novembro de 2004). Analysis and design of STATCOM-based voltage regulator for self-excited induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 783 - 790.
- (SINGH et al., 2006) Singh, B. , Madhusudan, M., Verma, V., & Tandon, A.K. Rating Reduction of Static Compensator for Voltage Control of Three-Phase Self-Excited Induction Generator. *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2. Montreal, Que.
- (SINGH et al., 2006) Singh, B. , Murthy, S.S., & Gupta, S. Modelling of STATCOM Based Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator with Dynamic Loads. *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES '06.*, (pp. 1 - 6). New Delhi.
- (SINGH et al., 2006) Singh, B. , Murthy, S.S., & Gupta, S. (02 de Outubro de 2006). STATCOM-Based Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator Feeding Nonlinear Loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), 1437 - 1452.
- (SINGH et al., 2014) Singh, B. , Murthy, S.S., & Chilipi, R.S.R. (29 de Janeiro de 2014). STATCOM-Based Controller for a Three-Phase SEIG Feeding Single-Phase Loads. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(2), 320 - 331.
- (SINGH et al., 2014) Singh, B. , Murthy, S.S., Chilipi, R.R., Madishetti, S., & Bhuvaneswari, G. (Setembro de 01 de 2014). Static synchronous compensator-variable frequency drive for voltage and frequency control of small-hydro driven self-excited induction generators system. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 1528 - 1538.
- (SINGH et al., 2015) Singh, B. , Murthy, S.S., Reddy, R.S., & Arora, P. (6 de Julho de 2015). Implementation of modified current synchronous detection method for voltage control of self-excited induction generator. *Institution of Engineering and Technology*, 8(7), 1146 - 1155.
- (SPITSA et al., 2006) Spitsa, V. , Kuperman, A., Weiss, G., & Rabinovici, R. Design of a robust voltage controller for an induction generator in an autonomous power system using a genetic algorithm. *American Control Conference, IEEE 2006*. Minneapolis, MN.

- (SUAREZ & BORTOLOTTO, 1999) Suarez, E. , & Bortolotto, G. (Setembro de 1999). Voltage-frequency control of a self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3), 394 - 401.
- (TAMRAKAR et al., 2007) Tamrakar, I. , Shilpkar, L.B., Fernandes, B.G., & Nilsen, R. (27 de Agosto de 2007). Voltage and frequency control of parallel operated synchronous generator and induction generator with STATCOM in micro hydro scheme. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 1(5), 743 - 750.
- (TRAPP et al., 2011) Trapp, J.G. , Parizzi, J.B., Farret, F.A., Serdotte, A.B., & Longo, A.J. Stand alone self-excited induction generator with reduced excitation capacitors at fixed speed. *Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian* (pp. 955 - 962). Praiamar: IEEE.
- (VENKATESA PERUMAL & CHARTTERJEE, 2006) , Venkatesa Perumal, B. , & Chatterjee, J.K. Analysis of a self excited induction generator with STATCOM/battery energy storage system. *Power India Conference, 2006 IEEE*. New Delhi.
- (VERUCCHI et al., 2005) Carlos J. Verucchi, Gerardo Gabriel Acosta, & Ezequiel Carusso. (Outubro de 2005). Influencia de la Inercia y el Par de Carga en el Diagnóstico de Fallas en Rotores de Máquinas de Inducción. *Revista IEEE América Latina*, 3(4), 350 - 355.
- (VIANA et al., 2004) Augusto Nelson Carvalho, Ângelo José Junqueira Rezek, & Daniel de Macedo Medeiros. A utilização de geradores de indução acionados por bfts na geração de energia elétrica. *In Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*. Campinas, SP.
- (WEG, 2012) *Características e Especificações de geradores*. 2012. 66 p. Curso DT- 5.
- (WU, 2010) Wu, Marcel. *Análise teórico-experimental do gerador de indução trifásico diretamente conectado à rede de distribuição elétrica*. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.