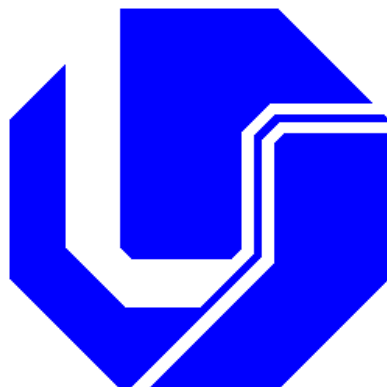


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

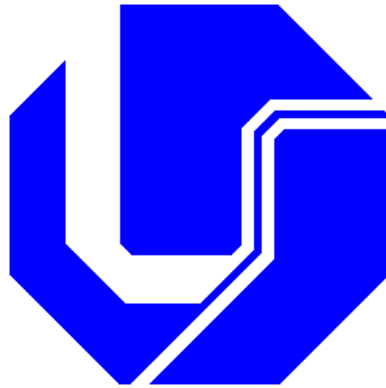


**ANÁLISE DA GERAÇÃO ASSÍNCRONA DISTRIBUÍDA UTILIZANDO GÁS METANO
PROVENIENTE DA SUINOCULTURA**

EUDINEI DE OLIVEIRA SILVA

**ABRIL
2020**

**FEDERAL UNIVERSITY OF UBERLÂNDIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
POSTGRADUATE IN ELECTRICAL ENGINEERING**



**ANALYSIS OF DISTRIBUTED ASYNCHRONOUS GENERATION USING METHANE GAS
FROM SWINE BREEDING**

EUDINEI DE OLIVEIRA SILVA

**APRIL
2020**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 264, PPGEELT				
Data:	Vinte e quatro de abril de dois mil e vinte	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:45
Matrícula do Discente:	11413EEL003				
Nome do Discente:	Eudinei de Oliveira Silva				
Título do Trabalho:	Análise da geração assíncrona distribuída utilizando gás metano proveniente da suinocultura				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Dinâmica de sistemas elétricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Análise da tecnologia assíncrona na geração distribuída utilizando gás metano proveniente da suinocultura (Analysis of Asynchronous Technology in Distributed Generation using Methane Gas from Swine Breeding). Agência Financiadora: Energisa/MT Início: 01/08/2013 Término: 01/05/2015 No. do Projeto na agência: ANEEL PD-0405-0010/2013. Professor Coordenador: Prof. Dr. José Mateus Rondina – UFMG.				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Luciano Martins Neto - FEELT/UFU; Adélio José de Moraes - FEELT/UFU; Rui Vagner Rodrigues da Silva - IFG; Fernando Bento Silva - UFOP; Geraldo Caixeta Guimarães - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Geraldo Caixeta Guimarães, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Doutor**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Caixeta Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/04/2020, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RUI VAGNER RODRIGUES DA SILVA, Usuário Externo**, em 24/04/2020, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adelio José de Moraes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/04/2020, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Bento Silva, Usuário Externo**, em 24/04/2020, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Martins Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/04/2020, às 14:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1913707 e o código CRC A7F826F7.

EUDINEI DE OLIVEIRA SILVA

**ANÁLISE DA GERAÇÃO ASSÍNCRONA DISTRIBUÍDA UTILIZANDO GÁS METANO
PROVENIENTE DA SUINOCULTURA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito necessário para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistema de energia elétrica.

Linha de pesquisa: Dinâmica de sistemas elétricos

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães, PhD.

Uberlândia, 24 de abril de 2020.

Banca de avaliação

Prof. Fernando Bento Silva, Dr. (UFOP) – Convidado externo.

Prof. Rui Vagner R. da Silva, Dr. (IFG) – Convidado externo.

Prof. Adélio José de Moraes, Dr. (UFU) – Convidado interno.

Prof. Luciano Martins Neto, Dr. (UFU) – Convidado interno.

**ANÁLISE DA GERAÇÃO ASSÍNCRONA DISTRIBUÍDA UTILIZANDO GÁS METANO
PROVENIENTE DA SUINOCULTURA**

EUDINEI DE OLIVEIRA SILVA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito necessário para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, PhD.
Orientador

Prof. José Roberto Camacho, PhD.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2020	<p>Silva, Eudinei de Oliveira, 1970-</p> <p>Análise da geração assíncrona distribuída utilizando gás metano proveniente da suinocultura [recurso eletrônico]: Análise da geração assíncrona distribuída / Eudinei de Oliveira Silva. - 2020.</p> <p>Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2392 inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Guimarães, Geraldo Caixeta, 1956-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p>CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

***Dedico este trabalho ao Exército Brasileiro-
Braço Forte, Mão Amiga. Ao Colégio Militar
de Salvador, a minha eterna gratidão***

“As palavras conduzem e o exemplo arrasta”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela existência;

Aos meus Pais, Irmãs, Madrinha e Padrinhos pelo incessante trabalho em me transformar em um homem melhor;

A minha esposa Laura que sempre me brinda com sua dedicação, paciência e companheirismo;

Aos Professores Geraldo Caixeta Guimarães e Luciano Martins Neto pelo incentivo, motivação e orientação;

A todos os Professores;

Aos meus amigos e colegas da Universidade Federal de Uberlândia do Núcleo de Máquinas e Aterramentos;

À Cinara Fagundes P. Mattos pela presteza e incentivo;

Aos Amigos Pedro Henrique Jardim de Arruda, José Mateus Rondina, Antônio de Pádua Finazzi, Wagner Eduardo Vanço, Edson Dias, Edson Domingues Miranda, Marlon Zambotto de Lima, Enrique Camilot e Mário Rodrigues da Silva Filho pela valiosa contribuição neste trabalho;

Ao Grupo Selco pelo costumeiro e incessante apoio logístico na execução dos trabalhos.

ANÁLISE DA GERAÇÃO ASSÍNCRONA DISTRIBUÍDA UTILIZANDO GÁS METANO PROVENIENTE DA SUINOCULTURA

RESUMO

A Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) permite a conexão de geradores ao sistema de distribuição. A geração distribuída possui como característica principal possuir pequenas unidades geradoras conectadas diretamente à rede de distribuição. Esse tipo de geração com fontes alternativas está crescendo em número e em potência, principalmente pelo forte apelo ambiental. No entanto, os críticos da geração distribuída apontam problemas técnicos, operacionais, de qualidade e principalmente de segurança (como a alimentação acidental da rede de distribuição).

O objetivo da pesquisa é estudar o comportamento da máquina assíncrona na geração distribuída trabalhando em condições reais (com presença de harmônicos e desequilíbrio de tensão e corrente), operando conectada à rede principal ou em condição ilhada. Simplicidade operacional, menor custo de implantação e manutenção e, principalmente, segurança são aspectos relevantes considerados na pesquisa. Neste caso, o combustível primário da máquina é o gás metano proveniente da suinocultura.

O gerador de indução opera na condição de regime permanente, linear, não-senoidal e desequilibrada, empregando um banco de capacitores para o fornecimento da potência reativa necessária. Isto se justifica para evitar a necessidade de importar reativos da rede o que seria economicamente inviável.

Para validar a proposta, são realizados ensaios experimentais e simulações computacionais. Os resultados práticos são coletados de uma instalação elétrica real, usando equipamentos comerciais que atendem aos padrões de uma empresa de energia elétrica. Os resultados virtuais vêm da representação do sistema elétrico usando o Matlab/Simulink®. Ao final, conclui-se que ambos os tipos de resultados mostraram boa concordância.

Palavras-chaves: Gerador de indução. Geração distribuída. Desequilíbrio. Harmônicos. Ilhamento. Simulação. Matlab/Simulink®

ANALYSIS OF DISTRIBUTED ASYNCHRONOUS GENERATION USING METHANE GAS FROM SWINE BREEDING

ABSTRACT

The normative resolution 482/2012 of the National Electric Energy Agency (ANEEL) allows the connection of generators to the distribution system. Distributed generation has as main feature the use of small generating units connected directly to the distribution network. This type of generation with alternative sources is growing in number and power, mainly by strong environmental appeal. However, critics of the distributed generation point technical, operational, quality issues and notably those concerned to security (such as accidental supply of the distribution network).

The research goal is to study the behavior of the asynchronous machine in distributed generation working in real conditions (with presence of harmonics and voltage and current unbalances), connected to the main grid or on islanding operation. Operational simplicity, lower cost of deployment and maintenance, and especially the safety are relevant aspects considered in the research. In this case, the primary machine fuel is the methane gas from pig farming.

The induction generator operates on a steady-state, linear, non-sinusoidal and unbalanced condition, employing a capacitor bank to supply the necessary reactive power. This is justified to avoid the need to import such power from the network, which would be economically unfeasible.

To validate the proposal experimental tests and computer simulations are performed. Practical results are collected from a real electrical installation, using commercial equipment that meet the standards of an electric power utility. Virtual results come from the electric system representation using the Matlab/Simulink®. Finally, it is concluded that both types of results have showed good agreement.

Keywords: Induction generator. Distributed generation. Unbalance. Harmonics. Islanding. Simulation. Matlab/Simulink®

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO II – CONCEITOS E MODELAGEM: MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA

Figura 2.2.1 – (a) Rotor tipo gaiola de esquilo; (b) Estator.	18
Figura 2.2.2 – Estrutura física da máquina de indução trifásica.	18
Figura 2.2.3 – Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução polifásica.	19
Figura 2.2.4 – Curva de conjugado x escorregamento da máquina assíncrona.	20
Figura 2.2.5 – Circuito equivalente do rotor.	22
Figura 2.2.6 – Circuito equivalente monofásico da máquina de indução.	24
Figura 2.3.1 – Esquema representativo de eixos magnéticos do estator e rotor de uma máquina de indução trifásica ligada em estrela.....	27
Figura 2.3.2 – Relação das variáveis abc e dq.....	34
Figura 2.3.3 – Relação trigonométrica do circuito do rotor para eixo dq.....	36
Figura 2.3.4 – Circuito equivalente de transformação no rotor para máquina de indução trifásica.....	40

CAPÍTULO III – DESCRIÇÃO DO PROJETO

Figura 3.1 – Imagem da central geradora assíncrona experimental.....	51
Figura 3.2 – Tratamento do biogás.....	51
Figura 3.3 – Processo de queima do biogás. (a) Biodigestor; (b) Flare.....	52
Figura 3.4 – Fluxo de caixa econômico previsto.	64

Figura 3.5 –Lucros previstos; (a) Lucro ou prejuízo acumulado; (b) Lucro ou prejuízo livre.....	64
Figura 3.6 – Relação <i>EBITDA</i>	65
Figura 3.7 – Relação margem de contribuição e custos fixos.....	65

CAPÍTULO IV – ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL: RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

Figura 4.2.1 – Diagrama elétrico geral da instalação.....	70
Figura 4.2.2 –Tensão trifásica de fase obtidas experimentalmente.....	71
Figura 4.3.1 – Tensões de linha, ensaio experimental com banco de capacitores.....	73
Figura 4.3.2 – Tensões de fase, ensaio experimental com banco de capacitores.....	74
Figura 4.3.3 – Correntes de fase, ensaio experimental com banco de capacitores.....	75
Figura 4.3.4 – Potência ativa de fase, ensaio experimental com banco de capacitores....	76
Figura 4.3.5 – Potência reativa de fase, ensaio experimental com banco de capacitores.	77
Figura 4.3.6 – Fator de potência nas fases, ensaio experimental com banco de capacitores.	78
Figura 4.3.7 – Potência ativa da instalação, ensaio experimental com banco de capacitores.....	78
Figura 4.3.8 – Potência reativa da instalação, ensaio experimental com banco de capacitores.....	79
Figura 4.3.9 – Frequência gerada, ensaio experimental com banco de capacitores.....	80
Figura 4.3.10 – Modelagem computacional, gerador de indução conectado à rede elétrica, simulação com banco de capacitores.	81
Figura 4.3.11 – Formas de onda das tensões de linha, simulação com banco de capacitores.....	82

Figura 4.3.12 – Formas de onda das tensões de fase, simulação com banco de capacitores.	84
Figura 4.3.13 – Tensões de linha, simulação com banco de capacitores.	85
Figura 4.3.14 – Tensões de fase, simulação com banco de capacitores.	86
Figura 4.3.15 – Desequilíbrio de tensão, simulação com banco de capacitores.	86
Figura 4.3.16 – Formas de onda das correntes de fase, simulação com banco de capacitores.	87
Figura 4.3.17 – Desequilíbrio de corrente, simulação com banco de capacitores.	88
Figura 4.3.18 – Correntes de fase, simulação com banco de capacitores (valores rms).	89
Figura 4.3.19 – Potência ativa de fase, simulação com banco de capacitores.	89
Figura 4.3.20 – Potência reativa de fase, simulação com banco de capacitores.	90
Figura 4.3.21 – Fator de potência nas fases, simulação com banco de capacitores.	90
Figura 4.3.22 – Potência ativa da instalação, simulação com banco de capacitores.	91
Figura 4.3.23 – Potência reativa da instalação, simulação com banco de capacitores.	91
Figura 4.3.24 – Velocidade do rotor, simulação com banco de capacitores.	92
Figura 4.3.25 – Torque eletromagnético, simulação com banco de capacitores.	93
Figura 4.3.26 – Torque pulsante, simulação com banco de capacitores.	93
Figura 4.3.27 – Tensões de linha durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.	95
Figura 4.3.28 – Tensões de linha após abertura do disjuntor, simulação com banco de capacitores.	95
Figura 4.3.29 – Tensões de fase durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.	96
Figura 4.3.30 – Tensões de fase após abertura do disjuntor, simulação com banco de capacitores.	96
Figura 4.3.31 – Corrente de fase durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.	97
Figura 4.3.32 – Corrente após abertura do disjuntor, simulação com banco de capacitores.	97
Figura 4.3.33 – Potência reativa trifásica durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.	98
Figura 4.3.34 – Potência reativa de fase durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.	98

Figura 4.3.35 – Potência ativa da instalação durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.....	99
Figura 4.3.36 – Torque eletromagnético durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.....	100
Figura 4.3.37 – Velocidade do rotor durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.	101

APÊNDICE A – DISTORÇÕES HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIO EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Figura A.1 – Representação de cada ordem harmônica de uma onda de corrente distorcida por uma lâmpada compacta fluorescente.....	81
---	----

APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA O GERADOR DE INDUÇÃO SEGUNDO (CHAPALLAZ et al., 1992)

Figura B.1 – Ligação do banco de capacitores no gerador de indução.....	125
Figura B.2 – Circuito equivalente simplificado do gerador de indução com a presença do banco de capacitores.....	125
Figura B.3 – Circuito equivalente monofásico do gerador de indução com a presença de banco de capacitores.....	126
Figura B.4 – Diagrama fasorial da tensão induzida. (a) Ação motora; (b) Ação geradora.	126

Figura B.5 – Processo de magnetização do gerador de indução trifásico tipo gaiola de esquilo.....	127
Figura B.6 – Processo de desmagnetização do gerador de indução trifásico tipo gaiola de esquilo.....	128
Figura B.7 - Simulação computacional da avaliação do banco de capacitores.....	131
Figura B.8 – Potência trifásica na condição de 25% da potência ativa gerada.....	131
Figura B.9 – Potência trifásica na condição de 50% da potência ativa gerada.....	132
Figura B.10 – Potência trifásica na condição de 75% da potência ativa gerada.	133
Figura B.11 – Potência trifásica na condição de 100% da potência ativa gerada.	133
Figura B.12 – Curva de potência ativa e reativa trifásica, razão da potência ativa gerada pelo gerador de indução.....	134
Figura B.13 – Fator de potência do gerador de indução de acordo com a variação de carga.	134
Figura B.14 – Velocidade do rotor em função de carregamento do gerador de indução.	135
Figura B.15 – Rampa de torque de carga em função do tempo de simulação.....	136
Figura B.16 – Rampa de carregamento do gerador de indução.	136
Figura B.17 – Curva da potência reativa absorvida pelo gerador de indução em função da carga.....	137

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO III – DESCRIÇÃO DO PROJETO

Tabela 3.1 – Composição química do biogás.....	53
Tabela 3.2 – Medidas da composição do biogás na Fazenda Três Passos.	54
Tabela 3.3 – Medidas da composição do biogás na Fazenda Três Passos.	55
Tabela 3.4 – Composição química e valor calórico.	56
Tabela 3.5 – Tabela de seleção de geradores por fluxo em m ³	57
Tabela 3.6 – Cenário financeiro projetado.	61
Tabela 3.7 – Projeções financeiras do projeto.	61

CAPÍTULO IV – ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL: RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

Tabela 4.2.1 – Dados de placa do gerador de indução.	68
Tabela 4.2.2 – Parâmetros do gerador de indução.....	68
Tabela 4.2.3 – Dados de placa do transformador.	69
Tabela 4.2.4 – Parâmetros do transformador.....	69
Tabela 4.2.5 – Decomposição da onda de tensão da rede elétrica, fase A.	72
Tabela 4.2.6 – Decomposição da onda de tensão da rede elétrica, fase B.	72
Tabela 4.2.7 – Decomposição da onda de tensão da rede elétrica, fase C.	72

Tabela 4.3.1 – Manobras realizadas na simulação, regime permanente do gerador de indução com banco de capacitores.....	82
Tabela 4.3.2 – Decomposição da onda de tensão de linha, simulação com banco de capacitores, linha AB.....	83
Tabela 4.3.3 – Decomposição da onda de tensão de linha, simulação com banco de capacitores, linha BC.....	83
Tabela 4.3.4 – Decomposição da onda de tensão de linha, simulação com banco de capacitores, linha CA.....	83
Tabela 4.3.5 – Decomposição da onda de tensão de fase, simulação com banco de capacitores, fase AN.....	84
Tabela 4.3.6 – Decomposição da onda de tensão de fase, simulação com banco de capacitores, fase BN.....	84
Tabela 4.3.7 – Decomposição da onda de tensão de fase, simulação com banco de capacitores, fase CN.....	85
Tabela 4.3.8 – Decomposição da onda de corrente de fase, simulação com banco de capacitores, fase AN.....	87
Tabela 4.3.9 – Decomposição da onda de corrente de fase, simulação com banco de capacitores, fase BN.....	87
Tabela 4.3.10 – Decomposição da onda de corrente de fase, simulação com banco de capacitores, fase CN.....	88
Tabela 4.3.11 – Manobras realizadas na simulação, ilhamento do gerador de indução com banco de capacitores.....	94

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações iniciais	1
1.2 – Justificativas e objetivos	2
1.3 – Revisão bibliográfica	4
1.4 – Organização da tese	13

CAPÍTULO II

CONCEITOS E MODELAGEM: MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA	15
2.1 – Máquina de indução trifásica	15
2.2.1– Características construtivas	16
2.2.2 – Representação clássica	19
2.3 – Modelagem matemática	26
2.3.1- Equações Elétricas	26
.....	27
2.3.2 – Equação do torque elétrico em função das variáveis da máquina	32
2.3.3 – Transformação para o domínio dq0	34

2.3.4 – Equações de torque no domínio dq0	44
2.3.5– Valores em pu das equações elétricas e mecânicas.....	44
2.4– Considerações finais.....	48

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DO PROJETO	49
3.1 – Descrição	49
3.2 – Biogás.....	52
3.3 – Relevância socioambiental	57
3.4 – Relevância econômica	59
3.5 – Viabilidade econômica	60
3.6 – Considerações finais.....	66

CAPÍTULO IV

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL: RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS	67
4.1 – Introdução.....	67
4.2 – Especificações elétricas para tratamento teórico-experimental	67
4.3 – Análise teórico-experimental do gerador assíncrono com o banco de capacitores	73
4.3.1 – Procedimento experimental.....	73
4.3.2 – Simulação computacional.....	80
4.5 – Considerações finais.....	101

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	102
5.1 – Conclusões	102
5.2 - Afirmações operacionais relevantes.....	105
5.2 – Sugestões para trabalhos futuros	105
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

APÊNDICE A

DISTORÇÕES HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIO EM SISTEMAS ELÉTRICOS.....	119
A.1 – Harmônicos	119
A.2 – Desequilíbrio	122

APÊNDICE B

DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA O GERADOR DE INDUÇÃO SEGUNDO (CHAPALLAZ et al., 1992)	124
B.1 - Gerador de indução trifásico conectado à rede elétrica com banco de capacitores	124
B.2 – Dimensionamento do banco de capacitores.....	129
B.3 – Dimensionamento do banco de capacitores.....	130
B.4 – Avaliação do dimensionamento do banco de capacitores	130

B.4 – Proposta para chaveamento de banco de capacitores	134
---	-----

ANEXO A

ANEXOS SOBRE O GERADOR DE INDUÇÃO E O TRANSFORMADOR.....	138
---	------------

SIGLAS E ABREVIATURAS

MT	Mato Grosso
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
NTE	Norma Técnica
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
PIS	Programa de Integração Social
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PAYBACK	Retorno
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno
EBITDA	<i>Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization</i>
DSTATCOM	Compensador Síncrono Estático de Distribuição
BCC	Bancos de Capacitores Comutáveis
CCT	Cálculo do Tempo Crítico de Compensação
SCIG	Geradores de Indução de Gaiola de Esquilo Conectados à Rede
STATCOM	Compensador Síncrono Estático
DC	Corrente Contínua
AC	Corrente Alternada

SVC	Compensadores Var estáticos
LGS	Sistema de Geração Local
VSC	Conversores de Fonte de Tensão
IG	Gerador de Indução
GIT	Gerador de Indução Trifásico

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais

A energia elétrica desempenha um papel fundamental na vida humana. Ao lado de transportes, telecomunicações, água e saneamento, compõem a infraestrutura necessária para incorporar o ser humano ao denominado modelo de desenvolvimento vigente. Por isso o tratamento dos temas energéticos no seio do progresso da humanidade tem relevante importância visando à busca de um desenvolvimento sustentável. Isso requer uma abordagem holística e multidisciplinar num cenário composto por todas as dimensões do problema, bem como das tecnologias, das políticas econômicas, sociais e ambientais (BEBBINGTON; RUSSELL; THOMSON, 2017), (BOSSINK, 2017) e (WANG; MANCARELLA, 2016).

As máquinas de indução trifásica são amplamente utilizadas como motores, produzindo força mecânica a partir da potência elétrica. São equipamentos com a relação peso/potência baixa, comparado a outras máquinas elétricas. Apresentam grande robustez, possuem as características construtivas simples e baixo custo de fabricação. Não utiliza sistema de excitação, não necessitando de troca de escovas, o que torna sua manutenção mais barata e menos frequente (ANAGREH; AL-REFAE'E, 2003). Em se tratando de geração distribuída, na qual se tem um barramento com o nível de tensão e a frequência definidos, o gerador assíncrono se apresenta como uma opção viável. É neste contexto que se desenvolve este trabalho.

Com o aumento da demanda por energia elétrica devido ao crescimento populacional, a máquina de indução funcionando como gerador tornou-se uma boa alternativa. O seu baixo custo de fabricação, a ausência de excitatriz e de sistema de sincronismo a torna mais viável economicamente.

Com as sazonais crises energéticas brasileiras, muitas vezes agravadas pelas prolongadas estiagens no país, deixam o sistema elétrico em estado alarmante tendo como consequência o racionamento de energia elétrica. Diante dessa preocupação, devem-se empregar métodos racionais e eficientes para o uso e a geração da energia elétrica. A geração distribuída ajuda melhorar o fornecimento e a confiabilidade, além de aumentar a capacidade da rede. Com o uso do gás metano para a geração de energia elétrica, aumenta-se a possibilidade da ramificação da matriz energética do sistema elétrico brasileiro, contribuindo com a diminuição da dependência da força hídrica.

1.2 – Justificativas e objetivos

Diante da necessidade de fortalecer a rede de energia, vê-se a possibilidade da geração de eletricidade via queima do gás metano proveniente de biodigestores. O biogás confinado é queimado, transformando o metano em dióxido de carbono, reduzindo em dezenas de vezes seus malefícios ambientais.

A queima do biogás em motores acionando geradores síncronos já vem sendo empregado. Diferentemente dos geradores síncronos, os geradores assíncronos têm sua magnetização provida pelo próprio barramento, auxiliado por um banco de capacitores que faz circular, entre o gerador e o banco, a potência reativa necessária.

Muitas foram às tentativas dos produtores rurais e dos fabricantes de equipamentos conseguirem autorização para a conexão direta de fontes alternativas à rede elétrica de distribuição rural. Essa opção não era autorizada pelas empresas distribuidoras de energia devido aos impactos negativos que a geração distribuída pode proporcionar. Quanto à segurança, ressalta-se a possibilidade de energização indevida de trechos da rede de média tensão durante os desligamentos para a manutenção.

A Resolução Normativa 482/2012/ANEEL fomenta a geração distribuída, permitindo a conexão de micro e mini geradores às redes de distribuição e institui a modalidade da compensação de energia. Isso despertou o interesse por parte dos

suinocultores pela conexão de pequenos geradores, utilizando o gás metano como força primária.

Essa realidade exigiu das empresas distribuidoras de energia elétrica um cuidado adicional quando a estas unidades geradoras. Também o próprio processo de sincronismo desses pequenos geradores, no momento da reconexão, exige uma operação com pessoal capacitado, sob pena de esses procedimentos interferirem indevidamente na rede de distribuição local. A tecnologia assíncrona na geração distribuída proporciona a superação dessas dificuldades. Em caso de desligamento da rede elétrica, o gerador assíncrono desmagnetiza-se, deixando de gerar tensão terminal, dessa forma torna-se o gerador de indução do tipo gaiola de esquilo um candidato ideal para a geração distribuída.

Atualmente, o uso de geradores assíncronos é pouco conhecido e explorado no Brasil. A tecnologia disponível contempla consideravelmente a geração síncrona, pois os geradores síncronos foram idealizados para operação também em sistemas isolados, já que possuem enrolamento de excitação para a regulação de tensão.

As redes de distribuição rural têm a peculiaridade de serem longas, devido à grande extensão territorial do Brasil. Essas redes longas tendem a apresentar problemas de regulação de tensão. A presença de pequenos geradores na rede pode ajudar a melhorar os níveis de tensão, atenuando o desequilíbrio. Outra característica dessas redes é a existência de muitos consumidores monofásicos, que provocam um grande desbalanceamento entre as correntes das fases.

Vale ressaltar que uma vez comprovados os resultados desta pesquisa, será possível implementar esta proposta em uma grande variedade de aplicações onde se tenha a formação de biogás. A geração assíncrona pode também ser aplicada em micro e mini geração hidroelétrica, cujo potencial no Brasil é expressivo. Uma vez demonstrada às características vantajosas da geração assíncrona, a concessionária de energia poderá normatizar sua aplicação na geração distribuída como requisito de segurança.

A tecnologia assíncrona será estudada para a simplificação da conexão de pequenos geradores com redução de custos de implantação, operação e manutenção, bem como o elevado ganho com segurança e a confiabilidade. Espera-se também demonstrar

ganhos na qualidade da energia exportada ao sistema de distribuição, especialmente nas tensões da rede e no desequilíbrio de corrente.

Assim, neste trabalho foram efetuados testes com o gerador assíncrono operando em rede real para avaliar o seu desempenho e a sua segurança.

1.3 – Revisão bibliográfica

O rebanho suíno brasileiro vem expandindo de forma significativa nos últimos anos, com uma média de crescimento anual de aproximadamente 8% segundo dados do IBGE, chegando em 2011 um número de aproximadamente 39 milhões de cabeça (GERVÁSIO, 2013). Assim como no Brasil, a suinocultura no estado do Mato Grosso cresce de forma significativa, com rebanho de aproximadamente 2,1 milhões de cabeças em 2010 (IBGE, 2010), sendo o estado com maior crescimento relativo na produção de suínos no país entre 2004 e 2012, com crescimento de 171% (MAPA, 2006). Com a expansão significativa do rebanho suíno em Mato Grosso nos últimos anos, a imposição legal do tratamento e da destinação dos seus dejetos proporcionou, e ainda proporcionará a instalação de muitos biodigestores no estado de Mato Grosso, bem como em outros estados e regiões produtoras de suínos como ditas anteriormente. Assim uma vez que a emissão do biogás, rico em metano, é um efluente da cadeia produtiva de suínos, nada mais eficiente que promover o aproveitamento dessa energia útil utilizando o gás como combustível em um motor, para acionar geradores de energia elétrica e posteriormente conectá-lo a rede de distribuição elétrica, seguindo a Resolução Normativa N° 042 da ANEEL e as recomendações do PRODIST. A recente edição de decreto estadual isentando a cobrança de ICMS, bem como a isenção do PIS e COFINS pelo governo federal sobre a compensação de energia pela micro e mini geração distribuída, são fortes fatores motivadores para o crescimento da demanda de aproveitamento do biogás.

A queima do biogás em motores acionando geradores para produção de energia elétrica já vem sendo utilizada há algum tempo em Mato Grosso, a capacidade atual de produção de energia elétrica pelo aproveitamento do biogás da suinocultura em Mato Grosso é de 17.408,00Mwh por mês que são suficientes para abastecer 87.040,00

residências de classe média com consumo de cerca de 200 kWh por mês (PIERETI *et al.*, 2015).

Nos tópicos relacionados a máquinas assíncronas, a literatura clássica evidencia basicamente o conceito de motores de indução (FALCONE, 1993), (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS, 2006) e (VINCENT DEL TORO, 1999). Isso acontece também na maioria das pesquisas científicas que relacionam o tema, isso, pois a máquina assíncrona foi concebida para operar como motor ao contrário da máquina síncrona que é utilizada como gerador na grande maioria das usinas geradoras de energia elétrica. Os primeiros estudos envolvendo gerador de indução datam da década de 1930, sendo as principais vantagens quando, comparado com o gerador síncrono, é em relação ao custo de aquisição que é aproximadamente 40% menor para baixas potências, possui maior robustez, é mais simples e dispensa o dispositivo de sincronismo. As grandes usinas geradoras no Brasil e em todo o mundo utilizam máquinas síncronas, que são responsáveis por gerar, além da potência ativa, os fluxos de reativos necessários ao sistema. No Brasil, antes da resolução Nº 482 da ANEEL o aproveitamento de pequenos potenciais se limitava a estudos envolvendo operação de sistemas isolados (MEDEIROS; VIANA; REZE, 2005).

Na última década, devido ao aumento da demanda de energia, mesmo antes da emissão da portaria normativa de GD da ANEEL, estudos relacionados à conexão de pequenos geradores diretamente à rede de distribuição mostram a importância do fortalecimento da matriz energética. Existem diversos projetos de P&D na ANEEL envolvendo o Biogás da suinocultura e de outras fontes, no entanto, a grande maioria, relaciona questões econômicas, ambiental e de viabilidade, o que difere do apresentado no projeto (Capítulo III).

Poucas dissertações apresentam estudo sobre o gerador de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo em velocidade fixa.

NASCIMENTO (2010) investiga a máquina de indução operando como gerador. Seu trabalho centra-se nas normas e requisitos para conexão com a rede de distribuição: um gerador de indução trifásica de 15kW é acoplado a uma máquina primária de combustão a gás (GLP ou biogás) em uma micro usina a gás, no entanto, nesse trabalho o gerador de indução é conectado à rede elétrica avaliando-se a potência gerada conforme

valores de banco de capacitores, nenhum dos ensaios propostos neste trabalho encontra-se no referido trabalho.

Um estudo do comportamento dinâmico do gerador de indução auto excitado chaveado por tiristores para controle de tensão (regulação estática) em plena carga é apresentado em CALDERON (1983). CÉSAR (2009) faz um estudo para a otimização de alocação de fontes de geração distribuída em redes de distribuição em média tensão, com base na análise de multicritério.

HERRERA (2011) apresenta um estudo do diagnóstico de falhas internas do gerador de indução auto excitado em aplicações de micro gerações. Baseia-se no modelo dinâmico da máquina de indução juntamente com a potência espectral e a função Espectro *Global Wavelet*, obtendo-se um sistema simplificado de reconhecimento de falhas.

Um estudo sobre a viabilidade técnica da máquina de indução em aplicação nas pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) é apresentado por RONDINA (2007), propondo a substituição do gerador síncrono pelo assíncrono de gaiola de esquilo, focando as vantagens e desvantagens desses geradores na geração distribuída.

SCHERER (2012) apresenta uma modelagem e controle de uma micro central hidrelétrica utilizando um gerador de indução auto excitado, realizando o controle de frequência pela abertura das pás da turbina, ao passo que, o controle de tensão é feito pelo controle de potência reativa usando um inversor de frequência, uma análise teórica é apresentado deste sistema isolado.

Um estudo sobre a máquina de indução, operando como gerador, considerando a saturação magnética, ligado diretamente à rede de distribuição de energia elétrica é apresentado por WU (2009). A análise baseia-se no comportamento do gerador de indução com um modelo matemático que contempla a saturação magnética. O gerador de indução, quando está operando na região de saturação, gera correntes com formas de ondas distorcidas, o autor analisa tais distorções, com a aplicação da modelagem matemática empregada em uma modelagem computacional, a qual se incluiu a saturação magnética.

O uso combinado de um gerador síncrono com um gerador de indução auto excitado em sistemas isolados é proposto por VANÇO (2016), o estudo propõe que o

gerador síncrono seja responsável por atender a demanda de reativo solicitado pela carga, desse modo, torna-se o gerador síncrono um regulador de tensão, o gerador síncrono entrega o mínimo de potência ativa para a carga, sendo em sua maioria suprida pela potência ativa gerada do gerador de indução auto excitado, apresentando vantagens significativas no quesito de implantação e expansão de sistemas ilhados, já que se pode aumentar a classe de potência do gerador assíncrono à medida mínima do gerador síncrono.

As seguintes teses sobre o estudo do gerador de indução em velocidade fixa foram encontradas:

NASCIMENTO (2014), em sua tese, realiza um estudo e análise para a construção de um protótipo de uma máquina de indução para operar, exclusivamente como gerador de indução, investiga as características operacionais ideais operando como gerador de indução em regime permanente, modelagens numéricas utilizando elementos finitos são realizadas para melhoramento de projeto construtivo com um gerador de indução de gaiola de esquilo com ranhuras assimétricas projetadas e prototipadas. Uma análise comparativa é realizada com o motor de indução convencional operando na rede, mostrando melhoria no fator de potência e rendimento.

Um estudo sobre o desenvolvimento de métodos analíticos para análise da estabilidade do gerador de indução conectado à rede de distribuição é apresentado por PAVANI (2008), metodologias foram elaboradas pela autora, para investigar a análise de geradores de indução trifásicos frente a pequenas e grandes perturbações. Os resultados mostrados neste trabalho comprovam que os métodos analíticos que são propostos possuem boa precisão para observar o comportamento dos geradores de indução tipo rotor gaiola de esquilo, dessa forma, reduzindo-se os esforços computacionais nas simulações de análise dessas perturbações.

SCHERER (2016) emprega uma nova topologia de regulação de tensão para o uso de geradores de indução auto excitados em micro usinas hídricas, o controle é realizado por com Compensador Síncrono Estático de Distribuição (*Distribution Static Synchronous Compensator* - DSTATCOM) em associação a Bancos de Capacitores Comutáveis (BCC), o controle garante uma regulação das tensões trifásicas com baixa taxa de poluição

harmônica, além de corrigir o desequilíbrio de tensão provocado por cargas desequilibradas do sistema ilhado.

Existe um número expressivo de artigos, dissertações e teses empregando o gerador de indução trifásico na operação em velocidade variável na geração distribuída, como a aplicação em velocidade variável não é contemplada nesta tese apresentada, esses trabalhos direcionados a energia eólica não serão citados, por justamente não pertencer ao escopo e topologia de geradores conectados diretamente à rede de distribuição em velocidade fixa sobre síncrona.

Abaixo se encontram as publicações encontradas sobre geradores de indução no funcionamento em velocidade fixa:

Um estudo sobre o fluxo de potência e a eficiência do gerador de indução trifásico conectado à rede é apresentado em alguns estudos SUPPITAKSAKUL, PHANUPHOL & DANGEAM (2015), um modelo de fluxo de potência do gerador de indução para o sistema conectado à rede visando determinar a potência do gerador de indução que flui para o sistema de distribuição elétrica e os parâmetros do gerador. Os resultados computacionais do modelo proposto são comparados aos resultados do conjunto de testes realizados no laboratório, e, então, a eficiência do gerador é discutida. A partir dos resultados experimentais, verifica-se que a simulação do modelo forneceu resultados de fluxo de energia tendem a ser o mesmo que o conjunto de testes com eficiência de aproximadamente 80%.

Uma análise em regime permanente e transitório do gerador de indução auto excitado conectado à rede elétrica, focado mais na dinâmica do gerador de indução diante perturbações é apresentado por WANG, YANG & KUO (2002). Outro estudo similar focado no desempenho do gerador de indução conectado à rede elétrica, porém sem a utilização de banco de capacitores de excitação é tratado em WANG & CHING-CHUNG TSAO (2001).

Em outro estudo FREITAS *et al.* (2005) foi comparada, através de simulação computacional, a diferença entre os geradores síncronos e indução para aplicação na geração distribuída, onde foram analisadas características como o perfil de tensão, perdas elétricas, estabilidade de tensão, estabilidade transitória, afundamento de tensão e corrente de curto-circuito. As conclusões obtidas pelos autores dessa comparação entre

esses dois tipos de geradores foram que, a melhor opção para o uso de cada gerador depende das características técnicas do sistema.

Uma nova ligação no gerador de indução auto excitado trifásico com um condensador monofásico para realizar a auto regulação foi apresentada em FUKAMI *et al* (1995). Esse novo esquema de ligação consiste em uma máquina de indução trifásica do tipo gaiola de esquilo e três capacitores conectados em série e paralelos com uma carga de fase única. A regulação de tensão deste gerador é muito pequena devido ao efeito dos três capacitores. Além disso, uma vez que é utilizado um enrolamento do estator ligado em estrela, a forma de onda da tensão de saída torna-se senoidal. Neste artigo são explicadas a configuração do sistema e o princípio de funcionamento desta nova ligação e as características básicas de funcionamento são também investigadas por meio de uma simples análise em uma máquina de laboratório.

Em L'ICHEN (2006), explora-se a possibilidade de utilizar o método de forma normal para a análise de estabilidade transitória (*transient stability analysis based on normal form method*) de Geradores de Indução de Gaiola de Esquilo Conectados à Rede (SCIG) considerando-se os transientes elétricos do rotor. A teoria do sistema dinâmico não linear para aproximação de limites de estabilidade de sistemas de potência (*stability region boundary theory based on linear dynamic system*) é comparada com o método normal. Desenvolve-se um método de Cálculo do Tempo Crítico de Compensação (CCT) baseado na teoria da forma normal, que é aplicado aos modelos dinâmicos propostos do sistema SCIG. Curto-circuito, e vários torques mecânicos iniciais são calculados usando o método na forma normal e comparado com um método de tentativas e erros por simulação. Vários resultados mostraram que o modelo e método propostos para a análise de estabilidade transitória do SCIG são válidos. Os resultados mostraram que os modelos dinâmicos SCIG propostos apontam que a análise de estabilidade de SCIG considerando-se com transientes elétricos de rotor usando o método de forma normal são factíveis.

É proposto um estudo em BJORNSTEDT & SAMUELSSON (2008), dois geradores de indução operando isoladamente, como os geradores de indução não são inicialmente construídos para operação isolada, os autores propõem eletrônica de potência para tornar a operação ilhada satisfatória. Neste trabalho, estuda-se o comportamento de dois geradores de indução operados paralelamente por turbinas hidráulicas durante

oscilações de carga. A influência de um regulador de tensão baseado em STATCOM também é investigada. É realizado um estudo de estabilidade com regulador rápido e lento para controle de tensão, mostrando que um regulador de tensão rápido pode não ser desejável para geradores de indução em combinação com turbinas hidráulicas.

Em MORCOS & GOMEZ (2008), é apresentado um estudo sobre curto-circuito em geradores de indução conectado à rede. A análise leva-se em conta resultados experimentais em geradores de indução de 4 a 10 kW, sendo que é avaliado o tipo de excitação para magnetização da máquina, tais como rotor bobinado, gaiola de esquilo e duplamente alimentado. A contribuição deste trabalho é relacionar a magnitude e a duração de curto-circuito fornecida por geradores de indução com o respectivo tipo de excitação do gerador de indução.

MUSA, ZAHAWI & GADOUE (2013) propõem um algoritmo para calcular o requisito de potência reativa do gerador de indução conectado à rede de distribuição. O circuito equivalente da máquina é combinado com um algoritmo de fluxo de potência para cálculo simultâneo de capacitores em shunt. O algoritmo calcula iterativamente o escorregamento necessário para que a potência de saída do gerador fique dentro de uma pequena faixa de tolerância da potência de saída especificada. O algoritmo é testado em uma rede de distribuição padrão de 33 barras. Usa-se este algoritmo para realizar a integração do gerador de indução na rede de distribuição de energia e para calcular o requisito de potência reativa da máquina. A investigação considera a utilização de capacitores de compensação shunt como parte do problema de otimização. Estes proporcionaram localmente a exigência de potência reativa do gerador de indução, resultando em menores fluxos de potência reativa absorvida pela rede.

Uma análise da auto excitação do gerador de indução gaiola de esquilo sobre o modelo de impedância do gerador de indução é apresentado em ARABACI (2014). A tensão de auto excitação em regime permanente é calculada levando em consideração as variações dos parâmetros do rotor com a frequência. O valor mínimo de capacitância é então obtido para iniciar a auto excitação por resultados de simulação. Os efeitos da velocidade e do capacitor de excitação na tensão de saída foram analisados.

Em BOUCHIBA, SALLEM & KAMMOUN (2015) é apresentado uma análise em regime permanente do gerador de indução auto excitado com compensação paralela. A velocidade é variada em uma máquina de indução de 4,4 kW excitada com um banco de capacitores para suprir cargas resistivas ou resistivo-indutivas. Um novo método é proposto para a determinação das capacitâncias mínimas e máximas que garantem o desempenho do gerador de indução auto excitado por um modelo matemático simples, dentro de uma determinada categoria de velocidades.

Uma nova estratégia de controle de tensão de um gerador de indução auto excitado empregando eletrônica de potência é apresentada por estudos DI NOIA, LAURIA & RIZZO (2015). Um motor diesel aciona o gerador de indução, cargas variáveis (cargas trifásicas e monofásicas) são conectadas. Este artigo concentra-se no controle composto do inversor *dc-link* e motor primário, a fim de melhorar a avaliação dinâmica do gerador de indução. A estratégia de controle baseia-se na dissociação das ações reguladoras, permitindo conceber uma estrutura de controle bastante semelhante aos controles clássicos de potência ativa e reativa dos sistemas de energia elétrica.

Um estudo em geração distribuída é proposto por DOS SANTOS *et al.* (2008), sendo um sistema elétrico híbrido, onde um gerador de indução opera com um painel solar, baseado em uma rede monofásica, a fonte de energia solar é conectada por um conversor DC-AC. A rede monofásica é conectada ao gerador de indução de gaiola de esquilo através do conversor de potência. Uma potência hidráulica ou outra fonte controlada de energia (motor primário) é adotada impulsionar o gerador de indução. A estratégia do sistema de controle é concebida para obter a tensão de ligação CC igual à do conversor padrão com cinco pernas. O sistema de controle proposto é capaz de funcionar com uma potência mecânica controlada a partir do sistema de energia híbrido proposto.

Outro estudo DORIN *et al.* (2016) apresenta um sistema híbrido conectado à rede elétrica no qual o gerador de indução é conectado ao sistema de energia fotovoltaica, o gerador de indução gaiola de esquilo é movido por um gerador biogás. Outro estudo similar encontra-se em TOMA *et al.* (2016).

Uma investigação sobre o impacto do *Static Var Compensator* (SVC) e do *Distribution Static Synchronous Compensator* (DSTATCOM) na detecção do ilhamento do

gerador de indução conectado à rede de distribuição no lado de alta é apresentado por LEÃO *et al.* (2004). Os resultados expostos mostram que o uso de dispositivos dinâmicos de compensação de energia reativa pode tornar difícil a detecção do ilhamento do gerador de indução usando os relés comuns de sub/sobre tensão.

Um sistema de geração local (*Local Generation System-LGS*) composto de um gerador de indução é proposto por dois estudos MARTINEZ, POMILIO & PEREIRA DA SILVA (2008) e MORENO, POMILIO & DA SILVA (2008). O gerador de indução fornece a potência ativa ao sistema com o suporte de um conversor de fonte de tensão (*Voltage Source Converter- VSC*) para o condicionamento de energia. Com o LGS conectado à rede por meio de indutores de acoplamento, o déficit ou o excesso de produção de energia do gerador de indução é entregue ou recebido pela rede. No funcionamento autônomo do LGS, um conversor *Buck*, um conversor bidirecional e um conjunto de bateria estão conectados nos terminais DC do VSC para controlar a tensão do barramento CC e fornecer energia à carga local com frequência e tensão constante. O LGS proposto inclui um método ativo de detecção de ilhamento do gerador de indução, função de carga da bateria e um procedimento para reconectar o LGS com a rede depois que a tensão é restabelecida. Na operação de ilha, o LGS pode manter a continuidade no fornecimento de energia através de um conjunto de baterias. A eficácia do método de detecção da ilha e o procedimento de reconexão do LGS com a rede foram comprovados pelos autores.

Uma análise do desempenho dos relés de sob/sobre tensão e frequência para a detecção de ilhamento de geradores de indução tipo gaiola de esquilo é apresentado em MEIRA *et al.*, (2009). A análise baseia-se nas zonas de não detecção, que são determinadas por simulações dinâmicas extensivas usando PSCAD/EMTDC. As zonas de não detecção apresentadas são construídas considerando diferentes compensações de reativo e em diferentes tempos de detecção. A principal contribuição deste artigo é destacar o fato de que a proteção anti-ilhamento baseado em tensão e relé de frequência nem sempre pode detectar situações de ilhamento para sistemas em que estão sendo alimentados por geradores de indução do tipo gaiola de esquilo.

Após pesquisa, não se encontrou nenhum estudo que contemplasse em regime permanente os efeitos harmônicos e o desequilíbrio da rede de distribuição no gerador de indução. Também não se encontrou estudos sobre ilhamento do gerador de indução

considerando a rede elétrica desequilibrada e com harmônicos, nem situações com a presença do banco de capacitores no ilhamento propriamente dito. Localizou-se apenas estudo de detecção de ilhamento, e nesses estudos não se avaliou o ilhamento do gerador de indução, sobretudo em geradores de indução impulsionados por combustão do gás metano.

Nota-se aqui a importância do tema proposto e sua relevante contribuição científica, além da originalidade técnica, conclui-se que o tema apresentado é original no presente estado da arte.

1.4 – Organização da tese

Esta tese encontra-se organizada em cinco capítulos, dois apêndices e um anexo. O presente capítulo apresenta a introdução ao assunto, objetivos e justificativas para desenvolvimento do tema, a revisão bibliográfica contemplando o estado da arte.

O capítulo 2 trata dos conceitos básicos e modelagem matemática da máquina assíncrona conforme a bibliografia clássica de máquinas elétricas. Para compreensão do funcionamento da máquina de indução trifásica, são mostradas as características construtivas, perdas, potência gerada e rendimento. Um equacionamento simplificado utilizando circuito equivalente da máquina de indução também é apresentado neste capítulo, juntamente com a modelagem matemática das variáveis eletromecânicas da máquina de indução através de matriz de estados.

O capítulo 3 apresenta uma descrição do projeto realizado para o aproveitamento do gás metano produzidos nos biodigestores da suinocultura com uso do gerador assíncrono. Destaca-se a descrição das instalações, a relevância socioambiental e econômica do projeto de P&D.

O capítulo 4 apresenta a análise dos resultados experimentais e os simulados para o gerador de indução operando em regime permanente, durante o “ilhamento”, funcionando com a presença de capacitores. O comparativo teórico-experimental se faz com a comparação dos dados obtidos em campo com a simulação computacional para a

tensão gerada, corrente gerada, potência gerada, e dentre outras variáveis elétricas. Contemplam-se também os efeitos harmônicos e de desequilíbrio da rede de distribuição rural.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do projeto realizado do gerador de indução conectado à rede de distribuição em regime permanente e algumas sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A, são abordadas as teorias sobre o conteúdo harmônico e desequilíbrio em sistemas elétricos, faz-se necessário o estudo da distorção harmônica para o cálculo da tensão, corrente e fator de potência contemplando as componentes harmônicas e o equacionamento necessário para o cálculo do desequilíbrio de tensão e corrente.

No apêndice B é apresentado o dimensionamento do banco de capacitores a ser colocado com o gerador de indução quando operam conectados diretamente à rede elétrica de distribuição. Neste apêndice também é proposto o dimensionamento de banco de capacitores conforme o carregamento do gerador de indução.

Contêm no anexo A, informações adicionais do gerador de indução e do transformador.

CAPÍTULO II

CONCEITOS E MODELAGEM: MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA

2.1 – Máquina de indução trifásica

Toda máquina elétrica converte energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. O motor de indução não é exceção, é possível inverter o fluxo de energia e transformá-lo em gerador de indução. Demonstra-se fisicamente que o motor de indução ligado a uma fonte de tensão (rede previamente energizada) quando funciona a uma rotação acima da síncrona transforma-se em gerador. O procedimento é na prática simples, acoplando uma fonte mecânica (turbina, motor a combustão interna, dentre outros) ao motor de indução, acelera-o acima da rotação síncrona e em seguida conecta-se à rede elétrica previamente energizada.

Como dito, o gerador de indução tem grandes vantagens em relação ao síncrono. Na faixa de potência que corresponde ao motor de indução comercializado, o seu custo de aquisição é extremamente menor que a máquina síncrona para a mesma potência. Assim torna-se notável a economia na aquisição do equipamento, quando for possível utilizar o gerador de indução no seu custo de implantação no projeto. Destaca-se também a vantagem econômica por não necessitar de um sistema de sincronismo entre o gerador e a rede elétrica, diferentemente de um gerador síncrono, que para ser conectado a uma rede elétrica previamente energizada necessita de um equipamento de comando para realizar a sincronização.

O gerador de indução necessita de energia reativa para operar por não possuir excitação própria. Esta questão é contornada com a instalação de um banco de capacitores que fornece o reativo suficiente para a magnetização da máquina. Evidentemente que o custo do banco de capacitores onera o custo de implantação, mesmo assim o custo total é menor que a aquisição de um gerador síncrono.

O gerador de indução é instalado como se fosse um motor, ou seja, apenas com a chave contactora magnética para operá-lo no sistema e um relé térmico para a sua proteção. O gerador de indução é passivo, ou seja, na ausência da rede elétrica, o gerador de indução deixa de gerar. Neste ponto é conveniente lembrar que ele não serve como gerador de emergência, mas desperta grande interesse nas concessionárias de energia pelo fator segurança evitando uma alimentação acidental da rede.

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, e, 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 denominado escorregamento do rotor, e o escorregamento fracionário dado pela equação (2.1.2) (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS, 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 estaria estacionário em relação ao campo do estator, dessa forma, corrente alguma seria induzida no enrolamento de campo e nenhum conjugado seria desenvolvido (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS, 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 induz 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; KINGSLEY JR; UMANS, 2006).

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

Onde,

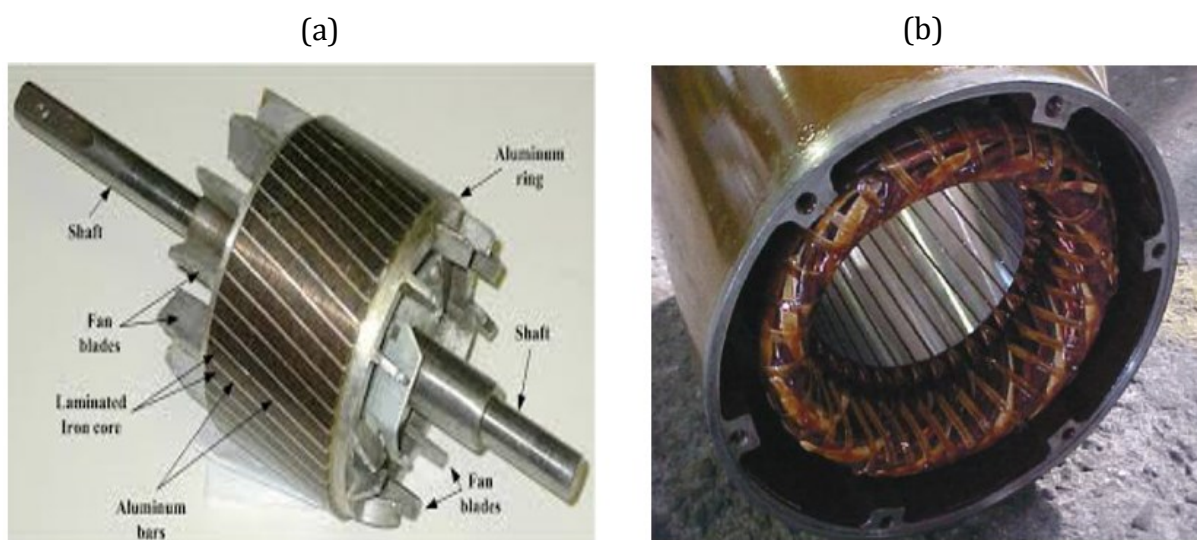
f_r - Frequência de escorregamento, no rotor [Hz];

f_e - Frequência elétrica [Hz].

A máquina de indução trifásica de gaiola de esquilo é composta por um circuito magnético estático, que é formada por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas umas das outras, chamado estator. São alocadas na carcaça sendo construída de um material resistente a corrosão tal 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 formado por um núcleo ferromagnético laminado, onde são construídos por enrolamentos paralelos e curto-circuitados em sua extremidade. O 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 a vazio (FRANCHI, 2009). As

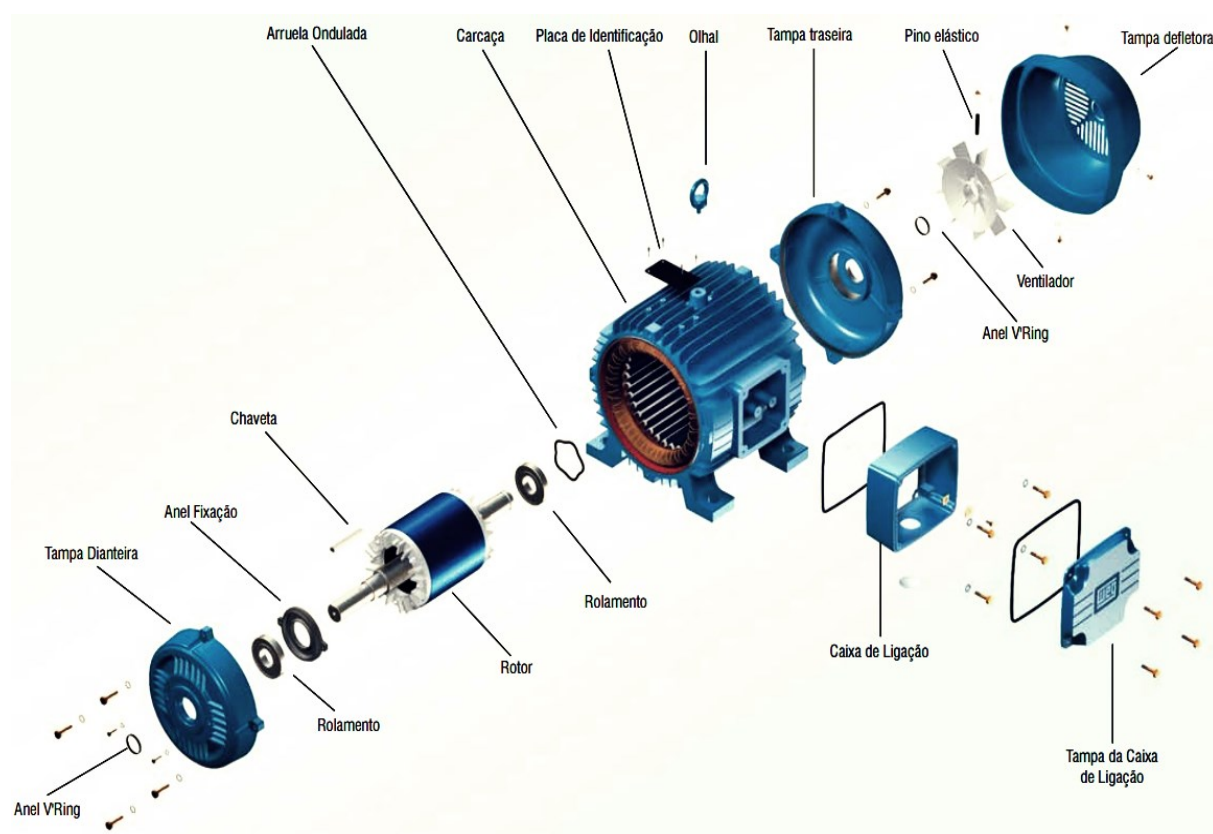
Figuras 2.2.1 e 2.2.2 mostram o rotor tipo gaiola de esquilo (a) e o estator (b) da máquina de indução, a estrutura construtiva, respectivamente.

Figura 2.2.1– (a) Rotor tipo gaiola de esquilo; (b) Estator.



Fonte: extraído da WEG de (SIMOES; FARRET, 2015).

Figura 2.2.2– Estrutura física da máquina de indução trifásica.

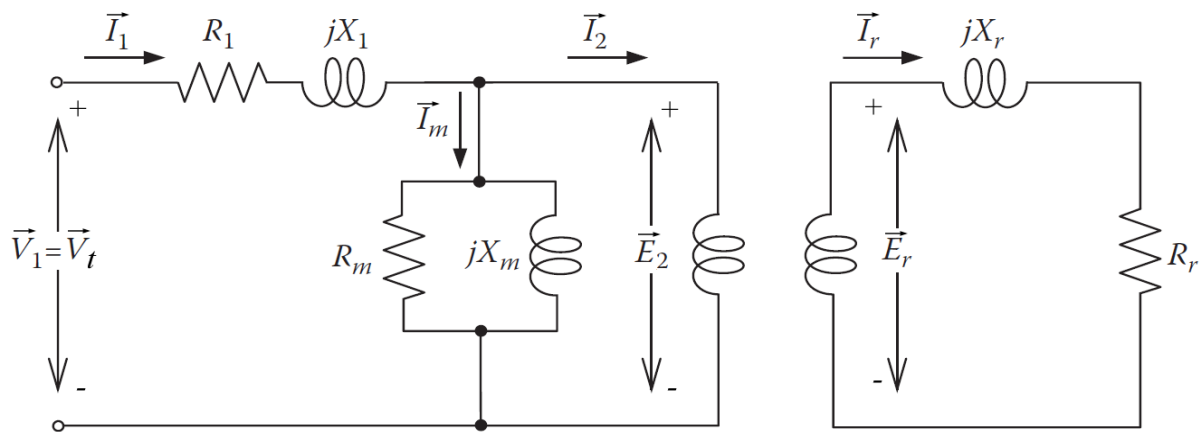


Fonte: extraído da WEG.

2.2.2 – Representação clássica

O modelo clássico da máquina de indução trifásica é mostrado pela Figura 2.2.3, a representação deste modelo contempla apenas regime senoidal equilibrado.

Figura 2.2.3– Circuito equivalente monofásico de uma máquina de indução polifásica.



Fonte: Adaptado de (SIMOES; FARRET, 2015).

Sendo:

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;

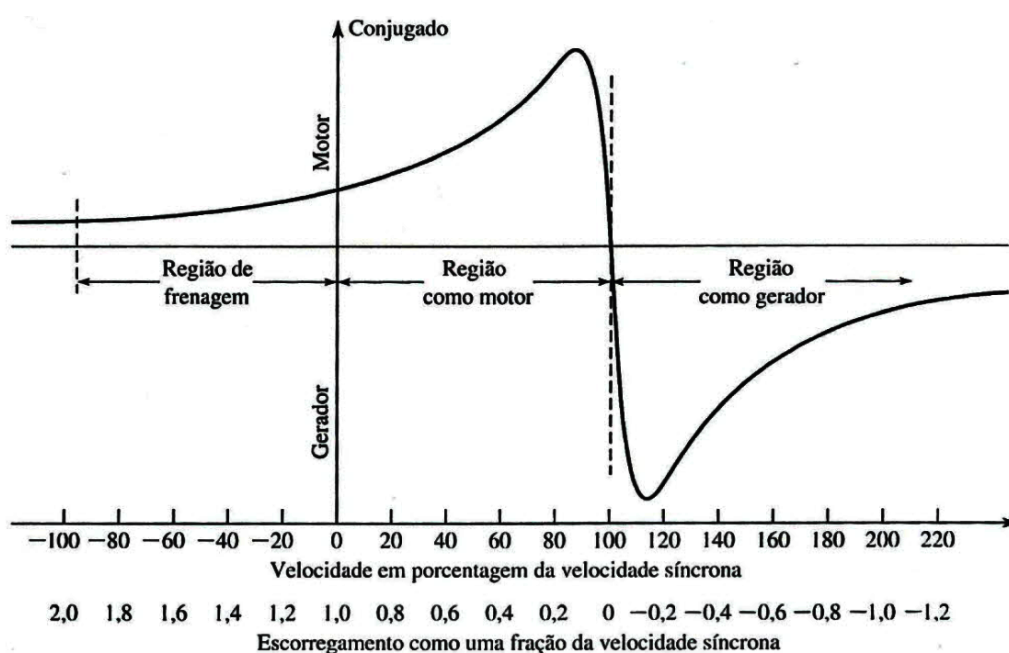
V_t - Tensão terminal;

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 o equivalente de um transformador, a diferença singular é que em um gerador de indução, a tensão do rotor está sujeita a uma frequência 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 (SIMOES; FARRET, 2015), conforme mostrado pela Figura 2.2.4.

Figura 2.2.4– Curva de conjugado x escorregamento da máquina assíncrona.



Fonte: extraído de (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS, 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, KINGSLEY JR & UMANS (2006), sendo o

rotor de gaiola de esquilo, curto-circuitado, a impedância vista pela tensão induzida é a impedância de curto-circuito 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 a grandeza referida do rotor ao estator.

Quanto às 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 representá-la sem nenhum problema, tanto máquinas assíncronas de rotores bobinados e de gaiola de esquilo. Considerando o escorregamento a fim 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).

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

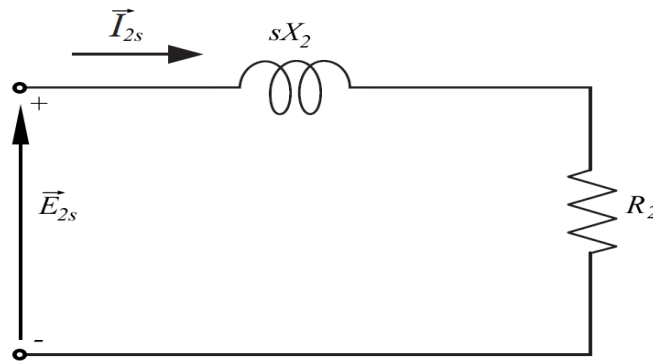
Onde,

R_2 - Resistência de dispersão do rotor referida ao estator;

sX_2 - Reatância de dispersão do rotor referida ao estator, na frequência de escorregamento.

O circuito equivalente dado em (2.2.8) é representado pela Figura 2.2.5, 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 2.2.5– Circuito equivalente do rotor.



Fonte: Extraído de (SIMOES; FARRET, 2015).

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 à corrente de um rotor equivalente possuir o mesmo número de espiras por fase do estator, e, 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 ao 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 às 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).

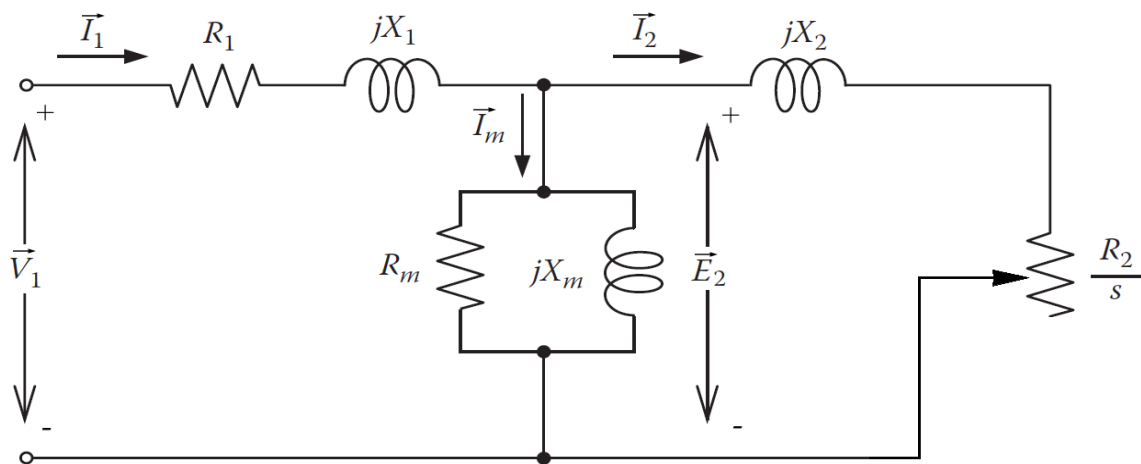
$$Z_{2s} = \frac{\vec{E}_{2s}}{\vec{I}_{2s}} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2.2.13)$$

Assim o circuito equivalente monofásico é representado pela Figura 2.2.7. A carga no eixo e a própria resistência do rotor aparece como uma resistência refletida R_2 / s função do escorregamento. As tensões e a corrente do rotor são refletidas para o estator tendo sua frequência também alterada para frequência do estator. Todos os fenômenos elétricos no rotor, quando vistos do estator, tornam-se fenômenos na frequência do

estator porque o enrolamento do estator simplesmente vê ondas de fmm e fluxo caminhando à velocidade síncrona.

Em regime permanente, por meio do circuito equivalente representado pela Figura 2.2.6, 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 2.2.6– Circuito equivalente monofásico da máquina de indução.



Fonte: Adaptado de (SIMOES; FARRET, 2015).

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

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

As perdas no enrolamento do rotor são dadas 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. Os 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 SIMOES & 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).

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

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

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

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

2.3 – Modelagem matemática

O comportamento elétrico e eletromecânico de grande parte das máquinas elétricas pode ser representado por um conjunto de equações que podem corresponder ao desempenho de sua ação motora ou geradora, seja diante de diversas situações, ou eventualidades impostas. Neste tópico trata-se da modelagem matemática das variáveis elétricas e mecânicas para a máquina de indução trifásica. A referência usada para o equacionamento descrito é segundo (KRAUSE *et al.*, 2013).

2.3.1- Equações Elétricas

A máquina de indução trifásica, mostrada pela Figura 2.3.1, possui as fases ou bobinas enroladas no estator que são distribuídas simetricamente 120° dentre si, da mesma forma é feito para o rotor bobinado. Os subscritos minúsculos e maiúsculos referem-se às variáveis do estator e rotor, respectivamente.

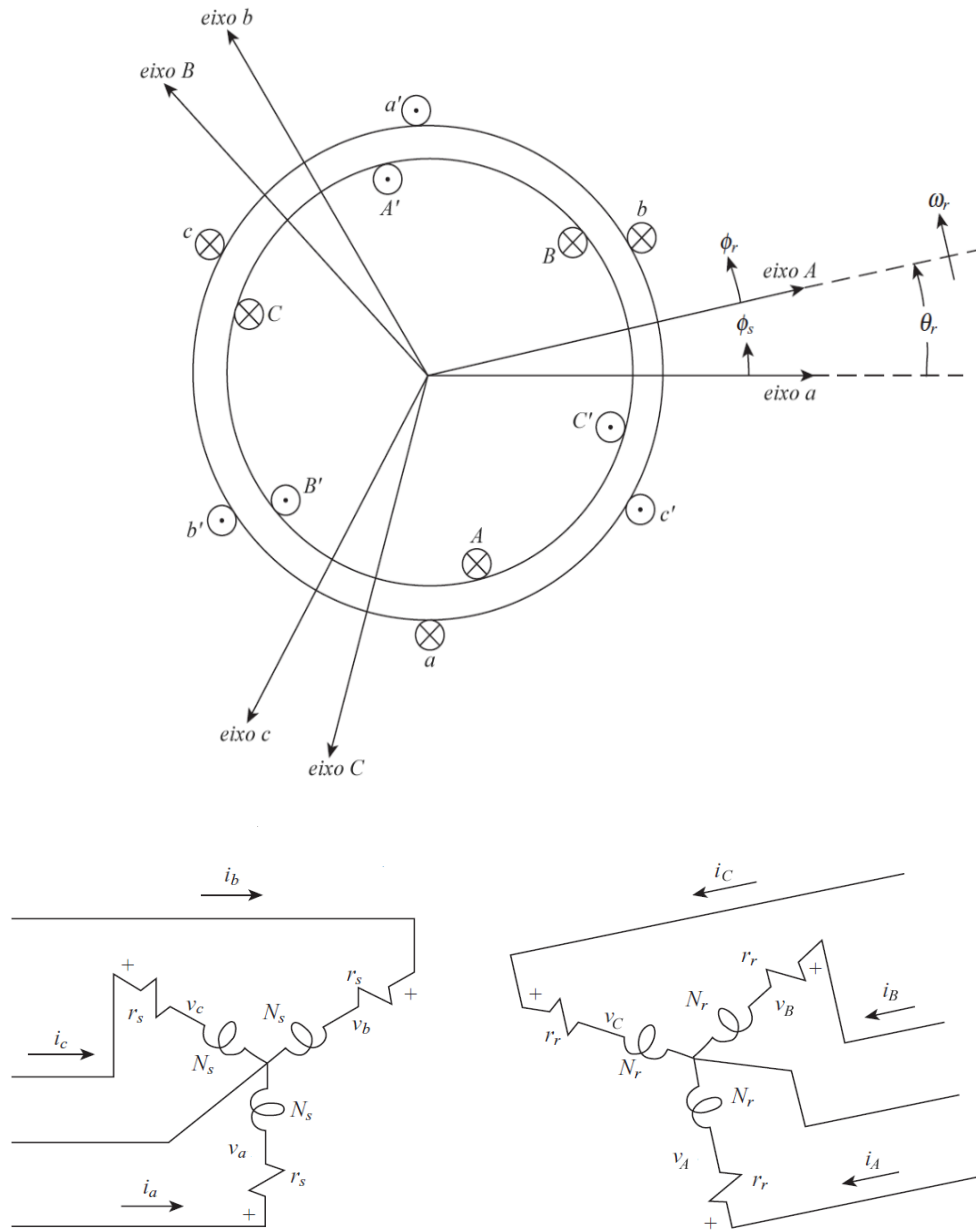
As equações de tensão para estator e rotor são descritas abaixo por (2.3.1) e (2.3.2).

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abcs} + \frac{d\lambda_{abcs}}{dt} \quad (2.3.1)$$

$$\mathbf{v}_{ABCr} = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{ABCr} + \frac{d\lambda_{ABCr}}{dt} \quad (2.3.2)$$

Considerando que os índices s e r denotam as variáveis associadas aos enrolamentos do estator e do rotor, respectivamente. As matrizes de resistências são matrizes diagonais indicadas por (2.3.3) e (2.3.4).

Figura 2.3.1 – Esquema representativo de eixos magnéticos do estator e rotor de uma máquina de indução trifásica ligada em estrela.



Fonte: Adaptado de (SIMOES; FARRET, 2015).

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (2.3.3)$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (2.3.4)$$

Fundamentando,

$$\left(\mathbf{f}_{abcs} \right)^T = \begin{bmatrix} f_{as} & f_{bs} & f_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.3.5)$$

$$\left(\mathbf{f}_{ABCr} \right)^T = \begin{bmatrix} f_{Ar} & f_{Br} & f_{Cr} \end{bmatrix} \quad (2.3.6)$$

Em que f representa variáveis de tensão, corrente e fluxo. As equações para os fluxos concatenados, tanto do rotor como estator são dados por (2.3.7).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{ABCr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ \left(\mathbf{L}_{sr} \right)^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}_{ABCr} \end{bmatrix} \quad (2.3.7)$$

Desprezando as indutâncias mútuas entre o enrolamento do estator e do rotor, pode-se escrever (2.3.8), (2.3.9) e (2.3.10).

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.3.8)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.3.9)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.3.10)$$

Sendo,

$$L_{ms} = \left(\frac{N_s}{P} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (2.3.11)$$

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{P} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (2.3.12)$$

$$L_{sr} = \frac{N_s}{P} \frac{N_r}{P} \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (2.3.13)$$

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 uma máquina de gaiola de esquilo, aparentemente, a indutância mútua entre o enrolamento do estator e rotor não poderia ser da forma expresso em (2.3.10), 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.

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

$$\mathbf{i}'_{ABCr} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{i}_{ABCr} \quad (2.3.14)$$

$$\mathbf{v}'_{ABCr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{v}_{ABCr} \quad (2.3.15)$$

$$\lambda'_{ABCr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{ABCr} \quad (2.3.16)$$

Associando o fluxo mútuo com o fluxo magnetizante, tem-se a relação dada em (2.3.17).

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (2.3.17)$$

Considerando a indutância mútua referenciada para o estator em (2.3.18) e pela relação dada por (2.3.17), pode-se escrever (2.3.19).

$$\mathbf{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{L}_{sr} \quad (2.3.18)$$

$$\mathbf{L}'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.3.19)$$

A indutância de magnetização do rotor é dada por (2.3.20).

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s} \right)^2 L_{ms} \quad (2.3.20)$$

Definindo (2.3.21), a partir de (2.3.9), obtém-se (2.3.22) que é a matriz indutância do rotor referenciada ao estator.

$$\mathbf{L}'_r = \left(\frac{N_r}{N_s} \right)^2 \mathbf{L}_r \quad (2.3.21)$$

$$\mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.3.22)$$

Onde,

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \quad (2.3.23)$$

Assim, o fluxo do estator e do rotor podem ser escritos por (2.3.24).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{ABCr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}'_{ABCr} \end{bmatrix} \quad (2.3.24)$$

As equações de tensão são dadas em (2.3.25), em termos das variáveis da máquina de indução referidas ao enrolamento do estator.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abcs} \\ \mathbf{v}'_{ABCr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s + \frac{d\mathbf{L}_s}{dt} & \frac{d\mathbf{L}'_{sr}}{dt} \\ \frac{d(\mathbf{L}'_{sr})^T}{dt} & \mathbf{r}'_r + \frac{d\mathbf{L}'_r}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}'_{ABCr} \end{bmatrix} \quad (2.3.25)$$

Onde,

$$\mathbf{r}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \mathbf{r}_r \quad (2.3.26)$$

2.3.2 – Equação do torque elétrico em função das variáveis da máquina

A energia armazenada no campo magnético da máquina indução é dada por (2.3.27).

$$W_f = \frac{1}{2} (\mathbf{i}_{abcs})^T \mathbf{L}_s \mathbf{i}_{abcs} + (\mathbf{i}_{abcs})^T \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}'_{dqr} + \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{3}{2} \right) (\mathbf{i}'_{dqr})^T \mathbf{L}'_r \mathbf{i}'_{dqr} \quad (2.3.27)$$

Como o sistema magnético da máquina é adotado como linear, e considerando a posição mecânica do rotor por (2.3.28), o torque elétrico em função da posição do rotor é escrito por (2.3.29).

$$\theta_r = \left(\frac{P}{2} \right) \theta_{rm} \quad (2.3.28)$$

$$T_e = \left(\frac{P}{2} \right) (\mathbf{i}_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_{ABCr} \quad (2.3.29)$$

Expandindo-se (2.3.29), obtém-se (2.3.30).

$$T_e = - \left(\frac{p}{2} \right) L_{ms} \left\{ \left[i_{as} \left(i'_{Ar} - \frac{1}{2} i'_{Br} - \frac{1}{2} i'_{Cr} \right) + i_{bs} \left(i'_{Br} - \frac{1}{2} i'_{Ar} - \frac{1}{2} i'_{Cr} \right) + i_{cs} \left(i'_{Cr} - \frac{1}{2} i'_{Br} - \frac{1}{2} i'_{Ar} \right) \right] \sin \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} \left[i_{as} (i'_{Br} - i'_{Cr}) + i_{bs} (i'_{Cr} - i'_{Ar}) + i_{cs} (i'_{Ar} - i'_{Br}) \right] \cos \theta_r \right\} \quad (2.3.30)$$

Para a expressão anterior, o torque é positivo para motor e negativo para ação geradora. A velocidade do rotor e o torque estão relacionados pela equação (2.3.31), cabe lembrar que se o torque mecânico for positivo, o modelo será de correntes para dentro da máquina, conforme Figura 2.3.1, se for negativo, as correntes terão sentido para fora, indicando funcionamento como gerador.

$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + T_L \quad (2.3.31)$$

Onde,

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

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

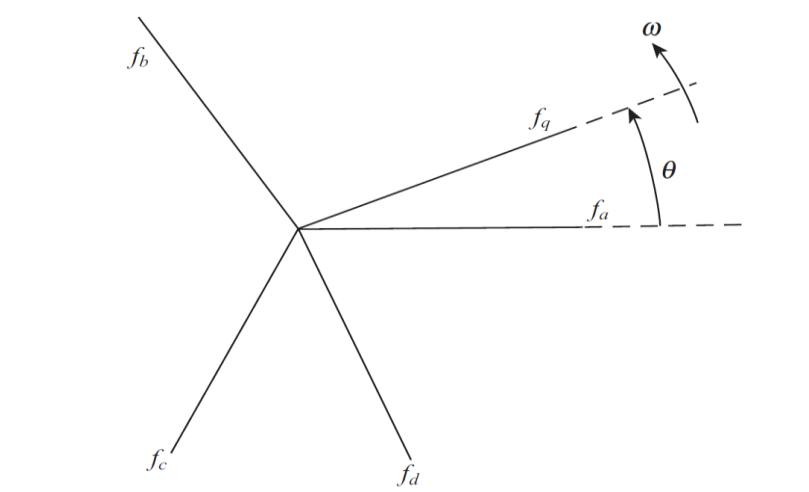
ω_r - Velocidade angular do rotor [rad./s].

2.3.3 – Transformação para o domínio dq0.

As equações apresentadas anteriormente foram desenvolvidas por coordenadas de fase (abc) para o estator e, as coordenadas de fase (ABC) para o rotor. A solução em três coordenadas torna-se um tanto complexa, para facilitar a solução, R.H. Park criou um modelo visando uma solução analítica simplificada. O modelo consiste em dois 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 com que as indutâncias sejam independentes do ângulo de posição do rotor ou do movimento do rotor (PARK, 1929).

A Figura 2.3.2, mostra a relação das variáveis de eixos abc e dq0 para transformação de Park para o enrolamento estacionário, ou seja, o estator. Para a máquina de indução, é necessário fazer a associação para transformação das três fases do circuito do estator e o circuito do rotor para os eixos arbitrários dq.

Figura 2.3.2– Relação das variáveis abc e dq.



Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

A velocidade arbitrária aqui definida por ω , é relacionada pela posição angular de referência girante por (2.3.32).

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.3.32)$$

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 (2.3.33).

$$\mathbf{f}'_{dq0} = \mathbf{K} \mathbf{f}'_{abc} \quad (2.3.33)$$

Onde,

$$\left(\mathbf{f}'_{abc} \right)^T = \begin{bmatrix} f'_a & f'_b & f'_c \end{bmatrix} \quad (2.3.34)$$

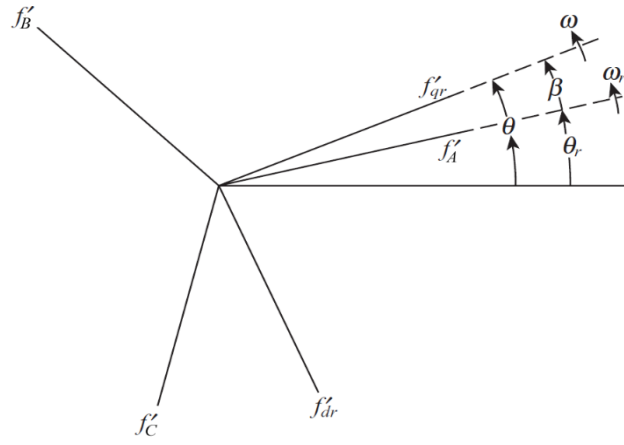
$$\left(\mathbf{f}'_{dq0} \right)^T = \begin{bmatrix} f'_d & f'_q & f'_0 \end{bmatrix} \quad (2.3.35)$$

$$\mathbf{K} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3.36)$$

$$\mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.37)$$

Em que f' representa o vetor a ser transformado em tensão, corrente, fluxo, dentre outros.

O subscrito r indica transformação do circuito rotativo, ou seja, o rotor, conforme indica a Figura 2.3.3, assim define-se (2.3.38).

Figura 2.3.3– Relação trigonométrica do circuito do rotor para eixo dq.

Fonte: Adaptado de (KRAUSE et al., 2013).

$$\mathbf{f}'_{dq0r} = K_r \mathbf{f}'_{ABCr} \quad (2.3.38)$$

Sendo,

$$\left(\mathbf{f}'_{dq0r} \right)^T = \begin{bmatrix} f'_{qr} & f'_{dr} & f'_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.3.39)$$

$$\left(\mathbf{f}'_{ABCr} \right)^T = \begin{bmatrix} f'_{Ar} & f'_{Br} & f'_{Cr} \end{bmatrix} \quad (2.3.40)$$

Em que f'_{ABCr} representa o vetor das variáveis do rotor referenciadas ao estator a ser transformada para o eixo qd .

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \beta & \sin \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3.41)$$

Onde:

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (2.3.42)$$

A velocidade angular e a posição angular θ de estão relacionadas pela equação (2.3.32), de forma análoga para θ_r , pode-se escrever (2.3.43).

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (2.3.43)$$

A matriz inversa de (2.3.41) é dada por (2.3.44).

$$K_r^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 1 \\ \cos \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.44)$$

As equações de transformação anterior para os circuitos do rotor são as mesmas equações para o circuito do estator, utilizando aqui o ângulo β como o descolamento angular de referência entre fase A e o eixo em quadratura. Para o enrolamento estacionário 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 para o estator por (2.3.45), e para o rotor por (2.3.46).

$$\mathbf{v}_{dq0s} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{dq0s} + \omega \boldsymbol{\lambda}_{dqs} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_{dq0s}}{dt} \quad (2.3.45)$$

$$\mathbf{v}'_{dq0r} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{dq0r} + (\omega - \omega_r) \boldsymbol{\lambda}'_{dqr} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}'_{dq0r}}{dt} \quad (2.3.46)$$

Onde,

$$\left(\boldsymbol{\lambda}'_{dqs} \right)^T = \begin{bmatrix} \lambda_{ds} & -\lambda_{ds} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3.47)$$

$$\left(\boldsymbol{\lambda}'_{dqr} \right)^T = \begin{bmatrix} \lambda'_{dr} & -\lambda'_{dr} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3.48)$$

Aplicando as equações de transformação (2.3.33) e (2.3.38) em (2.3.24), resulta em (2.3.49).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dq0s} \\ \lambda'_{dq0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_r)^{-1} \\ \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq0s} \\ \mathbf{i}'_{dq0r} \end{bmatrix} \quad (2.3.49)$$

Sendo,

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (2.3.50)$$

Onde,

$$L_M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (2.3.51)$$

$$\mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (2.3.52)$$

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K})^{-1} = \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3.53)$$

Expandindo (2.3.45) e (2.3.46), obtêm-se as equações de tensão (2.3.54)-(2.3.59).

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (2.3.54)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (2.3.55)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (2.3.56)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \quad (2.3.57)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \quad (2.3.58)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{d\lambda'_{0r}}{dt} \quad (2.3.59)$$

Substituindo (2.3.50), (2.3.52) e (2.3.53) em (2.3.49), encontram-se os fluxos concatenados na sua forma expandida em (2.3.60) - (2.3.65).

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.3.60)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.3.61)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (2.3.62)$$

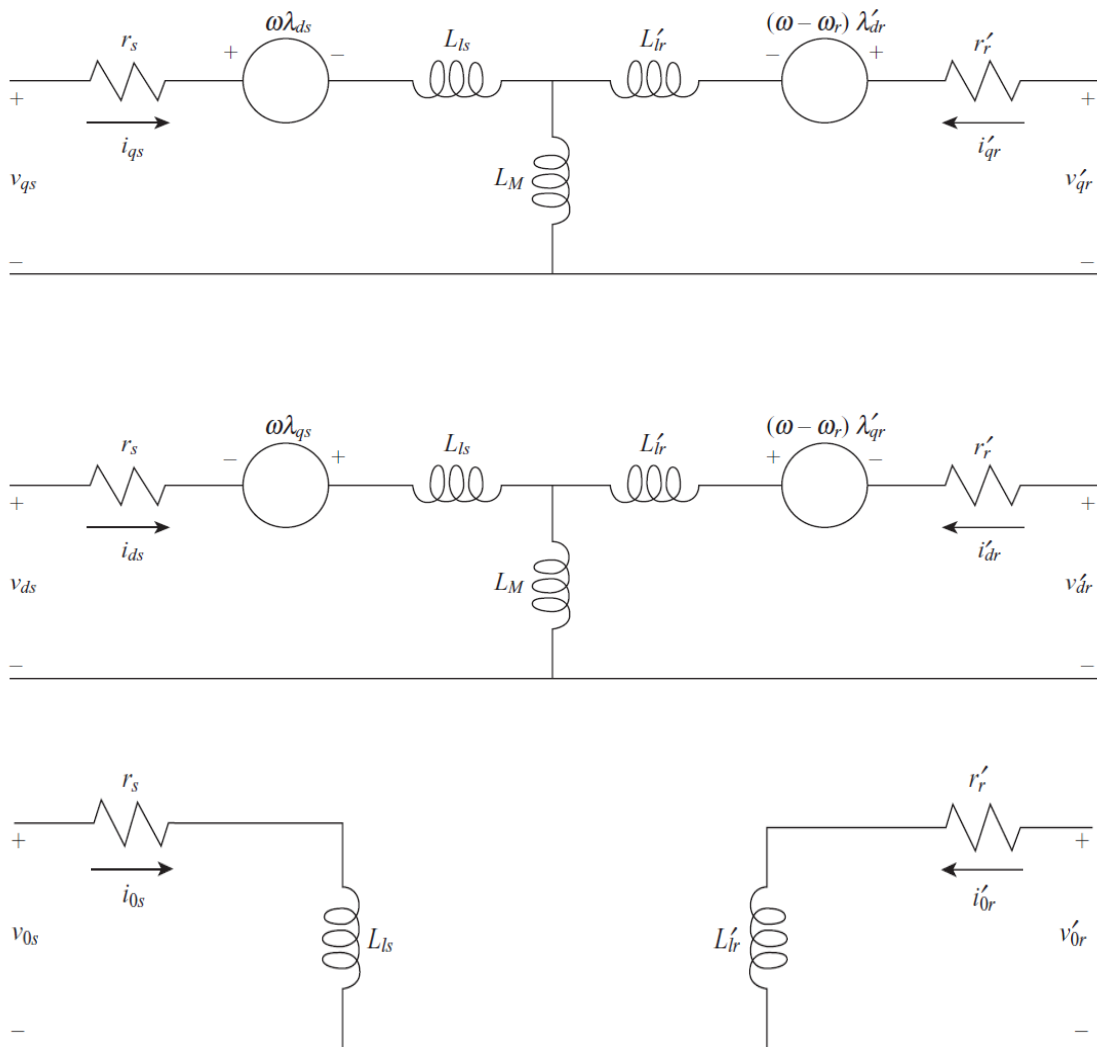
$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.3.63)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.3.64)$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \quad (2.3.65)$$

As equações de tensão e fluxo concatenado são representadas por seu circuito equivalente pela Figura 2.3.4.

Figura 2.3.4– Circuito equivalente de transformação no rotor para máquina de indução trifásica.



Escrevendo as equações de tensão (2.3.54) - (2.3.59) e de fluxo concatenado (2.3.60)-(2.3.65) em função das reatâncias, já que é bem mais usual na bibliografia geral, comparado em função das indutâncias, obtêm-se as novas equações de tensão (2.3.66)-(2.3.71).

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \lambda_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (2.3.66)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \lambda_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (2.3.67)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (2.3.68)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \lambda'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \quad (2.3.69)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \lambda'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \quad (2.3.70)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda'_{0r}}{dt} \quad (2.3.71)$$

Visando diminuir o espaço nos elementos da matriz das equações anteriores representadas pela equação (2.3.72), será considerado a derivada $\frac{d}{dt}$ pelo operador p .

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_M & \frac{\omega}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_M & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) X_M & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) X'_{rr} & 0 \\ -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) X_M & \frac{p}{\omega_b} X_M & 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) X'_{rr} & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.3.72)$$

Onde,

$$X_{ss} = X_{ls} + X_M \quad (2.3.73)$$

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \quad (2.3.74)$$

Os fluxos podem ser obtidos por (2.3.75) e isolando as correntes a partir dos fluxos concatenados, obtém-se (2.3.76).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.3.75)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 & 0 \\ 0 & X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{X'_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.3.76)$$

Onde,

$$D = X_{ss}X'_{rr} - X_M^2 \quad (2.3.77)$$

Realizando a substituição das correntes dadas em (2.3.76) nas equações (2.3.66) - (2.3.71), obtém-se na matriz de estado (2.3.78) relacionando tensão e fluxo.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_s}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & 0 & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) & 0 \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r'_r}{X'_{lr}} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.3.78)$$

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.

2.3.4 – Equações de torque no domínio dq0

A equação de torque eletromagnético em termos das variáveis dq pode ser descrito por substituição das equações de transformação em (2.3.29), resultando em (2.3.79).

$$T_e = \left(\frac{p}{2}\right) \left[(\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{dq0s} \right]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \left[\mathbf{L}'_{sr} \right] (\mathbf{K}_r)^{-1} \mathbf{i}'_{dq0r} \quad (2.3.79)$$

A equação (2.3.80) apresenta o torque expresso em termos de correntes, sendo:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) L_M \left(i_{qs}' i_{dr}' - i_{ds}' i_{qr}' \right) \quad (2.3.80)$$

Onde T_e possui valor positivo para a ação motora e negativo para a ação geradora. Outra expressão equivalente do torque eletromagnético para uma máquina com rotor em gaiola, pode ser dada por:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \left(\frac{1}{\omega_b}\right) \left(\lambda_{ds}' i_{qs}' - \lambda_{qs}' i_{ds}' \right) \quad (2.3.81)$$

2.3.5- Valores em pu das equações elétricas e mecânicas

Os valores de base para o estator são dados pelas equações (2.3.82) a (2.3.86)

$$V_{s_{base}} = \frac{V_n \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.3.82)$$

$$I_{s_{base}} = \frac{P_n \sqrt{2}}{V_n \sqrt{3}} \quad (2.3.83)$$

$$Z_{s_{base}} = \frac{V_{s_{base}}}{I_{s_{base}}} = \frac{V_n^2}{P_n} \quad (2.3.84)$$

$$\omega_{s_{base}} = 2\pi f_n \quad (2.3.85)$$

$$L_{s_{base}} = \frac{Z_{s_{base}}}{\omega_{s_{base}}} \quad (2.3.86)$$

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 do circuito equivalente são dados pelas equações por (2.3.87) a (2.3.91).

$$r_{s_{pu}} = \frac{r_s}{Z_{s_{base}}} \quad (2.3.87)$$

$$L_{l_{pu}} = \frac{L_{ls}}{L_{s_{base}}} \quad (2.3.88)$$

$$r'_{pu} = \frac{r'_r}{Z_{s_{base}}} \quad (2.3.89)$$

$$L'_{lr_{pu}} = \frac{L'_{lr}}{L_{s_{base}}} \quad (2.3.90)$$

$$L_{M_{pu}} = \frac{L_{M_{pu}}}{L_{s_{base}}} \quad (2.3.91)$$

Em que,

$r_{s_{pu}}$ - Resistência do estator [pu];

$L_{l_{s_{pu}}}$ - Indutância de dispersão do estator em [pu];

r'_{pu} - Resistência do rotor [pu];

$L'_{lr_{pu}}$ - Indutância de dispersão do rotor [pu];

$L_{M_{pu}}$ - Indutância de magnetização [pu];

r'_s - Resistência do estator [Ω];

L_{ls} - Indutância de dispersão do estator [H];

r'_r - Resistência do rotor [Ω];

L'_{lr} - Indutância de dispersão do rotor [H];

L_M - Indutância de magnetização [H].

O torque de base pode ser descrito pela equação (2.3.92).

$$T_{base} = \frac{P_{base}}{\left(\frac{2}{P}\right)\omega_{base}} = \frac{\left(\frac{3}{2}\right)V_{base_{dq0}}I_{base_{dq0}}}{\left(\frac{2}{P}\right)\omega_{base}} \quad (2.3.92)$$

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 (2.3.81) pela velocidade base e por (2.3.92), obtém o torque em valor unitário pela equação (2.3.93).

$$T_{e_{pu}} = \lambda_{qr}i_{dr} - \lambda_{dr}i_{qr} \quad (2.3.93)$$

A velocidade mecânica em pu pode ser desenvolvida a partir da equação (2.3.31), (2.3.93) e (2.3.94), resultando em (2.3.95). A posição mecânica em pu é dada por (2.3.96).

$$T_{e_{pu}} = 2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_{base}} \right) + T_{L_{pu}} \quad (2.3.94)$$

$$\omega_m = \left(\frac{2}{P} \right) \omega_r \quad (2.3.95)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_{e_{pu}} - T_{L_{pu}}) \quad (2.3.96)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (2.3.97)$$

A constante de inércia H cuja unidade pode ser calculada por (2.3.98).

$$H = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{2}{P}\right)^2 \frac{J \omega_{base}^2}{P_{base}} \quad (2.3.98)$$

2.4– Considerações finais

O princípio básico de funcionamento da máquina de indução trifásica foi apresentado neste capítulo, buscando mostrar os conceitos elementares tais como: potência desenvolvida ou gerada, perdas e rendimento. O presente capítulo mostrou equacionamentos simplificados e definições essenciais para compreensão da máquina assíncrona que são encontrados na literatura clássica de máquinas elétricas (KRAUSE). Aspectos de operação em regime permanente da máquina de indução comportando como motor e gerador foram destacados.

A princípio a modelagem é considerada convencionalmente com 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, 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 da 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.

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DO PROJETO

3.1 – Descrição

A pesquisa desenvolveu um grupo motor-gerador de energia elétrica tendo como matriz energética o biogás produzido pela atividade suinicultora. Esta atividade econômica deve estar equipada com biodigestores, permitindo o confinamento e a queima do biogás, degradando seus efeitos nocivos ao meio ambiente.

A edição da portaria 482/ANEEL/2012, que regulamenta a conexão de unidades de geração distribuída às redes de distribuição e estabelece a “compensação de energia”, certamente motivará a instalação de grupos motor-gerador para o aproveitamento do biogás. Pretende-se com a tecnologia assíncrona, mitigar os impactos causados pela conexão de pequenos geradores ao sistema de distribuição, principalmente do ponto de vista da simplicidade e da segurança.

O projeto de conexão à rede de distribuição tem por objetivo atender aos requisitos apresentados na norma NTE-041-Energisa, para acesso em média tensão, de uma central geradora de energia, com potência de 110 kW. A unidade consumidora número UC15095121, de propriedade de Nilton José Dal Bem, está situada na zona rural denominada “Fazenda Três Passos”, localizada na estrada Morocó, município de Sorriso/MT.

A unidade consumidora em questão é atendida por uma rede de distribuição rural trifásica, em 13,8 kV. Possui medição em tensão primária, localizada nas coordenadas: ZIL0627751; UTM8539656. O contrato de fornecimento de energia contempla a modalidade horo sazonal verde, com demanda contratada de 102 kW. As instalações atendem as granjas de suinocultura e avicultura. Possuem, à jusante da medição, dois postos de transformação 13,8 kV/220-127 Volts, 75 kVA. Em cada posto de transformação existe, por reversão em rampa de tensão, um grupo gerador à diesel, destinado ao

atendimento de 100 % da demanda em horário de ponta e para garantir o fornecimento em uma possível falta de energia elétrica por parte da concessionária.

Todas as manobras de operação são realizadas por um sistema supervisório de automação. As grandezas elétricas, de energia, além de dados sobre consumo de gás, temperaturas e dentro outros, são constantemente monitoradas, produzindo subsídio para proteção, desconexão, reconexão. Através de um sistema de comunicação em tempo real, via SMS, a operação será supervisionada também à distância.

Para conectar a central geradora experimental à unidade consumidora, foi construída uma extensão de rede trifásica, em 13,8 kV, de 960 metros, contendo um novo posto de transformação de 75 kVA. Não será necessário considerar aumento de carga na unidade consumidora, visto que a medição é primária e que o novo posto de transformação de 75 kVA não contém carga conectada, servindo apenas para a conexão da central geradora à rede interna primária da propriedade.

Para estudar o gerador assíncrono impulsinado por motor a biogás, foi projetado um grupo motor gerador especial composto por um motor a ciclo diesel de seis cilindro e 289 CV, modificado em fábrica, para funcionar em ciclo Otto, e desenvolver 160 CV pela queima do biogás. O motor utilizado é da marca MWM, modelo G6-12T. O gerador assíncrono utilizado foi uma máquina assíncrona WEG 150 CV – 110 kW.

O grupo motor gerador é indicado pela Figura 3.1, é equipado com o acoplamento do gerador assíncrono. Testes e operações exaustivas foram realizados, armazenando dados colhidos por um analisador de energia e pelos sistemas supervisórios de automação instalados na unidade geradora.

A Figura 3.2 mostra o abrigo da usina experimental, evidenciando com destaque em “A”, um vaso pulmão desenvolvido para estabilizar a pressão e a vazão de entrada do biogás no motor. Em “B” mostra um filtro para a retenção do sulfeto de hidrogênio melhorando a qualidade do gás injetado no motor. As propriedades perniciosas do H₂S provocam danos ao motor com redução da potência gerada.

Figura 3.1 – Imagem da central geradora assíncrona experimental.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.2 – Tratamento do biogás.



. Fonte: Autoria própria.

O biodigestor, mostrado pela Figura 3.3, apontado por (a), tem por finalidade confinar o biogás, rico em metano. Em (b) mostra o Flare, local onde o biogás é queimado e transformado em dióxido de carbono, reduzindo em dezenas de vezes seus malefícios ambientais.

Figura 3.3 – Processo de queima do biogás. (a) Biodigestor; (b) Flare.

Fonte: Autoria própria.

A produção de motores a combustão interna para queima do gás metano já é uma realidade do Brasil, porém os fabricantes existentes no mercado oferecem grupos motor-gerador utilizando unicamente máquina síncrona. Como dito, este projeto realizou o desenvolvimento de um grupo motor-gerador para operar com gás metano, utilizando gerador assíncrono. A primeira vantagem da inovação proposta é a redução do custo do equipamento, visto que o gerador assíncrono nada mais é do que um motor de indução normal, disponível no mercado a custo por kW muito menor que a do gerador síncrono. Outro fato importante que contribui para redução ainda mais do custo na geração assíncrona, é a não existência dos sistemas de excitação, regulação de velocidade e de sincronização com a rede elétrica, exigidos na geração síncrona.

Deve-se ainda considerar a questão da segurança na operação do gerador de indução quando conectado ao sistema de distribuição. Como sua excitação é produzida pela rede, em caso de desligamentos, em poucos segundos não haverá alimentação indevida pela unidade assíncrona.

3.2 – Biogás

Sendo que a emissão do gás metano é um efluente da cadeia produtiva de suínos, nada mais eficiente que promover o aproveitamento dessa energia útil utilizando o gás

como combustível em um motor, para acionar geradores de energia elétrica e posteriormente conectá-lo a rede de distribuição elétrica.

O biogás é composto basicamente de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e, em menor grau, hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e outros gases. A quantidade de biogás produzido e sua composição variam de acordo com a temperatura, pH, umidade e a composição do material orgânico decomposto, denominado substrato. Além do biogás, o digestato é um subproduto líquido, sendo considerado um fertilizante rico em nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A Tabela 3.1 mostra a composição percentual de biogás para cada componente químico.

Tabela 3.1– Composição química do biogás.

Componente	Porcentagem na mistura (%)
Metano (CH_4)	50 a 75
Dióxido de Carbono (CO_2)	25 a 40
Hidrogênio (H_2)	1 a 3
Nitrogênio (N_2)	0,5 a 2,5
Oxigênio (O_2)	0,1 a 1
Gás Sulfídrico (H_2S)	0,1 a 0,5
Amônia (NH_3)	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1
Água (H_2O)	Variável

Fonte: Adaptado de (ZACHOW, 2000).

O equipamento usado para realizar as medições é um analisador de gases portátil da marca Dräger® modelo X-am 7000, contendo cinco sensores.

Para medições de H₂S acima de 1000 partículas por milhão (ppm), é utilizado o analisador de gases da marca Oda Logger, modelo H₂S gaslogger. A leitura da qualificação e quantificação dos gases foi realizada na tubulação existente na saída dos biodigestores. O monitoramento foi realizado por oito meses, iniciando em fevereiro e terminando em setembro do ano de 2012. A Tabela 3.2 mostra as medidas obtidas experimentalmente.

Tabela 3.2– Medidas da composição do biogás na Fazenda Três Passos.

Mês	CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	H ₂ S ppm	H ₂ ppm
Fevereiro	64,52	34,95	0,27	896,06	1792,11
Março	62,91	35,95	0,72	2399,63	1797,48
Abril	61,73	37,04	0,79	2613,84	1763,72
Maio	60,97	38,46	0,09	2928,37	1875,96
Junho	61,26	37,83	0,36	3693,36	1801,64
Julho	60,59	38,56	0,28	3927,37	1836,08
Agosto	61,08	37,95	0,46	3239,24	1850,99
Setembro	61,29	37,72	0,47	3258,98	1885,98

Fonte: Autoria própria.

De acordo com SANTOS (2000), a concentração de metano no biogás varia de 50 a 75%. É o que determina sua capacidade energética, ou tecnicamente, seu poder calorífico. A razão de equivalência entre eletricidade e biogás é de 6,5 kWh/m³. No entanto, a conversão de biogás em eletricidade usando grupos geradores (motor de combustão interna) tem um rendimento em torno de 22%, o que reduz a equivalência para 1,428 kWh/m³ com 60% da concentração de metano obtido experimentalmente.

Segundo o modelo CENBIO COELHO *et al.* (2008) a estimativa do volume em m³ de biogás ($Q_{biogás}$) produzido em relação à quantidade de dejetos produzidos pelos suínos, pode ser calculado por:

$$Q_{biogás} = N_c \cdot E_t \cdot P_b \cdot t \quad (3.1)$$

Em que,

N_c - Número de cabeças de suínos;

E_t - Esterco total [kg_{esterco}];

P_b - Produção de biogás [kg_{biogás}/kg_{esterco}];

t - Tempo [dia];

E_t = Esterco total = 2,25kg esterco/ (dia suíno) e P_b = Produção de Biogás (é igual a 0,062kg biogás/kg esterco equivalente a 0,086m³ biogás/kg esterco).

A Tabela 3.3 mostra a relação das cabeças de suínos com a quantidade de m³ de gás metano produzida em relação à energia elétrica.

Tabela 3.3– Medidas da composição do biogás na Fazenda Três Passos.

Cabeça de suínos	Metano (m ³)	Potencial energético (kW)
500	4,03	5,75
1000	8,06	11,51
4000	32,25	46,05
8500	68,53	97,86
9000	72,56	103,61
85000	685,31	978,62

Fonte: Autoria própria.

Para fins de cálculo, será considerada a concentração de metano no biogás a 60%. Sendo a concentração média obtida nas medições nos biodigestores.

O valor calorífico de um combustível representa a quantidade de energia no material. O valor calorífico do biogás varia de acordo com sua composição e pode ser calculado; no entanto, nos casos em que a composição exata não é conhecida, valores de referência podem ser utilizados, conforme mostrado na Tabela 3.4.

A Tabela 3.4 mostra as variações no poder calorífico (PC) de acordo com a porcentagem de metano (CH₄) no biogás, de acordo com (AVELLAR, 2001).

Tabela 3.4– Composição química e valor calórico.

Composto	VC (kJ/Kg)
10%CH ₄ e 90%CO ₂	1948,29
40%CH ₄ e 60%CO ₂	9769,50
60%CH₄ e 40%CO₂	17706,70
65%CH ₄ e 35%CO ₂	20223,15
75%CH ₄ e 25%CO ₂	26175,10
95%CH ₄ e 05%CO ₂	43825,75
99%CH ₄ e 01%CO ₂	48814,03

Também de acordo com CIBIOGÁS (2018), o poder calorífico do metano com concentração de 60% é de 17.706,70 kJ/Kg = 5,100 kcal/m³ = 5,91 kWh/m³.

Com dados de fluxo de biogás, energia e regime operacional (DG - Geração Distribuída), o gerador deve ser selecionado para identificar a energia total do gerador e o fator de eficiência ou conversão. A Tabela 3.5 mostra a taxa de conversão de energia de gás em eletricidade com a proporção do motor de combustão de biogás e do gerador de indução conforme mostrado por CIBIOGÁS (2018). Esta Tabela 3.5 foi criada a partir de dados em catálogos de fabricantes (ER-BR, Leão Energia, Fockink e CHP Brasil) e monitoramento das unidades de demonstração monitoradas pelo CIBIOGÁS-ER.

Tabela 3.5– Tabela de seleção de geradores por fluxo em m³.

Vazão do biogás (m³/h)	Potência máxima da máquina (kW)	Eficiência (%) *	Fator de conversão (kWh / m³) **
10.0	10	13.54%	0.80
19.0	24	17.10%	1.01
23.4	36	20.85%	1.23
32.0	48	20.30%	1.20
34.9	57	22.09%	1.31
43.0	72	22.67%	1.34
50.9	86	22.89%	1.35
64.1	108	22.80%	1.35
91.8	165	24.33%	1.44
110.0	237	29.16%	1.72
130.0	288	29.99%	1.77

* Eficiência do motor-gerador

** DG (80% da potência nominal do gerador de indução)

A partir do fluxo de biogás obtido experimentalmente de 65 m³/h, a Tabela 3.5 em negrito destaca a relação a ser utilizada nos cálculos de energia gerada.

3.3 – Relevância socioambiental

Segundo INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2004) os países ricos aumentaram seu consumo de energia em menos de 100% em 20 anos, no mesmo período a Coréia do Sul aumentou sua demanda em 306%, a Índia em 240%, a China em 192% e o Brasil em 88%

assim sendo, qualquer tentativa de inclusão social promoverá pressão adicional sobre o consumo de energia.

Para se pensar em desenvolvimento sócio econômico e ambiental é necessário ter claro a necessidade da bioenergia produzida a partir de produtos agropecuários e florestais e pelas fontes renováveis como hidrelétrica, eólica, solar, geotérmica e energia dos oceanos. A sustentabilidade energética com um ganho social não pode desapressar qualquer fonte de geração energética, pois somente a somatória de todas as fontes disponíveis poderá produzir a energia necessária para uma inclusão social permanente da população no Brasil.

A primeira vantagem comparativa do sistema de geração elétrica utilizando a biogás proveniente dos dejetos suíno vem da possibilidade de incorporar novas fontes de energia renovável de energia sem competir com a agricultura de alimentos, como ocorre com o etanol, o que faz desse processo agregador de valor a atual produção agrícola, além de utilizar o gás metano altamente agressivo a atmosfera, causador do efeito estufa e ainda com impacto socialmente aceito.

A segunda vantagem comparativa decorre da possibilidade de múltiplos pontos de produção que durante o ano, se bem coordenado no período produtivo, poderá ter continuidade da produção energética, diferentemente das “janelas produtivas” que são períodos com riscos razoáveis para a cultura principal, comparada a energias oriunda de safras como a da cultura da cana de açúcar.

A terceira vantagem advém da extensão e da localização geográfica do estado de Mato Grosso, cuja maior parte situa-se nas faixas tropical e a produção dos insumos necessários para a produção suína e ampliando a utilização de produtos de origem no arranjo local, o que pode garantir a permanência dessa agroindústria em constante estado produtivo com menor custo. O Estado do Mato Grosso também possui exuberante biodiversidade, o que permite várias opções associadas à agricultura, consequentemente insumos para a sustentação dos processos produtivos da suinocultura.

Este projeto trouxe consigo um ganho mensurável ao produtor agrícola, que diminuí os custos de produção ao agregar produção de energia, tornando o empreendimento mais

atrativo, além de um ganho intangível que é mostrar para a sociedade um processo produtivo voltado a uma preocupação ambiental relevante.

A relevância, da tecnologia empregada nesse projeto de desenvolvimento vai de encontro com o aceleração da mudança necessária de produção e diversificação energética brasileira. Essas inovações, ao aumentar produção energética, resultam em benefícios ambientais e econômicos, contribuindo para viabilizar economicamente esta fonte renovável de energia e induzindo ganhos de escala e redução de custos em longo prazo. Aumenta, também, o número de investidores interessados em contratos de longo prazo para o fornecimento desse combustível, pois a energia elétrica é componente importante do custo de produção agropecuário e da agroindústria, tornando progressivamente atraente a geração de energia a partir do biogás metano dentro da propriedade.

3.4 – Relevância econômica

As propriedades com exploração da atividade suinicultora possuem, por força de lei, como condição para autorização do início das atividades, biodigestores instalados. Com a realidade do aproveitamento do biogás pela geração de energia, aumenta naturalmente a preocupação com a eficiência dos biodigestores de forma a maximizar o confinamento do biogás e a sua condução para a queima nos motores.

Outra relevância econômica é a possibilidade da exploração da energia do biogás pela associação em cooperativas de pequenos e médios produtores de suínos. O modelo proposto por esse projeto é a concentração da geração de energia em uma microrregião. A construção de uma usina com grandes biodigestores e diversos grupos motor-geradores assíncrono, em localização geodésica centralizada em relação às granjas produtoras. Os dejetos oriundos da atividade em cada propriedade seriam transportados em caminhões tanques até a usina onde se daria o tratamento e a geração de energia elétrica com o aproveitamento dos demais subprodutos. A vantagem do modelo centralizado está na profissionalização do negócio, eficiência na manutenção e maximização de resultados pela escala de produção da energia e subprodutos do processo.

3.5 – Viabilidade econômica

O estudo de viabilidade econômica teve por base dados da implantação do projeto e da energia gerada, considerando receita baseada na compensação de energia pela resolução normativa 482/ANEEL/2012. O retorno está demonstrado com horizonte de cinco anos. Foi considerada uma taxa de desconto da ordem de 14 % ao ano, o que resultou num *playback* de 29 meses.

O estudo tomou por base o custo com equipamentos e instalações realizados no projeto. Não foram considerados custos não relacionados diretamente à aquisição e instalação de equipamentos diretamente ligados com a unidade geradora, como custo com aquisição e transmissão de dados, automação à distância e outros custos científicos não relacionados diretamente com a unidade geradora.

O cenário adotado considera a energia gerada por 80% da capacidade instalada em 80% do tempo. Esse foi o cenário considerado real, tendo em vista as paradas de manutenção e as variações na produção do biogás. Num cenário mais otimista, o *playback* pode ser reduzido em alguns meses. No pior cenário imaginado, o *playback* sobe para 36 meses. O retorno é considerado como a soma da TIR e a taxa de desconto atual = 13,74% + 34% = aproximadamente 48%. Cronologicamente, considerando 60 meses (5 anos) como 100%, o valor de 48% em meses equivalentes, resulta em um retorno de 29 meses. Os dados para este estudo de viabilidade econômica são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6– Cenário financeiro projetado.

Indicadores de retorno	
Taxa de desconto atual	13,74%
VPL (Valor Presente Líquido)	R\$ 155.263,43
TIR (Taxa Interna de Retorno)	34%
Payback (retorno de lucro)	29 meses
Investimento inicial	260.370,00

A taxa interna de retorno foi admitida em 34% ao ano para o pagamento do investimento bruto. A taxa de desconto atual é obtida a partir da taxa de desconto na receita bruta para obter lucro líquido (custo fixo mais depreciação), considerando uma média de 5 anos ou 60 meses.

Tabela 3.7– Projeções financeiras do projeto.

Resumo	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Total
Receita bruta	R\$91.929,60	R\$157.593,60	R\$157.593,60	R\$157.593,60	R\$157.593,60	R\$722.304,00
Taxas	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00
Custos variáveis	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00	R\$0,00
Lucro bruto	R\$91.929,60	R\$157.593,60	R\$157.593,60	R\$157.593,60	R\$157.593,60	R\$722.304,00
Custos fixos	R\$3.022,50	R\$6.321,83	R\$6.709,76	R\$7.121,49	R\$7.558,49	R\$30.734,07
Depreciação	R\$14.685,90	R\$14.685,90	R\$14.685,90	R\$14.685,90	R\$14.685,90	R\$73.429,50
Lucro líquido	R\$74.221,20	R\$136.585,87	R\$136.197,94	R\$135.786,21	R\$135.349,21	R\$618.140,43
Percentual de rentabilidade	80,74%	86,67%	86,42%	86,16%	85,88%	85,58%
Desconto considerado anual	19,263%	13,330%	13,576%	13,838%	14,115%	14,421%
Taxa de desconto atual	13,74%					

Em relação à eletricidade gerada, são apresentados os seguintes resultados:

Potência gerada = 80%*potência instalada = 0,8*110 kW = 88kW

Horas trabalhadas por dia de operação = 80%*24 = 19,2 horas

Energia gerada/dia = 88*19,2 = 1.689,6 kWh

Energia gerada/mês = 1.689,6*30 = 50.688 kWh

Energia gerada/ano = 50.688*12 = 608.256 kWh

Com base nos valores do investimento, foi possível realizar uma análise preliminar da viabilidade econômica, considerando um horizonte de planejamento de cinco anos devido à depreciação dos equipamentos. O custo apresentado é baseado no valor médio da eletricidade na área rural, de R\$ 0,25594/kWh.

Cálculo da receita bruta (gerada) = 60,8256*0,2594/kWh = R\$ 157.593,60

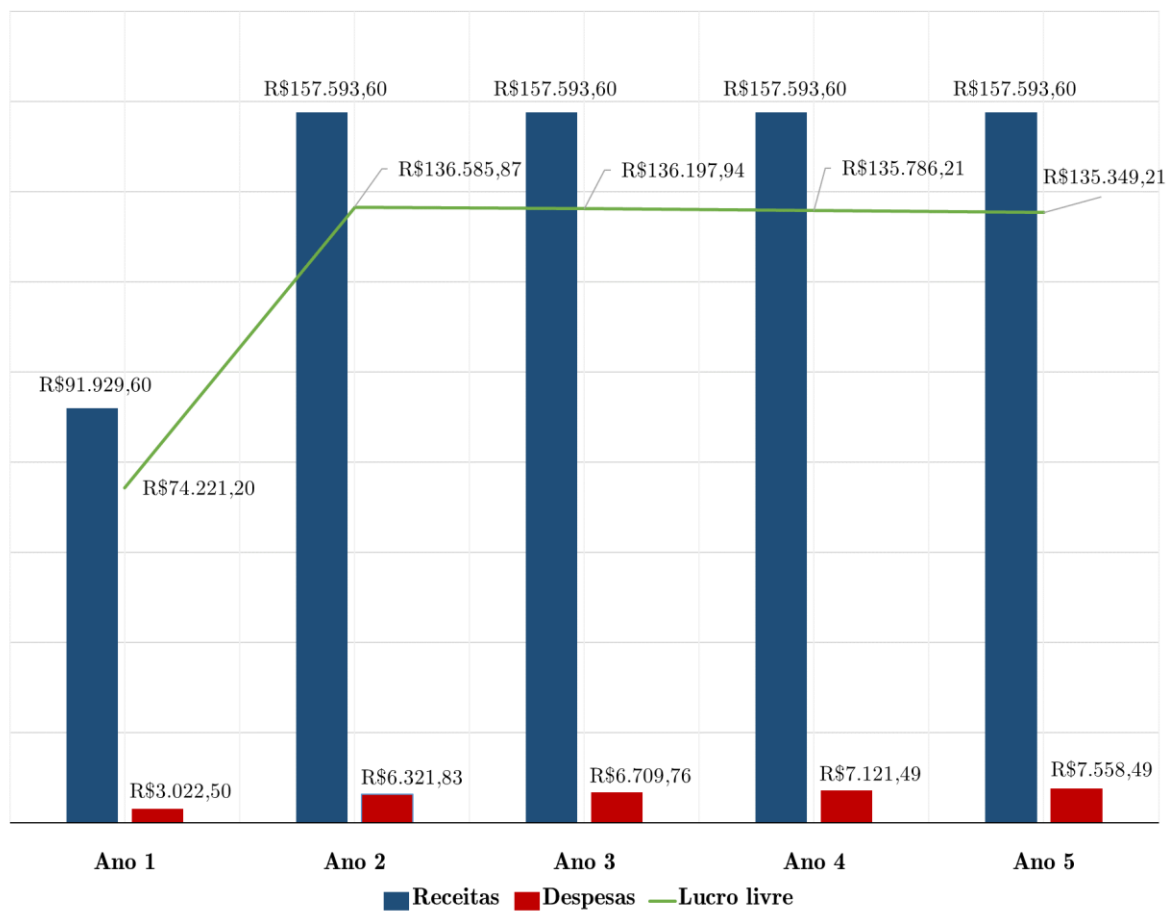
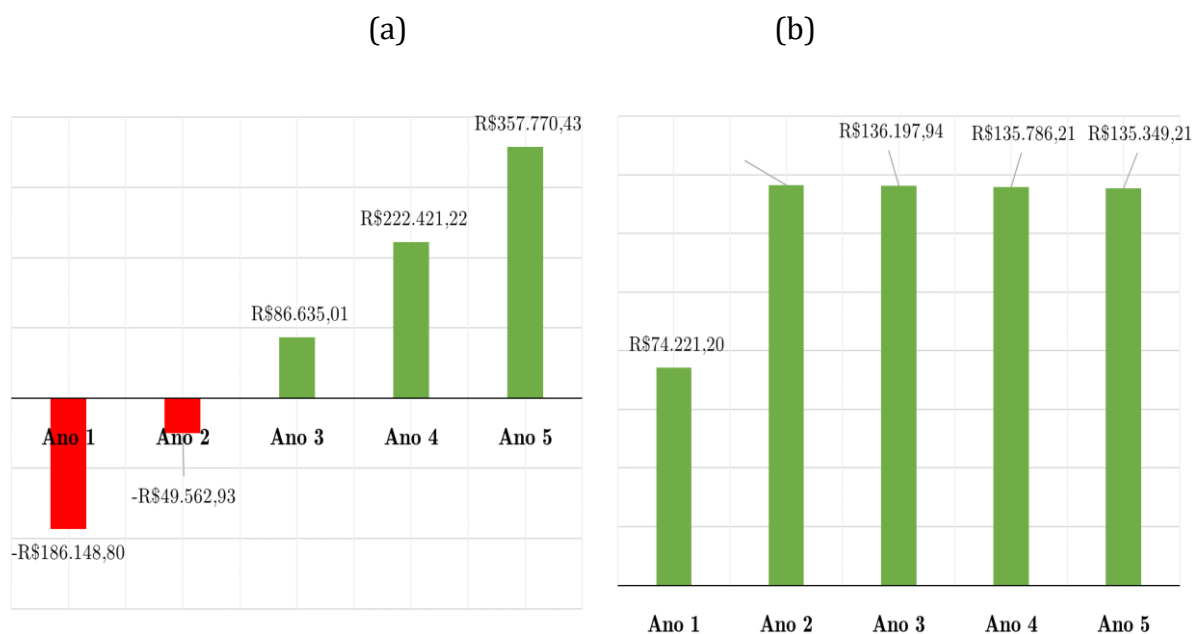
A partir desses cálculos, a Tabela 3.7 é mostrada para explicar a viabilidade econômica.

Com relação às variáveis na contabilização da viabilidade econômica, são apresentados:

- Considerando o percentual médio de rentabilidade, foi obtida uma taxa de desconto atual de 13,74% (aproximadamente 14% em 5 anos);
 - No primeiro ano, a receita bruta é de R\$ 91.929,60, referente a 7 meses de operação e 5 meses de implantação do sistema;
 - O investimento inicial inclui a aquisição e instalação do grupo gerador a motor, da estação transformadora de 75 kVa e da extensão da rede de 960 metros. Também estão incluídos os projetos e todo o procedimento legal com a concessionária - R \$ 260.370,00;
 - Impostos: Não foi considerado o desconto tributário, uma vez que o ICMS, o PIS e o CONFINS não se aplicam à energia gerada. O excedente gerado pode ser descontado na próxima fatura ou baixado na conta de uma unidade consumidora sob a responsabilidade do principal titular;
-

- Custos variáveis: foi considerado zero, pois no período de 5 anos não haverá investimento em nova instalação ou substituição de equipamentos;
- Lucro bruto: somente receita bruta de geração sem descontos;
- Custos fixos: Manutenção eletromecânica preventiva e possível manutenção corretiva em 5 anos são consideradas. Esses valores foram fornecidos pelo fabricante do grupo gerador, contemplando o material e o trabalho de execução sendo assinado por um contrato de manutenção. Ao longo dos anos, o custo de manutenção aumenta devido à depreciação natural do equipamento.
- Depreciação: Valor fornecido pelo fabricante, governado pelo mercado. Este valor reflete o desgaste natural do conjunto do motor do gerador;
- Lucro livre = lucro líquido.
- Percentual de rentabilidade: inclui o percentual de rentabilidade entre a receita bruta gerada e o lucro livre obtido.

Com os dados expostos pela Tabela 3.7, é possível representar ao longo de 5 anos, o fluxo de caixa previsto e lucros previstos em gráficos de barra, que estão indicados pelas Figuras 3.4 e 3.5. A Figura 3.5(a) mostra o lucro ou prejuízo acumulado, e a Figura 3.5(b), o lucro ou prejuízo livre. Observe que na Figura 3.5(a) o lucro ou prejuízo acumulado é obtido a partir do custo inicial de R\$ 260.370,00 subtraindo o lucro livre de cada ano. Na Figura 3.5(b), o lucro livre para cada ano é plotado.

Figura 3.4 – Fluxo de caixa econômico previsto.**Figura 3.5 – Lucros previstos; (a) Lucro ou prejuízo acumulado; (b) Lucro ou prejuízo livre.**

A Figura 3.6 mostra a relação *EBITDA*, que significa “*earnings before interest, taxes, depreciation and amortization*”, que traduzido para o português significa: “Lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização”. O gráfico para a margem de contribuição vs Custos fixos do projeto é ilustrado pela Figura 3.7.

Figura 3.6 – Relação *EBITDA*.

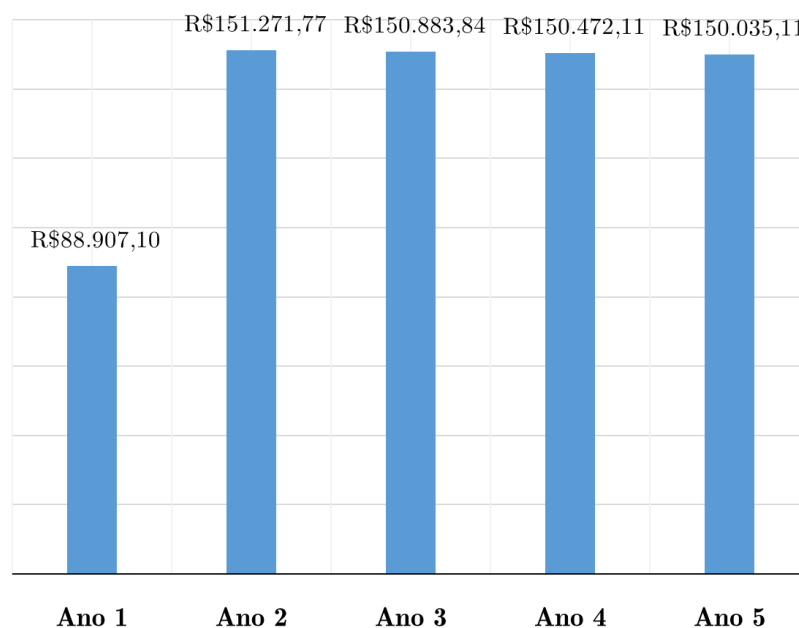
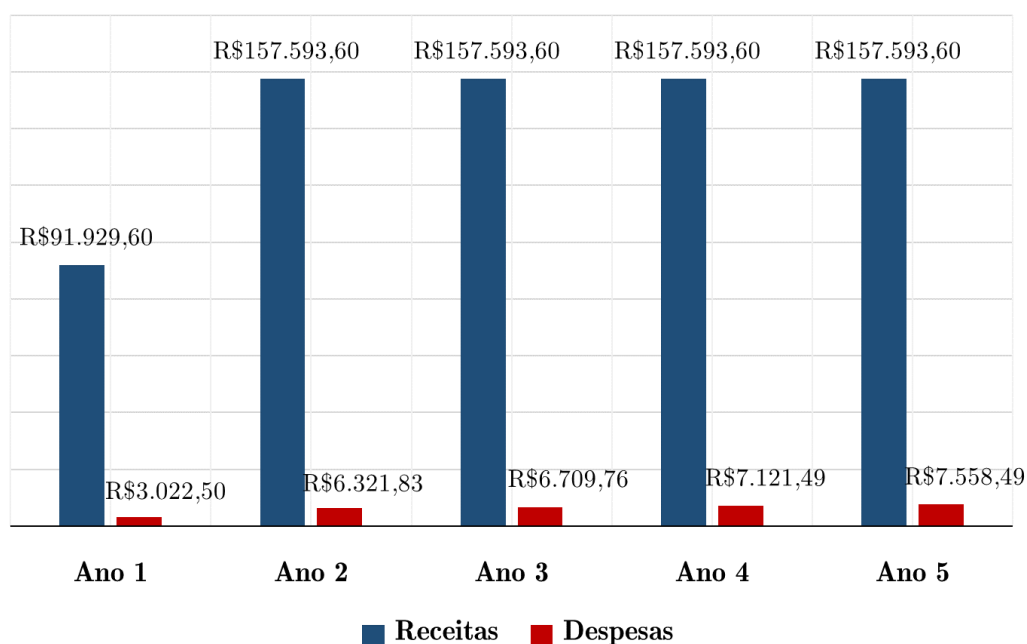


Figura 3.7 – Relação margem de contribuição e custos fixos.



Na Figura 3.7, é mostrado a diferença entre receita bruta menos os custos fixos. Após o segundo ano, os valores são diferentes, pois o custo fixo varia de ano para ano. O projeto descrito possui viabilidade financeira e econômica significativa, como pode ser notado pelos dados apresentados acima.

3.6 – Considerações finais

Este capítulo abordou o cenário propício e favorável para geração de energia elétrica a partir do processo de queima do gás metano, confinado em biodigestores, proporcionando grande vantagem ambiental e econômica. A inovação do trabalho apresentado encontra-se no uso de um gerador de indução tipo gaiola de esquilo acoplado a um motor de combustão biogás.

Foi apresentado neste projeto que o uso do gerador assíncrono torna o custo de implantação menor, com simplicidade de operação e segurança sendo recomendável na geração distribuída. Também foram mostradas todas as instalações dos equipamentos para a geração de energia elétrica (estrutura elétrica e civil) com o biogás contido no projeto regulamentado por normas vigentes da concessionária.

Foi descrito o projeto com os seus impactos e relevâncias com resultados bastante motivadores.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL: RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

4.1 – Introdução

O presente capítulo tem por propósito apresentar e comparar os resultados dos ensaios experimentais com os simulados. Os resultados experimentais foram coletados no domínio do tempo. A análise foi realizada em regime permanente. Foram realizadas leituras da potência ativa, reativa, fator de potência, frequência gerada, dentre outras variáveis elétricas para uma exposição coesa e clara do assunto aqui tratado.

4.2 – Especificações elétricas para tratamento teórico-experimental

Os dados de placa e os parâmetros do gerador de indução e do transformador são essenciais para simulação computacional. As Tabelas 4.2.1 e 4.2.2, mostram respectivamente os dados de placa e os parâmetros do gerador de indução.

Tabela 4.2.1– Dados de placa do gerador de indução.

Dados	Valores
Potência nominal	110/150 [kW/cv]
Tensão nominal	380 [V]
Corrente nominal	207 [A]
Ligação	YY
Polos	4
Fator de potência	0,87
Rendimento	0,95
Fator de serviço	1,15
Frequência	60 [Hz]

Tabela 4.2.2– Parâmetros do gerador de indução.

Parâmetros	Valores [SI]	Valores [pu]
Resistência do estator	0,0792 [Ω]	0,06934 [pu]
Resistência do rotor	0,0457 [Ω]	0,04001 [pu]
Reatância de magnetização	3,6567 [Ω]	3,201713[pu]
Resistência de perdas no núcleo	154,25 [Ω]	135,058 [pu]
Reatância de dispersão do estator	0,4354 [Ω]	0,38122 [pu]
Reatância de dispersão do rotor	0,6528 [Ω]	0,57157 [pu]
Inércia do rotor	0,8748 [kg.m ²]	-
Constante de inércia	-	0,122921[s]

Os dados de placa e os parâmetros dos transformadores também são apresentados pelas Tabelas 4.2.3 e 4.2.4, respectivamente.

Tabela 4.2.3– Dados de placa do transformador.

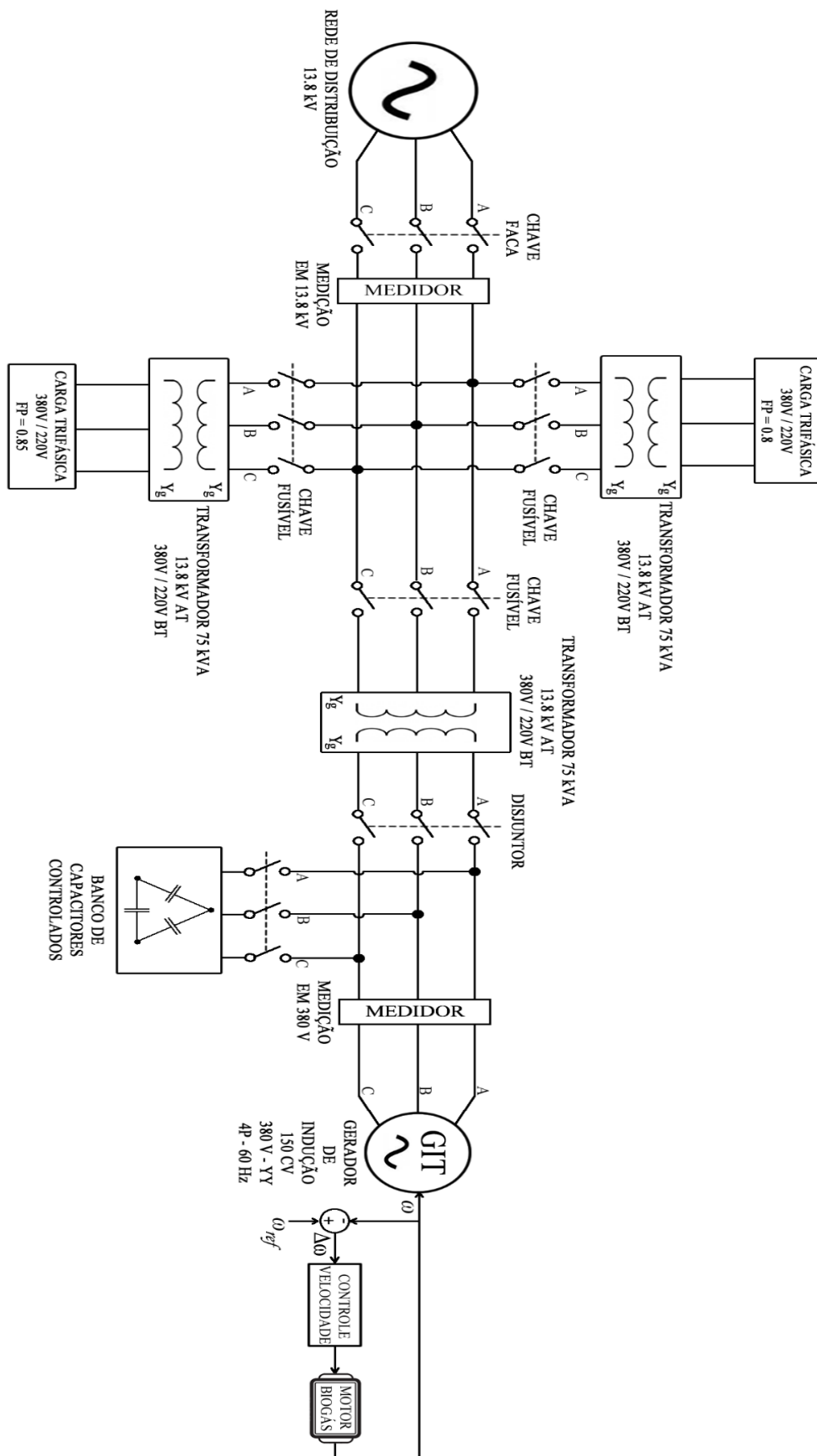
Parâmetros	Valores
Potência nominal	75 [kW]
Tensão nominal primário	13800 [V]
Tensão nominal secundário	380 [V]
Corrente nominal primário	3,14 [A]
Corrente nominal secundário	113,95 [A]
Ligação primário/secundário	Yg/Yg
Fases	3
Rendimento	0,983
Frequência	60 [Hz]

Tabela 4.2.4– Parâmetros do transformador

Parâmetros	Valores [SI]	Valores [pu]
Resistência do primário	13,60334 [Ω]	0,005357 [pu]
Resistência do secundário	11,85166 [m Ω]	0,006155 [pu]
Reatância do primário	55,3088 [Ω]	0,021782 [pu]
Reatância do secundário	55,3088 [Ω]	0,021782 [pu]
Resistência de perdas no núcleo	508,451 [Ω]	264,0849 [pu]
Reatância de magnetização	210,982 [Ω]	109,5826 [pu]

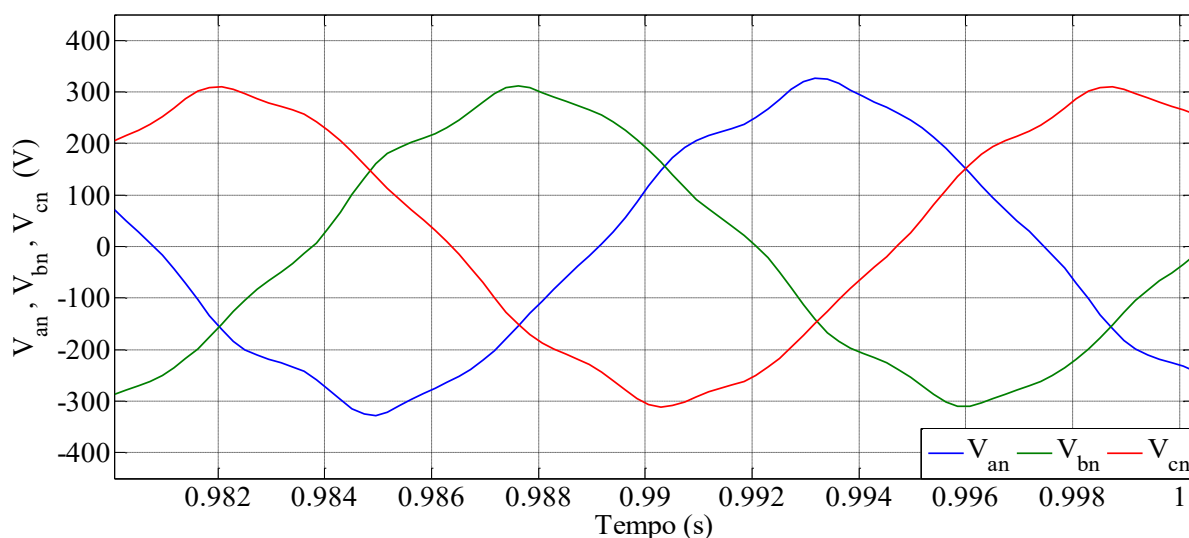
Outras informações sobre o transformador, da máquina assíncrona e o motor de combustão a biogás, encontram-se no Anexo A. Os detalhes da instalação elétrica realizada no Capítulo III são mostrados pelo diagrama elétrico ilustrado pela Figura 4.2.1.

Figura 4.2.1– Diagrama elétrico geral da instalação.



Os efeitos harmônicos e o desequilíbrio da rede de distribuição local foram contemplados na simulação computacional programando uma fonte de tensão trifásica desequilibrada para buscar uma melhor aproximação da situação real. Experimentalmente, é medido pelo osciloscópio conforme mostrado na Figura 4.2.2.

Figura 4.2.2–Tensão trifásica de fase obtidas experimentalmente.



Decompõem-se cada onda de tensão de fase nas diversas frequências que ocorrem. Para o desequilíbrio da rede de distribuição, utilizam-se os valores obtidos nos ensaios experimentais. Deste modo, aproxima-se o desequilíbrio nas simulações com o desequilíbrio dos procedimentos experimentais.

Vale lembrar que quando se altera o módulo da componente fundamental, as demais componentes harmônicas são refletidas em magnitude e em porcentagem da componente fundamental, respeitando a distribuição harmônica das ondas oscilografadas.

Como a leitura é realizada no lado de baixa tensão do transformador, refletem-se as componentes harmônicas considerando a relação de transformação. A fonte trifásica harmônica desequilibrada é então modelada no lado de alta tensão.

A teoria de harmônicos e o desequilíbrio encontram-se no Apêndice A. Todas as variáveis utilizadas ao longo deste capítulo devem ser consultadas neste apêndice. O DTT

das ondas de tensão de fase A, B e C é de aproximadamente 5,76%, 5,87% e 5,75%. Valores obtidos na análise dos valores medidos.

As Tabelas 4.2.5, 4.2.6 e 4.2.7 mostram a decomposição harmônica para as ondas das fases A, B e C, respectivamente. Consideraram-se como expressivos os conteúdos harmônicos até a 9ª ordem. Utilizando a equação (A.2) do Apêndice A, pode-se obter em porcentagem a componente fundamental de cada fase.

Tabela 4.2.5– Decomposição da onda de tensão da rede elétrica, fase A.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
319,48	8,21	8,74	13,95	0,46

Tabela 4.2.6– Decomposição da onda de tensão da rede elétrica, fase B.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
305,17	7,84	8,35	13,32	0,44

Tabela 4.2.7– Decomposição da onda de tensão da rede elétrica, fase C.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
303,80	7,80	8,31	13,26	0,44

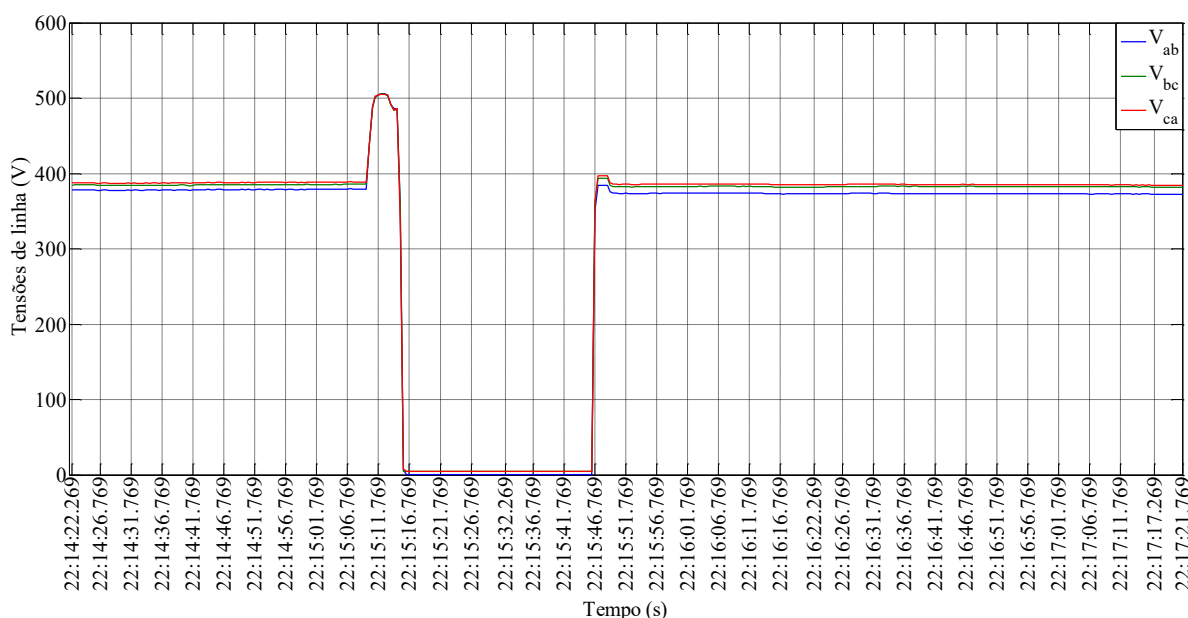
4.3 – Análise teórico-experimental do gerador assíncrono com o banco de capacitores

O comparativo teórico-experimental baseia-se na análise dos resultados experimentais com os simulados computacionalmente. A simulação computacional é dividida em regime permanente e em situação de ilhamento. Essa divisão é realizada buscando uma melhor didática na apresentação dos resultados simulados.

4.3.1 – Procedimento experimental

As leituras efetuadas nos terminais do gerador de indução são apresentadas na Figura 4.3.1. Os resultados apresentados a seguir, contemplam o gerador operando em regime permanente e em seguida ocorre o ilhamento. O banco de capacitores permaneceu ligado durante todo procedimento experimental. As plotagens gráficas foram realizadas em intervalos regulares para uma melhor visualização dos tempos.

Figura 4.3.1– Tensões de linha, ensaio experimental com banco de capacitores.

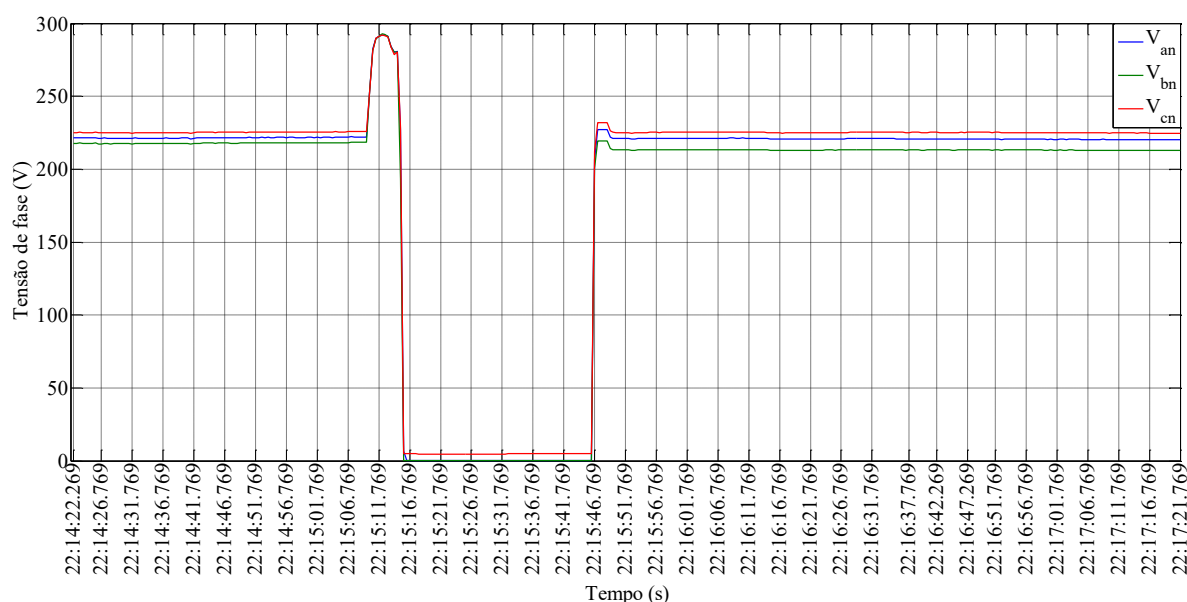


Percebe-se que em regime permanente existe um desequilíbrio de tensão, o qual é provocado pelo desequilíbrio da rede de distribuição de aproximadamente 1,435%. Esse desequilíbrio nas tensões varia ao longo do ensaio experimental. Isto ocorre

costumeiramente em uma rede de distribuição rural devido às constantes mudanças das cargas ao longo da linha.

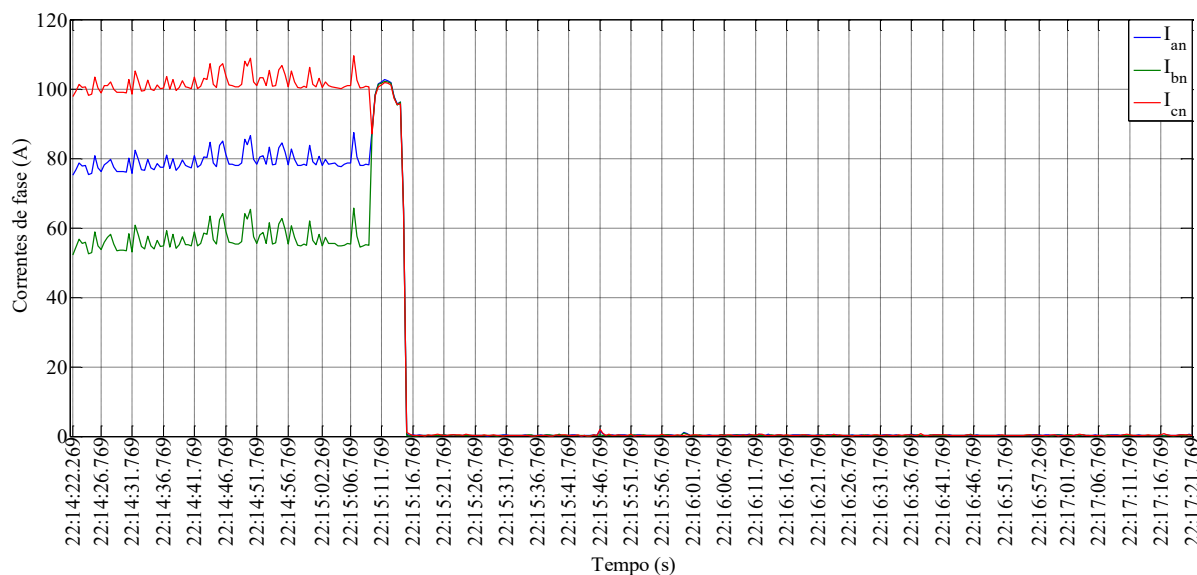
A Figura 4.3.2, mostra a leitura das tensões de fase. Nota-se que após o ilhamento as tensões de fase aumentam rapidamente devido ao excesso de reativo. Como o gerador deixa de fornecer potência ativa, o fluxo de reativo necessário para fornecer essa potência ativa é então limitado pela saturação magnética do material ferromagnético limitando o nível de tensão.

Figura 4.3.2– Tensões de fase, ensaio experimental com banco de capacitores.



Após a limitação das tensões terminais, estas começam a decrescer devido ao processo de desmagnetização que se inicia. O fluxo de reativo presente entre o gerador e o banco de capacitores começa a diminuir e as tensões chegam ligeiramente à tensão residual produzida pelo magnetismo residual no rotor. A tensão residual é zerada quando a desmagnetização do material ferromagnético do rotor for total.

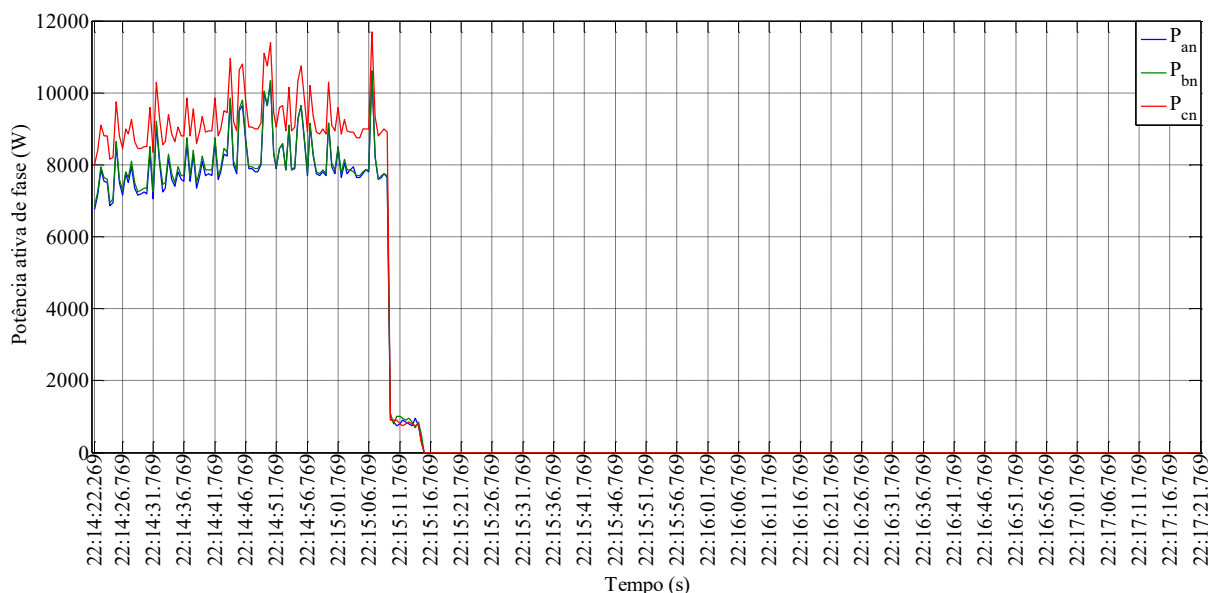
As leituras das correntes de fase com o gerador conectado na ligação estrela são mostradas pela Figura 4.3.3.

Figura 4.3.3– Correntes de fase, ensaio experimental com banco de capacitores.

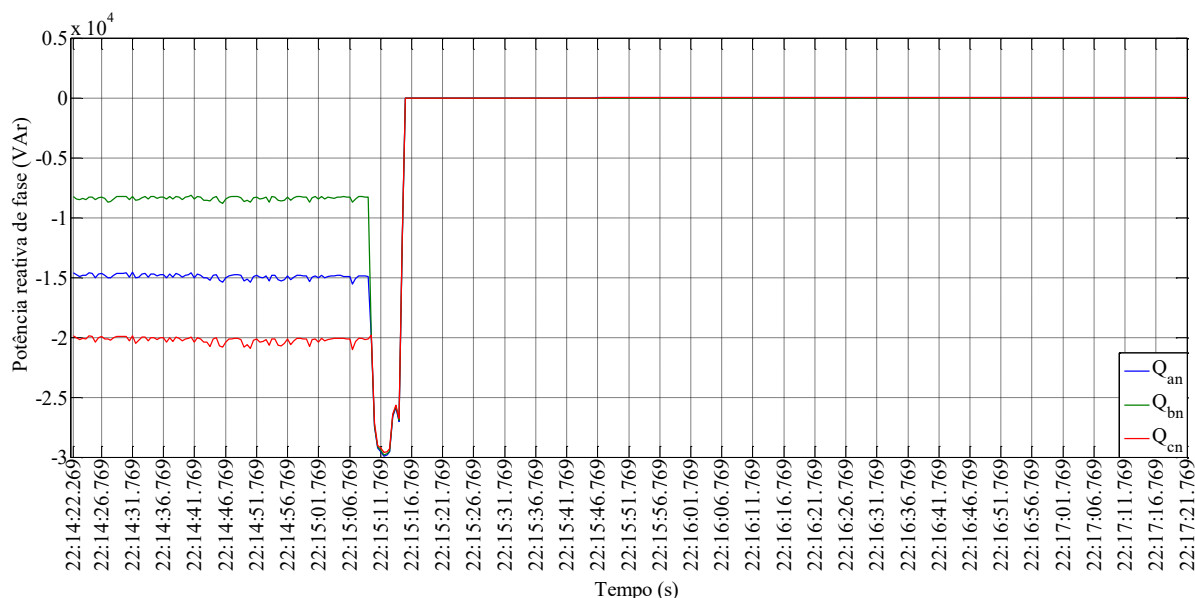
Nota-se que o desequilíbrio de corrente é expressivo (em torno de 30%), o que é de se esperar de uma linha de distribuição rural. Uma das vantagens de se utilizar um gerador de indução é que em situações de desequilíbrio de corrente este possui um grau de suportabilidade maior que um gerador síncrono.

O desequilíbrio imposto pela rede de distribuição local foi cessado e estas correntes se mantêm em um nível conforme o fluxo de reativo é limitado pela saturação magnética do gerador. Com a desmagnetização, as correntes nos terminais caem à zero, pois o fluxo de reativo após a abertura do chaveamento do disjuntor cai drasticamente. Como o gerador não volta a se magnetizar, mesmo com a presença do banco de capacitores, nenhuma corrente é produzida como pode ser observado na Figura 4.3.3.

As potências ativas geradas nas fases são mostradas na Figura 4.3.4. Como a linha de distribuição rural é desequilibrada, as potências geradas nas fases são necessariamente desequilibradas. Após o ilhamento, o gerador de indução ainda gera uma parcela de potência ativa devido ao atraso no controle da resposta mecânica. Esta parcela de potência ativa gerada é responsável pelo aceleração do gerador e aumento da frequência. Com o corte do biogás e do torque mecânico exercido pela máquina primária, a potência ativa decresce juntamente como processo de desmagnetização.

Figura 4.3.4– Potência ativa de fase, ensaio experimental com banco de capacitores.

A potência reativa absorvida é necessária para a manutenção do campo magnético do gerador de indução, mostrada pela Figura 4.3.5. Em regime permanente a rede de distribuição fornece a potência reativa e o desequilíbrio é devido ao seu desbalanceamento. Após o início do ilhamento quem irá fornecer a potência reativa para o gerador será o banco de capacitores, iniciando o processo de desmagnetização. Ocorre um aumento da potência reativa absorvida pelas fases no gerador que não conta mais com a rede elétrica para fornecer a potência ativa gerada. Dessa forma, existe um excedente de potência reativa que faz com que a tensão terminal aumente até ser limitada pela saturação magnética do material ferromagnético do gerador. No final do processo de desmagnetização, o banco não fornece mais reativo ao gerador de indução.

Figura 4.3.5– Potência reativa de fase, ensaio experimental com banco de capacitores.

Dadas às potências ativa e reativa, presentes nas fases do gerador, medidas durante os ensaios experimentais, calcula-se o fator de potência de cada fase, a cada instante. Estes valores são apresentados na Figura 4.3.6. O motivo do fator de potência ser diferente em cada fase se deve ao desequilíbrio imposto ao gerador pela rede elétrica de distribuição, como a potência ativa e reativa são desequilibradas, consequentemente, o fator de potência também é desbalanceado de uma fase para outra.

Nota-se que o fator de potência é relativamente baixo no processo de desmagnetização, já que a potência reativa aumenta consideravelmente, e o oposto ocorre com a potência ativa.

Figura 4.3.6– Fator de potência nas fases, ensaio experimental com banco de capacitores.

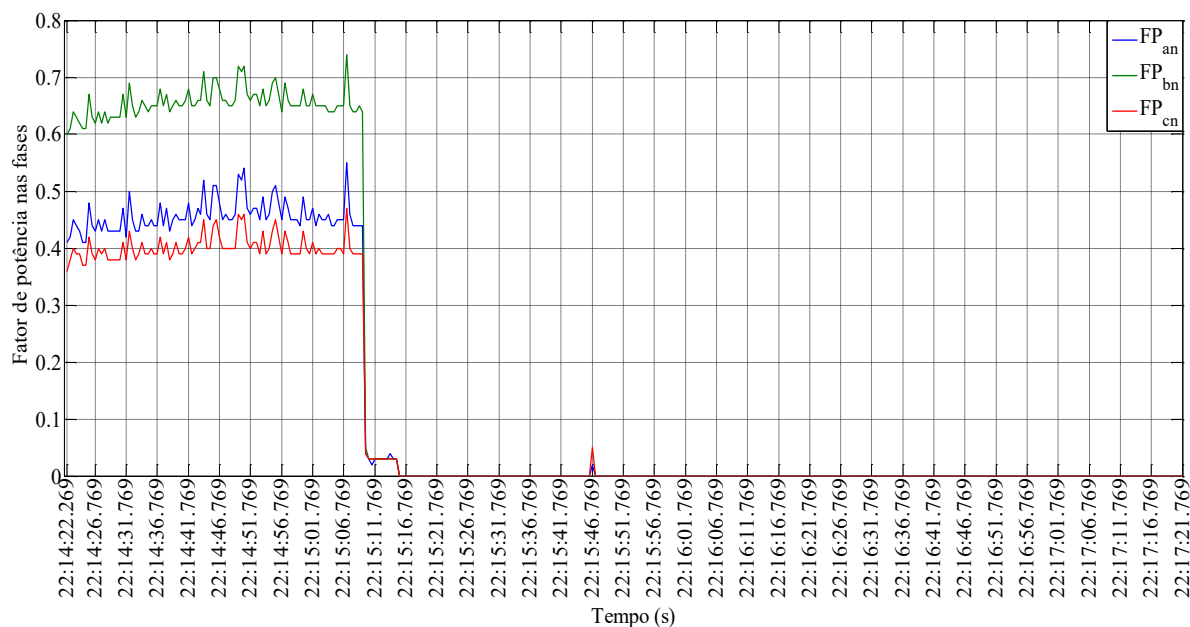
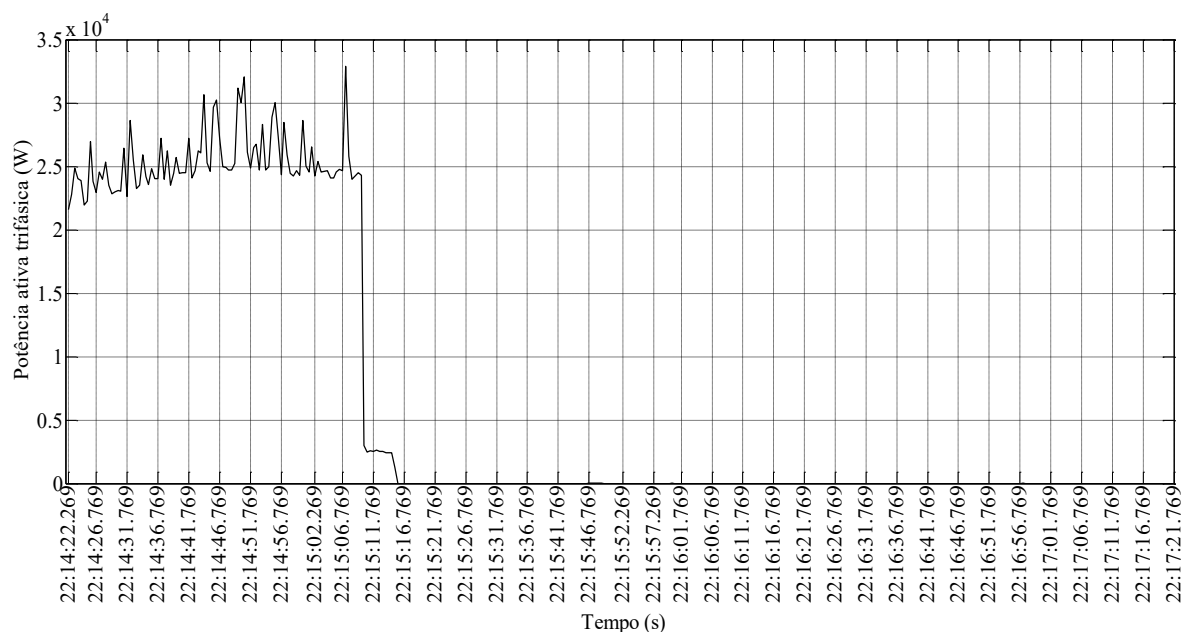


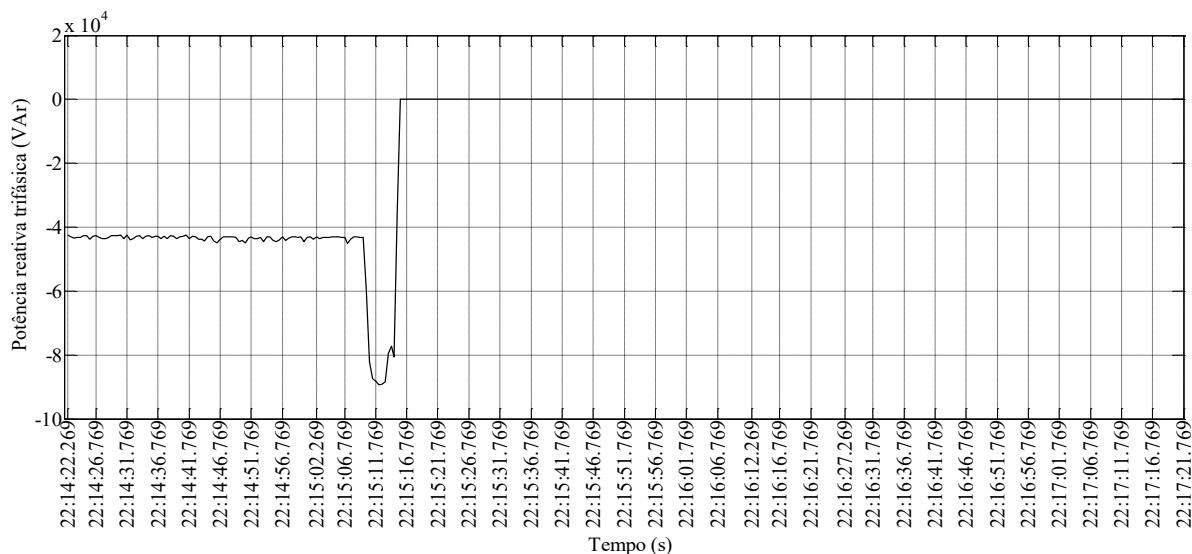
Figura 4.3.7– Potência ativa da instalação, ensaio experimental com banco de capacitores.



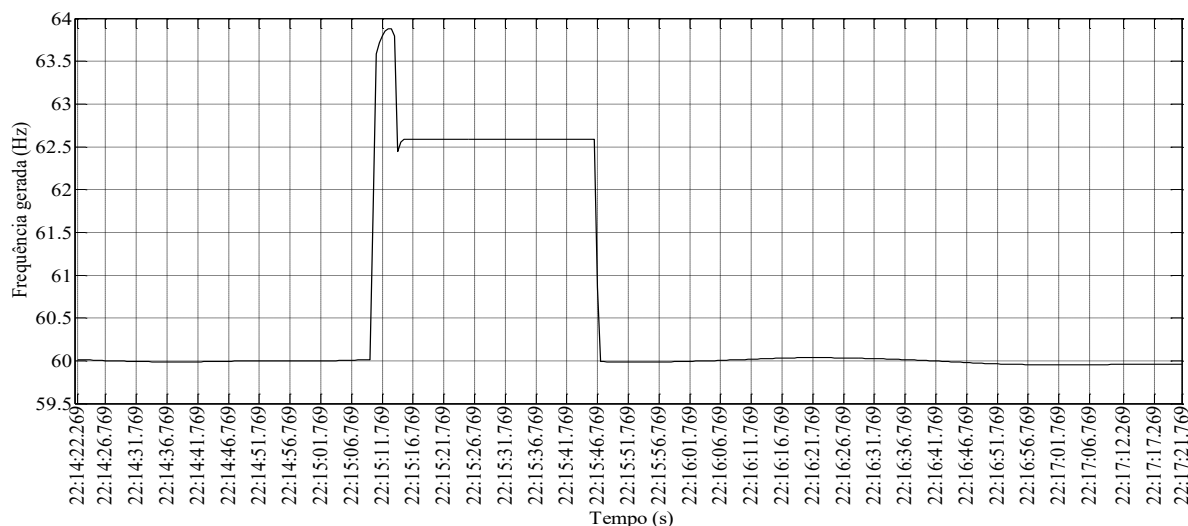
As Figuras 4.3.7, 4.3.8, mostram potência ativa e reativa trifásicas. Na ocasião do ilhamento, observa-se, para cada fase, o mesmo comportamento da potência ativa e da potência reativa. Em regime permanente, o gerador produz uma potência ativa em torno

de 27,5 kW. A potência reativa, suficiente para a magnetização do gerador é proveniente do banco de capacitores, é de aproximadamente 43 kVar.

Figura 4.3.8– Potência reativa da instalação, ensaio experimental com banco de capacitores



O comportamento da frequência é mostrado pela Figura 4.3.9. Em regime permanente a frequência gerada é próxima de 60 Hz, sendo imposta pela frequência da rede de distribuição. Após o ilhamento, a frequência sobe rapidamente devido a interrupção da entrega de potência ativa para rede. Com a rede desligada, o excesso de potência ativa resulta no aceleração da máquina e no aumento da frequência gerada. A frequência então cai quando o controle mecânico realiza o corte do biogás na máquina de combustão. No ilhamento, o controle mecânico pode limitar a velocidade ou desligar o motor a combustão levando a frequência a 0 como medida de segurança para uma sobre velocidade.

Figura 4.3.9– Frequência gerada, ensaio experimental com banco de capacitores

4.3.2 – Simulação computacional

A simulação computacional do gerador de indução com o banco de capacitores foi desenvolvida no Matlab/Simulink® e os parâmetros de entrada do gerador de indução e do transformador foram levantados a partir de ensaios para a determinação do circuito equivalente. Outros dados necessários para a simulação foram obtidos pelos fabricantes dos equipamentos (Anexo B). O diagrama elétrico da arquitetura do sistema elétrico experimental é representado agora pela Figura 4.3.10.

Figura 4.3.10 – Modelagem computacional, gerador de indução conectado à rede elétrica, simulação com banco de capacitores.

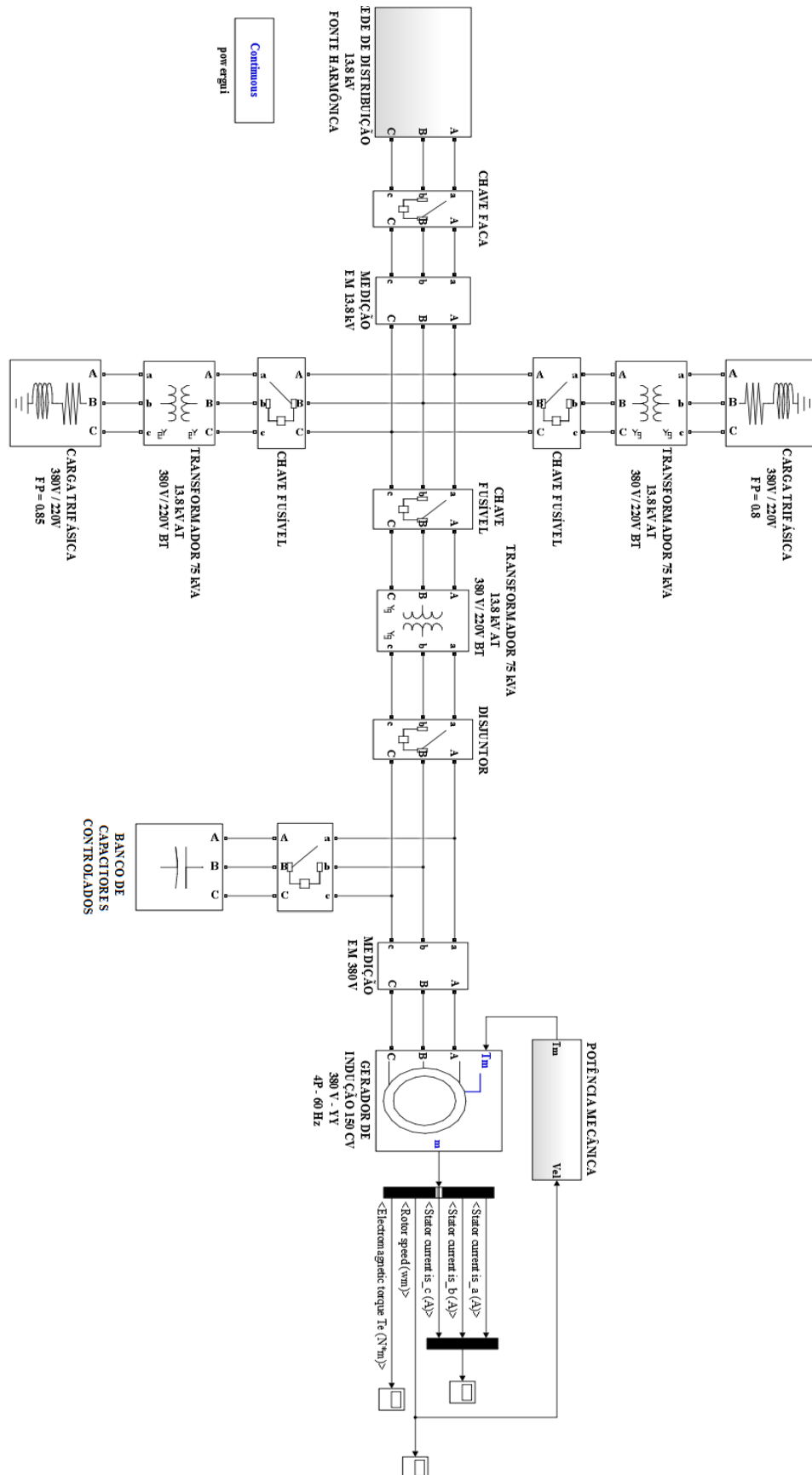


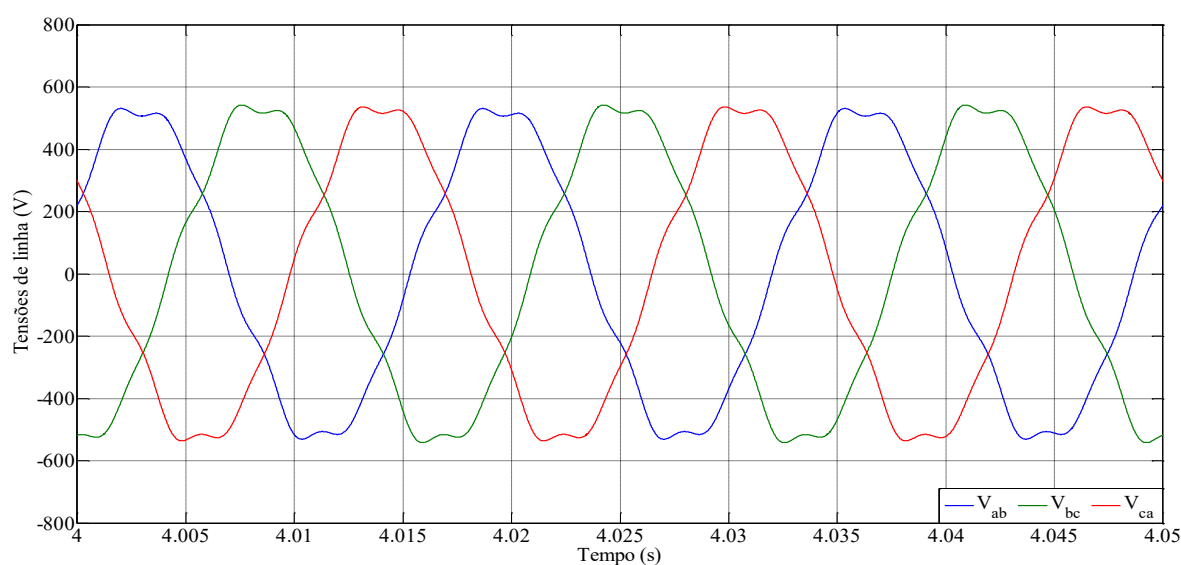
Tabela 4.3.1– Manobras realizadas na simulação, regime permanente do gerador de indução com banco de capacitores.

Tempo (s)	Chaveamentos (manobras)
0	Partida do sistema. Início da simulação.
0.01	Liga-se a chave faca e as chaves fusíveis, a rede elétrica alimenta as cargas locais e energiza o transformador do gerador de indução.
0.5	Liga-se disjuntor, gerador de indução opera em paralelo com à rede elétrica de distribuição.
5	Desliga o sistema. Fim da simulação

Dadas as manobras usadas na simulação pela Tabela 4.3.1. Não foi definido o tempo de 0.5s até 2s devido ao intervalo para a partida do gerador de indução com a rede de distribuição. Vale lembrar que os valores simulados para forma de ondas e espectros harmônicos para tensão e corrente estão em valores de pico.

A Figura 4.3.11 mostra a forma de onda das tensões de linha do gerador de indução, que está conectado a uma rede com harmônicos e desequilibrado.

Figura 4.3.401– Formas de onda das tensões de linha, simulação com banco de capacitores.



As Tabelas 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4 mostram a decomposição harmônica para as ondas das linhas AB, BC e CA, respectivamente.

Tabela 4.3.2– Decomposição da onda de tensão de linha, simulação com banco de capacitores, linha AB.

1^{th}	5^{th}	7^{th}
536,0	14,7	23,6

Tabela 4.3.3– Decomposição da onda de tensão de linha, simulação com banco de capacitores, linha BC.

1^{th}	5^{th}	7^{th}
547,0	14,7	23,5

Tabela 4.3.4– Decomposição da onda de tensão de linha, simulação com banco de capacitores, linha CA.

1^{th}	5^{th}	7^{th}
545,0	14,5	23,0

As formas de onda das tensões de fase são apresentadas na Figura 4.3.12. As Tabelas 4.3.5, 4.3.6 e 4.3.7 mostram a decomposição harmônica para as ondas das fases AN, BN e CN, respectivamente.

Figura 4.3.12– Formas de onda das tensões de fase, simulação com banco de capacitores.

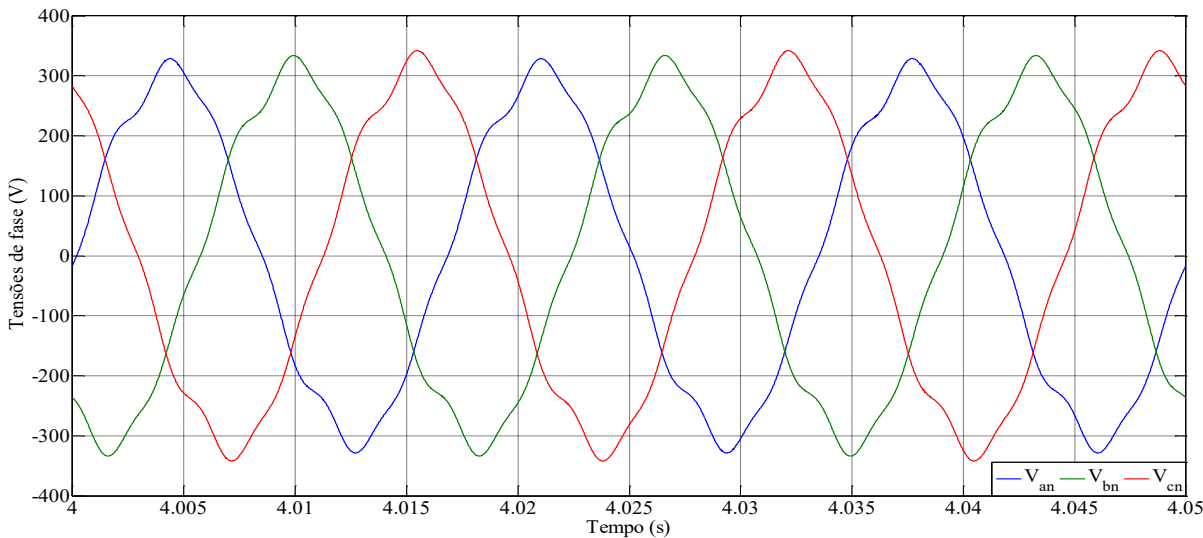


Tabela 4.3.5– Decomposição da onda de tensão de fase, simulação com banco de capacitores, fase AN.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
307,0	7,88	8,31	13,4	0,436

Tabela 4.3.6– Decomposição da onda de tensão de fase, simulação com banco de capacitores, fase BN.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
311,0	8,25	8,79	14,0	0,481

Tabela 4.3.7– Decomposição da onda de tensão de fase, simulação com banco de capacitores, fase CN.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
321,0	7,72	8,22	13,3	0,429

Os *DTT* das ondas de tensão de fase estão em torno de 5,75% a 5,86%, tais como obtidas no procedimento experimental. O *DTT* das ondas de tensão de linha é de aproximadamente 5,10%, variando pouco entre si, devido à pouca diferença entre as tensões de fase. Utilizando a equação (A.6) do Apêndice A, calcula-se os valores rms, considerando as componentes harmônicas. As Figuras 4.3.13 e 4.3.14 mostram os valores rms das tensões de linha e fase respectivamente.

Figura 4.3.13– Tensões de linha, simulação com banco de capacitores.

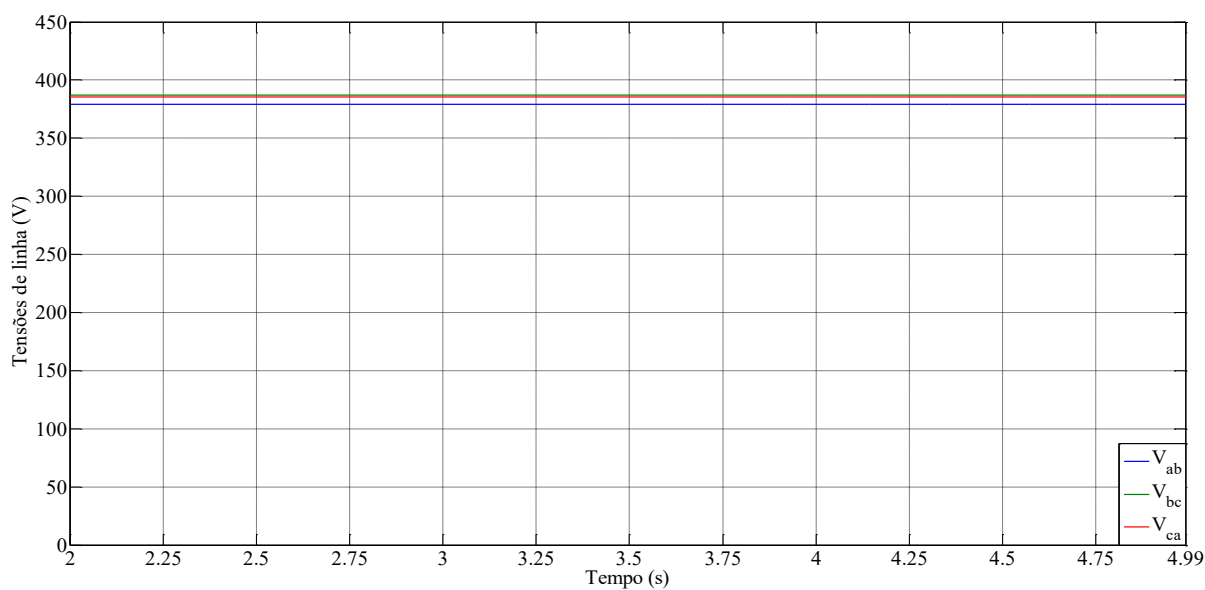
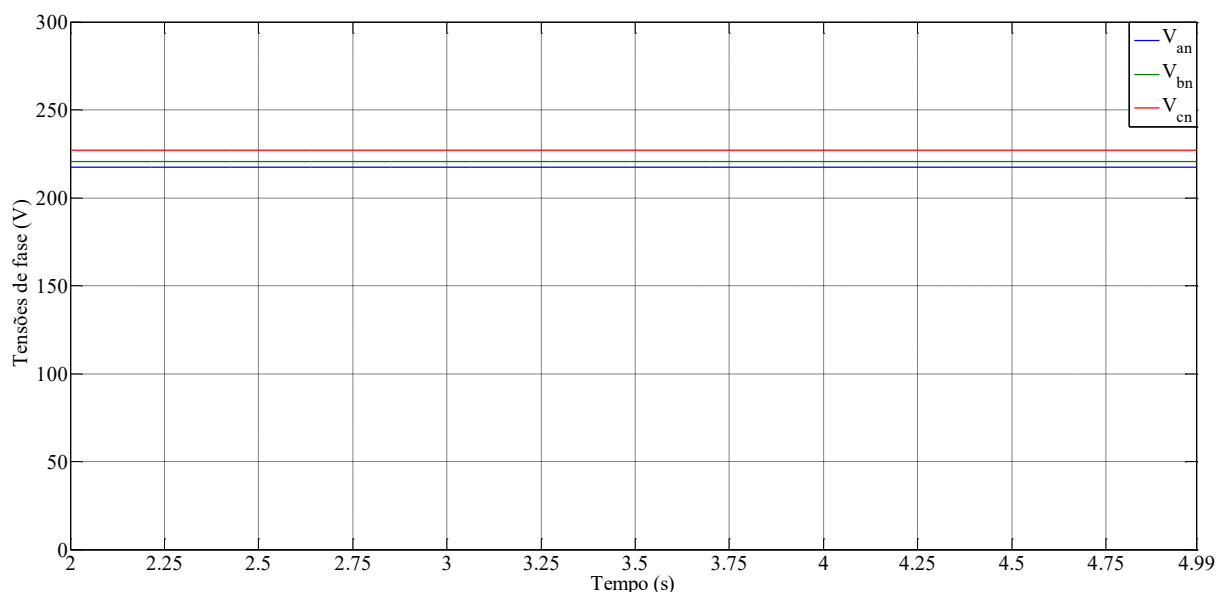


Figura 4.3.14 – Tensões de fase, simulação com banco de capacitores.

Utilizando a equação (A.9) nas tensões de fase ou a equação (A.12) nas tensões de linha, do Apêndice A, obtém-se o valor de desequilíbrio de tensão de aproximadamente 1,3%, conforme mostrado pela Figura 4.3.15. Esse valor do desequilíbrio de tensão é próximo do obtido no ensaio experimental, sendo que no ensaio experimental o desequilíbrio de tensão oscilava em torno de 1,2% a 1,5%. As formas de onda das correntes simuladas do gerador de indução com banco de capacitores são apresentadas pela Figura 4.3.16.

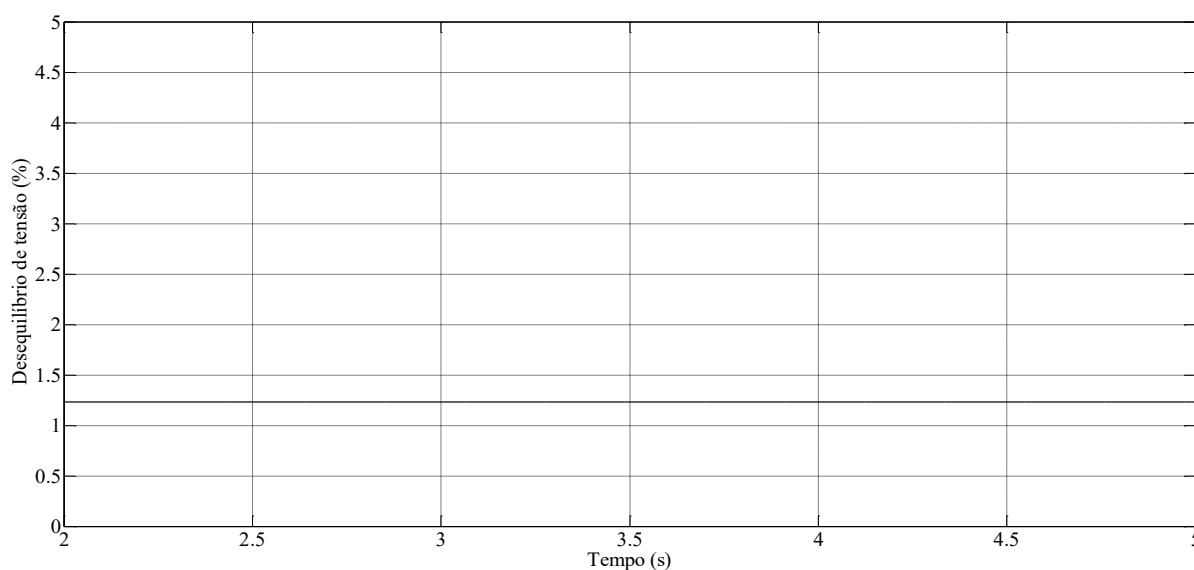
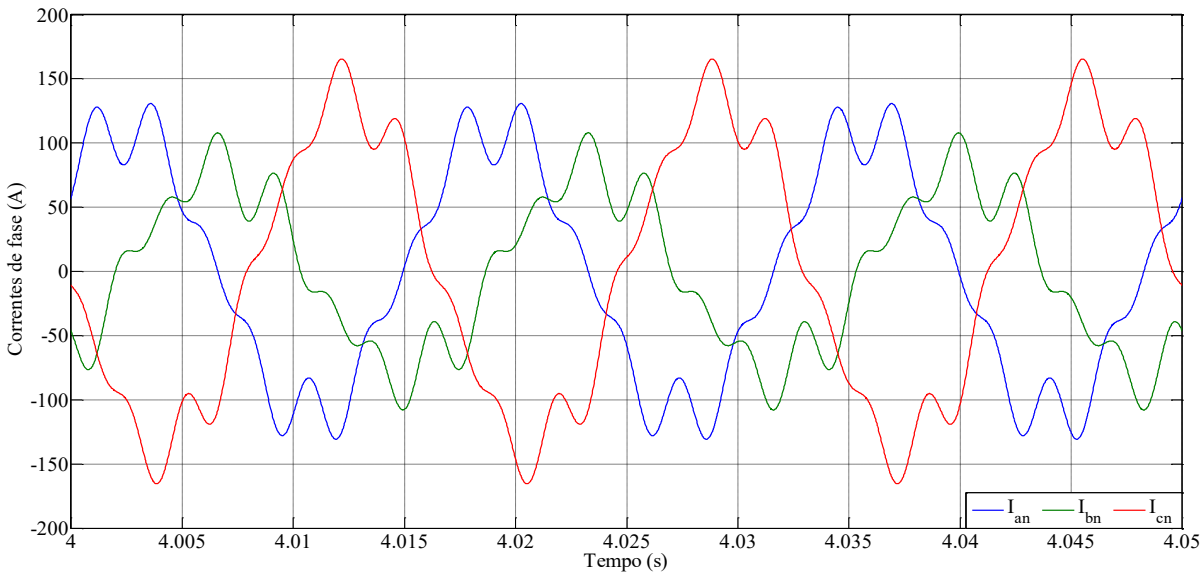
Figura 4.3.15 – Desequilíbrio de tensão, simulação com banco de capacitores.

Figura 4.3.16– Formas de onda das correntes de fase, simulação com banco de capacitores.



As Tabelas 4.3.8, 4.3.9 e 4.3.10 mostram a decomposição harmônica para as ondas da corrente de fase AN, BN e CN, respectivamente.

Tabela 4.3.8– Decomposição da onda de corrente de fase, simulação com banco de capacitores, fase AN.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
115,0	0,23	14,7	16,9	0,0

Tabela 4.3.9– Decomposição da onda de corrente de fase, simulação com banco de capacitores, fase BN.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
81,3	0,65	15,1	17,2	0,0

Tabela 4.3.10– Decomposição da onda de corrente de fase, simulação com banco de capacitores, fase CN.

1^{th}	3^{th}	5^{th}	7^{th}	9^{th}
139,0	0,47	14,7	16,9	0

Os *DTC* das correntes de fase AN, BN e CN, são respectivamente 19,54%, 28,21% e 16,06%, essa diferença de distorção harmônica de corrente de uma fase para outra, são ocasionadas devido às pequenas diferenças entre as distorções das tensões de fase. Observe que as ondas de tensões de linha e de fase possuem grandes semelhanças em sua forma de onda entre elas, diferentemente da forma de ondas de correntes.

Considerando a equação (A.5) do apêndice A, o *DTC* em sistemas desequilibrados, a componente fundamental pode influir na poluição harmônica, em outras palavras, mudar a forma de onda, como pode ser constado na Figura 4.3.16.

O desequilíbrio de corrente calculado na simulação utiliza a equação (A.11) nas correntes de fase. O valor do desequilíbrio de corrente é de aproximadamente 30,97%, conforme mostrado pela Figura 4.3.17. Os valores eficazes para as correntes simuladas podem ser vistos na Figura 4.3.18.

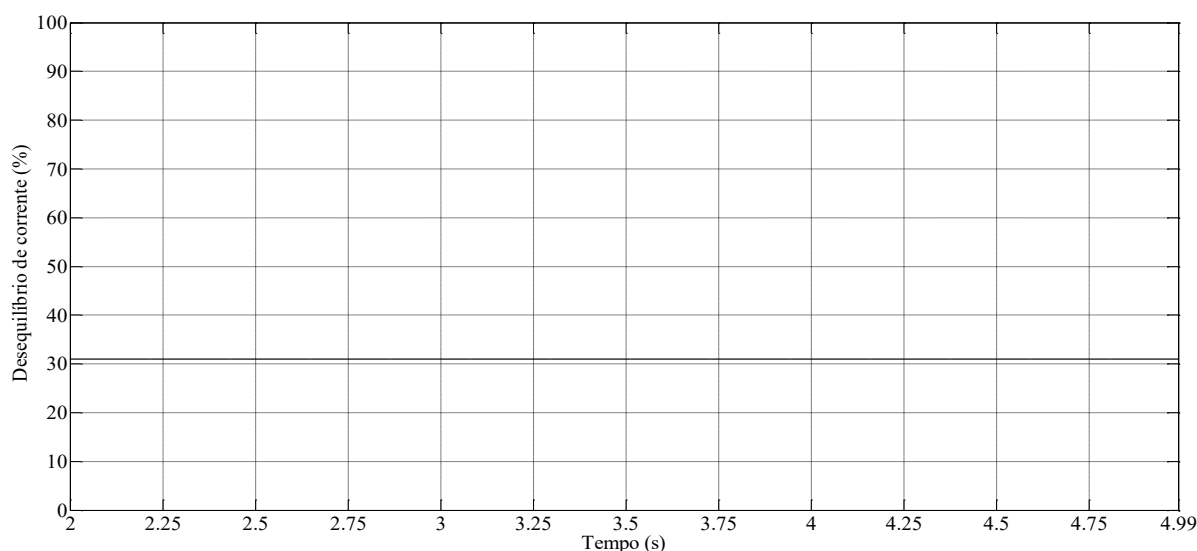
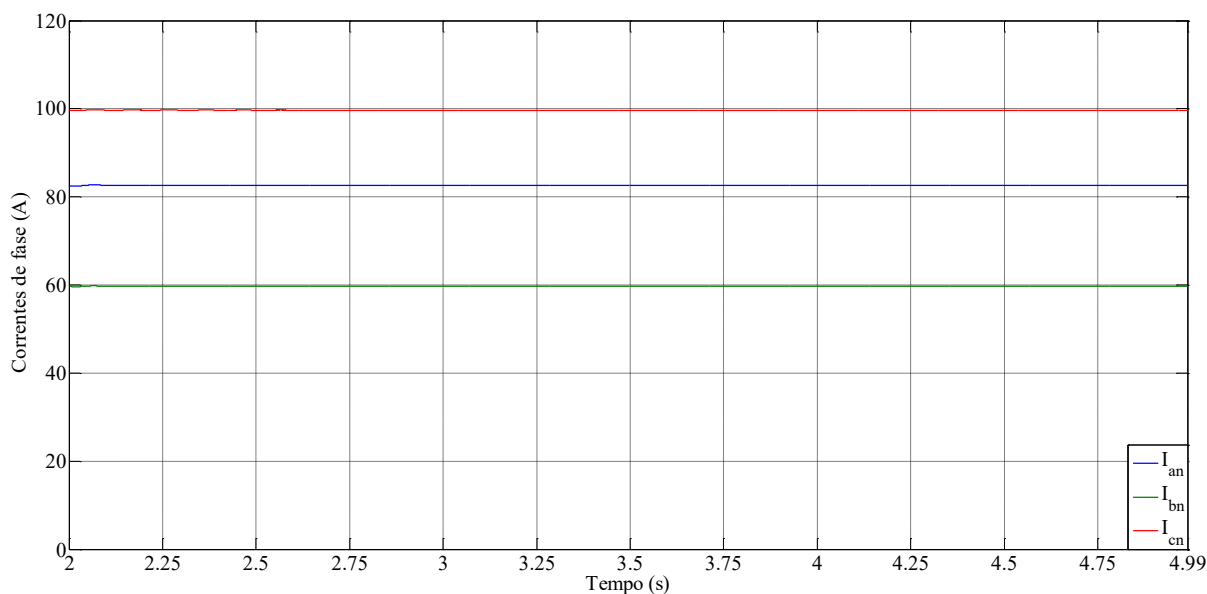
Figura 4.3.17– Desequilíbrio de corrente, simulação com banco de capacitores.

Figura 4.3.18– Correntes de fase, simulação com banco de capacitores (valores rms).

As potências ativas e reativas nas fases são mostradas pelas Figuras 4.3.19 e 4.3.20, respectivamente. Calcula-se então o fator de potência nas fases, ilustrado na Figura 4.3.21. Nota-se que devido à ausência da impedância desequilibrada da rede elétrica local, não foi possível realizar o desequilíbrio de potência nas fases. Na simulação, é usada uma fonte de tensão desequilibrada para representar o desequilíbrio da rede de distribuição.

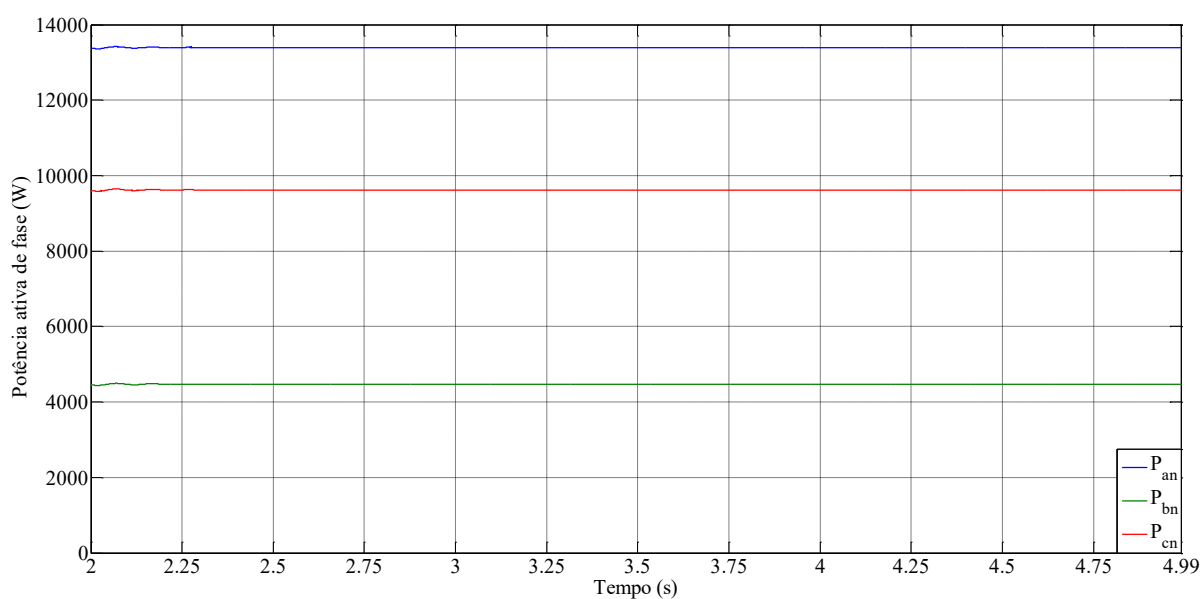
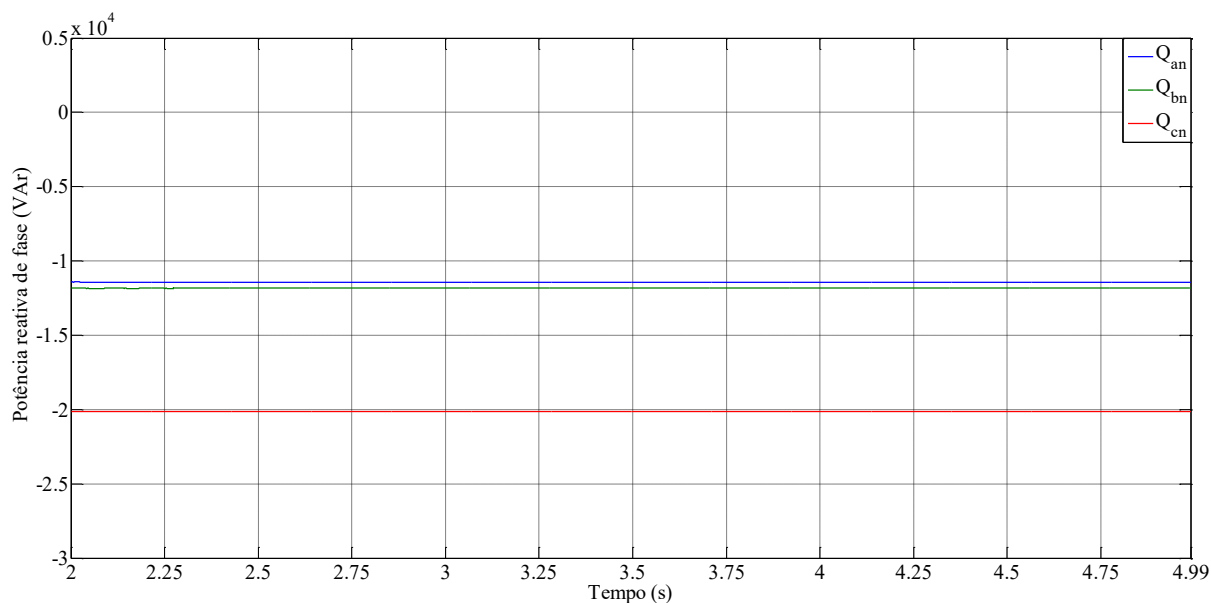
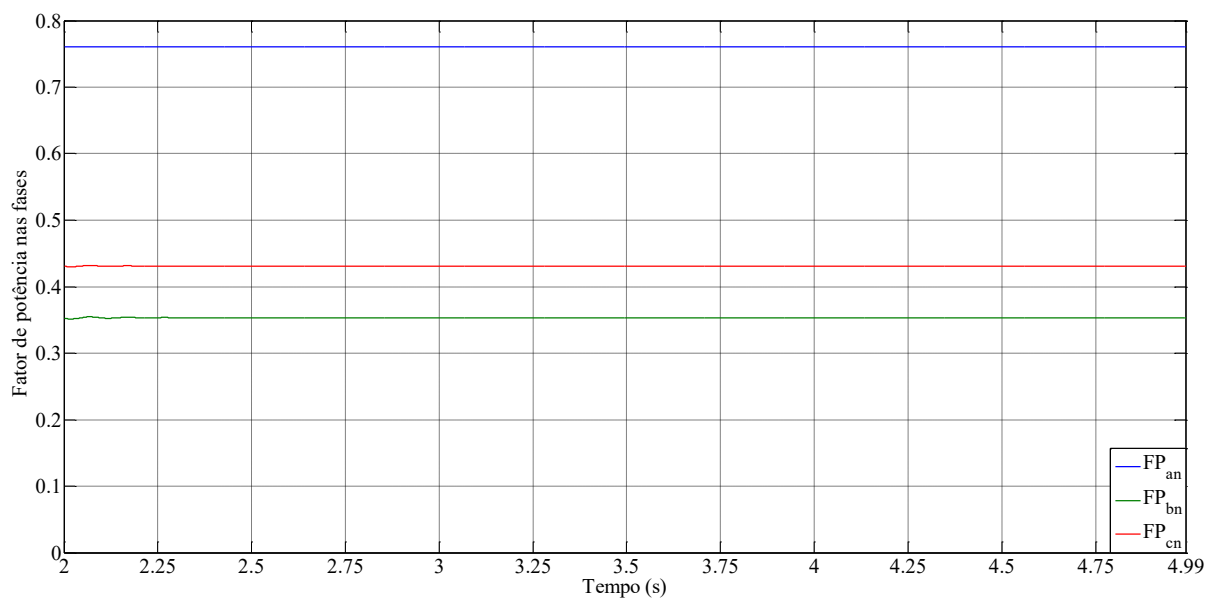
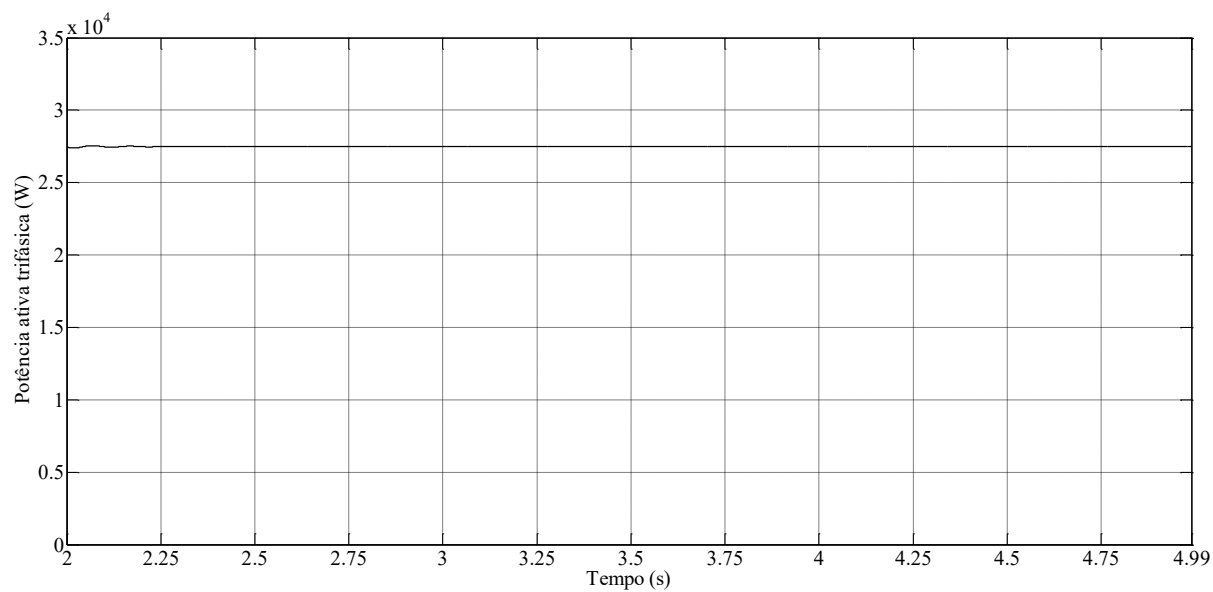
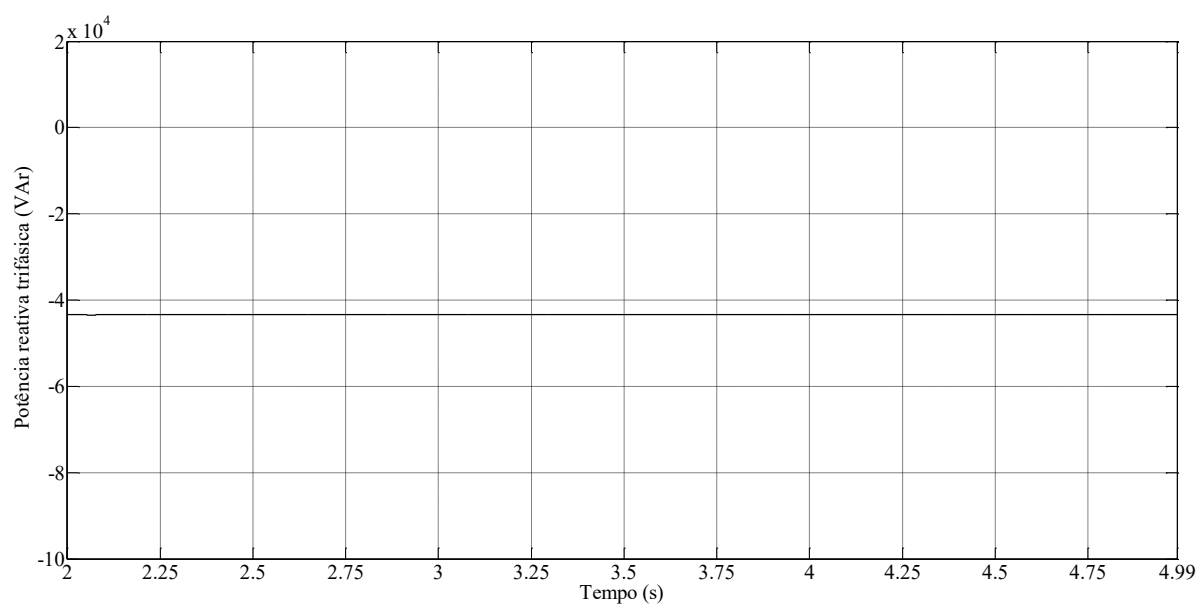
Figura 4.3.19– Potência ativa de fase, simulação com banco de capacitores.

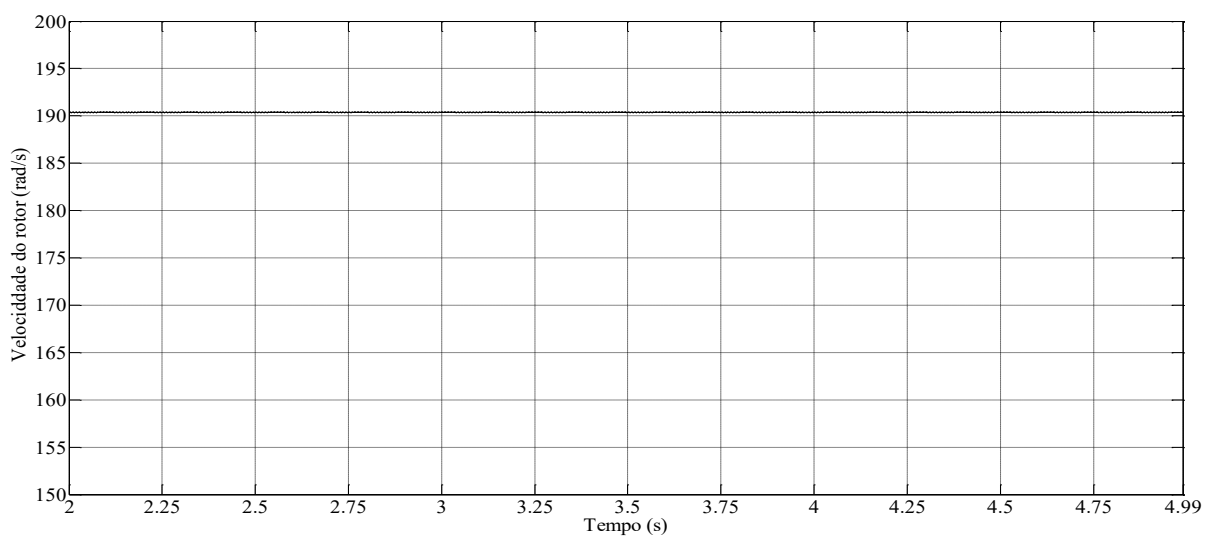
Figura 4.3.20– Potência reativa de fase, simulação com banco de capacitores.**Figura 4.3.21**– Fator de potência nas fases, simulação com banco de capacitores.

As Figuras 4.3.22, 4.3.23 mostram a potência ativa e a potência reativa da instalação, respectivamente. Vale destacar que a potência ativa gerada foi parametrizada no valor médio do obtido experimentalmente, em torno de 27,5 kW e a potência absorvida do banco de capacitores, aproximadamente 43,41 kVar.

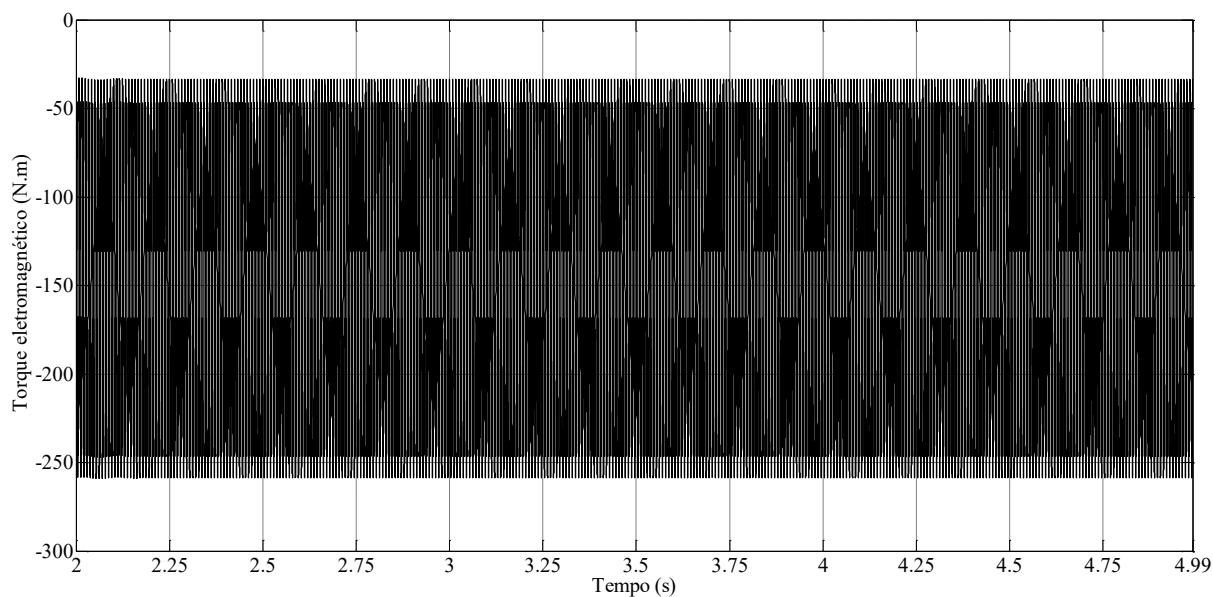
Figura 4.3.22– Potência ativa da instalação, simulação com banco de capacitores.**Figura 4.3.23**– Potência reativa da instalação, simulação com banco de capacitores.

Para entregar energia à rede, a velocidade do rotor do gerador de indução deve estar acima da velocidade síncrona, ou seja, acima de 188,5 rad./s. A velocidade do rotor, quando o gerador de indução está entregando 27,5 kW para a rede de distribuição pode ser visto na Figura 4.3.24. Como explicado no Capítulo 2, o escorregamento torna-se negativo quando o rotor opera acima da velocidade síncrona, indicando operação geradora. Para que o gerador entregue a potência nominal, um maior escorregamento é necessário.

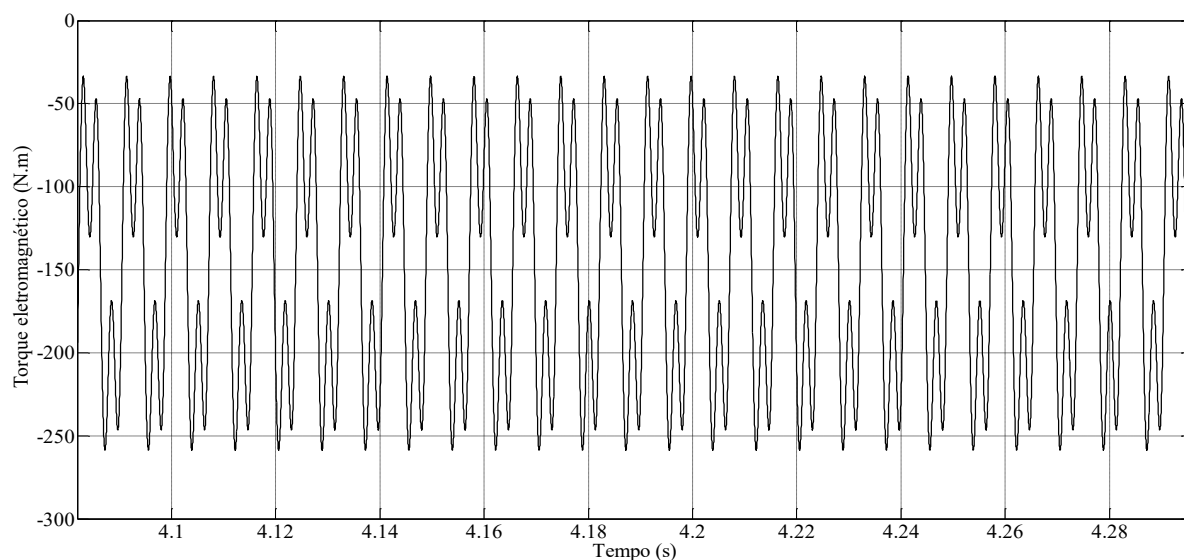
Figura 4.3.24– Velocidade do rotor, simulação com banco de capacitores.



O torque eletromagnético exercido pelo gerador de indução com a presença do banco de capacitores é mostrado pela Figura 4.3.25.

Figura 4.3.25 – Torque eletromagnético, simulação com banco de capacitores.

Aplicando um “zoom” é possível verificar a natureza do torque eletromagnético em um gerador de indução gaiola de esquilo, operando paralelamente em uma rede de distribuição com harmônicos e desequilíbrio.

Figura 4.3.26– Torque pulsante, simulação com banco de capacitores.

Mais detalhes sobre harmônicos em máquina rotativa encontram-se em outros estudos (ALVES, 2011), (LADJAVARDI; MASOUM; ISLAM, 2006), (ESCOBAR MARTINEZ;

DE LA ROSA, 2001), (FAN; LIAO, 2012) e (OLIVEIRA *et al.*, 2006). Em máquinas rotativas a componente de sequência negativa, resulta em um torque de dupla frequência. Maiores detalhes sobre o assunto podem ser encontrados em outras bibliografias: (OLIVEIRA *et al.*, 2006), (CHATTOPADHYAY; MITRA; SENGUPTA, 2011), (DAHAL; SALEHFAR, 2016), (LAIJUN CHEN *et al.*, 2015), (RAMOS *et al.*, 2012) e (HARLEY; MAKRAM; DURAN, 1987).

A análise das variáveis elétricas é observada nesse intervalo de tempo. O fato de desconectar a rede elétrica implica no mesmo fenômeno da rede elétrica ser desligada. O intuito do estudo do ilhamento do gerador de indução com banco de capacitores é verificar se o gerador de indução gera energia com a presença de um banco de capacitores.

Tabela 4.3.11– Manobras realizadas na simulação, ilhamento do gerador de indução com banco de capacitores.

Tempo (s)	Chaveamentos (manobras)
0	Partida do sistema. Início da simulação.
0,01	Liga-se a chave fca e as chaves fusíveis, a rede elétrica alimenta as cargas locais e energiza o transformador do gerador de indução.
0,5	Liga-se disjuntor, gerador de indução opera em paralelo com à rede elétrica de distribuição.
5	Desliga-se disjuntor, gerador de indução perde a rede elétrica.
10	Desliga o sistema. Fim da simulação

Dadas as manobras usadas na simulação pela Tabela 4.3.11, plota-se as variáveis elétricas para análise do ilhamento do gerador de indução trifásico no intervalo de 2s a 10s, quando o gerador se encontra em regime permanente, da sua partida, até o final da simulação. A Figura 4.3.27 mostra a tensão de linha durante o ilhamento.

Nota-se que, assim como obtido experimentalmente na Figura 4.3.1, a tensão de linha cresce devido ao excesso de reativo, quando do desligamento da rede elétrica. Outro fato interessante, assim como obtido no ensaio experimental é que o desequilíbrio cessa após o desligamento do disjuntor, já que a rede não impõe mais o desbalanceamento entre as fases, como pode ser visto na Figura 4.3.28. Isso vale para a poluição harmônica.

Figura 4.3.27– Tensões de linha durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.

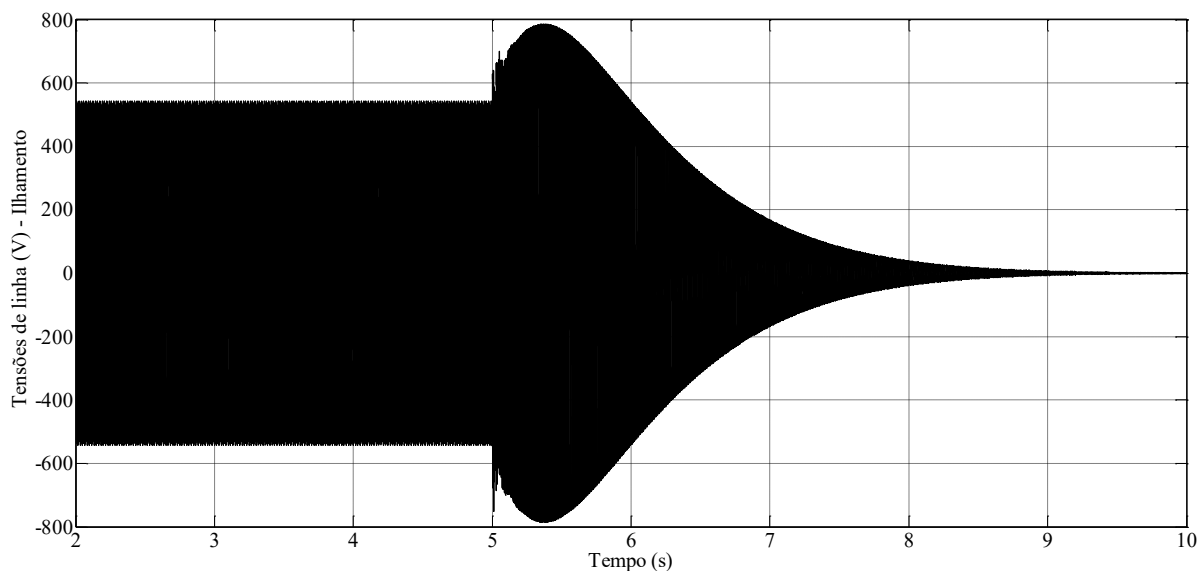
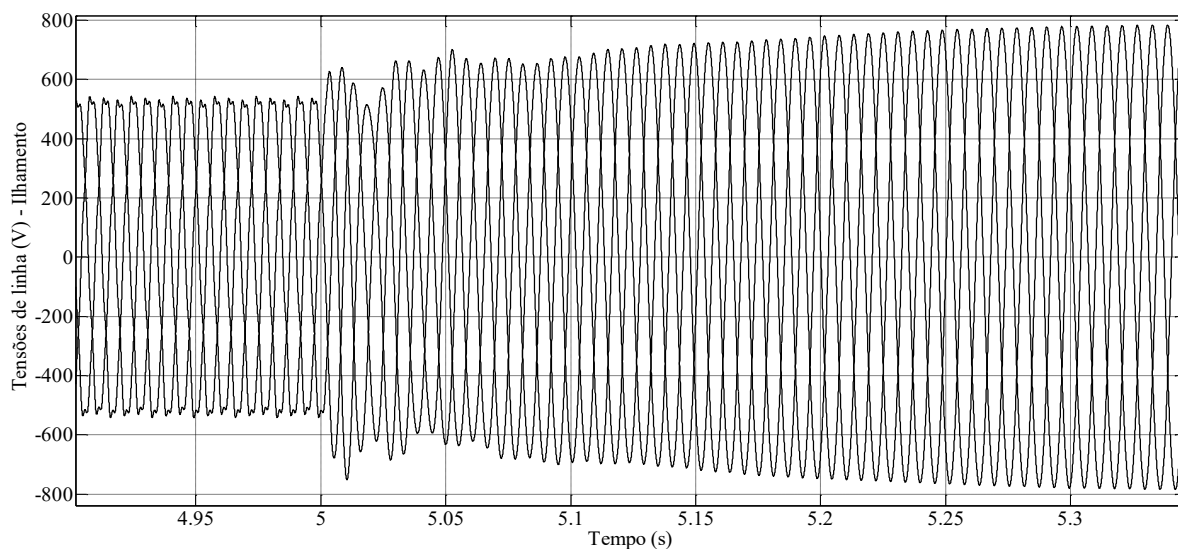


Figura 4.3.28– Tensões de linha após abertura do disjuntor, simulação com banco de capacitores.



As Figuras 4.3.29 e 4.3.30, mostram respectivamente, as tensões de fase durante o ilhamento e a redução significativa do desequilíbrio e harmônicos após o chaveamento.

Figura 4.3.29 – Tensões de fase durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.

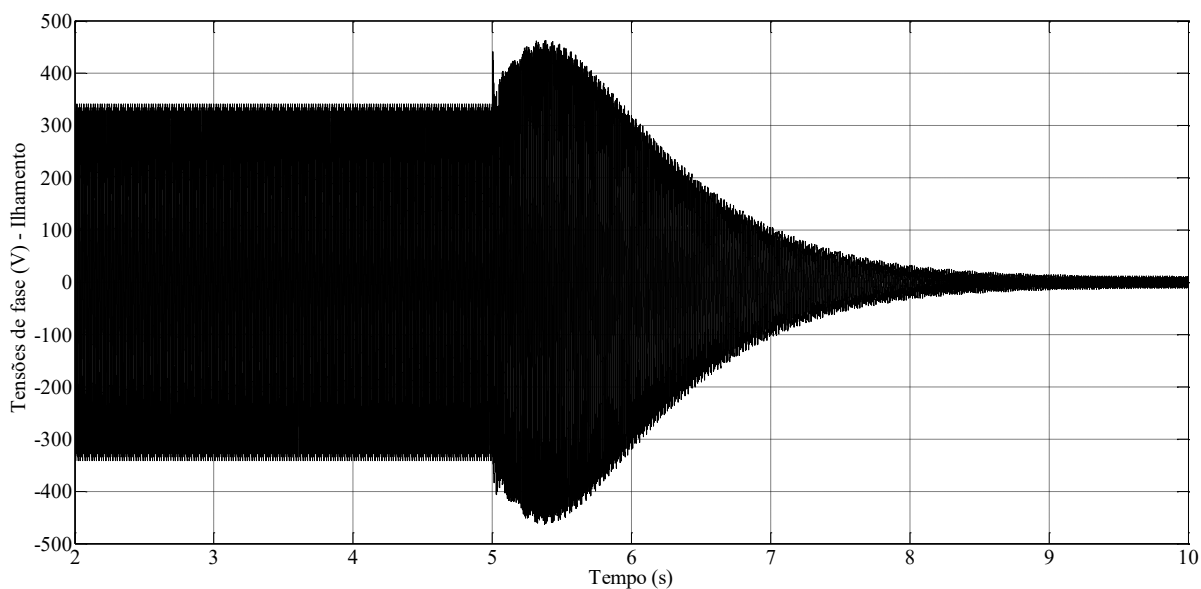
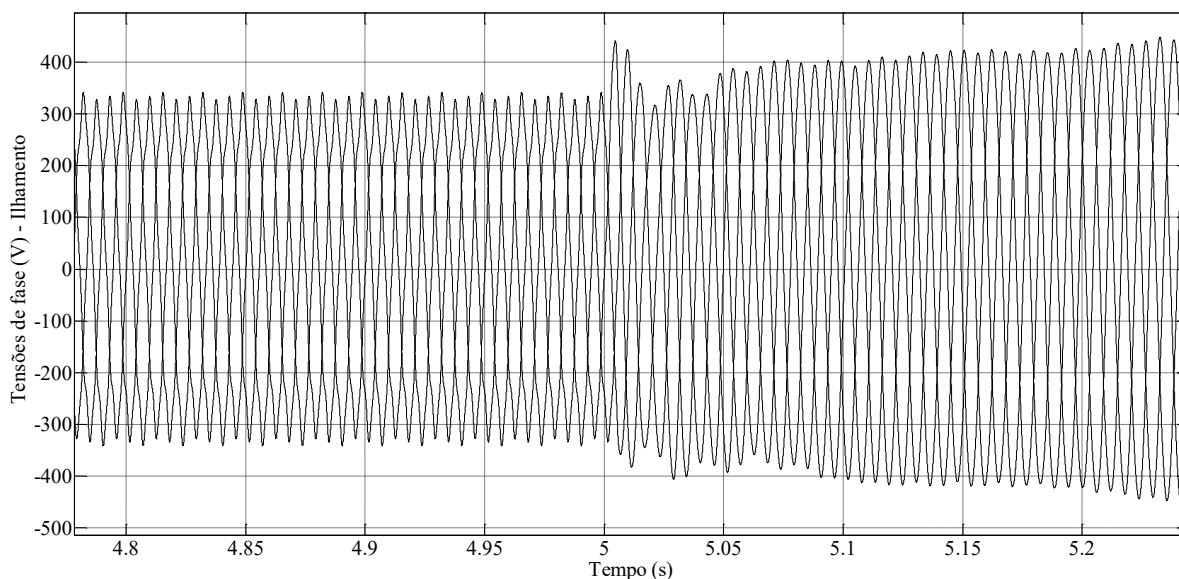


Figura 4.3.30– Tensões de fase após abertura do disjuntor, simulação com banco de capacitores.



A Figura 4.3.31 mostra o comportamento da corrente de fase do gerador de indução durante o processo de ilhamento. Percebe-se que no instante do ilhamento as correntes

ficam equilibradas e sem componentes harmônicas, assim como ocorre nas leituras de tensão de linha e de fase. Esse comportamento é mais bem visto na Figura 4.3.32.

Figura 4.3.31 – Corrente de fase durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores

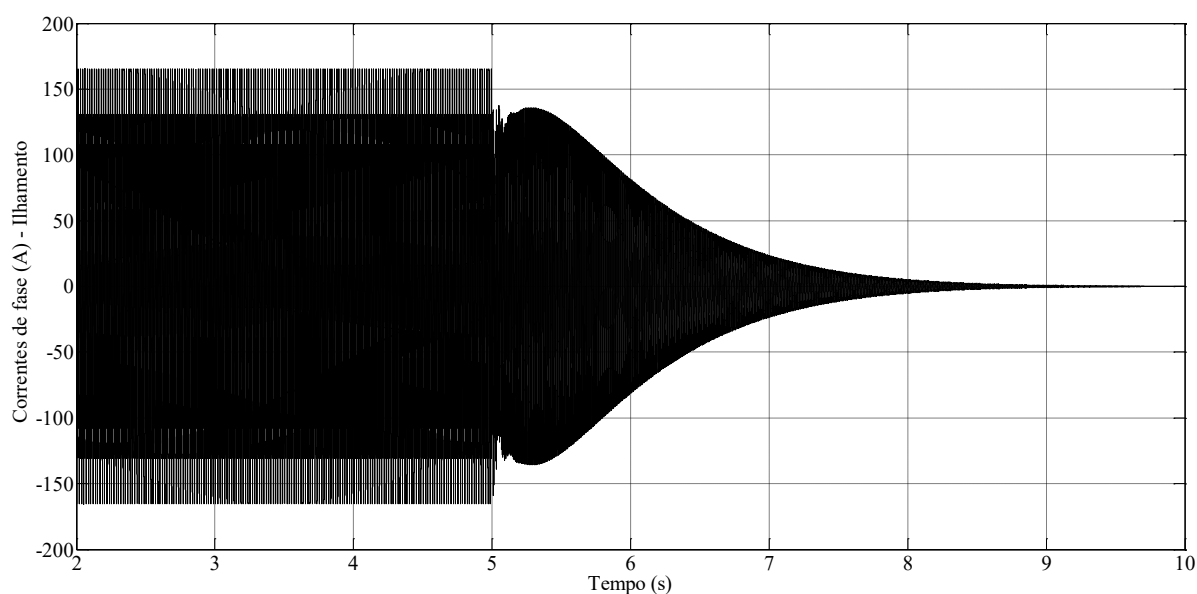
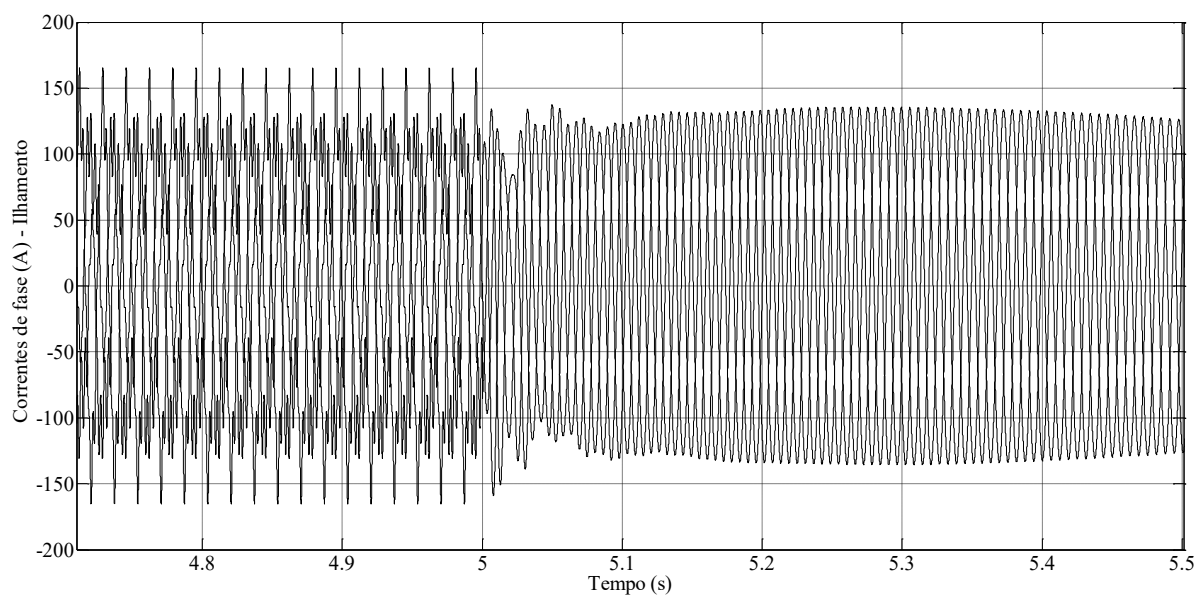


Figura 4.3.32 – Corrente após abertura do disjuntor, simulação com banco de capacitores.



As Figuras 4.3.33 e 4.3.34 mostram a potência reativa trifásica e de fase durante o ilhamento do gerador de indução, respectivamente. Observe que os valores e o

comportamento da curva de potência reativa mostram-se muito próximo das obtidas experimentalmente.

Figura 4.3.33– Potência reativa trifásica durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.

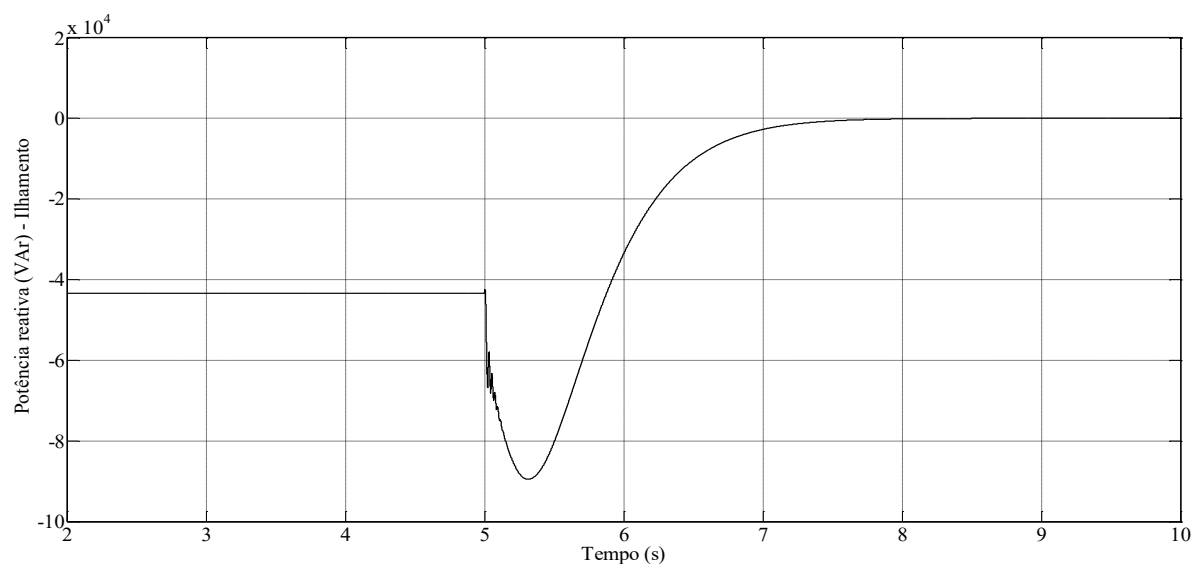
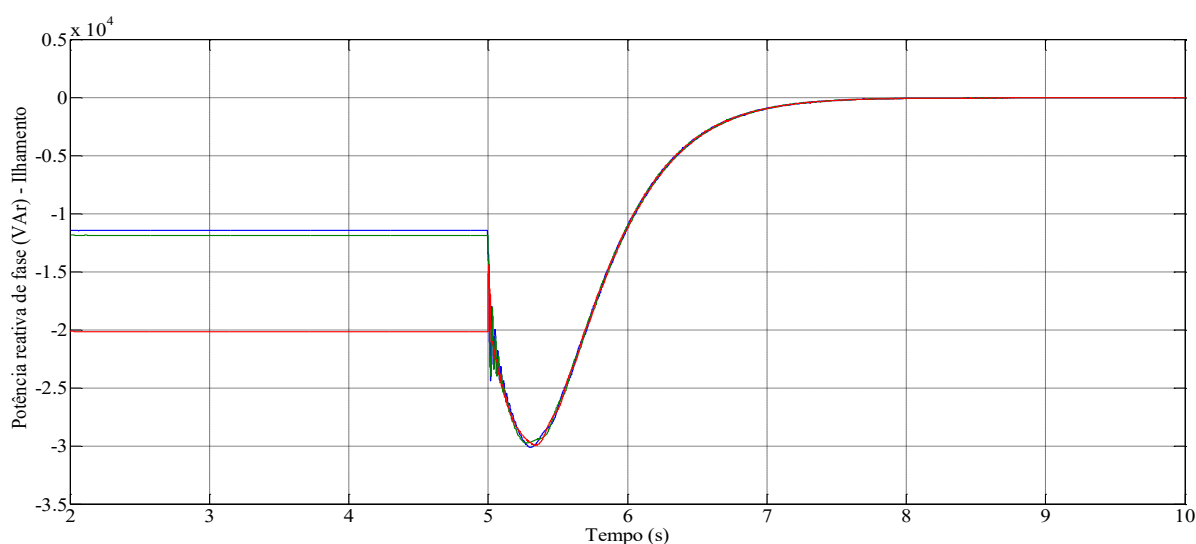


Figura 4.3.34 – Potência reativa de fase durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.

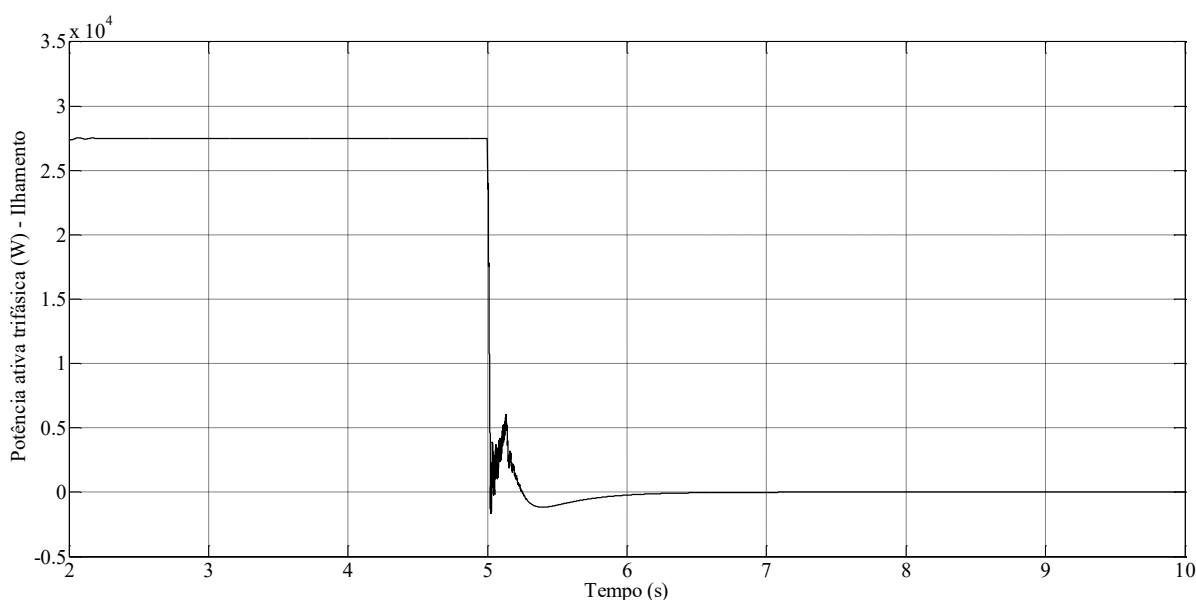


No instante da abertura do disjuntor, o gerador ainda possui uma pequena parcela de potência ativa. Como o banco é dimensionado para operação com a rede elétrica, este fato contribui para o aumento da tensão terminal, já que o rotor também irá acelerar. A tensão terminal gerada consequentemente aumenta. É um efeito duplo em que o excesso

de reativo e o aumento da rotação produzem esse significativo acréscimo na tensão terminal.

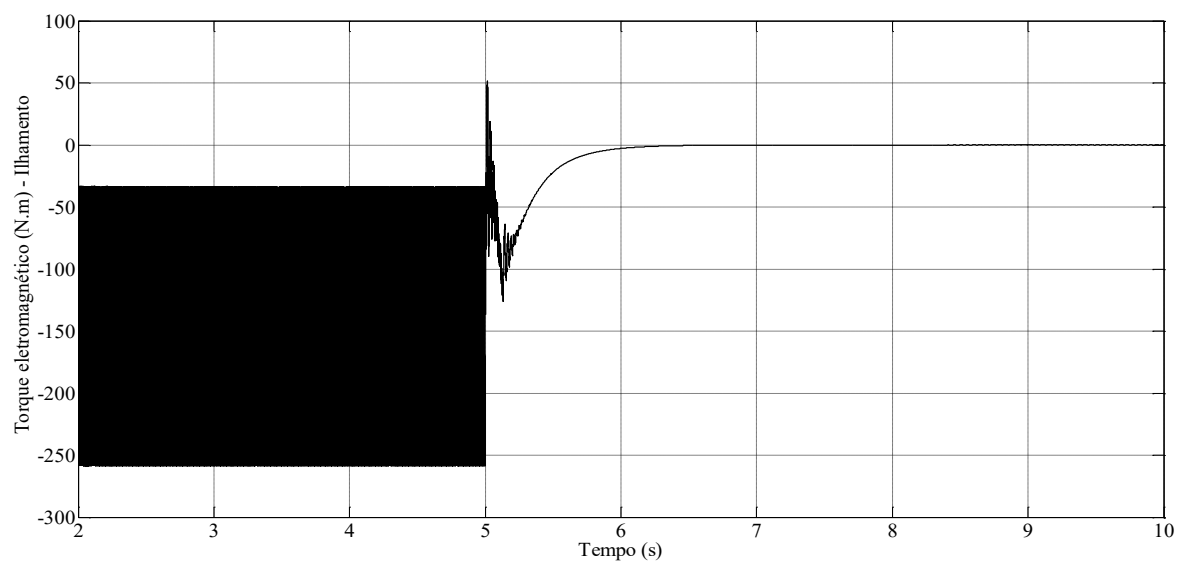
A Figura 4.3.35 mostra o comportamento da potência ativa da instalação durante o ilhamento. Nota-se que uma pequena parcela de potência ativa ainda é gerada, mas rapidamente a potência ativa gerada cai à zero.

Figura 4.3.35 – Potência ativa da instalação durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.



O torque eletromagnético durante o ilhamento é mostrado pela Figura 4.3.36. Quando o disjuntor é aberto, um torque eletromagnético é exercido, responsável pelo aceleração do rotor, consequência de uma parcela de potência ativa gerada devido à potência mecânica não ser cortada, ou seja, pertinente ao atraso do controle mecânico. Como constado nas tensões e correntes, o torque deixa de ser pulsante devido o gerador de indução não estar mais exposto ao desequilíbrio e as componentes harmônicas presente na rede de distribuição.

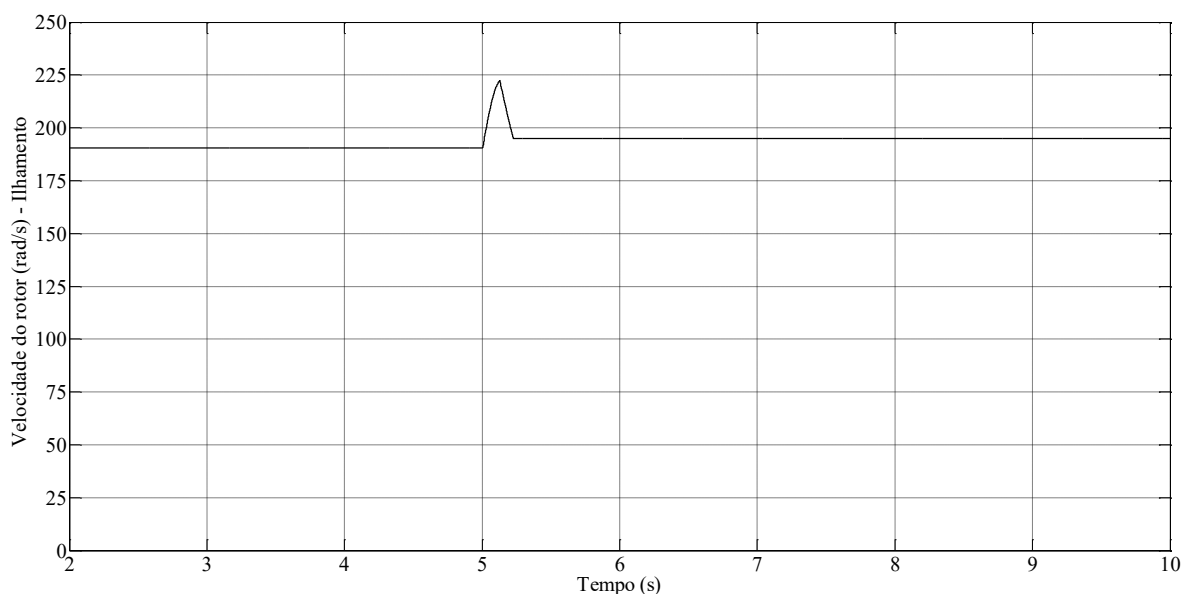
Figura 4.3.36 – Torque eletromagnético durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.



Logo após a potência ativa gerada se aproximar de zero, o torque eletromagnético cai também à zero.

No instante do ilhamento o rotor acelera devido à carga não estar mais presente com a ausência da rede. Isto ocorrerá até a ação do controle mecânico. O comportamento da velocidade do rotor do gerador de indução durante o ilhamento é apresentado na Figura 4.3.37.

Figura 4.3.37 – Velocidade do rotor durante o ilhamento, simulação com banco de capacitores.



4.5 – Considerações finais

A análise teórico-experimental foi realizada neste capítulo para o gerador de indução tipo gaiola conectado a uma rede elétrica de distribuição rural com a presença de um banco de capacitores. O estudo minucioso das variáveis elétricas foi apresentado na simulação computacional a partir da parametrização dos resultados obtidos nos procedimentos experimentais. O gerador de indução opera em uma rede de distribuição rural com alto índice de desequilíbrio e poluição harmônica. Esses efeitos foram considerados também na simulação computacional por meio da modelagem de uma fonte de tensão trifásica, harmônica e desequilibrada.

Os resultados da desmagnetização comprovam o fator de segurança do gerador assíncrono quando ilhado, ou seja, quando a rede elétrica de distribuição se encontra desligada seja por problemas técnicos ou por manutenções programadas, o gerador de indução desmagnetiza-se mesmo com a presença de banco de capacitores como mostrado nos resultados teórico-experimentais.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões

■ O projeto para o aproveitamento do biogás proveniente da suinocultura para a geração de energia com o uso do gerador assíncrono mostrou-se sustentável e economicamente vantajoso. Os ganhos ambientais e financeiros estão interligados, uma vez que o biogás é produzido naturalmente na cadeia produtiva da suinocultura. Com a queima do biogás pode-se diminuir a ação nociva à atmosfera tendo em vista que dióxido de carbono é menos poluente que o metano. A aplicação do gerador assíncrono torna os custos de instalação, expansão e substituição mais barata devido ao seu menor custo de aquisição.

■ Na geração síncrona, o ilhamento deve ser feito por dispositivos de controle e proteção. O gerador síncrono possui um enrolamento de campo próprio, gerando sempre tensão terminal, devendo ser desconectado da rede elétrica pelo fator de segurança. Em se tratando da geração assíncrona distribuída, nenhum sistema de controle e proteção se mostra necessário. O gerador de indução se desmagnetiza quando a rede é interrompida, não gerando tensão terminal após poucos segundos do ilhamento com ou sem a presença do banco de capacitores. Conforme foi validado no comparativo teórico-experimental.

■ As granjas de suínos são instaladas longe dos centros urbanos e são alimentadas por redes de distribuição rural que possuem grandes extensões e muitos clientes monofásicos. Isso torna o desequilíbrio de tensão e corrente demasiadamente alto conforme foi mostrado pelos ensaios realizados em campo.

■ As cargas elétricas atuais são em sua maioria não lineares sendo responsáveis pela geração de harmônicos. Este efeito em regime não senoidal irá se refletir na forma e operação do gerador, tal como: queda do rendimento e do fator de potência e maior aquecimento e instabilidades. Tais anomalias refletirão no aumento do

estresse térmico e dielétrico. Quando a poluição harmônica e os desequilíbrios de tensão e corrente estão presentes, os geradores assíncronos sofrerão além das anomalias citadas, uma pulsação significativa no torque eletromagnético. A natureza desta pulsação é de dupla e sexta frequência, provocadas pelas componentes harmônicas de quinta e sétima ordem e pela componente de sequência negativa, conforme mostram as simulações computacionais.

■ A comprovação dos resultados teórico-experimentais demonstrou que o uso da tecnologia assíncrona na geração distribuída possui grande viabilidade técnica e de segurança. Estas características vantajosas da utilização do gerador assíncrono levantam uma recomendação para que as distribuidoras de energia possam normatizar sua aplicação na geração distribuída como indicativo de projeto e requisito de segurança.

5. 2 – Afirmações operacionais relevantes

■ O gerador de indução é instalado como se fosse um motor (a chave magnética para operar o sistema e um relé térmico para a proteção). A dispensa de outros relés exigidos no gerador síncrono se deve ao fato do gerador de indução ser passivo, ou seja, quando cai a energia da rede elétrica, o gerador deixa de gerar. É conveniente lembrar que ele não serve como gerador de emergência principal, mas desperta grande interesse nas concessionárias de energia pelo fator segurança, evitando uma alimentação acidental da rede de média tensão da concessionária.

■ Recomenda-se a instalação de um relé direcional de potência contra a motorização do gerador de indução caso a velocidade da máquina a biogás fique menor que a velocidade síncrona.

■ Recomenda-se a instalação de um relé de proteção contra a sobre velocidade. O ilhamento produzirá uma alta rotação na máquina acarretando sérios problemas mecânicos.

■ O motor a biogás, o gerador assíncrono e o quadro de comando e proteção irão ser instalados em localidades distantes, carentes de mão de obra especializada e sem grandes recursos técnicos. A sua simplicidade satisfaz por completo a necessidade

do consumidor, garantindo uma operação contínua com baixa manutenção eletromecânica;

■ A geração distribuída melhora o nível da tensão nas redes rurais. Elas possuem como característica o desequilíbrio das tensões e das correntes ocasionadas pelas grandes extensões territoriais e pelo grande número de unidades consumidoras monofásicas. Estas características elétricas negativas se tornam mais incisivas devido à falta de controle e investimentos por parte das concessionárias.

■ A indústria brasileira necessita urgentemente melhorar os motores a biogás. Hoje temos somente motores com tecnologia diesel adaptados para biogás, produzindo um número excessivo de paradas. O misturador de biogás e ar atmosférico sofre a ação oxidante devido à utilização de materiais inadequados.

■ O motor a biogás possui as instalações eletroeletrônicas convencionais não levando em consideração o ambiente corrosivo produzido pelo biogás, ocasionando falsos contatos, alarmes e paradas indesejadas. Estas constantes e persistentes ocorrências foram incrementadas pelo painel elétrico do motor estar fixado no chassi da máquina, sofrendo com a trepidação e o número exorbitante de réguas de bornes expostas a corrosão.

■ A casa do gerador deve ser o mais distante possível dos biodigestores minimizando a ação corrosiva do gás. Caso seja inevitável, devem-se utilizar materiais adequados a ambientes explosivos e corrosivos.

■ O motor a biogás não sofreu corrosão mecânica graças ao filtro de limalha de ferro e carvão ativado diminuído a ação corrosiva do biogás. Recomenda-se a instalação de um purgador para a retirada da água do filtro aumentando a sua vida útil e melhorando a queima do biogás.

■ Recomenda-se que o duto do gás metano seja externo, sob cavaletes, evitando o pisoteio de animais e facilitando a vistoria e a manutenção. A rede exposta diminui a produção de água e com inclinação de 3% evita que a água obstrua a rede. Podemos instalar pequenos reservatórios com purgadores automáticos no transcorrer da rede.

■ O duto de metano deve ser feito quase que na sua totalidade de polietileno de

alta densidade. Deve-se lembrar de que dez metros antes e depois do pressurizador recomendam-se a utilização de tubo galvanizado pesado para suportar a alta temperatura produzida no processo de pressurização.

5.3– Sugestões para trabalhos futuros

Para esta linha de pesquisa, as seguintes propostas para trabalhos futuros são sugeridas:

- Estudo em regime permanente não senoidal do gerador assíncrono, detalhando especificamente as perdas e perturbações provocadas pela distorção harmônica;
 - Estudo em regime permanente e desequilibrado, detalhando especificamente as perdas e perturbações provocadas pela componente de sequência negativa;
 - Realizar o estudo da estabilidade transitória dinâmica, envolvendo faltas de fase, curto-circuito fase-terra, curto-circuito trifásico, dentre outras eventualidades;
 - Desempenho e confiabilidade de grupos-gerador de indução acionados por outras fontes de energia primária.
-

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Manoel Berto. Análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal. 2011. 180 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14341>>.

ANAGREH, Yaser N.; AL-REFAE'E, Imadden M. Teaching the Self-Excited Induction Generator Using Matlab. International Journal of Electrical Engineering Education, v. 40, n.1, p. 55-65, 24 Jan. 2003. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.7227/IJEEE.40.1.6>>. <https://doi.org/10.7227/IJEEE.40.1.6>

ARABACI, Hayri. Analysis of effects of prime mover speed and exciting capacitor value on output voltage of generator of self-excited squirrel cage induction generator. Jun. 2014, IEEE, Jun. 2014. p. 12-13. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6893250/>>. <https://doi.org/10.1109/ICCTPEA.2014.6893250>

AVELLAR, L. H. N. A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental. 2001. 111 f. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, SP, 2001.

BANSAL, R.C. Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 20, n. 2, p. 292-299, Jun. 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1432840/>>. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.842395>

BEAULIEU, G. et al. Power quality indices and objectives. Ongoing activities in CIGRE WG 36-07. 2002, IEEE, 2002. p. 789-794. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1043433/>>.

BEBBINGTON, Jan; RUSSELL, Shona; THOMSON, Ian. Accounting and sustainable development: Reflections and propositions. Critical Perspectives on Accounting, Jul. 2017.

Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S104523541730062X>>.
<https://doi.org/10.1016/j.cpa.2017.06.002>

BJORNSTEDT, J.; SAMUELSSON, O. Voltage and frequency control for island operated induction generators. 2008, IEE, 2008. p. 79-79. Disponível em: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ic_20080484>.
<https://doi.org/10.1049/ic:20080484>

<https://doi.org/10.1049/ic:20080484>
<https://doi.org/10.1049/ic:20080484>

BLACKBURN, J. Lewis. Symmetrical Components for Power Systems Engineering (Electrical and Computer Engineering). 1º Edition. New York, EUA: CRC Press, 1993.

BOLDEA, Ion. Synchronous generators (The Electric Generators Handbook). 1º edition. Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.

BOLDEA, Ion. Variable Speed Generators (The Electric Generators Handbook). 1º Edition. Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
<https://doi.org/10.1201/9781420037265>

<https://doi.org/10.1201/9781420037265>
<https://doi.org/10.1201/9781420037265>

BOSSINK, Bart A.G. Demonstrating sustainable energy: A review based model of sustainable energy demonstration projects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 77, p. 1349-1362, Sep. 2017. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117302010>>.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.002>

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.002>
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.002>

BOUCHIBA, Nouha; SALLEM, Souhir; KAMMOUN, M. B. A. Three-phase self-excited induction generator analysis in stand-alone mode. Mar. 2015, IEEE, Mar. 2015. p. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7110925>>.

<https://doi.org/10.1109/IREC.2015.7110925>

<https://doi.org/10.1109/IREC.2015.7110925>

<https://doi.org/10.1109/IREC.2015.7110925>

CALDERÔN, JUAN EBEGARDO GUZMÁN. Uma contribuição ao estudo da dinâmica do gerador de indução auto-excitado com regulador estático. 1983. 66 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 1983.

CÉSAR, Álvaro Paulino. Otimização de alocação de fontes de geração distribuída em redes de distribuição de média tensão. 2009. 137 f. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais., 2009. Disponível em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngEletrica_CesarAP_1.pdf>.

CHAPALLAZ, Jean-Marc et al. 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. 1^o Edition. Eschborn, HESSE, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1992.

<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>

<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>

<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>

CHATTOPADHYAY, Surajit; MITRA, Madhuchhanda; SENGUPTA, Samarjit. Electric Power Quality. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-0635-4>>. (Power Systems).

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>

COELHO, Suani Teixeira et al. Atlas de Bioenergia do Brasil - Projeto Fortalecimento Institucional do Centro Nacional de Referência em Biomassa. . CENBIO, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://143.107.4.241/download/atlas_cenbio.pdf>.

DAHAL, Samir; SALEHFAR, Hossein. Impact of distributed generators in the power loss and voltage profile of three phase unbalanced distribution network. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 77, p. 256-262, May 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061515004585>>. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>

DI NOIA, L. P.; LAURIA, D.; RIZZO, R. A control strategy of a stand alone induction generator coupled with a diesel engine for distributed generation with renewable sources. Jun. 2015, IEEE, Jun. 2015. p. 448-453. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7177546/>>. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>

<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>
<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>

DORIN, Petreus et al. Supplying a renewable energy single phase microgrid from a biomass generator using a three phase induction machine. Jun. 2016, IEEE, Jun. 2016. p. 208-213. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7544186/>>. <https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>

<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>
<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>

CHAPALLAZ, Jean-Marc et al. 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. 1° Edition. Eschborn, HESSE, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1992. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>

<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>
<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>

<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>
<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>

<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>
<https://doi.org/10.1007/978-3-663-14044-3>

CHATTOPADHYAY, Surajit; MITRA, Madhuchhanda; SENGUPTA, Samarjit. Electric Power Quality. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. Disponível em:
<<http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-0635-4>>. (Power Systems).
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>

<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4>

COELHO, Suani Teixeira et al. Atlas de Bioenergia do Brasil - Projeto Fortalecimento Institucional do Centro Nacional de Referência em Biomassa. . CENBIO, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://143.107.4.241/download/atlas_cenbio.pdf>.

DAHAL, Samir; SALEHFAR, Hossein. Impact of distributed generators in the power loss and voltage profile of three phase unbalanced distribution network. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 77, p. 256-262, May 2016. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061515004585>>.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.038>

DI NOIA, L. P.; LAURIA, D.; RIZZO, R. A control strategy of a stand alone induction generator coupled with a diesel engine for distributed generation with renewable sources. Jun. 2015, IEEE, Jun. 2015. p. 448-453. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7177546/>>. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>

<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>
<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>

<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>
<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>

<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>
<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177546>

DORIN, Petreus et al. Supplying a renewable energy single phase microgrid from a biomass generator using a three phase induction machine. Jun. 2016, IEEE, Jun. 2016. p. 208-213. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7544186/>>. <https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>

<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>
<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>

<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>
<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>

<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>
<https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544186>

FUKAMI, T. et al. A new self-regulated self-excited single-phase induction generator using a squirrel cage three-phase induction machine. 1995, IEEE, 1995. p. 308-312. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/500744/>>.

GERVÁSIO, Edmar Wardensk. Suinocultura - Análise da Conjuntura Agropecuária. Paraná, 2013. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/SuinoCultura_2012_2013.pdf>.

HARLEY, Ronald G.; MAKRAM, Elham B.; DURAN, Edwin G. The effects of unbalanced networks on synchronous and asynchronous machine transient stability. Electric Power Systems Research, v. 13, n. 2, p. 119-127, Oct. 1987. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0378779687900393>>.
[https://doi.org/10.1016/0378-7796\(87\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0378-7796(87)90039-3)

[https://doi.org/10.1016/0378-7796\(87\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0378-7796(87)90039-3)
[https://doi.org/10.1016/0378-7796\(87\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0378-7796(87)90039-3)

HERRERA, Victoria Alejandra Salazar. Diagnóstico de falhas e avaliação da eficiência do Gerador de Indução Auto-excitado em sistemas de microgeração. 2011. 101 f. Universidade Federal do ABC, 2011. Disponível em: <http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo_sophia=47280>.

IBGE. Produção da Pecuária Municipal 2010. Rio de Janeiro, Brasil, 2010. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2010_v38_br.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. WORLD ENERGY OUTLOOK. . IEA PUBLICATIONS, 9, rue de la Fédération, International Energy Agency 9, rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15, France, 2004. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2008-1994/WEO2004.pdf>>.

KIMPARA, Marcio Luiz Macr. Modelagem e análise de geradores síncronos utilizando o método de reconstrução de campo. 2012. 55 f. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2012.

KRAUSE, Paul et al. Analysis of electric machinery and drive systems. 3° Edition ed. Hoboken, New Jersey, EUA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Wiley-IEEE Press, 2013.

KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. 1° Editon. Toronto, Ontario, Canadá: McGraw-Hill Education, 1993.

LADJAVARDI, M.; MASOUM, M.A.S.; ISLAM, S.M. Impact of Time and Space Harmonics on Synchronous Generator Load Angle. 2006, IEEE, 2006. p. 1132-1138. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4075907/>>. <https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296468>

<https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296468>
<https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296468>

LAIJUN CHEN et al. Control strategy for suppressing power oscillation of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage. 2015, [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2015. p. 5.-5. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2015.0313>>.

LEAO, J.C. et al. Impact of dynamic reactive power compensation on induction generator islanding detection. 2004, IEEE, 2004. p. 810-813. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1372928/>>.

LI, H.; CHEN, Z. Transient Stability Analysis of Grid-Connected Induction Generators Using Normal Form Method. Nov. 2006, IEEE, Nov. 2006. p. 4266-4271. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4153212/>>. <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347497>

<https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347497>
<https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347497>

LI WANG; CHING-CHUNG TSAO. Performance analyses of a three-phase induction generator connected to a utility grid. 2001, IEEE, 2001. p. 1398-1402. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/917298/>>.

MAPA. Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011. . Brasília, Brasil, 2006. Disponível em: <http://bbeletronica.sede.embrapa.br/bibweb/bbeletronica/2006/inst/inst_11.pdf>.

MARTINEZ, R.M.; POMILIO, J.A.; PEREIRA DA SILVA, L.C. Power flow control and islanding detection of the local generation system with induction generator. Jun. 2008, IEEE, Jun. 2008. p. 958-963. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4581280/>>. <https://doi.org/10.1109/SPEEDHAM.2008.4581280>

<https://doi.org/10.1109/SPEEDHAM.2008.4581280>
<https://doi.org/10.1109/SPEEDHAM.2008.4581280>

MEDEIROS, D. M.; VIANA, A. N. C.; REZE, A. J. J. Estudo de geradores de indução na geração de energia elétrica em micro centrais hidrelétricas. Rev. ciênc. exatas, v. 11, n. 2, p. pp 9-14, 2005.

MEIRA, Paulo C. M. et al. Investigation of the islanding detection of induction generators. Jul. 2009, IEEE, Jul. 2009. p. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5275218/>>. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275218>

<https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275218>
<https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275218>

MORCOS, M.; GOMEZ, J. C. Distributed generation: Short circuit current supplied for induction generators. Aug. 2008, IEEE, Aug. 2008. p. 1-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4641737/>>. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2008.4641737>

<https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2008.4641737>
<https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2008.4641737>

MORENO, R.M.; POMILIO, J.A.; DA SILVA, L.C.P. Power flow control and islanding detection of a local generation system with induction generator. Nov. 2008, IEEE, Nov. 2008. p. 885-891. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4758070/>>.

<https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758070>

<https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758070>

<https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758070>

MUSA, I.; ZAHAWI, B.; GADOUE, S. M. Integration of induction generator based distributed generation and shunt compensation capacitors in power distribution networks. May 2013, IEEE, May 2013. p. 1105-1109. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6635765/>>.

<https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635765>

<https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635765>

<https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635765>

NASCIMENTO, Carlos Sonier Cardoso Do. Diretrizes analíticas para projeto de geradores de indução de rotor tipo gaiola de esquilo. 2014. 197 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/116626>>.

NASCIMENTO, Carlos Sonier Cardoso Do. Proposta para implementação de micro centrais de geração a gás com utilização de geradores de indução. 2010. 134 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27266/000763750.pdf?sequence=1>>.

NISHIMURA, Rafael. Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional. 2009. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2009. Disponível em:

<[http://repositorio.cbc.ufms.br:8080/jspui/bitstream/123456789/655/1/Rafael Nishimura.pdf](http://repositorio.cbc.ufms.br:8080/jspui/bitstream/123456789/655/1/Rafael%20Nishimura.pdf)>.

NTE-041. REQUISITOS PARA ACESSO E CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA ENERGISA/MT. Rede de distribuição aérea - Conexão em baixa tensão. Cuiabá - Mato Grosso - Brasil. Disponível em:

<http://www.energisa.com.br/Documents/pdfs/nte/nte_041_emt.pdf>. , 2016

OLIVEIRA, R. et al. Three-Phase Synchronous Generators Performance with Unbalanced and Non-Linear Loading - Analytical and Experimental Analysis. Jul. 2006, IEEE, Jul. 2006. p. 1744-1749. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4078509/>>.

<https://doi.org/10.1109/ISIE.2006.295834>

<https://doi.org/10.1109/ISIE.2006.295834>

<https://doi.org/10.1109/ISIE.2006.295834>

PAVANI, Ahda Pionkoski Grilo. Métodos Analíticos para Análise de Geradores de Indução Conectados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. 2008. 134 f. Universidade Estadual de Campinas, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/261208>>.

PIERETI, Saulo Augusto Ribeiro et al. Distributed generation: Energetic potentials of Mato Grosso state and use of asynchronous technology in microgeneration. May 2015, IEEE, May 2015. p. 1-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7216635/>>.

<https://doi.org/10.1109/EEM.2015.7216635>

RAMOS, Rodrigo A. et al. Stability Analysis and Control of Synchronous Generators Operating in Distribution Systems under Unbalanced Load Conditions. IFAC Proceedings Volumes, v. 45, n. 21, p. 26-31, 2012. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667016319395>>.

<https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00007>

RONDINA, Jose Mateus. Geração distribuída utilizando micro-centrais hidro-elétricas com tecnologia assíncrona. 2007. 93 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14650>>.

SANTOS, P. Guia técnico de biogás. CCE- Centro para a Conservação de Energia. Guia Técnico de Biogás. AGEEN - Agência para a Energia. Amadora, Portugal, 2000.

SCHERER, Lucas Giuliani. Estudo, modelagem e controle de uma micro central hidrelétrica com utilização de gerador de indução auto-excitado. 2012. 156 f. Universidade Federal de Santa Maria, 2012. Disponível em:

<http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=4404>.

SCHERER, Lucas Giuliani. Topologia híbrida e métodos de controle aplicados à regulação de tensão de geradores de indução auto-excitados. 2016. 155 f. Universidade Federal de Santa Maria, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/3698>>.

SIMOES, Marcelo Godoy; FARRET, Felix A. Modeling and Analysis with Induction Generators. Third Edit ed. Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
<https://doi.org/10.1201/b17936>

SULLA, Francesco; SAMUELSSON, Olof. Analysis of island-operated distribution networks with distributed induction generation under fault conditions. Sep. 2008, IEEE, Sep. 2008. p. 1-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4651546/>>.
<https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651546>

SUPPITAKSAKUL, C.; PHANUPHOL, P.; DANGEAM, S. Power flow and efficiency analysis of three-phase induction generator for grid connected system. Oct. 2015, IEEE, Oct. 2015. p. 169-172. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7385020/>>.
<https://doi.org/10.1109/ICEMS.2015.7385020>

TOMA, Patarau et al. Small signal induction generator model connected in a frequency-droop controlled renewable energy microgrid. May 2016, IEEE, May 2016. p. 296-300. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7563208/>>.
<https://doi.org/10.1109/ISSE.2016.7563208>

VANÇO, Wagner Eduardo. Estudo teórico-experimental do funcionamento em regime permanente do gerador de indução operando com gerador síncrono para aplicação em geração isolada. 2016. 133 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14620>>.

VINCENT DEL TORO. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 1º edição. Prentice Hall do Brasil, 1999.

WANG, Han; MANCARELLA, Pierluigi. Towards sustainable urban energy systems: High resolution modelling of electricity and heat demand profiles. Sep. 2016, IEEE, Sep. 2016. p. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7754005/>>.
<https://doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7754005>

WU, Marcel. Análise teórico-experimental do gerador de indução trifásico diretamente conectado à rede de distribuição elétrica. 2009. 87 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14422/1/marcel.pdf>>.

ZACHOW, C. R. Biogás - Monografia de Graduação. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUI, Panambi: RN, 2000.

APÊNDICE A

DISTORÇÕES HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIO EM SISTEMAS ELÉTRICOS

A.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 ilhamento, as distorções apresentam valores significativos para análise dos resultados experimentais, e é por isso importante considerar os harmônicos existentes, a teoria apresentada encontra-se em (CHATTOPADHYAY; MITRA; SENGUPTA, 2011).

O conceito de harmônico surgiu nas pesquisas sobre “movimento harmônico simples”. Uma onda senoidal não periódica pode ser representada pela soma de ondas senoidais de diferentes frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental de um sistema (ALVES, 2011).

Os harmônicos podem ser representados pela soma de senóides pela Série de Fourier.

$$v(t) = V_{cc} + \sum_{n=1}^{\infty} V_{nm} \times \text{sen}(n\omega t + \alpha_n) \quad (\text{A.1})$$

Onde:

sen - Seno;

n - Ordem harmônica;

V_{cc} - Componente de tensão contínua;

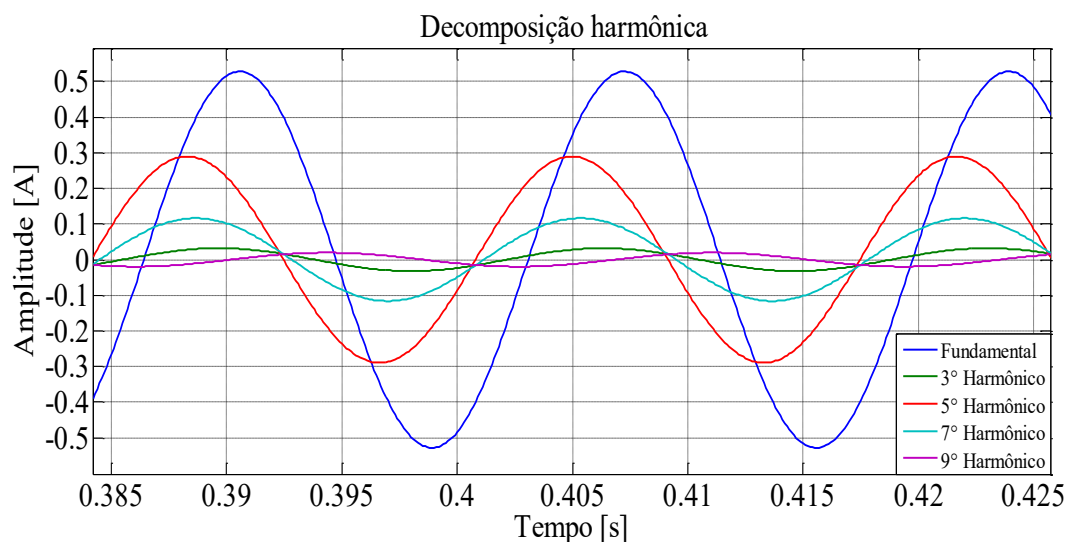
V_{nm} - Tensão máxima;

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 A.1 representa a decomposição de cada ordem harmônica de uma onda de corrente.

Figura A.28 – Representação de cada ordem harmônica de uma onda de corrente distorcida por uma lâmpada compacta fluorescente.



A distorção harmônica individual de tensão e corrente (*DIT e DIC*) 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 como de corrente.

- Para tensão

$$DIT_h \% = \left(\frac{V_h}{V_1} \right) \times 100 \quad (A.2)$$

- Para corrente

$$DIC_h \% = \left(\frac{I_h}{I_1} \right) \times 100 \quad (A.3)$$

É bastante usual constar o nível de distorção harmônica total de tensão (DTT) representando a distorção total da poluição harmônica. É calculado pela raiz do somatório das tensões harmônicas desejadas ao quadrado dividido pelo valor da componente fundamental, para expressar em porcentagem, basta multiplicar por 100.

$$DTT \% = \left(\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=n} V_h^2}}{V_1} \right) \times 100 \quad (A.4)$$

Analogamente, o nível de distorção harmônica total de corrente (DTC) é dado por:

$$DTC \% = \left(\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=n} I_h^2}}{I_1} \right) \times 100 \quad (A.5)$$

O valor eficaz da tensão e corrente que possuem várias componentes harmônicas não é a soma aritmética de cada componente, mas conforme apresentado por (A.6) e (A.7).

- Para tensão

$$V_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} V_h^2} \quad (A.6)$$

- Para Corrente

$$I_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} I_h^2} \quad (A.7)$$

A.2 – Desequilíbrio

O desequilíbrio de um sistema elétrico de potência é definido como sendo o desvio em magnitude da tensão ou corrente de qualquer uma ou duas das três fases do sistema trifásico. Quando as tensões de um sistema trifásico não são idênticas em magnitude e/ou as diferenças de fase entre elas não são exatamente 120 graus, o desequilíbrio de corrente/tensão então ocorre. Assim, o desequilíbrio em um sistema de energia pode ser expresso como a variação percentual em correntes e tensões de linha ou fase sobre os valores de correntes e tensões em valores nominais (CHATTOPADHYAY; MITRA; SENGUPTA, 2011). O desequilíbrio de tensão e corrente são expressos pela equação (A.9) e (A.10), respectivamente.

$$FD_V \% = \left(\frac{V_-}{V_+} \right) \times 100 \quad (A.9)$$

$$FD_I \% = \left(\frac{I_-}{I_+} \right) \times 100 \quad (A.10)$$

Onde,

FD_V - Fator de desequilíbrio de tensão;

FD_I - Fator de desequilíbrio de corrente;

V_- - Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa;

V_+ - Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva;

I_- - Magnitude da corrente eficaz de sequência negativa;

I_+ - Magnitude da corrente eficaz de sequência positiva.

As correntes ou tensões de fase podem ser decompostas em sequência positiva, negativa e zero, de acordo com a transformação de Fortescue (BLACKBURN, 1993).

O método CIGRÉ fornece o mesmo resultado do método das componentes simétricas para o desequilíbrio de tensão, utilizando uma série de manipulações algébricas para expressar o fator de desequilíbrio (FD) a partir dos módulos das tensões de linha (BEAULIEU *et al.*, 2002), como mostra as equações (A.11) e (A.12). Uma das vantagens de utilizar CIGRÉ deve-se a simplicidade para cálculo de desequilíbrio em ensaios experimentais, bastando as leituras *rms* das tensões de linha.

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (\text{A.11})$$

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (\text{A.12})$$

APÊNDICE B

DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA O GERADOR DE INDUÇÃO SEGUNDO (CHAPALLAZ et al., 1992)

B.1 - Gerador de indução trifásico conectado à rede elétrica com banco de capacitores

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 curtos-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; KINGSLEY JR; UMANS, 2006). A velocidade síncrona é expressa pela equação abaixo:

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

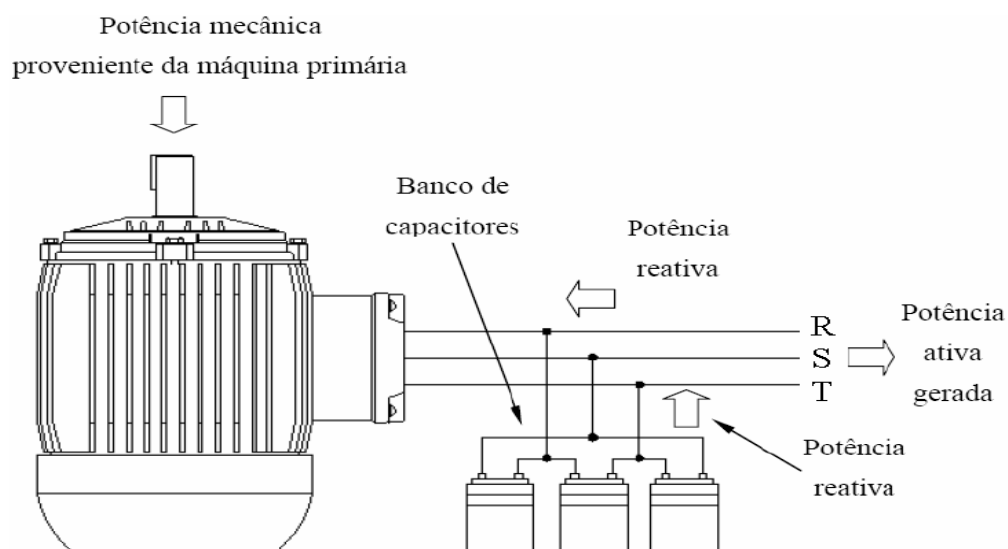
A diferença entre a velocidade síncrona e a do rotor é denominada como escorregamento ou escorregamento fracionário, que usualmente é expresso em porcentagem, igual a 100 vezes o escorregamento fracionário.

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

Como dito, a velocidade do rotor deve ultrapassar a velocidade síncrona quando gerador opera em paralelo com a rede elétrica de distribuição, o resultado disto é 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 da rede elétrica de distribuição ou de um banco de capacitores, conforme ilustrado na Figura B.1.

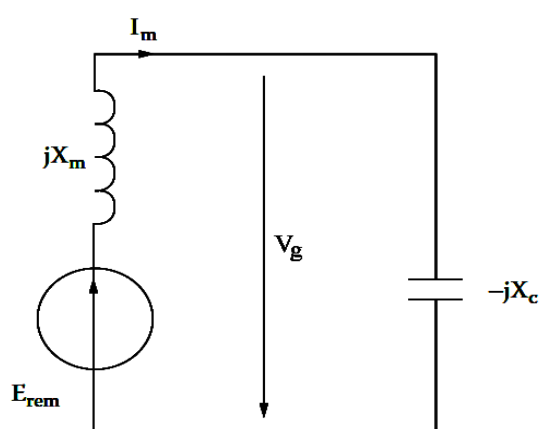
Figura B.1 – Ligação do banco de capacitores no gerador de indução.



Fonte: Extraído de (NASCIMENTO, 2010).

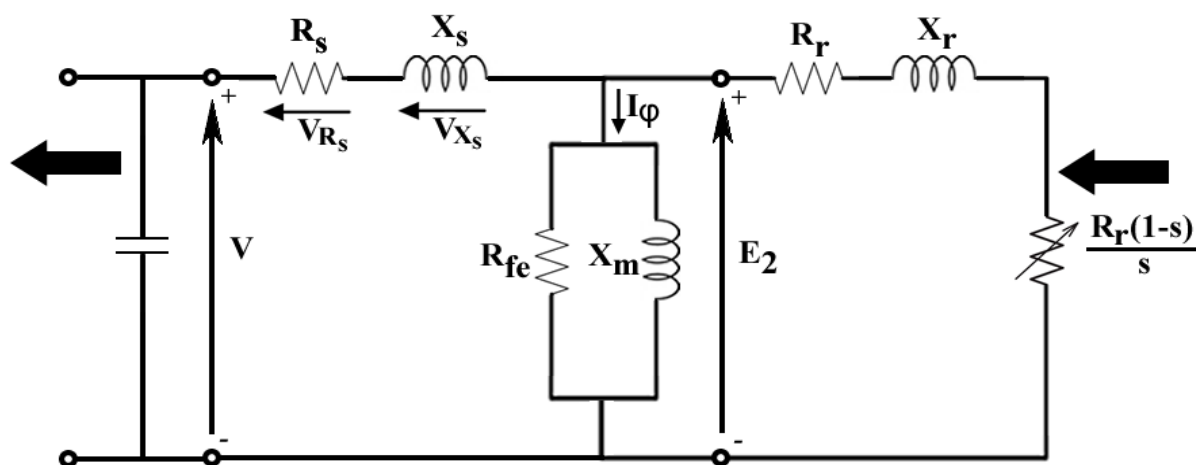
O circuito equivalente da máquina assíncrona para ação geradora é representado pelas Figuras B.2 e B.3

Figura B.2 – Circuito equivalente simplificado do gerador de indução com a presença do banco de capacitores.



Fonte: Extraído de (BOLDEA, 2005).

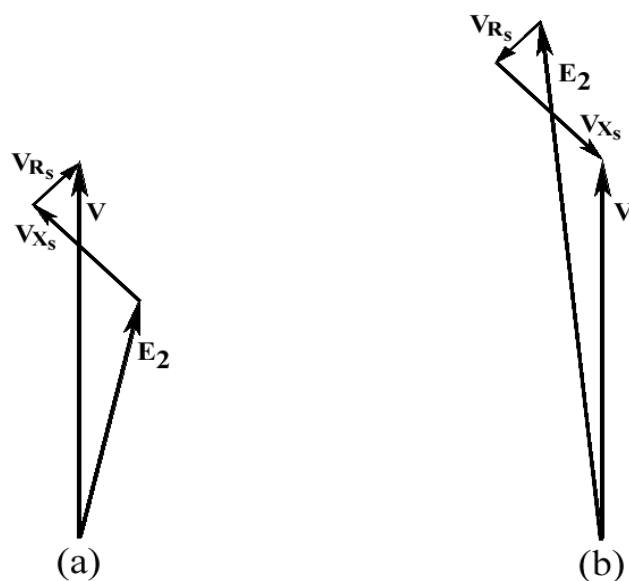
Figura B.3 – Circuito equivalente monofásico do gerador de indução com a presença de banco de capacitores.



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

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

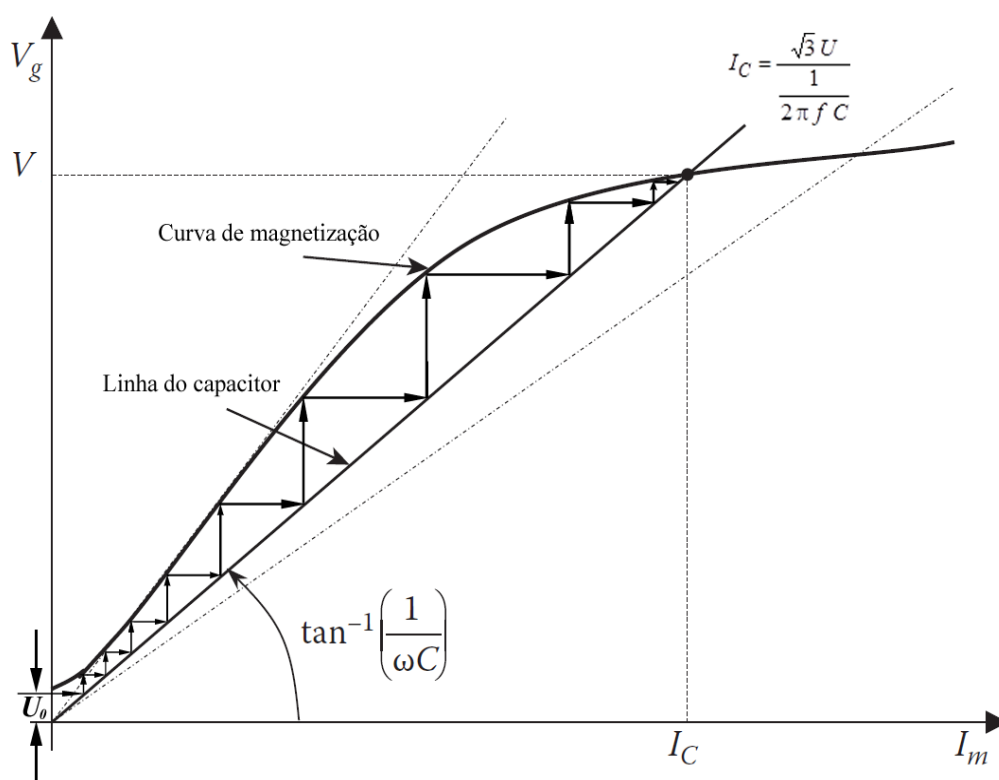
Figura B.4 – Diagrama fasorial da tensão induzida. (a) Ação motora; (b) Ação geradora.



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

Para operação em vazio, ou seja, desconectado da rede elétrica o processo de magnetização é igual do gerador de indução 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 é representado pela Figura B.5.

Figura B.5 – Processo de magnetização do gerador de indução trifásico tipo gaiola de esquilo.

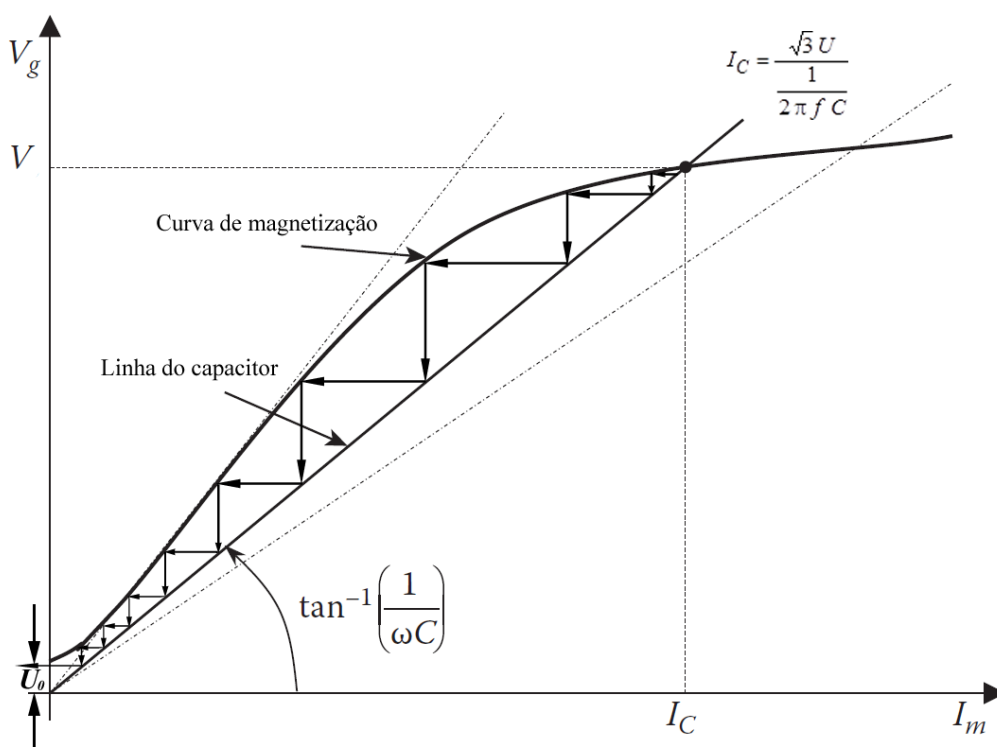


Fonte: Adaptado de (SIMOES; FARRET, 2015)

Explicado o procedimento de magnetização, fica simples explicar o que ocorre no processo de desmagnetização do gerador de indução com a presença de banco de capacitores quando conectado à rede elétrica de distribuição. No desligamento do

disjuntor (Figura 4.2.1) o gerador começa a se desmagnetizar devido à perda de referência que é da rede elétrica, é como se fosse uma carga brusca fosse chaveada em um gerador de indução auto-excitado, e então o processo de desmagnetização ocorre, ou então, pelo dimensionamento inadequado do banco de capacitores para cargas indutivas nominais (VANÇO, 2016). Quando desconectado da rede elétrica o processo de desmagnetização se inicia, o magnetismo presente no gerador de indução com o banco de capacitores decresce gradualmente, iniciando o processo desmagnetização, até que a única tensão induzida nos terminais do gerador assíncrono seja o valor da tensão residual provocada pelo fluxo residual presente no enrolamento do rotor. A Figura B.6 ilustra o procedimento de desmagnetização a partir da Figura B.5.

Figura B.6 – Processo de desmagnetização do gerador de indução trifásico tipo gaiola de esquilo.



B.2 – Dimensionamento do banco de capacitores

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 a partir da reatância de magnetização, que seria o valor mínimo de potência reativa trifásica, dada pela equação (B.3), o dimensionamento pela reatância de magnetização deve ser usado preferencialmente para geradores de indução de gaiola de esquilo com banco de capacitores ligados à rede elétrica, já para geradores que operam isoladamente (auto-excitado), outra técnica deve ser aplicada segundo z para o dimensionamento do banco de capacitores. O cálculo da potência reativa trifásica mínima necessário para suprir a reatância de magnetização do gerador de indução é dado pela equação (B.4)

$$C_{min} = \frac{3}{\omega X_M} \quad (B.3)$$

$$Q = 3 \left(\frac{V_{fase}^2}{\frac{1}{\omega C_{min}}} \right) \quad (B.4)$$

No entanto a potência reativa encontrada pela equação (B.4) é apenas para suprir a potência reativa solicitada pela reatância de magnetização, uma nova parcela de reativo é solicitada à medida que a potência ativa gerada aumenta, e para encontrar esse adicional necessário da potência reativa, pode-se simular o gerador com os dados de placa e parâmetros do circuito equivalente, dessa forma encontra-se o valor ideal do banco de capacitores para o carregamento ou geração de potência nominal.

B.3 – Dimensionamento do banco de capacitores

Realizando o dimensionamento pela reatância de magnetização, presente na Tabela 4.2.2, e com os dados de placa do gerador de indução mostrados na Tabela 4.2.1, obtém-se a potência reativa trifásica mínima.

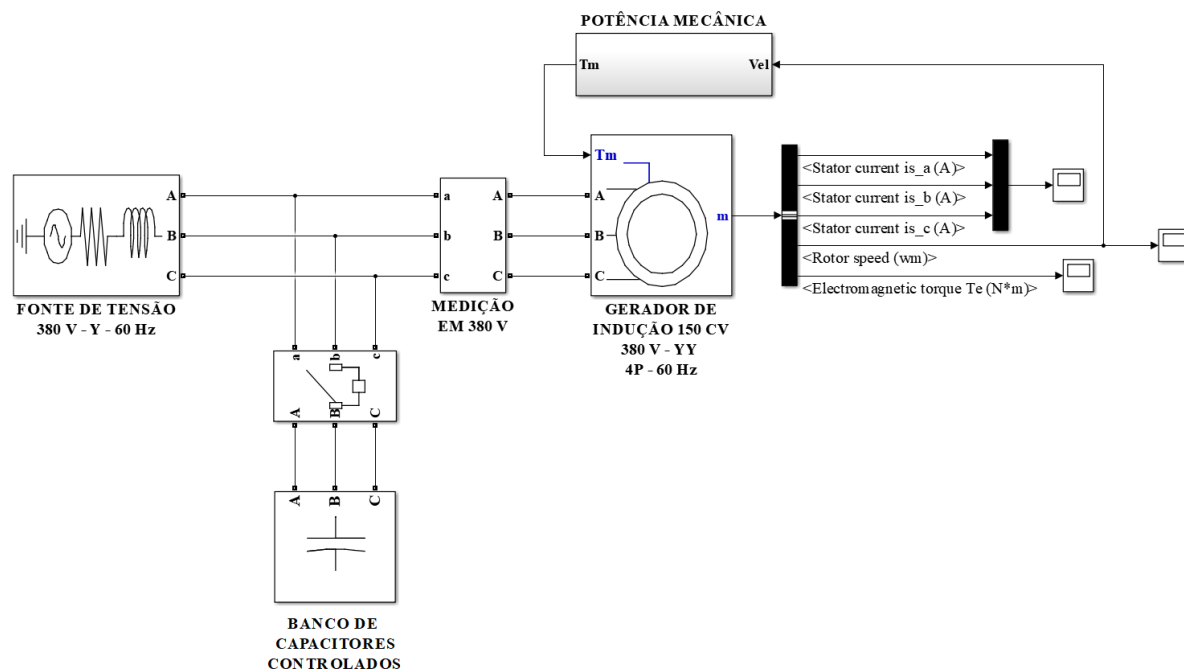
$$C_{min} = \frac{1}{377 \times 3,6567} = 7,2538 \times 10^{-4} \quad [F]$$

$$Q = 3 \left(\frac{V_{fase}^2}{\frac{1}{\omega C_{min}}} \right) = 3 \left(\frac{220^2}{\frac{1}{377 \times 7,2538 \times 10^{-4}}} \right) = -j39.707,95 \quad [Var]$$

Conforme ligação do gerador de indução utilizado (Tabela 4.2.1) deverá usado um banco de capacitores ligados em delta (380V) para realizar a magnetização do gerador assíncrono. A simulação a seguir mostrará os resultados de potência reativa necessária para o dimensionamento do banco de capacitores para 25%, 50%, 75% e 100% da potência ativa gerada que é entregue à rede de distribuição. Dessa forma pode-se ter noção da quantidade mais próxima de potência reativa necessária ser dimensionada por banco de capacitores, que devem ser chaveados conforme o carregamento do gerador de indução.

B.4 – Avaliação do dimensionamento do banco de capacitores

Para verificar a potência reativa solicitada pelo gerador conforme o aumento da potência ativa gerada realizou-se uma simulação computacional em Matlab/Simulink®, conforme ilustra a Figura B.7.

Figura B.7 - Simulação computacional da avaliação do banco de capacitores.

Para análise da potência reativa necessária do banco de capacitores de acordo com a potência ativa gerada, plotou-se essas 2 variáveis elétricas. A Figura A.8 e A.9 mostram respectivamente, a relação entre a potência reativa absorvida pelo gerador de indução quando gera 25% e 50% de sua potência ativa nominal.

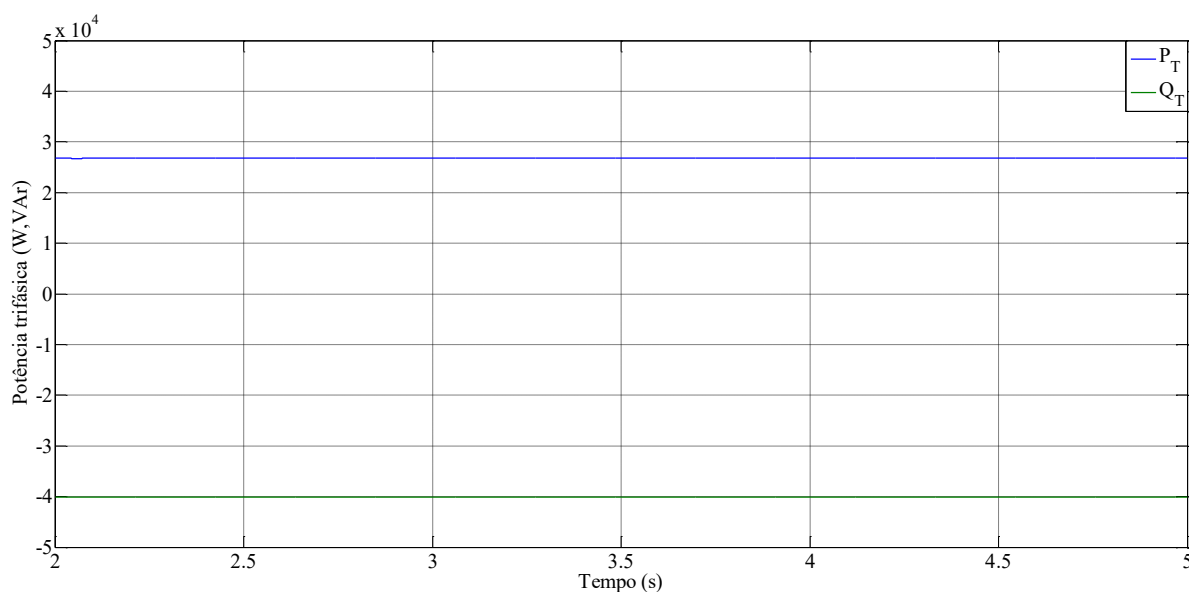
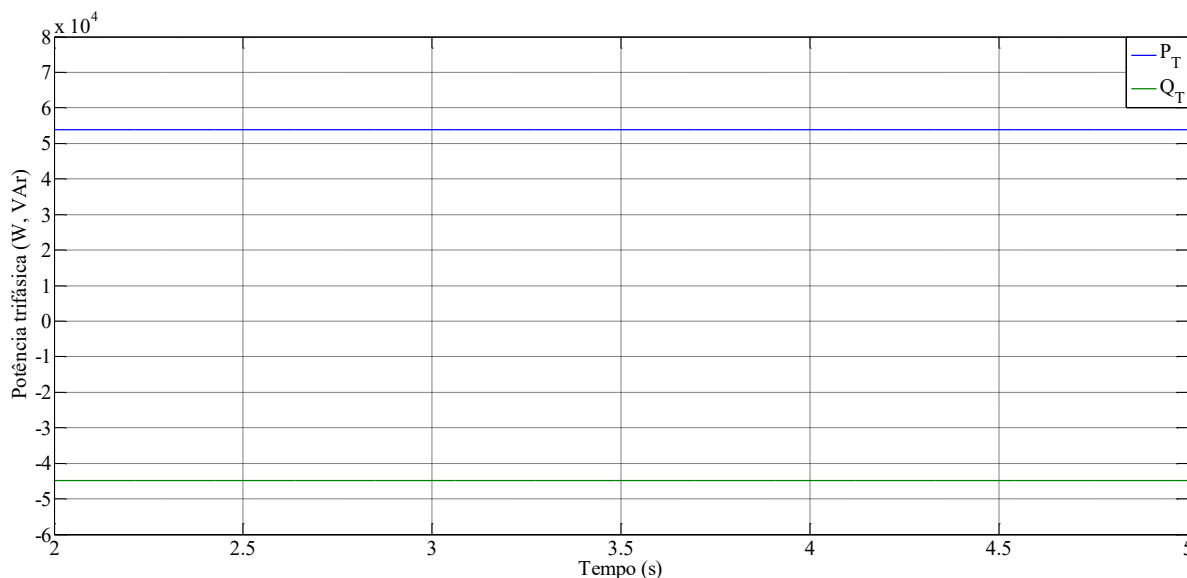
Figura B.8 – Potência trifásica na condição de 25% da potência ativa gerada.

Figura B.9 – Potência trifásica na condição de 50% da potência ativa gerada.

Comparando com as Figuras 4.3.7 e 4.4.7 da potência ativa gerada e Figuras 4.3.8 e 4.4.8 da potência reativa absorvida pelo gerador de indução nos procedimentos experimentais, nota-se que a potência ativa gerada varia em torno de 25% a 37% (dos valores obtidos da potência ativa gerada nos ensaios experimentais) percebe-se que o valor da potência reativa absorvida pelo gerador assíncrono em campo mostrado pelas Figuras 4.3.8 e 4.4.8 são condizente com o valor de potência reativa apresentada na simulação para 25% e 50% da potência ativa gerada.

Logo nos ensaios experimentais utilizou-se o chaveamento de banco de capacitores que somam a potência reativa trifásica de 50 kVAr, conforme mostra o diagrama elétrico representado pela Figura 4.2.1, uma vez que o gerador absorve aproximadamente 45 kVAr, o valor de 50 kVAr em banco de capacitores é o mais próximo nos comandos de chaveamento para banco de capacitores encontrados no mercado.

Visto que os valores se mostram próximos dos procedimentos experimentais para condição de até 50% da potência ativa gerada, obtém-se computacionalmente a relação entre a potência reativa absorvida pelo gerador de indução quando gera 75% e 100% de sua potência ativa nominal, que estão indicadas respectivamente pelas Figuras A.10 e A.11.

Figura B.10 – Potência trifásica na condição de 75% da potência ativa gerada.

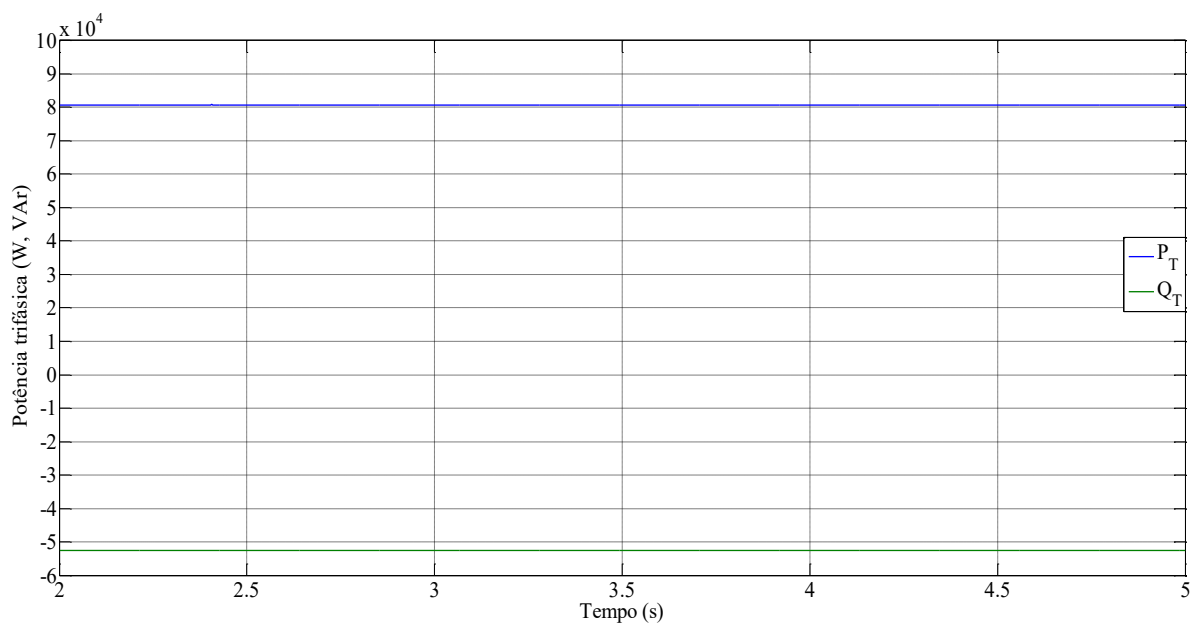
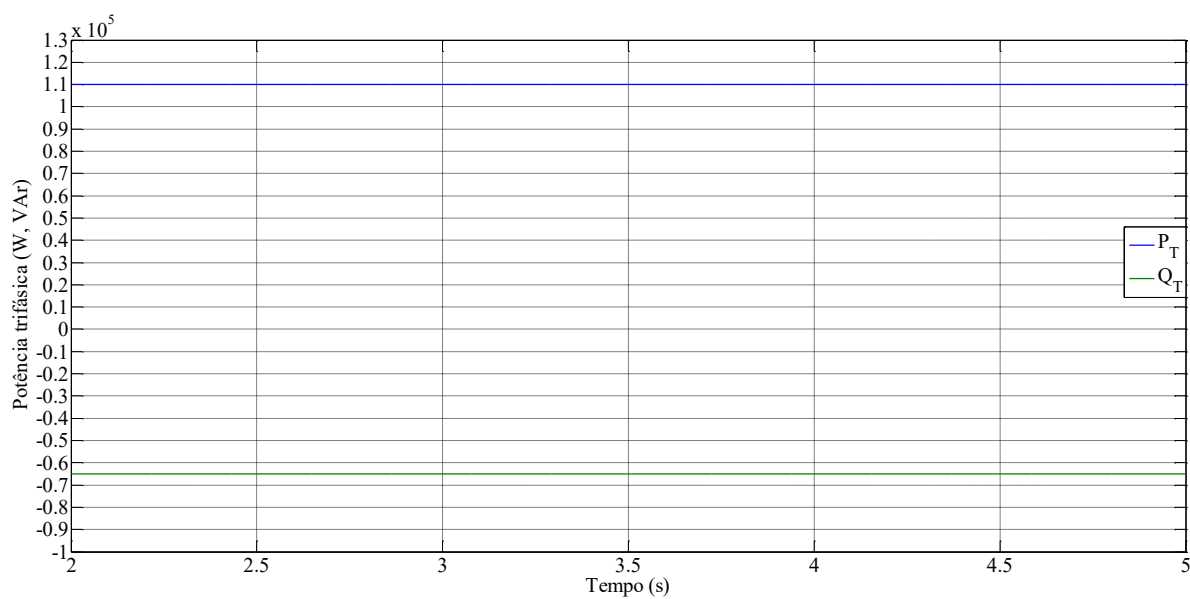


Figura B.11 – Potência trifásica na condição de 100% da potência ativa gerada.



Nota-se que um banco de capacitores de potência maior que 50 kVar são necessários para 50% da potência ativa gerada, e um banco de capacitores de aproximadamente 65 kVar para operação nominal.

B.4 – Proposta para chaveamento de banco de capacitores

Considerando o período após a partida do gerador de indução, são obtidas a razão de potência ativa gerada e a potência reativa absorvida pelo gerador de indução. A Figura B.12 mostra a proporção de potência ativa e reativa em função de uma rampa de carga de até 100% de carregamento.

Figura B.12– Curva de potência ativa e reativa trifásica, razão da potência ativa gerada pelo gerador de indução.

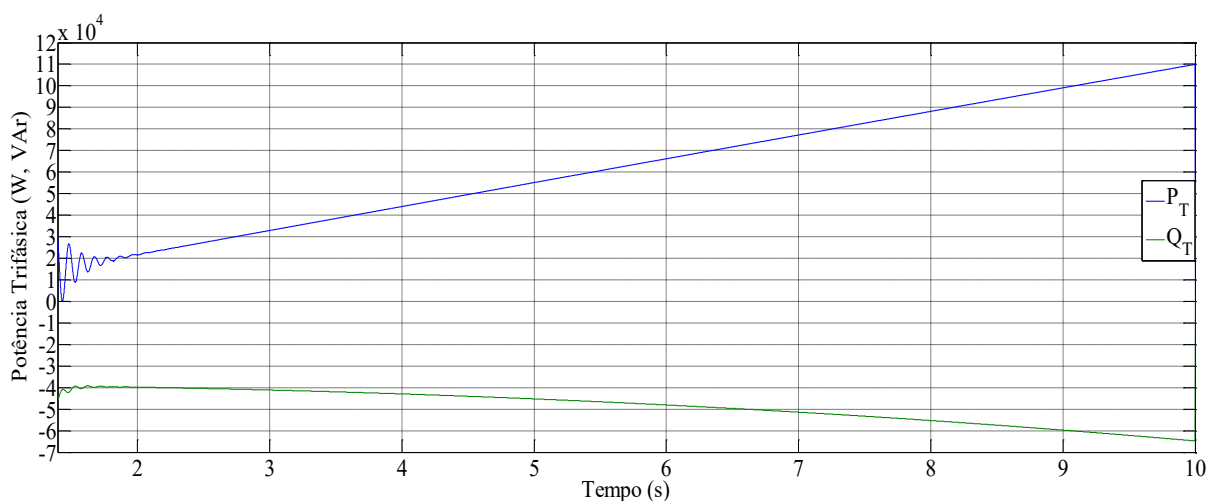
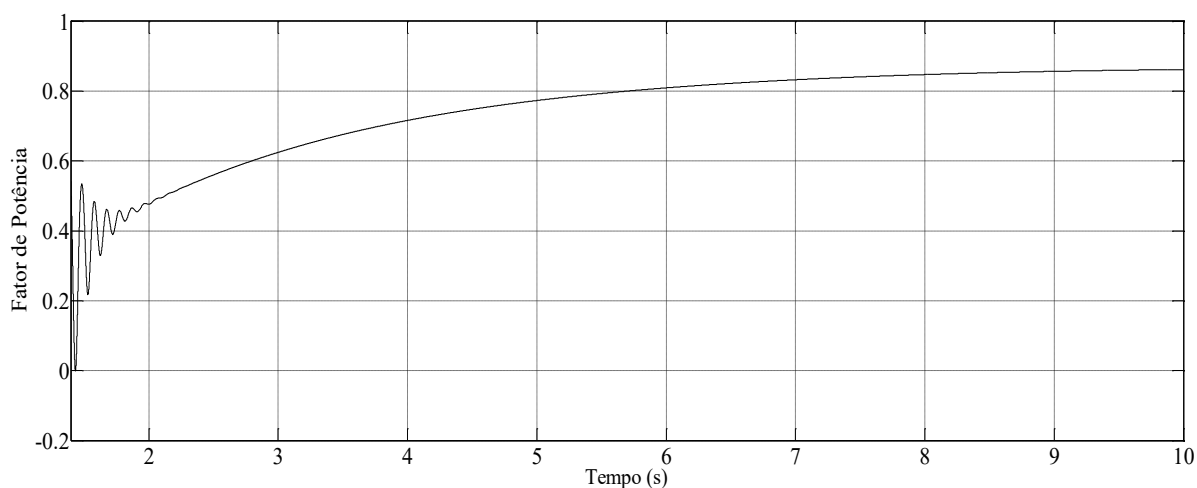


Figura B.13– Fator de potência do gerador de indução de acordo com a variação de carga.

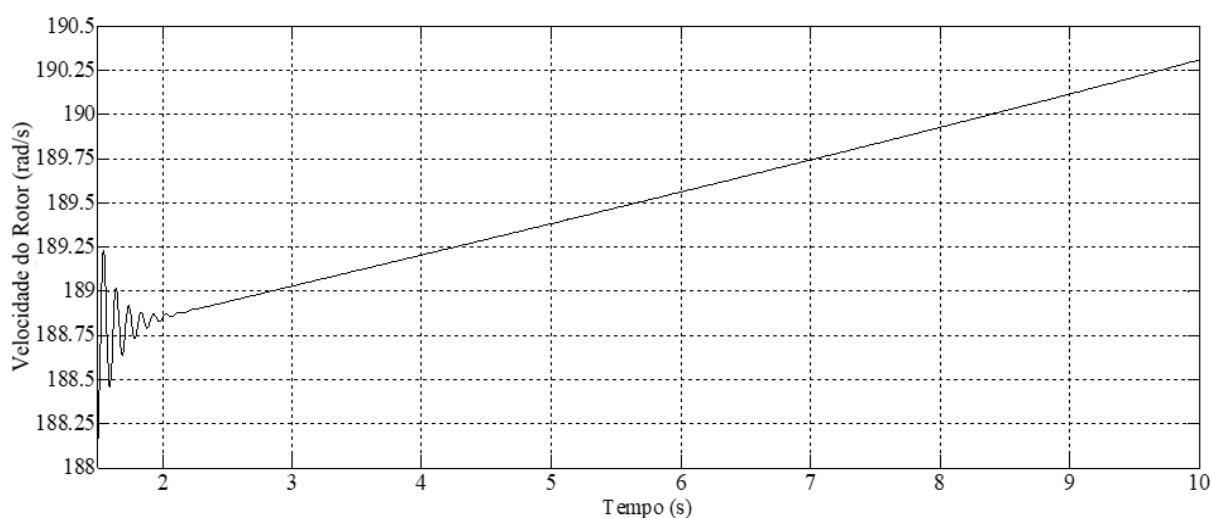


Na Figura B.13, o fator de potência do gerador de indução trifásico é plotado em função da carga. Observe que o fator de potência do gerador é alterado de acordo com a carga do gerador de indução trifásico.

Todas as leituras apresentadas são restritas às características construtivas do gerador de indução. As leituras foram obtidas a partir da medição de 380V (os terminais do gerador de indução trifásico) ilustrado na Figura 4.2.1.

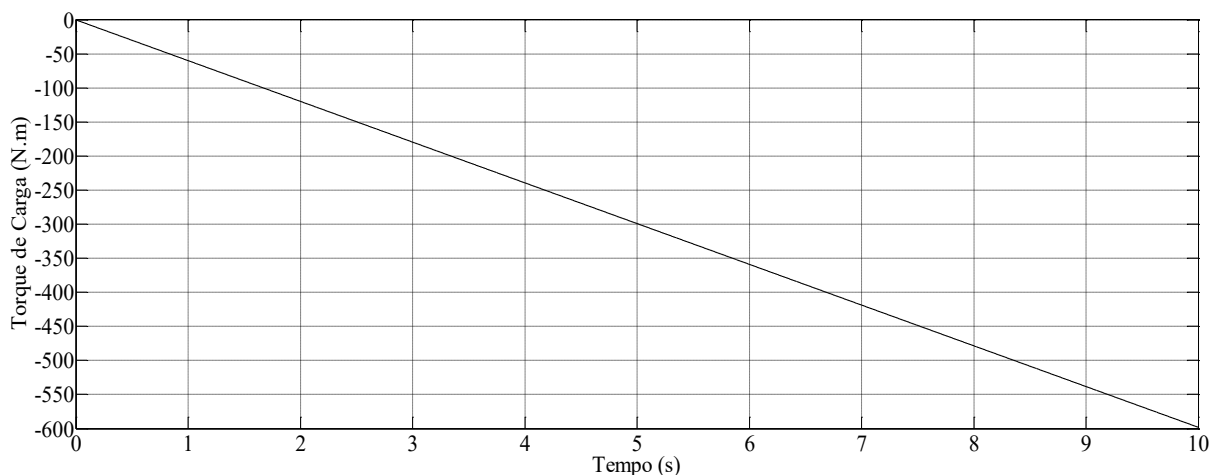
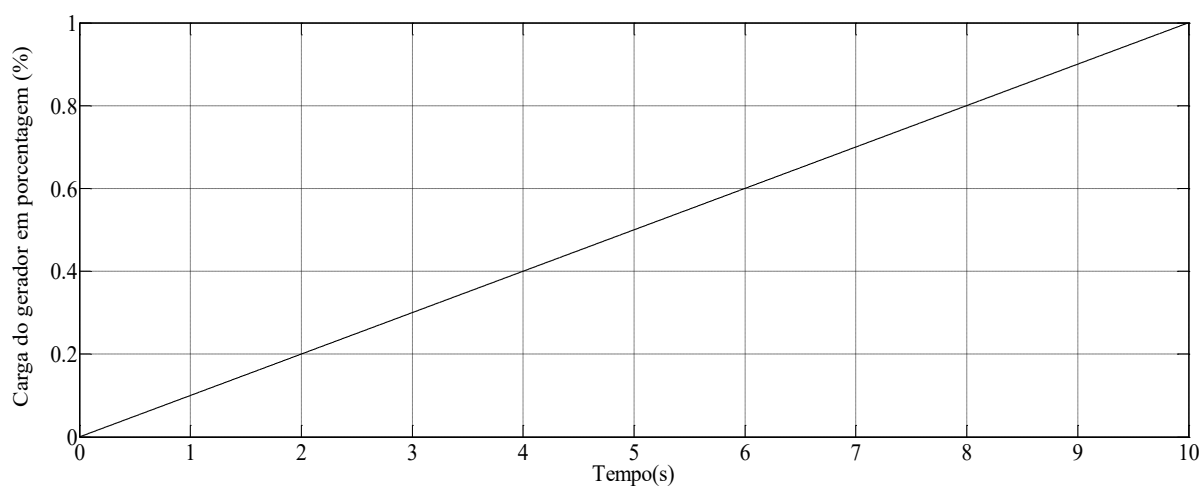
A velocidade do rotor é mostrada na Figura B.14 e a rampa de torque de carga imposta é mostrada na Figura B.15.

Figura B.14– Velocidade do rotor em função de carregamento do gerador de indução.



A curva de velocidade mostra que os resultados estão corretos porque, com o tempo, a carga aumenta e, necessariamente, a velocidade do gerador de indução deve estar na velocidade super síncrona e aumentar quando a carga aumentar.

A Figura B.15 mostra a rampa de torque em função do tempo; observe que em 10 segundos é encontrada a aplicação do torque inicial ao torque nominal. Assim, também é possível apresentar a Figura B.16, que é a rampa de carregamento em função do tempo de simulação.

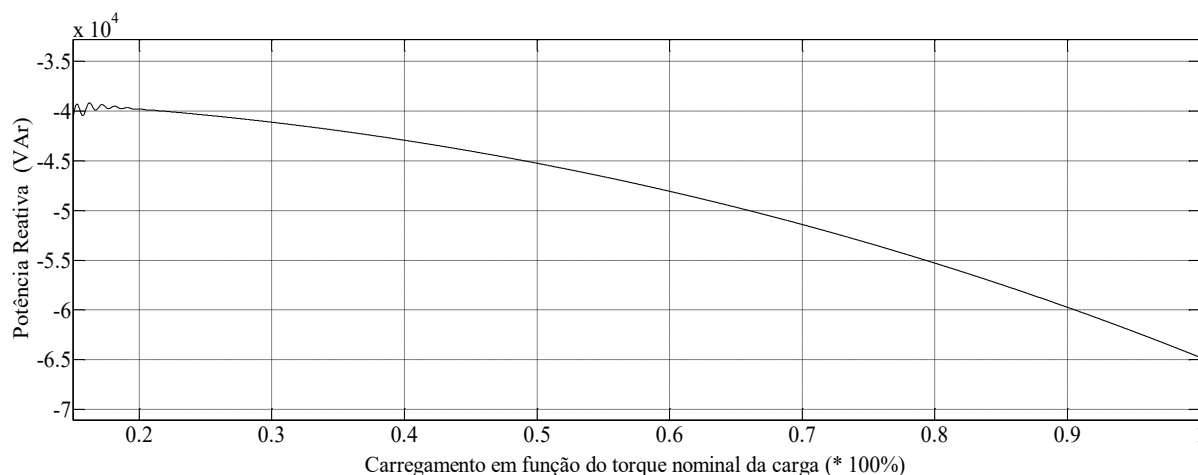
Figura B.15– Rampa de torque de carga em função do tempo de simulação.**Figura B.16**– Rampa de carregamento do gerador de indução.

Devido a partida do gerador de indução, foi considerado um torque inicial de aproximadamente 15% no tempo de 1,4s para a análise de dimensionamento do capacitor, que será apresentado abaixo.

O torque de carga está diretamente relacionado ao torque necessário para gerar potência entre 15% a 100% da potência ativa nominal do gerador de indução.

A Figura B.17 mostra a curva de dimensionamento do banco de capacitores a ser comutado (como mostrado na Figura 4.2.1) de acordo com a carga do gerador de indução trifásico.

Figura B.17– Curva da potência reativa absorvida pelo gerador de indução em função da carga.



A rampa de carregamento no tempo pode ser realizada a qualquer momento da simulação, desde que respeitando os limites de carga do gerador de indução de gaiola de esquilo. Após a obtenção da razão de potência reativa absorvida pelo gerador de indução em função da carga dada na Figura B.17, a inclusão da curva pode ser programada em um sistema de supervisão em qualquer linguagem de programação.

Conhecendo a razão de potência reativa necessária para magnetizar o gerador de indução, a curva pode ser incluída no sistema supervisor e, assim, obter a auto excitação correta sem absorver o excesso de potência reativa da rede. Isso evita que as empresas que investem na geração assíncrona evitem multas por exceder a demanda de energia reativa contratada.

ANEXO A

ANEXOS SOBRE O GERADOR DE INDUÇÃO E O TRANSFORMADOR

Informações do Equipamento



INFORMAÇÕES GERAIS

Cliente: FUNDAÇÃO DE APOIO E DESENVOLVIMENTO **Código do Cliente:** 54657738
Obra: GMG BIOGAS PROJETO P D **Número do DP:** 315295.10 **Pedido:** 20315295
Data de embarque: 26.05.2014 **Nº de Série** 0120024714

ESCOPO DE FORNECIMENTO

Produto:	G - GMG	Quantidade:	1 PC
Operação:	Automático Singelo	Potência:	120 kVA
Regime de Funcionamento:	S - Stand By	Tensão:	3T (220/380/440 Vca)
Frequência:	60 Hz		
Peças Sobressalentes	N - NÃO		
Montagem:	S - Sala		
Tensão(CC):	24 Vcc		

MOTOR

Fabricante: Motor MWM
Modelo: G6.12T
Regulador de Velocidade: T - Eletrônico
Refrigeração: R - Radiador Local
Atuador: ORIGINAL DO MOTOR
Tensão: 24 Vcc
Fiação do Motor: A - Auto-sustentado
Motor: 000000072000100110 - CJ MOT GAS MWM G6.12T - F2G001105

GERADOR

Fabricante: Geradores Weg
Modelo / Carcaça: VER OBS.
IP: 21
TC's no Gerador: NÃO
Qtde TC's -
Corrente TC's: -
Corrente Nominal: 315 A
Mala: N - NÃO
Fusível / Disjuntor:
Gerador 000000071000400331 - GER WEG GTA 251AE24 B35T - 1024018383

QUADRO DE COMANDO

Modelo: IG-NT(COMAP) **Gabinete:** PA-1888
IP: 21
Painel de Força / Trans: - Sem Transferência
Fusível / Disjuntor Prot: G - Grupo

PINTURA

Motor:	P - Padrão	Gerador:	P - Padrão
Base:	P - Padrão	Gabinete:	P - Padrão
Carenagem:	P - Padrão		

ACOMPANHAMENTOS

MATRIZ: Av. Pernambuco, 925 - Navegantes | CEP: 90240-004 - Porto Alegre/RS | Fone/Fax: 51 2131.3800 | www.stemac.com



Aracaju - Belém - Belo Horizonte - Blumenau - Brasília - Campo Grande - Cascavel - Caxias do Sul - Chapecó - Cuiabá - Curitiba - Florianópolis - Fortaleza - Goiânia - Governador Valadares - Itumbiara - Londrina
 Macaé - Macaço - Manaus - Marabá - Natal - Passo Fundo - Porto Alegre - Porto Velho - Recife - Ribeirão Preto - Rio de Janeiro - Salvador - Santa Bárbara - Santa Maria - São Luís - São Paulo - Teresina - Uberlândia - Vitória

TRAEL
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS LTDA.

Qualidade com Pontualidade

Fone/ Fax: (65) 3634-8999

Rua N, 244 - Quadra 17 - Distrito Industrial - CEP 78098-400 - Cuiabá - MT

RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRANSFORMADOR

ENSAIO DE ROTINA DO TRANSFORMADOR COM AS CARACTERÍSTICAS ABAIXO:

CLIENTE.....		FREQUÊNCIA (Hz).....	60	CORRENTE A.T. (A).....	3,14
NÚMERO.....	333872	TENSÕES A.T. (KV).....	13,80 a 12,80	CORRENTE B.T. (A).....	113,95
POTÊNCIA (KVA).....	75,0	TENSÕES B.T. (V).....	380/220	DATA FABRICAÇÃO.....	21/01/2015
FASES.....	3	DERIVAÇÕES.....	3	ESTADO.....	NOVO
LIGAÇÃO.....	Estrela/Estrela	A.T. LIGADA EM (KV).....	13,80	MASSA (Kg).....	485
TIPO.....	AÉREO CONVENCIONAL	B.T. LIGADA EM (V).....	380	FABRICANTE.....	TRAEL
MODELO.....	3159				

ENSAIO DE RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS

H1H2:	27,14 [OHMS]	X1X2:	23,62 [mOHMS]
H1H3:	27,17 [OHMS]	X1X3:	23,74 [mOHMS]
H2H3:	27,31 [OHMS]	X2X3:	23,75 [mOHMS]
Enrol. I:	Aluminio	Enrol. II:	Aluminio
TEMPERATURA AMBIENTE (°C):	32,0		

0 Graus

RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

LEITURA AT/BT (MOHMS).....	130000
LEITURA AT/MASSA (MOHMS).....	90000
LEITURA BT/MASSA (MOHMS).....	20000
TENSÃO DO MEGÔMETRO (V).....	5000

TENSÃO APLICADA

AT/BT x MASSA (KV).....	34,00
BT/AT x MASSA (KV).....	10,00
FREQUÊNCIA (Hz).....	60
TEMPO DO ENSAIO (S).....	60

TENSÃO INDUZIDA

TENSÃO INDUZIDA (V).....	760
FREQUÊNCIA (Hz).....	120
TEMPO DO ENSAIO (S).....	60
MÉTODO DO ENSAIO.....	NBR 9491

ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

TAP (V).....	13800	13200	12600
FASE 1.....	36,26	34,71	33,11
FASE 2.....	36,25	34,70	33,13
FASE 3.....	36,25	34,70	33,13
ERRO (%).....	-0,18	-0,11	-0,14

ENSAIO EM VAZIO

TENSÃO DO ENSAIO (V).....	380
CORRENTE DE EXCITAÇÃO (A).....	1,75
CORRENTE DE EXCITAÇÃO (%).....	1,71
PERDAS EM VAZIO (W).....	284

ENSAIO EM CURTO CIRCUITO

CORRENTE DE CURTO CIRCUITO (A).....	3,14
TENSÃO DE CURTO CIRCUITO (V).....	449,51
POTÊNCIA DE CURTO CIRCUITO (W).....	896
TEMPERATURA AMBIENTE (°C).....	28,0

VALORES CORRIGIDOS A 75 (°C)

PERDAS NO COBRE (W).....	1038
PERDAS TOTAIS (W).....	1322
RENDIMENTO A PLENA CARGA (%).....	98,3
IMPEDÂNCIA DE CURTO CIRCUITO (%).....	3,33

ENSAIO DE PINTURA

ENSAIO DE PINTURA			
ESPESSURA DA CAMADA:		(ASTM E 376)	
ESPECIFICAÇÃO.....	120	PINTURA DE FUNDO.....	90
MÍNIMO.....	120	PINTURA FINAL.....	150
MÉDIO.....			
MÁXIMO.....		UNIDADE:	[microns]
ADERÊNCIA		(MB 985)	
GRAU:	0,1	RESULTADO: SATISFATORIO	

ENSAIOS DO ÓLEO ISOLANTE

TIPO DE ÓLEO.....	ÓLEO TIPO A Vol:118 [litros]
RIGIDEZ DIELETRICA.....	60,00 [KV150] (NBR-6869)
TENSÃO INTERFACIAL.....	45,00 [mN/m] (NBR-6234)
TEOR DE ÁGUA.....	14,00 [ppm] (NBR-5755)
DENSIDADE.....	0,882 (NBR-7148)
IND. NEUTRALIZAÇÃO.....	<0,01 [mgKOH/g] (ABNT-MB-101)
F. P. A 100 (°C).....	0,35 [%] (ASTM D 924)
F. DISS. A 90 (°C).....	Teor de PCB: não detectado

ESTANQUEIDADE E RESISTÊNCIA À PRESSÃO

PRESSÃO (Kg/cm²).....	0,7	TEMPO (HORAS).....	1
-----------------------	-----	--------------------	---

OBSERVAÇÕES


23/01/2015

DATA

INSPECTOR

RESPONSÁVEL PELO ENSAIO

ALDO CESAR DA SILVA
ELETROTÉCNICO
CREA Nº: 1200335511

	FOLHA DE DADOS		No.: 179274/2013											
			Data: 05-NOV-2013											
Motor Trifásico de Indução - Rotor de Galo			PARA APROVAÇÃO <input type="checkbox"/> Aprovado <input type="checkbox"/> Aprovado com comentários <input type="checkbox"/> Não aprovado											
Cliente	:													
Código do produto	:													
Linha do produto	:	Motor Especial												
Carcaça	:	250S/M	Proteção											
Potência	:	110 kW (150 HP-cv)	IP23 (ODP)											
Frequência	:	60 Hz	Forma construtiva											
Número de pólos	:	4	B3D											
Rotação nominal	:	1825 rpm	Sentido de rotação											
Escorregamento	:	-1,39 %	Ambos											
Tensão nominal	:	220/380/440V	Massa aproximada*											
Corrente nominal	:	357/207/179 A	564 kg											
Corrente de partida	:	0,000/0,000/0,000 A	Momento de inércia											
Ip/In	:		0,8748 kgm²											
Corrente a vazio	:	100/57,9/50,0 A	Nível de pressão sonora											
Conjugado nominal	:	58,7 kgfm	75,0 dB(A) (global)											
Conjugado de partida	:	0 %												
Classe do isolamento	:	F												
Elevação de temperatura	:	80 K												
Tempo de rotor bloqueado	:	10 s (quente)												
Fator de serviço	:	1,15												
Regime de serviço	:	S1												
Temperatura ambiente	:	-20°C a +40°C												
Altitude	:	1000 m												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Carga</th> <th>Fator potência</th> <th>Rendimento (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100%</td> <td>0,85</td> <td>95,0</td> </tr> <tr> <td>75%</td> <td>0,82</td> <td>95,0</td> </tr> <tr> <td>50%</td> <td>0,74</td> <td>94,5</td> </tr> </tbody> </table>	Carga	Fator potência	Rendimento (%)	100%	0,85	95,0	75%	0,82	95,0	50%	0,74	94,5
Carga	Fator potência	Rendimento (%)												
100%	0,85	95,0												
75%	0,82	95,0												
50%	0,74	94,5												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Mancal</th> <th>Quantidade (lubrificante)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dianteiro</td> <td>6316-C3</td> <td>34 g</td> </tr> <tr> <td>Traseiro</td> <td>6314-C3</td> <td>27 g</td> </tr> </tbody> </table>		Mancal	Quantidade (lubrificante)	Dianteiro	6316-C3	34 g	Traseiro	6314-C3	27 g			
	Mancal	Quantidade (lubrificante)												
Dianteiro	6316-C3	34 g												
Traseiro	6314-C3	27 g												
		Intervalo de lubrificação: 20000 h												
		Graxa - MOBIL POLYREX EM												
Observações: Motor operando como gerador assíncrono.														
Os valores indicados são valores garantidos e para motores alimentados por rede senoidal, sujeitos às tolerâncias da norma ABNT-NBR 17094-1. Nível de ruído com tolerância de +3 dB(A). (*) Peso aproximado sujeito a alteração após fabricação dos motores.														
Executado deschamps	Verificado AUTOMATICO	Revisão No.: 0 Data: 05-NOV-2013	Aprovação cliente											

