

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

UMA PROPOSTA DE CO-GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
ASSIMÉTRICO CONECTADO A UMA REDE MONOFÁSICA

Tese apresentada por **Roberlam Gonçalves de Mendonça** à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

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

Professor Edson Bim, Dr. (UNICAMP)

Professor Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD. (UFC)

Professor José Carlos de Oliveira, PhD. (UFU)

Professor Décio Bispo, Dr. (UFU)

Professor Darizon Alves de Andrade, PhD. (UFU)

Uberlândia, 29 Maio de 2003.

**UMA PROPOSTA DE CO-GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO
CONECTADO A UMA REDE MONOFÁSICA**

AUTOR:

ROBERLAM GONÇALVES DE MENDONÇA

Tese apresentada por **Roberlam Gonçalves de Mendonça** à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia
Elétrica.

Prof. Luciano Martins Neto, Dr.
Orientador

Prof. Alcimar Barbosa, PhD.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

“Vê mais longe a gaivota que voa mais alto”

(Richard Bach)

Aos meus pais Tereza e Antônio Mendonça, a minha filha Laura e a minha esposa Glauce Mendonça pela compreensão, apoio, incentivo, amor e carinho a mim dispensados, essencial para o desenvolvimento e conclusão desta tese.

Dedico este título de DOUTOR a uma pessoa que nos momentos, talvez mais difíceis e conturbados de minha vida, me deu tudo aquilo que eu precisava em breves palavras do tipo: "... nunca se esqueça que você tem um pai ..." e "... seu pai está aqui...". Essas palavras me deram confiança, segurança, coragem e me fizeram chegar até aqui. Hoje, na qualidade de pai, se eu conseguir passar a minha filha pelo menos metade da segurança, confiança e coragem que o senhor me passou, já me dou por satisfeito. Muito obrigado Antônio Albino de Mendonça, MEU PAI.

(Roberlam Gonçalves de Mendonça)

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luciano Martins Neto pela sabedoria, orientação e atenção dispensadas a este trabalho.

Aos amigos e colegas da pós-graduação pela colaboração, amizade e companheirismo.

Ao Eng. Adelino Ricardo do laboratório de máquinas elétricas pelo apoio na realização dos ensaios experimentais.

À Joana e Gonçalo pela amizade e auxílio na secretaria de pós-graduação.

Ao CEFETGO – UNED JATAÍ por ter colaborado com a liberação em tempo integral, o qual foi fundamental para a realização deste trabalho.

A Coordenação de Eletrotécnica do CEFETGO por ter sacrificado, em parte, seu quadro de professores em benefício deste trabalho.

Ao CNPq por ter concedido apoio financeiro a esta pesquisa.

RESUMO

MENDONÇA, ROBERLAM G. ; Uma Proposta de Co-Geração de Energia Elétrica Utilizando Um Gerador de Indução Trifásico Assimétrico Conectado a Uma Rede Monofásica, Uberlândia, UFU, 2003.

Esta tese apresenta uma proposta de co-geração de energia elétrica utilizando um gerador de indução trifásico assimétrico conectado a uma rede monofásica. Para isto, é desenvolvido um modelo matemático no domínio do tempo que representa o gerador assimétrico, a carga trifásica e a rede monofásica. Ainda nesta modelagem, são incluídos os harmônicos espaciais de enrolamento. Para o gerador de indução trifásico assimétrico de 2cv, são obtidos os parâmetros de projeto por meio de simulações computacionais. Um protótipo de 2cv é ensaiado, e os resultados experimentais são confrontados com os resultados teóricos. Ainda com base no modelo matemático desenvolvido, são realizadas simulações em condições de afundamentos e elevações temporárias de tensão na rede monofásica.

No intuito de mostrar a possibilidade de se projetar geradores assimétricos com valor de potência usual na prática, são apresentados os parâmetros de projeto de uma máquina 60cv, obtidos por meio de simulações computacionais. Ainda, é feita uma análise do fluxo de potências ativa e reativa na rede monofásica para diversas condições de funcionamento do gerador assimétrico de 60cv.

Palavras-chave:

Gerador de indução trifásico assimétrico, co-geração, rede monofásica.

ABSTRACT

MENDONÇA, ROBERLAM G.; Proposal of Electric Power Co-Generation System Using a Asymmetrical Three-Phase Induction Generator Connected to a Single-Phase Source,
Uberlândia, UFU, 2003.

This work presents a proposal of electric power co-generation using an asymmetrical three-phase induction generator connected to a single-phase source. In this way, a mathematical model is developed in the time domain that represents the asymmetrical generator, the three-phase load and the single-phase source. Still in this modelling, the winding space harmonics are included. For the asymmetrical three-phase induction generator of 2cv, are obtained the design parameters through simulations. A prototype of 2cv is tested, and the experimental results are confronted with the theoretical results. Still based on the developed mathematical model, simulations are made in conditions of voltage sag and swell in the single-phase source.

Aiming to show the possibility to design asymmetrical generators with value of usual power in practice, the design parameters of a 60cv machine are presented. Still, is made an analysis of the power flow of in the single-phase source for several conditions of operation of the 60cv asymmetrical generator.

Key Words:

Asymmetrical Three-Phase Induction Generator, Co-generation, Single-Phase Source.

SUMÁRIO

- **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

1.1 - Justificativa e Objetivo.....	01
1.2 - Gerador de Indução Trifásico Assimétrico.....	07
1.3 - Revisão Bibliográfica.....	10
1.4 - Apresentação da Tese.....	13

- **CAPÍTULO 2 - MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO**

2.1- Introdução.....	15
2.2- Equações Elétricas Genéricas – Domínio do Tempo.....	16
2.3- Representação das Fases Gerador Assimétrico	21
2.4- Indutâncias Harmônicas do Gerador Assimétrico.....	22
2.5- Concatenamentos de Fluxo Magnético do Gerador Assimétrico.....	25
2.6- Relação Entre K , K_L , K_L' , e os Parâmetros do Circuito Equivalente do Gerador de Indução Trifásico Simétrico.....	30
2.7- Equações Elétricas e Mecânicas do Gerador de Indução Trifásico Assimétrico Conectado a Um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Monofásico.....	31
2.8- Resolução do Sistema de Equações do Gerador Assimétrico.....	36
2.9- Equações do Gerador Assimétrico Com Carga Resistiva Acoplada.....	38
2.10- Equações do Gerador Assimétrico Com Carga Motora Acoplada.....	40
2.10.1 Equações do Motor de Indução Trifásico Simétrico.....	41

- **CAPÍTULO 3 - PROJETO DE UM PROTÓTIPO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO**

3.1– Introdução.....	47
3.2– Ensaios da Máquina de Indução Trifásica Simétrica.....	48
3.2.1– Definição do Ponto de Funcionamento Nominal de Carga do Motor Simétrico.....	49
3.2.2 – Ensaio em Vazio	50
3.2.3 – Ensaio Com Rotor Bloqueado.....	51
3.2.4 – Medição da Resistência do Estator.....	52
3.3– Cálculo dos Parâmetros do Circuito Equivalente	52
3.4– Projeto do Gerador Assimétrico	55
3.4.1 – Sistemática de Projeto	56
3.4.2 – Obtenção dos Parâmetros de Projeto	62
3.4.3 – Simulação Computacional – Incluindo os Efeitos dos Harmônicos Espaciais de Enrolamento.....	64
3.5– Simulação Digital – Considerando Variações de Tensão na Rede.....	70

- **CAPÍTULO 4 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO**

4.1 – Resultados Experimentais.....	80
-------------------------------------	----

- **CAPÍTULO 5 - COMPROVAÇÃO TEÓRICA - EXPERIMENTAL**

5.1 – Comprovação Teórica – Experimental.....	92
5.1.1 – Ensaio em Vazio	94
5.1.2 – Ensaio em Carga Resistiva.....	95

5.1.3 – Gerador em Carga – Motor em Vazio.....	96
5.1.4 – Gerador em Carga – Motor em Carga.....	99
5.2 – Análise da Comprovação Teórica – Experimental.....	100
5.2.1 – Gerador em Vazio	100
5.2.2 – Gerador em Carga Resistiva.....	101
5.2.3 – Gerador em Carga – Motor em Vazio.....	101
5.2.4 – Gerador em Carga – Motor em Carga.....	102
• CAPÍTULO 6 - SIMULAÇÃO DIGITAL DE UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO DE 60 CV	
6.1 – Introdução.....	103
6.2 – Projeto e Parâmetros.....	103
6.3 – Simulação Computacional.....	107
6.4 – Análise do Fluxo de Potência.....	109
6.4.1 – Gerador Fornecendo Potência a Rede.....	110
6.4.2 – Gerador e a Rede Fornecendo Potência a Carga.....	111
6.4.3 – Apenas o Gerador Fornecendo Potência Ativa a Carga.....	112
6.4.4 – Gerador Fornecendo Potência Ativa a Carga e a Rede Monofásica.....	113
• CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	
7 – Conclusões e Sugestões.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

Em países de grande extensão territorial, onde os consumidores de energia elétrica caracterizam-se por: possuírem pequeno consumo de kwh mensal; pequena quantidade de consumidores por km de rede de energia elétrica; pequena demanda máxima simultânea; juntamente às limitações de recursos financeiros para investimentos em programas de eletrificação rural - como por exemplo o Brasil - obrigam as concessionárias de energia elétrica a utilizarem sistemas elétricos de distribuição de energia monofásicos ou monofilares. Devido a constante necessidade de aumentar o consumo de energia elétrica, principalmente em termos de demanda máxima, o consumidor rural fica limitado às peculiaridades próprias do sistema monofásico.

Entretanto, existem algumas saídas para esta situação, e uma delas é, quando se dispõe de um potencial energético na propriedade, aproveitá-lo para a geração de energia elétrica. Neste caso é interessante que a geração seja trifásica. Tradicionalmente a escolha da máquina elétrica recai no gerador síncrono, porém, uma solução utilizando o gerador de indução é mais vantajosa, uma vez que as máquinas de indução em gaiola de esquilo são simples, baratas, robustas, de baixo custo de manutenção e quando operam como gerador ligado a uma rede previamente energizada se tornam ainda mais simples; não necessitando de sistemas adicionais de excitação e sincronização com a rede elétrica. Assim, em se tratando de co-geração de energia elétrica a máquina de indução operando como gerador torna-se uma opção extremamente vantajosa em

relação ao tradicional gerador síncrono. Quando a rede é trifásica, para potências até alguns milhares de kva, pode-se adquirir no mercado o motor de indução trifásico e fazê-lo funcionar como gerador. No caso de redes elétricas rurais, a realidade é outra. Para este caso, se a geração for independente da rede elétrica, a utilização do gerador de indução não é aconselhável, sendo o gerador síncrono mais aconselhável. Como gerador independente, a máquina de indução precisa de uma excitação inicial que geralmente é conseguida aproveitando o campo magnético remanente da gaiola de esquilo que induz tensão no estator e carrega capacitores de excitação, porém esse processo é pouco confiável. Além disso, a tensão gerada fica dependente da rotação e do valor do capacitor de excitação, tanto no seu valor eficaz, como na freqüência, sendo que o sistema de controle desta dependência não é simples. Porém, no caso do gerador funcionar acoplado na rede elétrica previamente energizada, não há necessidade da excitação inicial, podendo a potência reativa vir da rede elétrica ou então de um capacitor, cuja capacidade poderá ser constante. Assim, para esta situação, as vantagens já mencionadas anteriormente para o gerador de indução o tornam uma solução melhor comparada com o gerador síncrono. A questão a ser resolvida é compatibilizar a rede elétrica monofásica com o gerador de indução trifásico. Esta tese apresenta uma proposta para a solução desta questão.

O objetivo desta tese é desenvolver um gerador de indução com enrolamento trifásico, porém conectado a uma rede elétrica monofásica previamente energizada. Esta conexão com a rede elétrica permite a obtenção de uma geração de melhor qualidade para o gerador de indução, tanto no que se refere a valores de tensão, como também relativo a sua freqüência. Uma das tensões do gerador é imposta pela rede elétrica, o que também acontece com a freqüência do sistema de tensões trifásicas gerado. A figura 1.1 mostra o esquema de uma idéia inicial, utilizando como gerador de indução uma máquina tradicional, ou seja, com o enrolamento trifásico de estator balanceado, e o rotor em gaiola de esquilo.

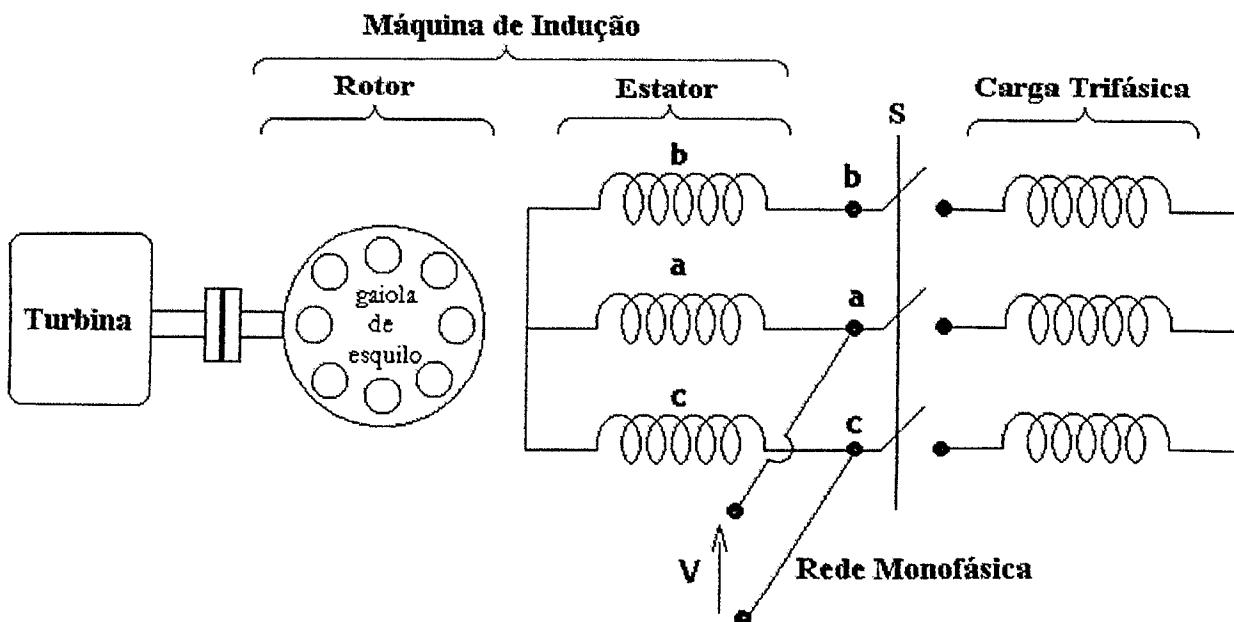


Figura 1.1 – Máquina de indução como gerador

Admitindo-se, inicialmente, a máquina de indução sem carga, ou seja, com a chave trifásica S aberta, na figura 1.1, devido à ligação elétrica com a rede monofásica, as suas fases a e c ficam submetidas a uma única corrente. Esta, por sua vez, estabelece um f.m.m. resultante que produz um campo magnético pulsante. Todo campo magnético pulsante pode ser decomposto em duas componentes iguais de campo magnético girante, ambas com o mesmo valor de rotação (rotação síncrona), porém em sentidos opostos. A figura 1.2 ilustra esquematicamente os dois campos magnéticos girantes, identificados por B.

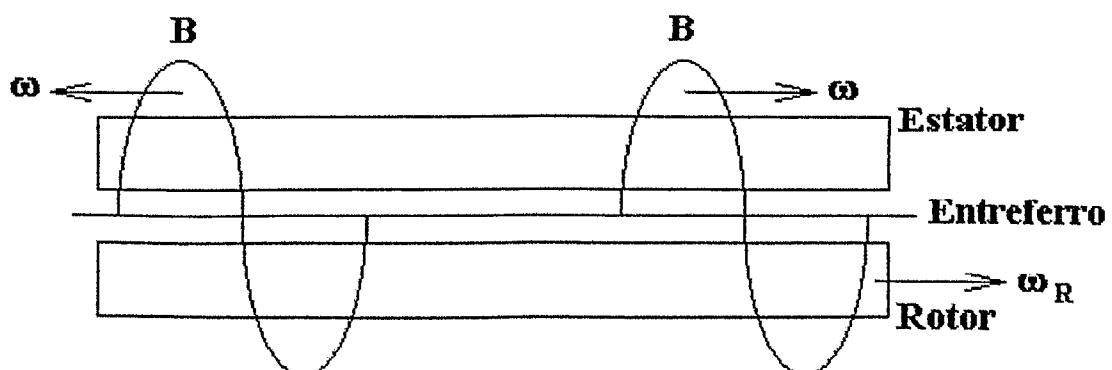


Figura 1.2 – Campos magnéticos girantes de estator.

Pela teoria tradicional das máquinas elétricas de indução trifásicas, devido ao campo magnético B que se movimenta para a esquerda, figura 1.2, a máquina funciona como freio, enquanto que devido ao campo que se movimenta para a direita, mesmo sentido do movimento do rotor, a máquina funciona como motor para $\omega_R < \omega$ e $\omega_R \neq 0$, e gerador para $\omega_R > \omega$.

Além deste aspecto funcional da máquina, é importante observar as tensões em seus enrolamentos, ainda na condição de vazio elétrico. Devido aos efeitos das correntes, produzidas pelas tensões induzidas no rotor, cada um dos campos girantes B pode ser decomposto na componente magnetizante, B_i ($i=1,2$), e na componente que corresponde à reação do estator diante do campo magnético produzido pela respectiva corrente do rotor, B_i' ($i=1,2$).

A figura 1.3 ilustra esquematicamente tais componentes.

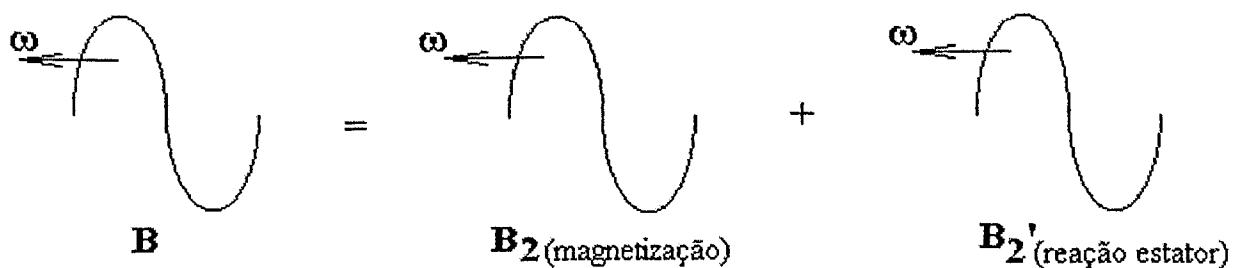
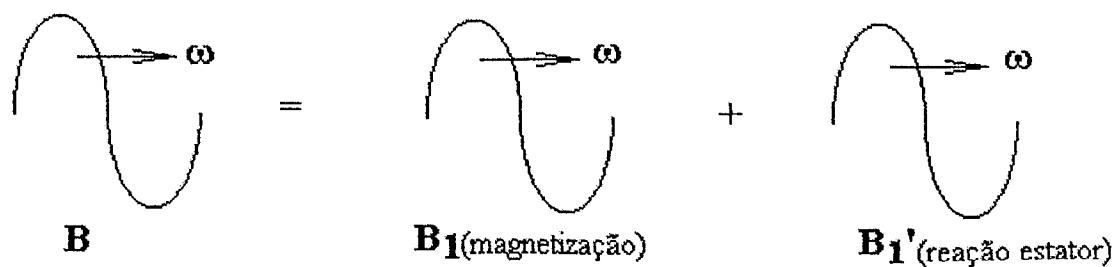


Figura 1.3 – Componentes dos campos magnéticos girantes B .

Pela teoria tradicional da máquina de indução monofásica, na condição de rotor bloqueado, as grandezas indicadas na figura 1.3 mantêm as relações (1.1) e (1.2).

$$B_1 = B_2 \quad (1.1)$$

$$B_1' = B_2' \quad (1.2)$$

Na medida em que o rotor acelera para a direita até a rotação síncrona, não interessando a maneira que isto ocorre, B_1 e B_2 , que inicialmente são iguais, começam a ficar diferentes, aumentando B_1 em relação a B_2 até que para rotações próximas à rotação síncrona, B_1 fica bem maior que B_2 . Efeito exatamente contrário se dá com B_1' e B_2' . Isto ocorre até a rotação síncrona. Acima da rotação síncrona, ainda aumentando a rotação do rotor, irá acontecer o efeito contrário, porém para as rotações próximas da síncrona, onde realmente a máquina deve operar, este efeito contrário não é suficiente para diminuir muito B_1 em relação a B_2 , mantendo-se ainda a condição de B_1 bem maior que B_2 .

É importante lembrar que as tensões induzidas nos terminais do enrolamento do estator da máquina são devidas aos campos magnéticos girantes B_1 e B_2 . O campo girante B_1 induz um sistema trifásico balanceado de tensões com a seqüência de fase positiva, enquanto que o campo girante B_2 faz o mesmo, porém com a seqüência de fase negativa.

Da origem das tensões induzidas nos terminais do enrolamento do estator, e da explanação apresentada sobre os valores relativos de B_1 e B_2 , pode-se concluir que para a máquina de indução indicada na figura 1.1, na condição da chave S aberta, funcionando com rotação igual à síncrona, existe um sistema trifásico de tensões no seu enrolamento, resultante dos sistemas de seqüências positiva e negativa. Exatamente por ser resultante desta condição, o sistema é desbalanceado, porém em um nível relativamente pequeno de desbalanceamento, uma vez que as tensões do sistema de seqüência positiva são maiores que o de seqüência negativa, por razões já vistas. Assim, nestas condições a máquina está preparada para funcionar como um gerador trifásico. Isto se concretiza quando a chave S é fechada e a turbina é devidamente

regulada para manter a rotação do rotor em um dado valor que forneça a potência necessária à carga.

De toda a explanação feita sobre o aspecto funcional da máquina de indução e das tensões induzidas nos terminais de seu enrolamento, conclui-se que é possível fazer um motor de indução trifásico tradicional funcionar com gerador trifásico, tomando-se como referência de tensão e freqüência uma rede elétrica monofásica previamente energizada. Do ponto de vista de potências ativa e reativa, o gerador poderá ou não fornecer potência ativa para a rede elétrica, porém neste esquema necessariamente receberá a potência reativa, contando que na situação mais comum a carga trifásica também necessita de reativos.

Fazendo-se uma análise do funcionamento deste gerador de indução, alguns pontos são evidentemente desvantajosos. O primeiro ponto, mais simples de se resolver, refere-se à potência reativa. Não é interessante que esta potência, pelo menos na sua grande parte, venha da rede elétrica. A colocação conveniente de capacitores resolve esta questão. O segundo ponto desvantajoso refere-se ao desbalanceamento no sistema trifásico de tensões gerado. Se em vazio elétrico este desbalanceamento é aceitável, quando se dá carga ao gerador este desbalanceamento aumenta, originando dois problemas. O nível de desbalanceamento atinge valores inaceitáveis e não existe disponível no esquema da figura 1.1, pelo menos uma grandeza que possa controlar este nível. Tentando exatamente resolver estes dois problemas, surge o Gerador de Indução Trifásico Assimétrico. A idéia deste gerador veio por analogia ao Motor de Indução Trifásico Assimétrico [15], e seu detalhamento vem a seguir.

1.2 GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO

O gerador de indução trifásico assimétrico possui o rotor em gaiola de esquilo e a estrutura ferromagnética do estator idêntica a do motor de indução trifásico tradicional, havendo apenas uma mudança no enrolamento de estator que passa a ter números de espiras diferentes por fase, mantendo-se os deslocamentos angulares entre fases de 120° elétricos, e um capacitor acoplado entre duas de suas fases, conforme mostra a figura 1.4. Adotando-se o número de espiras de uma das fases como referência, por exemplo N_a , tem-se como variáveis de controle as relações de espiras com as outras fases, ou seja, N_b/N_a e N_c/N_a , e o próprio valor do capacitor Cap . Assim estas três variáveis podem controlar o desbalanceamento do sistema trifásico de tensão e o fluxo de potência reativa. Nestas condições, o gerador de indução trifásico assimétrico pode ser conectado a uma rede monofásica com a finalidade de co-geração de energia elétrica fornecendo tensões balanceadas, dentro de uma certa precisão.

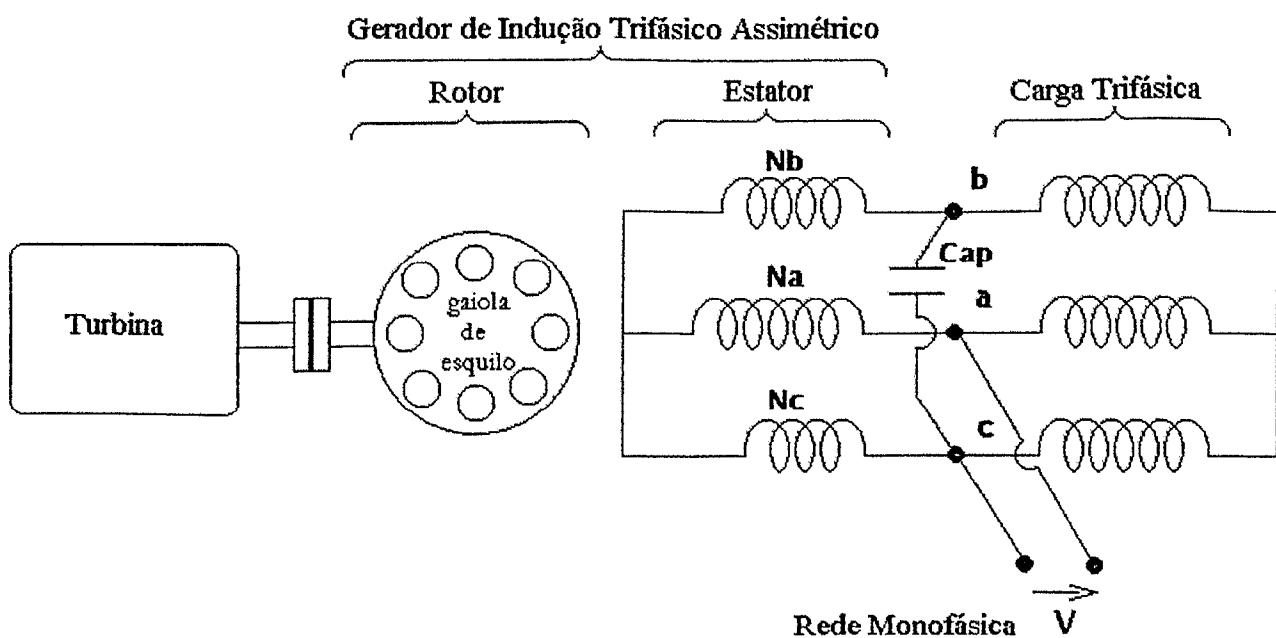


Figura 1.4 - Gerador de indução trifásico assimétrico conectado a rede monofásica

Um protótipo foi ensaiado e suas formas de onda experimentais de corrente nas fases do gerador, em vazio conforme figura 1.6, e em carga motora conforme figura 1.8, são agora apresentadas, pois elas justificam o tipo de modelagem matemática apropriada para simular este gerador.

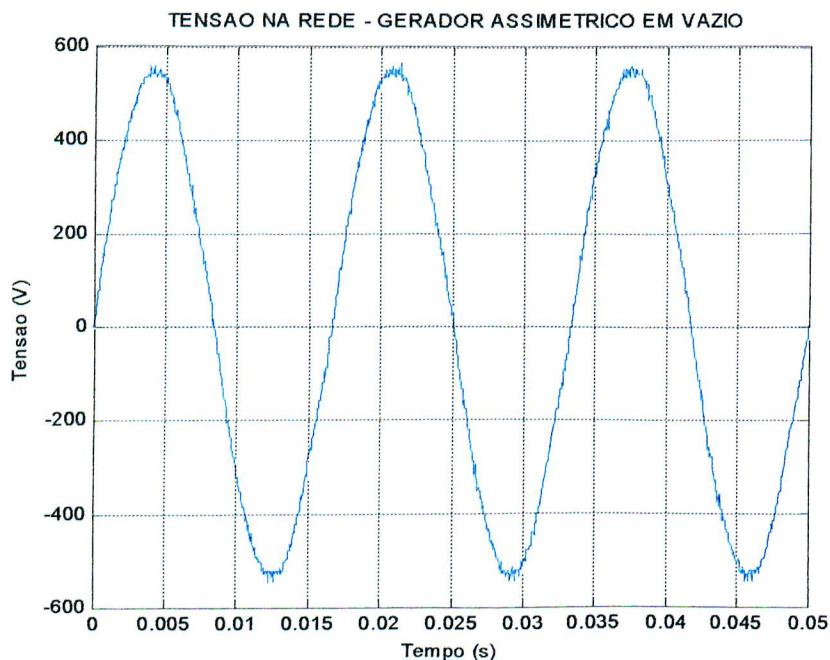


Figura 1.5 – Tensão na rede monofásica para o gerador assimétrico em vazio

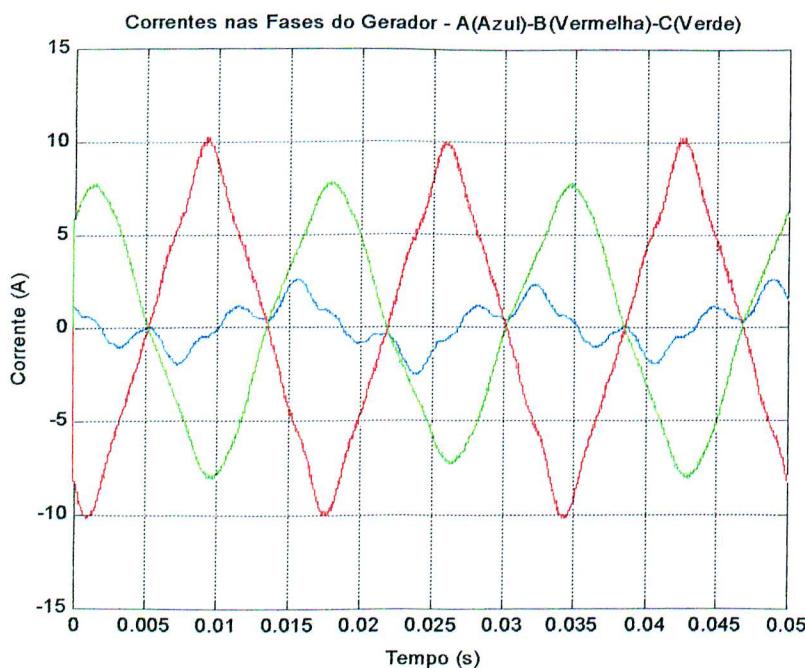


Figura 1.6 – Correntes nas Fases do Gerador Assimétrico em Vazio

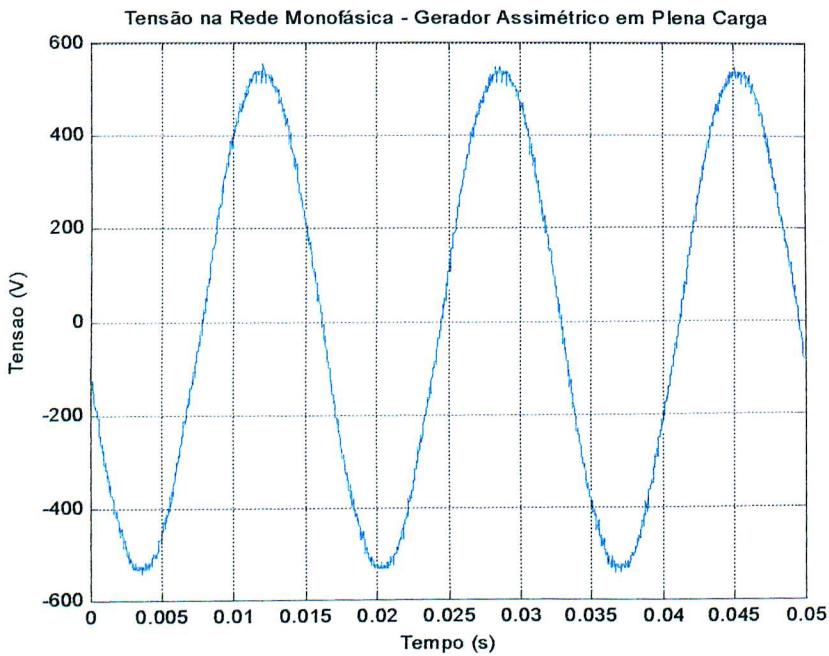


Figura 1.7 – Tensão na rede monofásica para o gerador assimétrico com carga motora

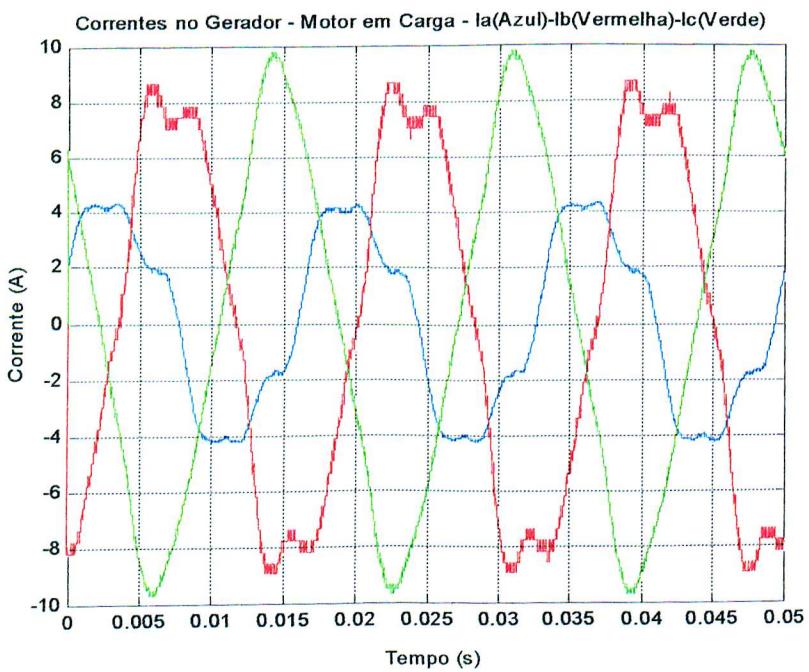


Figura 1.8 – Correntes nas Fases do Gerador Assimétrico em Carga Motora

Pela análise das figuras de 1.5 a 1.8 observa-se que para a tensão senoidal de alimentação, existem distorções temporais nas correntes que exigem uma modelagem matemática no domínio do tempo. Ainda pelas formas de onda das correntes do gerador

assimétrico em vazio e em carga, observa-se que as distorções não vêm apenas da saturação magnética, pois a distorção das ondas de corrente em carga ainda continua existindo em percentual razoável. Isto mostra que a distorção também é provocada por outros efeitos, um deles os harmônicos espaciais. Desta forma, a modelagem do gerador de indução trifásico assimétrico e da carga dever ser feita no domínio do tempo, com a inclusão dos harmônicos espaciais de enrolamento.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com vistas a atingir o objetivo principal desta tese, foi dividido em três etapas o levantamento bibliográfico pertinente ao tema.

Na primeira etapa, abordou-se bibliografias básicas, como livros técnicos e científicos, para ter uma melhor compreensão sobre o funcionamento dos motores e geradores de indução; sendo consultadas as referências [01] a [08].

Na segunda etapa, procurou-se abordar trabalhos científicos, como dissertações e teses relacionadas ao assunto; uma ampla revisão bibliográfica foi realizada, porém poucos trabalhos tiveram afinidade com a abordagem desta tese. Então, serão citadas apenas as referências que contribuíram de algum modo na formação de conceitos básicos para esta tese. Dentre os trabalhos pesquisados, as referências [09] a [17] foram as que mais tiveram afinidade com o tema deste trabalho, ou forneceram subsídios para este trabalho.

As referências de [09] a [11] são trabalhos destinados à conversão de fases, apresentando modelos no domínio da freqüência, no qual se busca compatibilizar uma carga trifásica a uma rede monofásica através do uso de motores elétricos operando em vazio ou através do uso de capacitores e indutores.

As referências [12], [13] e [15] abordam o motor de indução trifásico assimétrico. A referência [12], aborda um modelo matemático no domínio da freqüência apresentando uma proposta para compatibilizar os motores trifásicos a redes monofásica sem o uso de conversores intermediários; [13] apresenta um estudo comparativo entre os motores assimétricos e os motores monofásicos, utilizando um modelo no domínio da freqüência; [15] faz uma análise do conjugado oscilante do motor assimétrico para efeito de projeto, apresentando um modelo desenvolvido no domínio do tempo.

As referências [14] e [16] apresentam um modelo matemático desenvolvido no domínio do tempo para máquinas de indução contemplando os efeitos de enrolamento e saturação magnética. A referência [14] contempla o cálculo do conjugado, e [16] contempla a análise dinâmica do gerador de indução auto-excitado.

A referência [17] apresenta modelos matemáticos no domínio do tempo e da freqüência e contempla a análise térmica dos motores de indução sob condições não ideais de alimentação.

Na terceira etapa, esforços foram concentrados no intuito de buscar bibliografias relacionadas a publicações em congressos e revistas científicas; foram consultadas as referências [18] a [71]. Novamente, da ampla pesquisa realizada, poucos trabalhos tiveram correspondência direta a esta tese. [22], [23], [36], [41] e [42] abordam o funcionamento e desempenho do motor de indução trifásico sendo alimentado por uma fonte monofásica, utilizando modelos matemáticos no domínio da freqüência e no domínio do tempo utilizando a transformação dq0. As referências [18], [19], [24], [25], [26], [27], [29] e [34] contemplam o estudo do motor de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica utilizando um modelo matemático no domínio do tempo, o qual inclui os efeitos dos harmônicos espaciais de enrolamentos. As referências [20] e [21] fazem o estudo do motor de indução trifásico incluindo os conceitos das indutâncias harmônicas e saturação magnética. A referências [28], [32] e [33] fazem estudos de desempenho do motor de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica quando é

imposto um controle para redução das oscilações de conjugado. As referências [30], [31] e [40] fazem uma análise no domínio da freqüência do gerador de indução trifásico ligado a uma rede monofásica e por meio de conversores externos alimentam carga trifásicas. As referências [35], [37], [38] e [39] contemplam a análise do gerador de indução auto-excitado no intuito de determinar a capacidade mínima requerida, bem como o suprimento de cargas monofásicas. As referências [43] a [47] fazem estudos de comportamento do gerador de indução auto-excitado utilizando modelos matemáticos no domínio da freqüência. As referências [48] a [66] abordam o gerador de indução auto-excitado modelados no domínio da freqüência, utilizando métodos para controle de tensão e freqüência geradas, através de testes experimentais e resultados de simulação. A referência [67] trata de estudos do gerador de indução através de análises experimentais sem apresentar modelos matemáticos. As referências [68] a [70] fazem uma análise dos efeitos da saturação em geradores de indução auto-excitados, sem considerar os efeitos do terceiro harmônico espacial da distribuição de condutores. A referência [71] estuda os sistemas elétricos de potência que contém o gerador de indução utilizando o modelo de pequeno sinal.

Em suma, nesta última etapa do levantamento bibliográfico, pode-se dizer que a maior parte dos trabalhos encontrados abordava os seguintes temas: - geradores de indução trifásicos simétricos auto-excitados com modelos desenvolvidos no domínio da freqüência; análises experimentais, sem apresentar modelos matemáticos, obtendo conclusões com relação a custos confiabilidade, desempenho; estudos dos efeitos da saturação em geradores de indução auto-excitados, resolvendo equações diferenciais no domínio do tempo através da transformação “dq0”; estudos sobre o comportamento dinâmico dos geradores de indução, utilizando modelo “dq0”, sem considerar a saturação. As referências [18] a [34] foram as que apresentaram assuntos mais próximos ao tema desta tese.

Em face do exposto, fica claro o caráter inovador deste trabalho.

1.4 APRESENTAÇÃO DA TESE

Neste capítulo são apresentados os objetivos e as justificativas deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentado o modelo matemático no domínio do tempo para o gerador de indução trifásico assimétrico conectado a um sistema de distribuição de energia elétrica monofásico. Neste modelo são contemplados os efeitos dos harmônicos espaciais de enrolamento e para o sistema como um todo, são consideradas duas situações de carga acoplada ao gerador: uma com carga resistiva e outra com carga motora.

No capítulo 3 faz-se o desenvolvimento do projeto do gerador, visando determinar as relações entre os números de espiras das fases e o valor adequado do capacitor para obter tensões geradas equilibradas. Inicialmente é tomada uma máquina de indução trifásica comercial, ensaiada e seus parâmetros do circuito equivalente são tomados como plataforma para o projeto. Ainda neste capítulo, simulações computacionais incluindo os efeitos dos harmônicos espaciais de enrolamento são realizadas para as possibilidades de projeto encontradas, bem como simulações para o gerador em carga supondo oscilações de tensão na rede monofásica.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais obtidos em laboratório, no qual o gerador foi submetido as seguintes condições de carregamento: vazio pleno, carga resistiva, carga motora em vazio, carga motora em pleno carregamento.

No capítulo 5 é feita a comprovação teórico-experimental, no qual são confrontados os resultados obtidos por meio de simulação computacional com os obtidos em laboratório. Desta forma, são confrontados os resultados para as diversas condições de carregamento do gerador assimétrico descritas no capítulo 4.

No capítulo 6 são apresentados os resultados de simulações digitais para um gerador de indução trifásico assimétrico de 60 cv suprindo uma carga motora de mesma potência. São obtidos elementos suficientes para propor algumas alternativas de projeto para um gerador desta

potência. Ainda neste capítulo, é feita uma análise do fluxo de potência ativa e reativa objetivando contemplar a rede monofásica.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO

2.1 INTRODUÇÃO

Para que seja feita análise do comportamento do gerador de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica, faz-se necessário o desenvolvimento de um modelo matemático que o represente. Este modelo deve retratar os diversos fenômenos físicos que ocorram no gerador quando o mesmo estiver em operação; determinar, por meio da resolução de equações diferenciais, as diversas grandezas elétricas e mecânicas associadas ao gerador, bem como realizar estudos relacionados ao comportamento dinâmico e transitório do gerador de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica.

De acordo com o exposto, este capítulo tem por meta desenvolver um modelo matemático no domínio do tempo que represente o gerador de indução trifásico assimétrico conectado a uma rede monofásica. Este modelo baseia-se nas equações de fluxos enlaçados nos enrolamentos e da equação do conjugado. Por questões de simplicidade optou-se por não contemplar as características magnéticas ou de saturação do núcleo, bem como as perdas rotacionais da máquina. Entretanto, optou-se pela inclusão dos harmônicos espaciais de campo magnético provindo dos enrolamentos da máquina, por acreditar que as distorções das formas de onda das correntes nas fases do gerador sejam, em grande parte, provocadas por eles.

Todo o desenvolvimento matemático é embasado na modelagem desenvolvida para o motor de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica [15], fazendo-se as devidas adaptações para o gerador de indução trifásico assimétrico.

Também é desenvolvido um modelo matemático para o motor de indução simétrico que será acoplado as equações do gerador assimétrico, servido de carga para o mesmo. O modelo do motor de indução acompanha a mesma linha de raciocínio adotada para o gerador assimétrico.

Pretende-se a partir da modelagem matemática, obter elementos suficientes para o desenvolvimento do projeto do gerador de indução trifásico assimétrico conectado a uma rede monofásica.

2.2 EQUAÇÕES ELÉTRICAS GENÉRICAS - DOMÍNIO DO TEMPO

Por questões de simplicidade na apresentação, as equações no domínio do tempo são desenvolvidas apenas para duas fases genéricas “i” e “j” da máquina. Somente os resultados finais do desenvolvimento matemático é que são apresentados para as fases do estator e rotor.

Imaginando-se as 2 fases genéricas “i” e “j” do gerador pode-se escrever :

$$v_i = -r_i \cdot i_i - \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (2.1)$$

$$v_j = -r_j \cdot i_j - \frac{d\lambda_j}{dt} \quad (2.2)$$

$$\lambda_i = L_{ii} \cdot i_i + L_{ij} \cdot i_j + L_{di} \cdot i_i \quad (2.3)$$

$$\lambda_j = L_{jj} \cdot i_j + L_{ij} \cdot i_i + L_{dj} \cdot i_j \quad (2.4)$$

onde:

v_i , v_j - tensões nas fases “i” e “j” , respectivamente;

i_i , i_j - correntes nas fases “i” e “j” , respectivamente;

λ_i, λ_j - concatenamentos de fluxo magnético das fases “i” e “j”, respectivamente;

r_i, r_j - resistências das fases “i” e “j”, respectivamente;

L_2, L_{jj} - indutâncias próprias das fases “i” e “j”, sem dispersão, respectivamente;

L_{ij} - indutância mútua entre as fases “i” e “j”, respectivamente;

L_{di}, L_{dj} - indutâncias de dispersão das fases “i” e “j”, respectivamente.

Concentrando-se a atenção nas fases “i” e “j” da máquina, analisa-se o efeito magnético de uma das fases sobre a outra. Por exemplo, pode-se pensar na distribuição de densidade de campo magnético produzido pela corrente na fase “j”, que provoca um concatenamento de fluxo magnético na fase “i”. Esta distribuição de densidade de campo magnético pode ser decomposta espacialmente na “série de Fourier”. Cada componente harmônico da referida distribuição, por sua vez, provoca um componente harmônico de concatenamento de fluxo magnético, por exemplo, na fase “i”. A relação entre esta componente e a corrente que o produz, i_j , define a indutância harmônica L_{ijh} , onde o índice h representa a sua ordem. Para o cálculo de L_{ijh} , deve-se partir da grandeza física originária de todo este processo, ou seja, a distribuição espacial de força magnetomotriz produzida pela corrente “ i_j ” ao circular pelo enrolamento da fase “j”.

Admitindo-se para a fase “j”, um enrolamento excêntrico de dupla camada, formado por n_j bobinas distribuídas, centrado na posição α_j , na qual circula a corrente i_j , segundo referência [14], admitindo-se que cada bobina possui N_j espiras, passo da bobina igual a $\beta_j\pi$, a componente harmônica de ordem h da força magnetomotriz da fase “j”, F_{mmjh} , é dada por (2.5). A figura 2.1 mostra um corte transversal do enrolamento, onde o eixo de referência α está fixo no estator da máquina e serve para localizar qualquer fase da mesma.

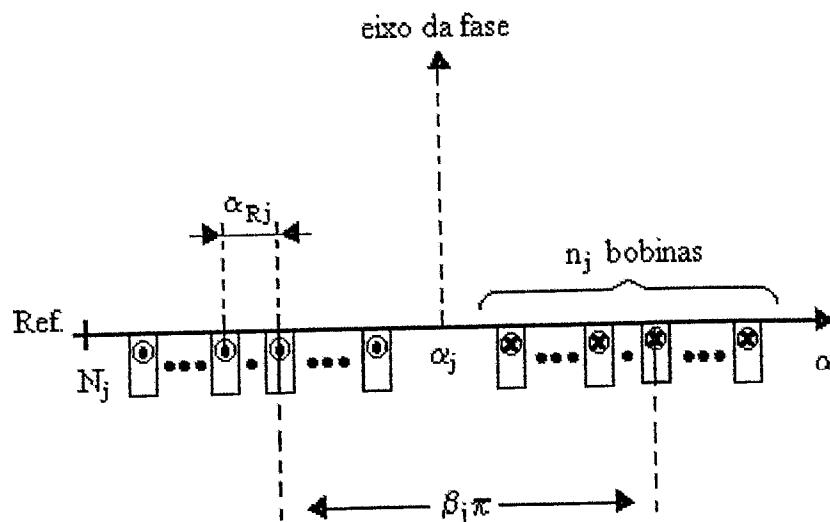


Figura 2.1 - Distribuição das bobinas do enrolamento da fase “j”.

$$F_{mm_{jh}}(\alpha) = \frac{2}{\pi} \cdot N_j \cdot n_j \cdot k_{pjh} \cdot k_{djh} \cdot i_j \cdot \frac{1}{h} \cdot \cos \left[h \cdot (\alpha - \alpha_j) \right] \quad (2.5)$$

onde:

k_{pjh} , k_{dih} - fatores de passo e distribuição, respectivamente, para o harmônico h , dados por (2.6)

e (2.7) segundo referência [1].

$$k_{pj,h} = \sin\left(h\beta_j, \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$k_{djh} = \frac{\sin\left(h \cdot n_j \cdot \frac{\alpha_{Rj}}{2}\right)}{n_j \cdot \sin\left(h \cdot \frac{\alpha_{Rj}}{2}\right)} \quad (2.7)$$

A distribuição de densidade de campo magnético B_{jh} produzida por $F_{mm,jh}(\alpha)$ é obtida pela lei de Ampère e resulta em (2.8). Neste caso a relutância do circuito magnético do ferro é desprezada em relação a relutância do entreferro, considerada uniforme.

$$B_{jh}(\alpha) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_0}{\sigma} \cdot N_j \cdot n_j \cdot k_{pjh} \cdot k_{djh} \cdot i_j \cdot \frac{1}{h} \cdot \cos[h(\alpha - \alpha_j)] \quad (2.8)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do ar e σ é o comprimento radial do entreferro.

Para a obtenção do concatenamento de fluxo magnético da fase “j” na fase “i”, λ_{ijh} , deve-se obter o fluxo magnético produzido pela fase “j” que enlaça a fase “i”. Sendo assim, da referência [14] partindo-se de (2.8), obtém-se o referido fluxo magnético e em seguida obtém-se o concatenamento λ_{ijh} , expresso por (2.9).

$$\lambda_{ijh} = k_1 \cdot N_i \cdot N_j \cdot i_j \cdot \frac{k_{wih} \cdot k_{wjh}}{h^2} \cos[h(\alpha_i - \alpha_j)] \quad (2.9)$$

$$k_1 = 4 \cdot \frac{2 \cdot p \cdot L \cdot R \cdot n_i \cdot n_j \cdot \mu_0}{\pi \cdot \sigma} \quad (2.10)$$

$$k_{wih} = k_{pih} \cdot k_{dih} \quad (2.11)$$

$$k_{wjh} = k_{pjh} \cdot k_{djh} \quad (2.12)$$

onde:

L - comprimento do cilindro rotórico;

R - raio do entreferro;

2p - número de pólos da máquina;

n_i , n_j - números de bobinas das fases “i” e “j”, respectivamente;

N_i , N_j - números de espiras das fases “i” e “j”, respectivamente;

k_{dih} , k_{djh} - fatores de distribuição das fases “i” e “j”, respectivamente;

k_{pih} , k_{pjh} - fatores de passo das fases “i” e “j”, respectivamente.

É importante observar que λ_{ijh} não inclui o fluxo concatenado de dispersão da fase.

A indutância harmônica de ordem h entre as fases “i” e “j”, L_{ijh} , pode ser obtida por

(2.13).

$$L_{ijh} = \frac{\lambda_{ijh}}{i_j} \quad (2.13)$$

Desta forma, substituindo-se (2.9) em (2.13) tem-se:

$$L_{ijh} = k_i \cdot N_i \cdot N_j \cdot \frac{k_{ijh}}{h^2} \cdot \cos[h(\alpha_i - \alpha_j)] \quad (2.14)$$

$$k_{ijh} = k_{wih} \cdot k_{wjh} \quad (2.15)$$

O concatenamento total de fluxo magnético de uma fase, por exemplo “i”, λ_i , pode ser decomposto na soma das contribuições do concatenamento do fluxo magnético que enlaça estator e rotor, λ_i' , e o fluxo de dispersão, λ_{di} . Desta forma tem-se:

$$\lambda_i = \lambda_{di} + \lambda_i' \quad (2.16)$$

$$\lambda_{di} = L_i \cdot i_i \quad (2.17)$$

onde:

L_i - indutância de dispersão da fase “i”.

A indutância de dispersão pode ser admitida constante e desta forma pode-se escrever:

$$L_i = k_{di} \cdot N_i^2 \quad (2.18)$$

onde:

k_{di} - permeância do circuito magnético de dispersão.

Segundo a referência [14], o concatenamento de fluxo λ_i' pode ser obtido pela superposição das componentes harmônicas de concatenamento λ_{ijh} de todas as fases. Desta forma pode-se escrever:

$$\lambda_i' = \sum_j \sum_h \lambda_{ijh} \quad (2.19)$$

De (2.13) e (2.19) vem:

$$\lambda_i' = \sum_j \sum_h L_{ijh} \cdot i_j \quad (2.20)$$

De (2.16), (2.17) e (2.20) vem (2.21).

$$\lambda_i = L_i \cdot i_i + \sum_h \sum_j L_{ijh} \cdot i_j \quad (2.21)$$

Finalmente, substituindo-se (2.21) em (2.1) tem-se:

$$v_i = -r_i \cdot i_i - L_i \cdot \frac{di_i}{dt} - \sum_h \sum_j \left[L_{ijh} \cdot \frac{di_j}{dt} + i_j \cdot \frac{dL_{ijh}}{dt} \right] \quad (2.22)$$

2.3 REPRESENTAÇÃO DAS FASES DO GERADOR ASSIMÉTRICO

As equações desenvolvidas anteriormente referenciam a fases, a gaiola de esquilo deve ser representada por um enrolamento trifásico equivalente. Desta forma, utiliza-se como nomenclatura, as fases “a, b, c” para o enrolamento trifásico do estator e as fases “A, B, C” para o enrolamento trifásico equivalente do rotor em gaiola. A figura 2.2 mostra esquematicamente a posição relativa dos eixos das diversas fases da máquina, e onde se vê que θ_R é o ângulo que define a posição instantânea do rotor em relação ao estator.

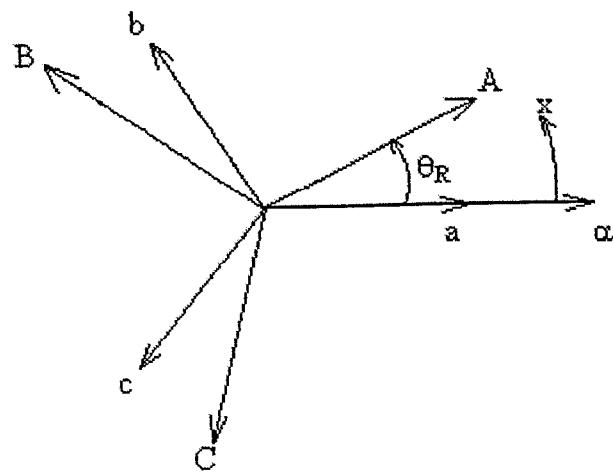


Figura 2.2 - Representação dos eixos magnéticos das fases dos enrolamentos da máquina de indução trifásica assimétrica

Deseja-se aplicar as equações anteriores, à máquina assimétrica, e como as fases “i” e “j” são genéricas, representam todas as fases a, b, c, A, B, C. Desta forma, os ângulos α_i e α_j assumem os valores:

$$\alpha_a = 0 \quad (2.23)$$

$$\alpha_b = \frac{2\pi}{3} \quad (2.24)$$

$$\alpha_c = -\frac{2\pi}{3} \quad (2.25)$$

$$\alpha_A = \theta_R \quad (2.26)$$

$$\alpha_B = \theta_R + \frac{2\pi}{3} \quad (2.27)$$

$$\alpha_C = \theta_R - \frac{2\pi}{3} \quad (2.28)$$

2.4 INDUTÂNCIAS HARMÔNICAS DO GERADOR ASSIMÉTRICO

Com base nas equações (2.14) e (2.18) e com os valores de (2.23) a (2.28) pode-se determinar as indutâncias harmônicas e de dispersão para o gerador assimétrico. O enrolamento equivalente à gaiola de esquilo é simétrico e, portanto $N_A=N_B=N_C=N_R$, onde N_R passa a ser o número de espiras por fase do rotor. Desta forma as expressões (2.29) a (2.61) representam as indutâncias próprias, mútuas e de dispersão da máquina assimétrica, conforme referência [16].

$$L_{aah} = k \cdot N_a^2 \cdot \frac{k_{aah}}{h^2} \quad (2.29)$$

$$L_{bbh} = k \cdot N_b^2 \cdot \frac{k_{bbh}}{h^2} \quad (2.30)$$

$$L_{cch} = k \cdot N_c^2 \cdot \frac{k_{cch}}{h^2} \quad (2.31)$$

$$L_{AAh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{AAh}}{h^2} \quad (2.32)$$

$$L_{BBh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{BBh}}{h^2} \quad (2.33)$$

$$L_{CCh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{CCh}}{h^2} \quad (2.34)$$

$$L_{abh} = k \cdot N_a \cdot N_b \cdot \frac{k_{abh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.35)$$

$$L_{bah} = k \cdot N_b \cdot N_a \cdot \frac{k_{bah}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.36)$$

$$L_{ach} = k \cdot N_a \cdot N_c \cdot \frac{k_{ach}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.37)$$

$$L_{cah} = k \cdot N_c \cdot N_a \cdot \frac{k_{cah}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.38)$$

$$L_{bch} = k \cdot N_b \cdot N_c \cdot \frac{k_{bch}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.39)$$

$$L_{ccb} = k \cdot N_c \cdot N_b \cdot \frac{k_{ccb}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.40)$$

$$L_{ABh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.41)$$

$$L_{ACH} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.42)$$

$$L_{BAh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.43)$$

$$L_{CAh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.44)$$

$$L_{CBh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.45)$$

$$L_{BCh} = k \cdot N_R^2 \cdot \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.46)$$

$$L_{aA\ h} = k \cdot N_a \cdot N_R \cdot \frac{k_{aR\ h}}{h^2} \cdot \cos(h \cdot \theta) \quad (2.47)$$

$$L_{aB\ h} = k \cdot N_a \cdot N_R \cdot \frac{k_{aR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.48)$$

$$L_{aC\ h} = k \cdot N_a \cdot N_R \cdot \frac{k_{aR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.49)$$

$$L_{bA\ h} = k \cdot N_b \cdot N_R \cdot \frac{k_{bR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.50)$$

$$L_{bB\ h} = k \cdot N_b \cdot N_R \cdot \frac{k_{bR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot (\theta) \right] \quad (2.51)$$

$$L_{bC\ h} = k \cdot N_b \cdot N_R \cdot \frac{k_{bR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.52)$$

$$L_{cA\ h} = k \cdot N_c \cdot N_R \cdot \frac{k_{cR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.53)$$

$$L_{cB\ h} = k \cdot N_c \cdot N_R \cdot \frac{k_{cR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.54)$$

$$L_{cC\ h} = k \cdot N_c \cdot N_R \cdot \frac{k_{cR\ h}}{h^2} \cdot \cos \left[h \cdot (\theta) \right] \quad (2.55)$$

$$L_{da} = k_{da} \cdot N_a^2 \quad (2.56)$$

$$L_{db} = k_{db} \cdot N_b^2 \quad (2.57)$$

$$L_{dc} = k_{dc} \cdot N_c^2 \quad (2.58)$$

$$L_{dA} = k_{dA} \cdot N_A^2 \quad (2.59)$$

$$L_{dB} = k_{dB} \cdot N_B^2 \quad (2.60)$$

$$L_{dC} = k_{dC} \cdot N_C^2 \quad (2.61)$$

2.5 CONCATENAMENTOS DE FLUXO MAGNÉTICO DO GERADOR ASSIMÉTRICO

O concatenamento total de fluxo, em uma fase, pode ser obtida a partir de (2.21), fazendo “i” e “j” varrerem todas as fases “a, b, c, A, B, C”, conforme [16]. Desta forma de (2.21) e com os resultados de (2.29) a (2.61) tem-se as expressões (2.62) a (2.67).

$$\lambda_a = k \cdot N_a \cdot \left\{ N_a \cdot \sum_h \frac{k_{aah}}{h^2} \cdot i_a + N_b \cdot \sum_h \frac{k_{abh}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_b + N_c \cdot \sum_h \frac{k_{ach}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_c + \right. \\ \left. N_R \cdot \left[\sum_h \frac{k_{ahrh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_A + \sum_h \frac{k_{ahrh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_B + \sum_h \frac{k_{ahrh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_C \right] \right\} + L_{da} \cdot i_a \quad (2.62)$$

$$\lambda_b = k \cdot N_a \cdot \left\{ N_a \cdot \sum_h \frac{k_{bah}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_a + N_b \cdot \sum_h \frac{k_{bbh}}{h^2} \cdot i_b + N_c \cdot \sum_h \frac{k_{bch}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_c + \right. \\ \left. N_R \cdot \left[\sum_h \frac{k_{brh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_A + \sum_h \frac{k_{brh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_B + \sum_h \frac{k_{brh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_C \right] \right\} + L_{db} \cdot i_b \quad (2.63)$$

$$\lambda_c = k \cdot N_a \cdot \left\{ N_a \cdot \sum_h \frac{k_{cah}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_a + N_b \cdot \sum_h \frac{k_{cbh}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_b + N_c \cdot \sum_h \frac{k_{cch}}{h^2} \cdot i_c + \right. \\ \left. N_R \cdot \left[\sum_h \frac{k_{crh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_A + \sum_h \frac{k_{crh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_B + \sum_h \frac{k_{crh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_C \right] \right\} + L_{dc} \cdot i_c \quad (2.64)$$

$$\lambda_A = k \cdot N_R \cdot \left\{ N_a \cdot \sum_h \frac{k_{ahrh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_a + N_b \cdot \sum_h \frac{k_{brh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_b + \right. \\ \left. N_c \cdot \sum_h \frac{k_{crh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_c + N_R \cdot \left[\sum_h \frac{k_{rhR}}{h^2} \cdot i_A + \sum_h \frac{k_{rrh}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_B + \sum_h \frac{k_{rrh}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_C \right] \right\} + L_{dA} \cdot i_A \quad (2.65)$$

$$\lambda_B = k \cdot N_R \cdot \left\{ N_a \cdot \sum_h \frac{k_{ahrh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_a + N_b \cdot \sum_h \frac{k_{brh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_b + \right.$$

$$N_c \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot i_c + N_R \cdot \left[\sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left(h \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_A + \sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot i_B + \sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left(h \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_C \right] + L_{dB} \cdot i_B \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} \lambda_c = k \cdot N_R \cdot & \left\{ N_a \cdot \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot i_a + N_b \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos \left[h \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot i_b + \right. \\ & N_c \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_c + N_R \cdot \left. \left[\sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \cos \left(h \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_A + \sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot i_B + \sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot i_C \right] \right\} + L_{dc} \cdot i_c \end{aligned} \quad (2.67)$$

Pretende-se trabalhar com as grandezas de rotor referidas a uma fase do estator, por exemplo a fase “a”. Para tanto, pode-se escrever:

$$N_R \cdot i_A = N_a \cdot i_A' \quad (2.68)$$

$$N_R \cdot i_B = N_a \cdot i_B' \quad (2.69)$$

$$N_R \cdot i_C = N_a \cdot i_C' \quad (2.70)$$

$$N_a \cdot \lambda_A = N_R \cdot \lambda_A' \quad (2.71)$$

$$N_a \cdot \lambda_B = N_R \cdot \lambda_B' \quad (2.72)$$

$$N_a \cdot \lambda_C = N_R \cdot \lambda_C' \quad (2.73)$$

$$N_a^2 \cdot L_{dA} = N_R^2 \cdot L_{dA}' \quad (2.74)$$

$$N_a^2 \cdot L_{dB} = N_R^2 \cdot L_{dB}' \quad (2.75)$$

$$N_a^2 \cdot L_{dC} = N_R^2 \cdot L_{dC}' \quad (2.76)$$

Substituindo-se as equações de (2.68) a (2.76) em (2.62) a (2.67) e utilizando-se também das expressões (2.56) a (2.61) vem:

$$\lambda_a = K \cdot \left\{ \left(\sum_h \frac{k_{aah}}{h^2} + K_L \right) i_a + \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{abh}}{h^2} \cdot \cos \left(h \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_b + \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{ach}}{h^2} \cdot \cos \left(h \frac{2\pi}{3} \right) \cdot i_c + \right. \quad (2.62)$$

$$\sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i'_A + \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i'_B + \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i'_C \quad (2.77)$$

$$\lambda_b = K \cdot \left\{ \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bah}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_a + \frac{1}{b^2} \cdot \left[\sum_h \frac{k_{bbh}}{h^2} + K_L \right] + \frac{1}{b \cdot c} \cdot \sum_h \frac{k_{bch}}{h^2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i'_A + \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i'_B + \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i'_C \right\} \quad (2.78)$$

$$\lambda_c = K \cdot \left\{ \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cah}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_a + \frac{1}{b \cdot c} \cdot \sum_h \frac{k_{cbh}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_b + \frac{1}{c^2} \cdot \left(\sum_h \frac{k_{ech}}{h^2} \cdot i_c + K_L \right) + \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i'_A + \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i'_B + \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i'_C \right\} \quad (2.79)$$

Para o rotor em gaiola de esquilo, do enrolamento trifásico equivalente, tem-se que $i_A + i_B + i_C = 0$. Deste modo, fazendo manipulações algébricas, obtém-se as seguintes equações de concatenação de fluxo para as fases do rotor, referidas à fase “a”:

$$\lambda_A' = K \cdot \left\{ \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_a + \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_b + \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] i_c + \left[\sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \left[1 - \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \right] + K'_L \right] i'_A \right\} \quad (2.80)$$

$$\lambda_B' = K \cdot \left\{ \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_a + \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_b + \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] i_c + \left[\sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \left[1 - \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \right] + K'_L \right] i'_B \right\} \quad (2.81)$$

$$\lambda_C' = K \cdot \left\{ \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_a + \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \cdot i_b + \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos(h\theta) \cdot i_c + \left[\sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \cdot \left[1 - \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \right] + K'_L \right] i'_C \right\} \quad (2.82)$$

$$[L] = K \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} & L_{26} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} \\ L_{14} & L_{24} & L_{34} & L_{44} & 0 & 0 \\ L_{15} & L_{25} & L_{35} & 0 & L_{44} & 0 \\ L_{16} & L_{26} & L_{36} & 0 & 0 & L_{44} \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 L_{11} &= \sum_h \frac{k_{aah}}{h^2} + K_L; & L_{22} &= \sum_h \frac{k_{bbh}}{h^2} + K_L; \\
 L_{33} &= \sum_h \frac{k_{cch}}{h^2} + K_L; & L_{44} &= \sum_h \frac{k_{RRh}}{h^2} \left[1 - \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \right] + K'_L; \\
 L_{12} &= \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{abh}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right); & L_{13} &= \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{ach}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right); \\
 L_{14} &= \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos(h \cdot \theta); & L_{15} &= \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]; \\
 L_{16} &= \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right]; & L_{23} &= \frac{1}{b \cdot c} \cdot \sum_h \frac{k_{bch}}{h^2} \cdot \cos\left(h \cdot \frac{2\pi}{3}\right); \\
 L_{24} &= \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right]; & L_{25} &= \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos(h \cdot \theta); \\
 L_{26} &= \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]; & L_{34} &= \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]; \\
 L_{35} &= \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos\left[h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right]; & L_{36} &= \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \cdot \cos(h \cdot \theta);
 \end{aligned} \quad (2.89)$$

2.6 RELAÇÃO ENTRE K , K_L , K_L' E OS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SIMÉTRICO

Considerando o gerador de indução trifásico simétrico em vazio síncrono, ligado em Y, e chamando de i_{ao} , i_{bo} e i_{co} suas correntes de fase do estator, para o harmônico espacial fundamental, da expressão (2.77) pode-se escrever:

$$\lambda_{ao} = K \left\{ (k_{aa1} + K_L) \cdot i_{ao} - 0.5 (k_{ab1} \cdot i_{bo} + k_{ac1} \cdot i_{co}) \right\} \quad (2.90)$$

Como:

$$i_{ao} + i_{bo} + i_{co} = 0 \quad (2.91)$$

$$k_{aa1} = k_{ab1} = k_{ac1} \quad (2.92)$$

Substituindo-se (2.91) e (2.92) em (2.90), vem:

$$\lambda_{ao} = \frac{3}{2} \cdot K \cdot k_{aa1} \cdot i_{ao} + K \cdot K_L \cdot k_{aa1} \cdot i_{ao} \quad (2.93)$$

A primeira parcela de λ_{ao} na expressão (2.93) representa o concatenamento de fluxo magnetizante, enquanto que a segunda parcela representa a dispersão da fase “a”.

Representando por X_m e X_s as reatâncias de magnetização e de dispersão do estator por fase do gerador simétrico, com base na expressão (2.93) pode-se escrever:

$$X_m = 3 \cdot \pi \cdot f \cdot K \cdot k_{aa1} \quad (2.94)$$

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot K \cdot K_L \cdot k_{aa1} \quad (2.95)$$

portanto:

$$K = \frac{X_m}{3 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{aa1}} \quad (2.96)$$

$$K_L = \frac{3 \cdot X_s}{2 \cdot X_m} \quad (2.97)$$

2.7 EQUAÇÕES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO CONECTADO A UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MONOFÁSICO

O gerador assimétrico segue a mesma linha do gerador simétrico convencional, sofrendo alteração, apenas, no número de espiras por fase. Nestas condições a máquina pode ser conectada a um sistema de distribuição de energia elétrica monofásico, que para a conexão Y é indicada na figura 2.3. Em analogia ao motor de indução trifásico assimétrico [15], um capacitor é acoplado entre as extremidades “B” e “C”, tendo como finalidade à excitação, em parte, do gerador, bem como melhorar o equilíbrio das tensões de linha na condição de regime permanente nominal.

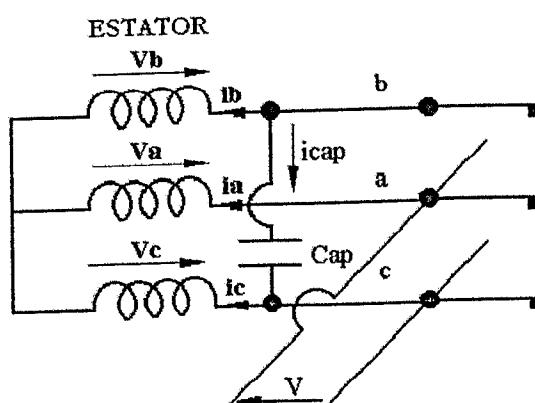


Figura 2.3 - Diagrama esquemático de ligação do gerador de indução trifásico assimétrico com rotor em gaiola de esquilo, conectado a uma rede monofásica.

Fazendo-se uma análise completa das equações elétricas e mecânicas do gerador de indução trifásico assimétrico, baseando-se nas equações preestabelecidas anteriormente para uma máquina de indução genérica, tem-se:

$$V_a = -r_a \cdot i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (2.98)$$

$$V_b = -r_b \cdot i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (2.99)$$

$$V_c = -r_c \cdot i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (2.100)$$

Com base na figura 2.3 pode-se escrever:

$$V = V_a - V_c \quad (2.101)$$

$$V_{cap} = V_b - V_c \quad (2.102)$$

$$i_{cap} = Cap \cdot \frac{dV_{cap}}{dt} \quad (2.103)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.104)$$

Manipulando matematicamente as equações de (2.98) a (2.104), obtém-se:

$$V = -(r_a + r_c) \cdot i_a - r_c \cdot i_b - \frac{d\lambda_{ac}}{dt} \quad (2.105)$$

$$V_{cap} = -(r_b + r_c) \cdot i_b - r_c \cdot i_a - \frac{d\lambda_{bc}}{dt} \quad (2.106)$$

onde:

$$\lambda_{ac} = \lambda_a - \lambda_c$$

$$\lambda_{bc} = \lambda_b - \lambda_c$$

Para o rotor tem-se:

$$0 = -r'_R \cdot i'_A - \frac{d\lambda'_A}{dt} \quad (2.107)$$

$$0 = -r'_R \cdot i'_B - \frac{d\lambda'_B}{dt} \quad (2.108)$$

$$0 = -r'_R \cdot i'_C - \frac{d\lambda'_C}{dt} \quad (2.109)$$

Para resolver o sistema de equações (2.105) a (2.109) deve-se inicialmente relacionar os concatenamentos de fluxo magnético com as correntes. Para a máquina assimétrica, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda'_A \\ \lambda'_B \\ \lambda'_C \end{bmatrix} = [L] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i'_A \\ i'_B \\ i'_C \end{bmatrix} \quad (2.110)$$

onde:

$[L]$ - matriz de indutâncias (2.88)

Da equação (2.110) e (2.104) pode-se obter (2.111).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ac} \\ \lambda_{bc} \\ \lambda'_A \\ \lambda'_B \\ \lambda'_C \end{bmatrix} = L_1 \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i'_A \\ i'_B \\ i'_C \end{bmatrix} \quad (2.111)$$

onde:

$$[L_1] = K \cdot \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & 0 & 0 \\ A_{14} & A_{24} & 0 & A_{33} & 0 \\ A_{15} & A_{25} & 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2.112)$$

Os termos da matriz $[L_1]$ são:

$$A_{11} = L_{11} - 2 \cdot L_{13} + L_{33}$$

$$A_{12} = L_{12} - L_{23} - L_{13} + L_{33}$$

$$A_{13} = L_{14} - L_{34}$$

$$A_{14} = L_{15} - L_{35}$$

$$A_{15} = L_{16} - L_{36}$$

$$A_{22} = L_{22} - 2 \cdot L_{23} + L_{33}$$

$$A_{23} = L_{24} - L_{34}$$

$$A_{24} = L_{25} - L_{35}$$

$$A_{25} = L_{26} - L_{36}$$

$$A_{33} = L_{44}$$

onde os valores de L_{ij} estão apresentados em (2.89).

Introduzindo-se as equações mecânicas da máquina tem-se:

$$Tb - Tm = J \cdot \frac{dW_R}{dt} \quad (2.113)$$

$$W_R = \frac{d\theta_R}{dt} \quad (2.114)$$

onde:

J - momento de inércia das partes girantes;

W_R - velocidade angular da máquina;

θ_R - deslocamento angular, em graus mecânicos;

Tm - conjugado eletromagnético;

Tb - conjugado de turbina.

O conjugado eletromagnético é dado por:

$$Tm = \frac{p}{4} \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c & i'_A & i'_B & i'_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d[L]}{d\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i'_A \\ i'_B \\ i'_C \end{bmatrix} \quad (2.115)$$

onde:

$$\theta = \frac{p}{2} \theta_R$$

p - número de pólos;

$[L]$ - matriz de indutâncias (2.88);

θ - deslocamento angular em graus elétricos.

Fazendo-se a derivada da matriz indutância, [L], em relação ao ângulo θ obtém-se:

$$\left[\frac{d[L]}{d\theta} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -K.s_{11} & -K.s_{12} & -K.s_{13} \\ 0 & 0 & 0 & -K.s_{21} & -K.s_{22} & -K.s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & -K.s_{31} & -K.s_{32} & -K.s_{33} \\ -K.s_{11} & -K.s_{21} & -K.s_{31} & 0 & 0 & 0 \\ -K.s_{12} & -K.s_{22} & -K.s_{32} & 0 & 0 & 0 \\ -K.s_{13} & -K.s_{23} & -K.s_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.116)$$

onde:

$$s_{11} = \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \sin(h.\theta) \quad s_{21} = \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \sin\left(h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$s_{12} = \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \sin\left(h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad s_{22} = \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \sin(h.\theta)$$

$$s_{13} = \sum_h \frac{k_{aRh}}{h^2} \sin\left(h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad s_{23} = \frac{1}{b} \cdot \sum_h \frac{k_{bRh}}{h^2} \sin\left(h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$s_{31} = \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \sin\left(h\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad s_{32} = \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \sin\left(h\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$s_{33} = \frac{1}{c} \cdot \sum_h \frac{k_{cRh}}{h^2} \sin(h.\theta)$$

Através das equações (2.115), (2.116) e (2.104) pode-se obter:

$$T_m = -\frac{p.K.R_1}{2} \cdot i_a - \frac{p.K.R_2}{2} \cdot i_b \quad (2.117)$$

Onde:

$$R_1 = (s_{11} - s_{31}) \cdot i'_A + (s_{12} - s_{32}) \cdot i'_B + (s_{13} - s_{33}) \cdot i'_C \quad (2.118)$$

$$R_2 = (s_{21} - s_{31}) \cdot i'_A + (s_{22} - s_{32}) \cdot i'_B + (s_{23} - s_{33}) \cdot i'_C \quad (2.119)$$

2.8 RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DO GERADOR ASSIMÉTRICO

Para se obter um sistema de equações que represente o funcionamento de uma máquina de indução assimétrica trifásica, com alimentação monofásica, uma das técnicas é unir as equações elétricas (2.105) a (2.110) com as mecânicas (2.113), (2.114) e (2.117) formando um sistema matricial de equações, (2.120).

$$\left[\frac{d[\lambda']}{dt} \right] = -[V'] - [R'][I'] \quad (2.120)$$

Onde:

$$[\lambda'] = [L_1'][I'] \quad (2.121)$$

Como:

$$\left[\frac{d[\lambda']}{dt} \right] = \left[\frac{d[L_1']}{dt} \right] \cdot [I'] + [L_1'] \cdot \left[\frac{d[I']}{dt} \right] \quad (2.122)$$

De (2.120) vem:

$$\left[\frac{d[I']}{dt} \right] = [L_1']^{-1} \cdot \left\{ -[V'] - \left([R'] + \left[\frac{d[L_1']}{dt} \right] \right) [I'] \right\} \quad (2.123)$$

onde:

$$[I'] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ V_{cap} \\ i'_A \\ i'_B \\ i'_C \\ Wr \\ \theta \end{bmatrix}; \quad [V'] = \begin{bmatrix} V \\ V_{cap} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{Tb}{J} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad [\lambda'] = \begin{bmatrix} \lambda_{ac} \\ \lambda_{bc} \\ V_{cap} \\ \lambda'_A \\ \lambda'_B \\ \lambda'_C \\ Wr \\ \theta \end{bmatrix};$$

$$[R'] = \begin{bmatrix} (r_a + r_c) & r_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_c & (r_b + r_c) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Cap} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_A' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_B' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_C' & 0 & 0 \\ \frac{-K.R_1.p}{2.J} & \frac{-K.R_2.p}{2.J} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{p}{2} & 0 \end{bmatrix};$$

$$[L_1'] = \begin{bmatrix} K.A_{11} & K.A_{12} & 0 & K.A_{13} & K.A_{14} & K.A_{15} & 0 & 0 \\ K.A_{12} & K.A_{22} & 0 & K.A_{23} & K.A_{24} & K.A_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.A_{13} & K.A_{23} & 0 & K.A_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.A_{14} & K.A_{24} & 0 & 0 & K.A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ K.A_{15} & K.A_{25} & 0 & 0 & 0 & K.A_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ e}$$

$$\left[\frac{dL_1'}{dt} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & K.B_{14} & K.B_{15} & K.B_{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K.B_{24} & K.B_{25} & K.B_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.B_{14} & K.B_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.B_{15} & K.B_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.B_{16} & K.B_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{d\theta}{dt}.$$

$$B_{14} = s_{31} - s_{11}$$

$$B_{15} = s_{32} - s_{12}$$

$$B_{16} = s_{33} - s_{13}$$

$$B_{24} = s_{31} - s_{21}$$

$$B_{25} = s_{32} - s_{22}$$

$$B_{26} = S_{33} - S_{23}$$

Sendo assim, de posse de todas as equações elétricas e mecânicas do gerador de indução trifásico assimétrico conectado a uma rede monofásica pode-se obter, através de simulações matemáticas, todo o comportamento do mesmo em regime transitório e permanente. Salientando-se que todas as variáveis como correntes de estator e rotor, tensão de alimentação, velocidade angular e conjugados podem ser obtidos em qualquer instante.

O ponto alto desta modelagem, além de permitir acompanhamento do desempenho do gerador assimétrico em qualquer instante de tempo, está em se fazer um estudo mais detalhado da máquina envolvendo os transitórios elétricos e mecânicos.

2.9 EQUAÇÕES DO GERADOR ASSIMÉTRICO COM CARGA RESISTIVA ACOPLADA

O equacionamento matemático do gerador de indução trifásico assimétrico com carga resistiva acoplada em seus terminais é desenvolvido baseado na figura 2.4.

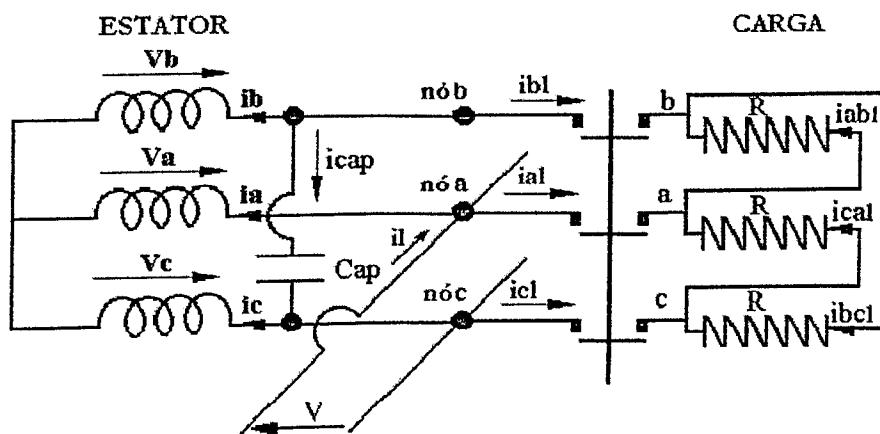


Figura 2.4 – Esquema de ligação do gerador de indução trifásico assimétrico alimentando uma carga trifásica resistiva.

Da figura 2.4, pela teoria de circuitos elétricos tem-se:

$$\text{No nó a} \quad \longrightarrow \quad ical - ia - iabl + il = 0 \quad (2.124)$$

$$\text{No nó b} \longrightarrow iabl - ibcl - ib - icap = 0 \quad (2.125)$$

$$\text{No nó c} \longrightarrow ibcl + icap - il - ic - ical = 0 \quad (2.126)$$

Na carga tem-se:

$$iabl + ibcl + ical = 0 \quad (2.127)$$

$$Vab = R.iabl \quad (2.128)$$

$$Vbc = R.Ibcl \quad (2.129)$$

$$Vca = R.Ical \quad (2.130)$$

$$Vab + Vbc + Vca = 0 \quad (2.131)$$

Das equações (2.124), (2.125) e (2.104) tem-se:

$$icap - iabl + ibcl + ib = 0 \quad (2.132)$$

Das equações (2.127), (2.129) e (2.132) tem-se:

$$icap + ical + ibcl + ib + \frac{Vbcl}{R} = 0 \quad (2.133)$$

Substituindo as equações (2.102), (2.103), (2.129) em (2.133) obtém-se:

$$\frac{dVcap}{dt} = \left(\frac{V - R.ib}{R.cap} \right) - \frac{2.Vcap}{R.cap} \quad (2.134)$$

Ainda da figura 2.4 tem-se:

$$Vca = -V \quad (2.135)$$

$$ial = iabl - ical \quad (2.136)$$

$$ibl = ibcl - iabl \quad (2.137)$$

$$icl = ical - ibcl \quad (2.138)$$

Para melhor apresentação visual nas simulações, adota-se a seguinte notação para as relações do número de espiras no gerador:

$$b1 = \frac{1}{b} = \frac{N_b}{N_a} \quad (2.139)$$

$$c1 = \frac{1}{c} = \frac{N_c}{N_a} \quad (2.140)$$

Através das equações representadas pelo sistema (2.123) tem-se condições de simular, no domínio do tempo, o sistema da figura 2.3, ou seja, o gerador de indução trifásico assimétrico sem carga acoplada em seus terminais. Por outro lado, para se fazer simulações - envolvendo uma análise dinâmica - do gerador de indução trifásico assimétrico com carga trifásica resistiva acoplada em seus terminais, utiliza-se das equações que caracterizam o sistema da figura 2.4, ou melhor, faz-se a substituição de (2.103) por (2.134) no sistema de equações (2.123).

2.10 EQUAÇÕES DO GERADOR ASSIMÉTRICO COM CARGA MOTORA ACOPLADA

O desenvolvimento matemático, que representa o sistema em que o gerador de indução trifásico assimétrico alimenta um motor de indução trifásico simétrico, é baseado na figura 2.5.

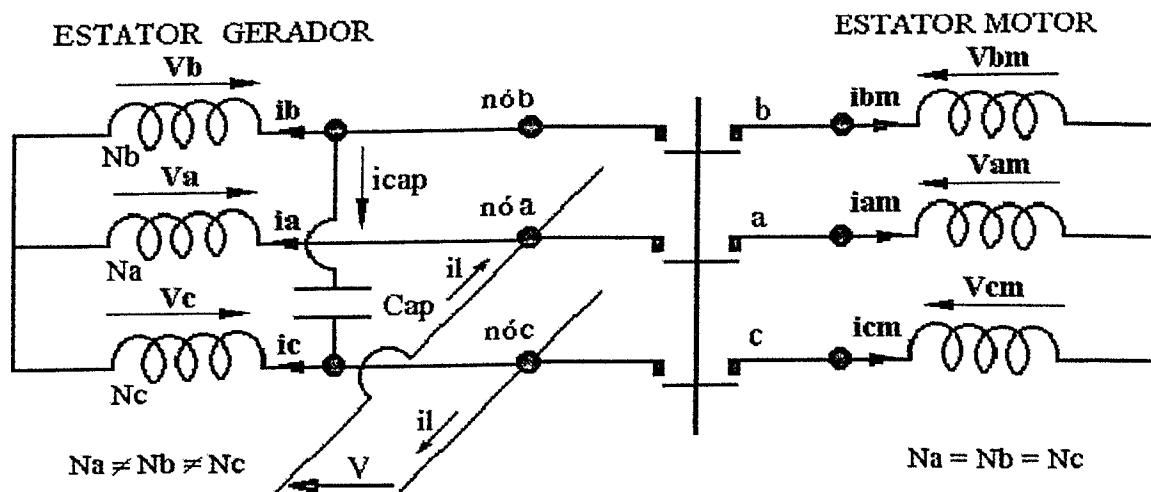


Figura 2.5 – Esquema de ligação do gerador de indução trifásico assimétrico alimentando uma carga motora trifásica.

Antes de equacionar o sistema da figura 2.5 como um todo, se faz necessário equacionar o motor de indução trifásico. Posteriormente será acoplado as equações do motor às do gerador assimétrico.

2.10.1 EQUAÇÕES DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SIMÉTRICO

Por questões de simplicidade e para não tornar a apresentação das equações muito repetitiva, será tomado como base algumas equações elétricas já definidas anteriormente. Desta forma, para o motor de indução trifásico simétrico tem-se:

$$v_i = r_i \cdot i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (2.141)$$

$$v_j = r_j \cdot i_j + \frac{d\lambda_j}{dt} \quad (2.142)$$

Aplicando os conceitos das equações (2.3) a (2.21) a partir de (2.141) e (2.142) tem-se:

$$v_i = r_i \cdot i_i + L_i \cdot \frac{di_i}{dt} + \sum_h \sum_j \left[L_{ijh} \cdot \frac{di_j}{dt} + i_j \cdot \frac{dL_{ijh}}{dt} \right] \quad (2.143)$$

Para a representação do modelo do motor de indução trifásico simétrico no domínio do tempo e em coordenadas “abc”, toma-se as equações de (2.23) a (2.97), particularizando-se os valores das relações do número de espiras “b” e “c” para um valor unitário.

Com base na figura 2.5, pode-se escrever:

$$V_{ac} = V_{am} - V_{cm} \quad (2.144)$$

$$V_{bc} = V_{bm} - V_{cm} \quad (2.145)$$

onde:

$$V_{am} = r_{am} \cdot i_{am} + \frac{d\lambda_{am}}{dt} \quad (2.146)$$

$$V_{bm} = r_{bm} i_{bm} + \frac{d\lambda_{bm}}{dt} \quad (2.147)$$

$$V_{cm} = r_{cm} i_{cm} + \frac{d\lambda_{cm}}{dt} \quad (2.148)$$

$$I_{cm} = -(I_{am} + I_{bm}) \quad (2.149)$$

Das equações (2.144) a (2.150), obtém-se:

$$Vac = (r_{am} + r_{cm}) i_{am} + r_{cm} i_{bm} + \frac{d\lambda_{acm}}{dt} \quad (2.150)$$

$$Vbc = (r_{bm} + r_{cm}) i_{bm} + r_{cm} i_{am} + \frac{d\lambda_{bcm}}{dt} \quad (2.151)$$

onde:

$$\lambda_{acm} = \lambda_{am} - \lambda_{cm}$$

$$\lambda_{bcm} = \lambda_{bm} - \lambda_{cm}$$

Para o rotor em gaiola de esquilo, tem-se:

$$0 = r'_{Rm} i'_{Am} + \frac{d\lambda'_{Am}}{dt} \quad (2.152)$$

$$0 = r'_{Rm} i'_{Bm} + \frac{d\lambda'_{Bm}}{dt} \quad (2.153)$$

$$0 = r'_{Rm} i'_{Cm} + \frac{d\lambda'_{Cm}}{dt} \quad (2.154)$$

Para resolver o sistema de equações do motor de indução, equações de (2.144) a (2.154), deve-se relacionar os concatenamentos de fluxo magnético – provindo das equações (2.77) a (2.82) - com as correntes conforme escrito a seguir:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{acm} \\ \lambda_{bcm} \\ \lambda'_{Am} \\ \lambda'_{Bm} \\ \lambda'_{Cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{am} \\ i_{bm} \\ i'_{Am} \\ i'_{Bm} \\ i'_{Cm} \end{bmatrix} \quad (2.155)$$

onde: $[L_{1m}] = [L_1]$, definido pela equação (2.112).

As equações mecânicas para o motor de indução são dadas por:

$$Tm_m - Tc_m = J_m \cdot \frac{dW_{Rm}}{dt} \quad (2.156)$$

$$W_{Rm} = \frac{d\theta_{Rm}}{dt} \quad (2.157)$$

onde:

J_m - momento de inércia das partes girantes do motor;

W_{Rm} - velocidade angular do motor;

θ_{Rm} - deslocamento angular, em graus mecânicos;

Tm_m - conjugado eletromagnético do motor;

Tc_m - conjugado de carga do motor.

O conjugado eletromagnético do motor é dado por:

$$Tm_m = \frac{p_m}{4} \cdot [i_{am} \quad i_{bm} \quad i_{cm} \quad i'_{Am} \quad i'_{Bm} \quad i'_{Cm}] \cdot \left[\frac{d[L_m]}{d\theta} \right] \cdot \begin{bmatrix} i_{am} \\ i_{bm} \\ i_{cm} \\ i'_{Am} \\ i'_{Bm} \\ i'_{Cm} \end{bmatrix} \quad (2.158)$$

onde:

p_m - número de pólos;

$[L_m] = [L]$ - matriz de indutâncias definida em (2.88);

θ - deslocamento ângular em graus elétricos.

Das equações (2.158), (2.116) e (2.149) pode-se obter:

$$Tm_m = -\frac{p_m \cdot K \cdot R_{1m}}{2} \cdot i_{am} - \frac{p_m \cdot K \cdot R_{2m}}{2} \cdot i_{bm} \quad (2.159)$$

onde:

$R_{1m} = R_1$ - definido pela equação (2.118);

$R_{2m} = R_2$ - definido pela equação (2.119).

O sistema de equações que representa o motor de indução trifásico simétrico, com fechamento em estrela é dado por:

$$\left[\frac{d[I_m']}{dt} \right] = [L_{1m}']^{-1} \cdot \left\{ [V'] - \left([R_m'] + \left[\frac{d[L_{1m}']}{dt} \right] \right) \cdot [I_m'] \right\} \quad (2.160)$$

onde:

$$\begin{aligned} [I_m'] &= \begin{bmatrix} i_{am} \\ i_{bm} \\ i_{Am} \\ i_{Bm} \\ i_{Cm} \\ Wr_m \\ \theta_m \end{bmatrix}; \quad [V'] = \begin{bmatrix} V_{ac} \\ V_{cb} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{Tc}{J_m} \\ \theta_m \end{bmatrix}; \\ [R_m'] &= \begin{bmatrix} (r_{am} + r_{cm}) & r_{cm} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_{cm} & (r_{bm} + r_{cm}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{Am} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{Bm} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{Cm} & 0 & 0 \\ \frac{K \cdot R_{1m} \cdot p_m}{2 \cdot J_m} & \frac{K \cdot R_{2m} \cdot p_m}{2 \cdot J_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{p_m}{2} & 0 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\left[L_{1m} \right] = \begin{bmatrix} K.A_{11} & K.A_{12} & K.A_{13} & K.A_{14} & K.A_{15} & 0 & 0 \\ K.A_{12} & K.A_{22} & K.A_{23} & K.A_{24} & K.A_{25} & 0 & 0 \\ K.A_{13} & K.A_{23} & K.A_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.A_{14} & K.A_{24} & 0 & K.A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ K.A_{15} & K.A_{25} & 0 & 0 & K.A_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\left[\frac{dL_{1m}}{dt} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K.B_{14} & K.B_{15} & K.B_{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K.B_{24} & K.B_{25} & K.B_{26} & 0 & 0 \\ K.B_{14} & K.B_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.B_{15} & K.B_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K.B_{16} & K.B_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Uma vez definida as equações do motor de indução no domínio do tempo em coordenadas “abc”, torna-se possível a associação das equações do motor de indução trifásico simétrico com as equações do gerador de indução trifásico assimétrico. Desta forma, ainda com base na figura 2.5, pela teoria de circuitos elétricos tem-se:

$$\text{No nó a} \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \quad i_l - i_a - i_{am} = 0 \quad (2.161)$$

$$\text{No nó b} \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \quad -i_{cap} - i_b - i_{bm} = 0 \quad (2.162)$$

$$\text{No nó c} \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \quad -i_l - i_{cm} - i_c - i_{cap} = 0 \quad (2.163)$$

Das equações (2.103), (2.161) e (2.163) tem-se:

$$\frac{dV_{cap}}{dt} = \frac{-i_b - i_{bm}}{Cap} \quad (2.164)$$

Através da junção de todas as equações – elétricas e mecânicas – do motor de indução trifásico simétrico às do gerador de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica, obtém-se um sistema de equações que representa a figura 2.5. O sistema de equações é mostrado a seguir:

$$\left[\frac{d[I_g', I_m']}{dt} \right] = [L_{1g}', L_{1m}']^{-1} \cdot \left\{ [V_g', V_m'] - \left([R_g', R_m'] + \left[\frac{d[L_1', L_{1m}']}{dt} \right] \right) [I_g', I_m'] \right\} \quad (2.165)$$

Este sistema de equações permite obter informações de todo o comportamento do sistema nos regimes transitório e permanente. Salientando-se que todas as variáveis (gerador, motor e rede) podem ser obtidas em qualquer instante de tempo.

Capítulo 3

3. PROJETO DE UM PROTÓTIPO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO

3.1 INTRODUÇÃO

O projeto do gerador de indução trifásico assimétrico é feito a partir de uma máquina de indução trifásica tradicional, substituindo-se apenas o enrolamento do estator e preservando-se a mesma estrutura magnética do estator e rotor em gaiola de esquilo, conforme definido em [15]. Inicialmente ensaia-se a máquina simétrica para a obtenção dos parâmetros de seu circuito equivalente.

Aplicam-se inicialmente os valores dos parâmetros do circuito equivalente na modelagem apresentada no Capítulo 2. Através do sistema de equações da máquina assimétrica (2.123), é possível variar “b”, “c” e “Cap”, onde os fatores “b” e “c” representam as relações do número de espiras da fase “a” do estator pelo número de espiras das fases “b” e “c” do estator, respectivamente, obtendo-se os respectivos valores de conjugado “T”, rotação “ ω_r ” e tensões de linha geradas. Os diversos conjuntos de valores de “b”, “c” e “Cap”, que resultam em tensões de linha balanceadas e com um valor de potência muito próximo ou igual ao nominal, são resultados que permitem projetar o gerador assimétrico, tal que, na condição de corrente nominal ele fornece aproximadamente ou exatamente a potência nominal e tensões geradas balanceadas. Para todos estes conjuntos de valores de “b”, “c” e “Cap” que resultaram em potência nominal e tensões geradas balanceadas, através da modelagem no domínio do tempo apresentada no item 2.3, obtém-se as curvas de conjugado eletromagnético, rotação, correntes nas fases do gerador e

tensões de linha em função do tempo. Analisando-se os resultados obtidos é possível escolher diversos conjuntos “b, c e Cap”, de forma que resultem em tensões geradas balanceadas e não ultrapasse o limite máximo da potência que o gerador possa fornecer. Desta forma, são obtidos os elementos necessários para projetar e construir o gerador de indução trifásico assimétrico.

3.2 ENSAIO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA SIMÉTRICA

Para que seja feito o levantamento dos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução trifásica simétrica é necessário realizar os seguintes ensaios: rotor a vazio, rotor bloqueado e medição de resistência do enrolamento do estator à temperatura nominal de funcionamento.

Para testar a validade de tais parâmetros, ensaiia-se a máquina de indução trifásica simétrica comercial na condição nominal de carga e comparam-se estes resultados com os teóricos. Estes resultados teóricos são obtidos por meio de simulação computacional, na qual os valores do circuito equivalente são aplicados ao modelo do motor de indução trifásico simétrico no domínio do tempo, conforme (2.160), e verificam-se os valores nominais da rotação, conjugado e corrente de fase.

A máquina de indução trifásica simétrica original tem os seguintes dados de placa:

- Modelo - 90S
- Potência - 2 cv
- Freqüência - 60 Hz
- Rotação - 1720 rpm
- Tensão - 220V/380V
- Corrente - 6,9A/3,99A
- Proteção - IP54

- I_p/I_n - 6,80
- F_s - 1,15
- I_{sol} - B
- Categoria - N
- Regime - S1
- Rendimento - 77,80
- $\text{Cos}\phi$ - 0,78
- J - 0,0045
- Enrolamento do estator trifásico, 4 pólos, 3 ranhuras por pólo por fase.

3.2.1 DEFINIÇÃO DO PONTO DE FUNCIONAMENTO NOMINAL DE CARGA DO MOTOR SIMÉTRICO

Comparando os dados de placa da máquina de indução trifásica simétrica com o ensaio experimental em carga, verificou-se que a mesma não desenvolve 2 CV em 1720 rpm quando a corrente de fase é de 4 A. No referido ensaio, para a corrente de fase de 4 A, a rotação resultou em 1734 rpm e um valor médio de 7.02 N.m para o conjugado eletromagnético útil, medido no torquímetro. Como no ensaio em vazio o valor médio do conjugado eletromagnético desenvolvido pelo motor resultou em 0.50 N.m, o valor médio do conjugado eletromagnético total desenvolvido pela máquina fica sendo 7.52 N.m. Desta forma há necessidade de se definir um ponto de operação convencionado como nominal. Pelo fato de não querer exceder o limite de corrente de placa, na condição de regime permanente, definiu-se como ponto de funcionamento nominal a condição em que o máquina desenvolve 4 A de fase. Isto significa que a condição nominal de carga para este máquina foi definida para:

Corrente de fase: 4 A

Rotação: 1734 rpm

Potência: 1.73 CV

Tensão: 220 V-Δ / 380 V-Y

Conjugado total: 7.52 N.m

Para funcionamento da máquina como gerador, adota-se como condição nominal os seguintes valores:

Corrente de fase: 4 A

Conjugado total: 7.52 N.m

3.2.2 ENSAIO EM VAZIO

Tomando-se a máquina convencional com conexão triângulo no estator, alimentando-o com tensão e freqüência nominais e rotor a vazio, verifica-se os valores de tensão, corrente e potência elétrica de entrada conforme indicado no esquema de ligação da figura 3.1.

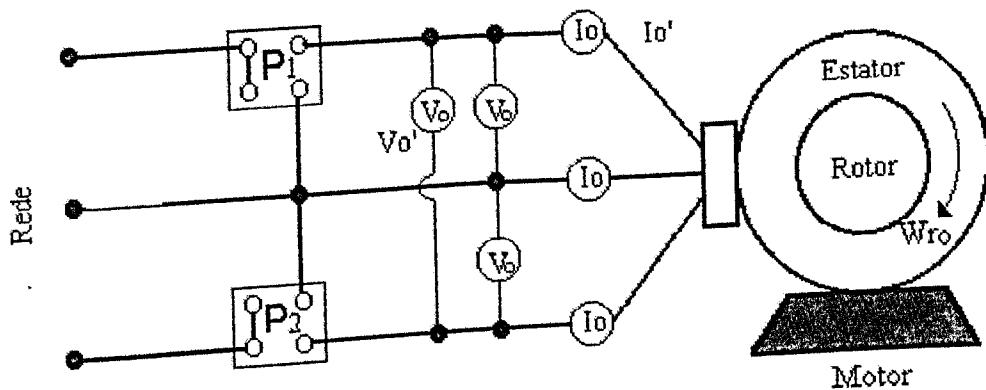


Figura 3.1 - Esquema de medição - Ensaio à vazio

Chamando-se P_1 , P_2 , V_0' e I_0' as potências, tensão e corrente indicada pelos instrumentos de medição na figura 3.1, e P_0 , I_0 e V_0 a potência, corrente e tensão por fase respectivamente, pode-se escrever as seguintes equações:

$$P_0 = \frac{P1 + P2}{3} \quad (3.1)$$

$$I_0 = \frac{I_0'}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

$$V_0 = V_0' \quad (3.3)$$

Os resultados obtidos são:

$$P_0 = 300 \pm 3,0 \text{ W}$$

$$\omega_0 = 1796 \pm 2 \text{ rpm}$$

$$I_0 = 5,0 \pm 0,01 \text{ A}$$

$$V_0 = 220 \pm 3,0 \text{ V}$$

3.2.3 ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO

Como o próprio nome já diz, este é um ensaio com o rotor da máquina travado. Através de um equipamento que fornece tensão variável, aplica-se um valor de tensão nos terminais da máquina a fim de se obter a sua corrente nominal.

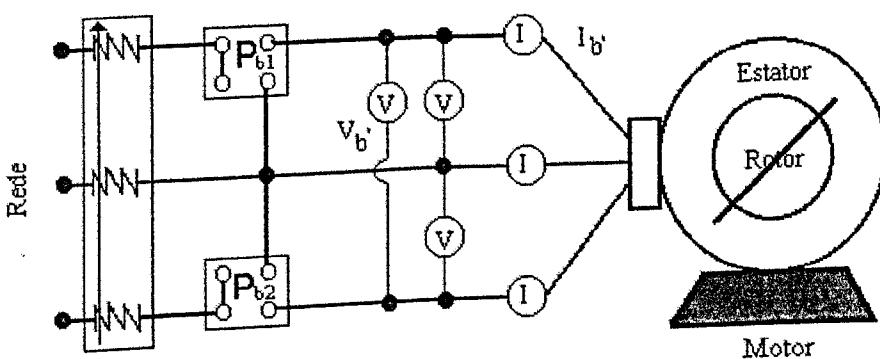


Figura 3.2 - Ligação dos instrumentos de medição para ensaio com rotor bloqueado

Chamando-se $Pb1$, $Pb2$, Vb' e Ib' as potências, tensão e corrente indicadas pelos instrumentos de medição no esquema da figura 3.2 e Pb , Ib e Vb a potência, corrente e tensão por fase respectivamente, para o motor ligado em estrela pode-se escrever:

$$Pb = \frac{Pb1 + Pb2}{3} \quad (3.4)$$

$$Ib = Ib' \quad (3.5)$$

$$Vb = \frac{Vb'}{\sqrt{3}} \quad (3.6)$$

Os resultados obtidos são:

$$Pb = 350 \pm 3,0 \text{ W}$$

$$\omega_{rb} = 0 \text{ rpm}$$

$$Ib = 6,90 \pm 0,01 \text{ A}$$

$$Vb = 38,0 \pm 0,5 \text{ V}$$

3.2.4 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ESTATOR

A medição da resistência por fase do enrolamento do estator é feita diretamente dos bornes da máquina quando desligada. Depois de efetuado o ensaio de rotor bloqueado, quando o enrolamento ainda se encontra aquecido, através de uma ponte de Kelvin mede-se o valor da resistência do enrolamento de estator.

Para a máquina em questão tem-se:

$$Rs = 3,83 \pm 0,03 \Omega$$

3.3 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Adotando-se o mesmo procedimento apresentado na referência [13], e que apenas a título de comodidade para o leitor, transcreve-se a seguir as equações relativas ao referido

procedimento, obtém-se os parâmetros do circuito equivalente, cujos resultados estão na tabela 3.1.

$$X_o = \sqrt{\left(\frac{V_o}{I_o}\right)^2 - \left(\frac{P_o}{I_o^2}\right)^2} \quad (3.7)$$

$$X_b = \sqrt{\left(\frac{V_b}{I_b}\right)^2 - \left(\frac{P_b}{I_b^2}\right)^2} \quad (3.8)$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2} \quad (3.9)$$

$$X_{r'} = \frac{X_b}{A + K_c} \quad (3.10)$$

$$X_m = X_o - K_c \cdot X_{r'} \quad (3.11)$$

$$R_{r'} = \frac{R_b - R_s}{A^2} \quad (3.12)$$

$$X_s = K_c \cdot X_{r'} \quad (3.13)$$

Tabela 3.1 - Parâmetros do circuito equivalente da máquina simétrica

$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$X_{r'}(\Omega)$	$R_{r'}(\Omega)$
$3,83 \pm 0,03$	$3,18 \pm 0,03$	$72,62 \pm 0,70$	$3,18 \pm 0,03$	$3,11 \pm 0,03$

Uma vez definidos os parâmetros do circuito equivalente da máquina simétrica, faz-se uma verificação destes parâmetros. Desta forma, a verificação é feita por meio de simulação computacional, considerando o harmônico espacial de até 25º ordem, utilizando as equações matemáticas que representam um motor de indução trifásico simétrico, conforme descrito no Capítulo 2. Sendo assim, as figuras 3.3 a 3.5 mostram os valores nominais de conjugado, rotação e correntes para os parâmetros apresentados na tabela 3.1.

➤ Motor Simétrico

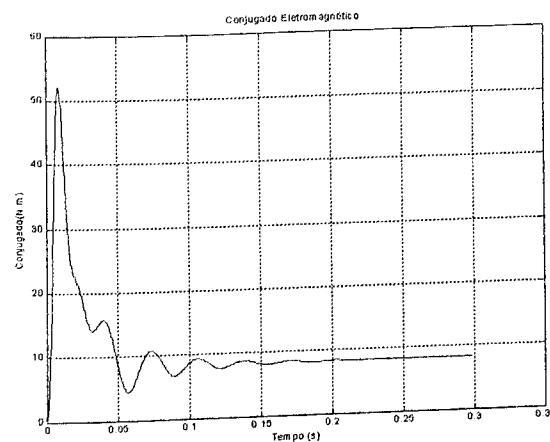


Figura 3.3 – Conjugado Eletromagnético

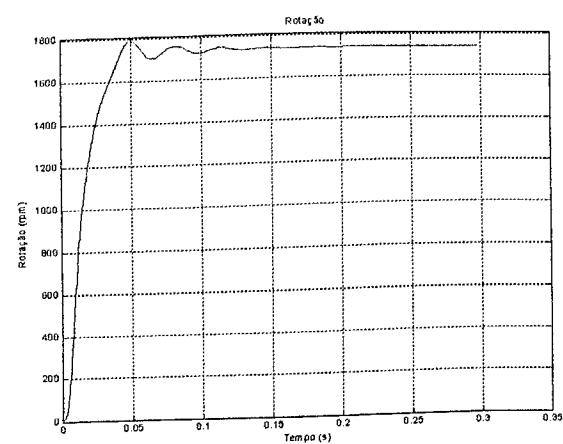


Figura 3.4 – Velocidade

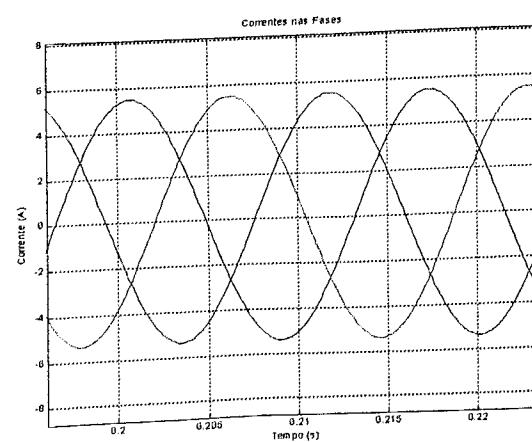


Figura 3.5 – Correntes nas fases

3.4 PROJETO DO GERADOR ASSIMÉTRICO

O projeto do protótipo do gerador de indução trifásico assimétrico é desenvolvido a partir das equações da máquina apresentadas no Capítulo 2 e dos ensaios já realizados neste capítulo.

Aplicando-se os resultados da tabela 3.1, que equivale aos parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução trifásica simétrica, na equação (2.165) é possível obter resultados para o conjugado eletromagnético, tensões geradas nos terminais de saída do gerador, velocidade angular, e correntes de fase do gerador. Como o sistema de equações descrito em (2.165) corresponde ao sistema como um todo – gerador, motor e rede monofásica - será necessário incluir dados de uma outra máquina de indução trifásica para servir de carga motora para o gerador. Para servir de carga motora, tomam-se os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico simétrico com os seguintes dados de placa: 2 cv, 380V/220V, 60 Hz, utilizado em [17]. Os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros do circuito equivalente da máquina que servirá de carga

$Rs(\Omega)$	$Xs(\Omega)$	$Xm(\Omega)$	$Xr'(\Omega)$	$Rr'(\Omega)$
3,9811	3,6348	72,028	3,6348	2,8308

3.4.1 SISTEMÁTICA DE PROJETO

Com base nas equações desenvolvidas no capítulo 2, foram desenvolvidos dois programas computacionais no MatLab no qual permitem simular, no domínio do tempo, os seguintes sistemas:

- PROG_1 - simula o sistema representado pela figura 2.4, o gerador de indução trifásico assimétrico em vazio ou com carga resistiva acoplada em seus terminais, utiliza-se das equações que caracterizam o sistema da figura 2.4, ou melhor, faz-se a substituição de (2.103) por (2.134) no sistema de equações (2.123);
- PROG_2 – simula o sistema representado pela figura 2.5, o gerador de indução trifásico assimétrico em vazio ou com carga motora acoplada em seus terminais, utiliza-se o sistema de equações (2.165).
- PROG_3 – programa responsável pela leitura dos valores máximos das tensões de linha e correntes nas fases do gerador.

No intuito de suprir cargas motoras, o projeto visa contemplar um gerador de indução trifásico assimétrico que forneça tensões balanceadas para um motor de indução trifásico simétrico. Desta forma, na busca do ponto de equilíbrio das tensões, foram feitas simulações computacionais do sistema da figura 2.5 (PROG_2), para efeito de projeto. Muito embora possa ser feito o projeto do gerador para cargas resistivas, não haveria sentido projetar um gerador de indução trifásico assimétrico tendo o ponto ótimo de equilíbrio das tensões para cargas puramente resistivas.

Para efeito de projeto do gerador assimétrico, usando o PROG_2, a sistemática adotada é descrita a seguir:

1. Inicialmente atribuem-se valores para b_1 , c_1 e Cap , então a simulação computacional começa com a máquina de indução funcionando como motor;
2. Nesta fase será adotado $h=1$ por questões de simplicidade;
3. Ao longo do tempo de simulação é aplicado um conjugado de turbina constante no eixo da máquina para que a mesma possa trabalhar como gerador em vazio. Ao aplicar conjugado de turbina constante ao eixo da máquina, as correntes nas fases invertem-se, e por consequência o conjugado eletromagnético fica negativo.

4. Após alguns segundos de simulação é conectado ao gerador assimétrico um motor de indução trifásico em vazio;
5. Posteriormente, o motor de indução trifásico simétrico, funcionando como carga para o gerador assimétrico, é levado à condição de carregamento nominal.
6. Após a carga atingir o regime permanente, é feita uma variação no valor do capacitor em intervalos de tempo e mantidos os valores de $b1$ e $c1$;
7. Ao final da simulação no domínio do tempo os dados são gravados. Então, um outro programa desenvolvido, também no MatLab (PROG_3), faz a leitura dos valores máximos das tensões de linha e correntes nas fases do gerador. Esta leitura é feita para o intervalo em que a carga motora encontra-se em carregamento nominal e em regime permanente.
8. Ao final desta leitura, os gráficos contendo as tensões máximas de linha e correntes máximas nas fases do gerador são gerados em função dos valores do capacitor. As figuras 3.6 e 3.7 são exemplos destas figuras geradas.

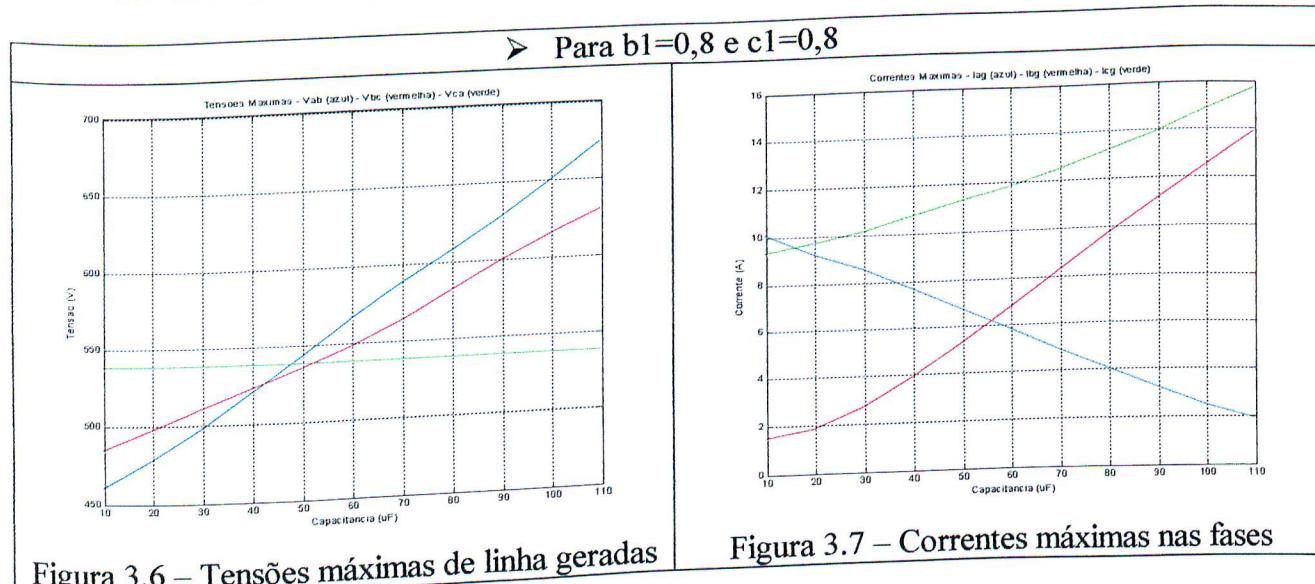
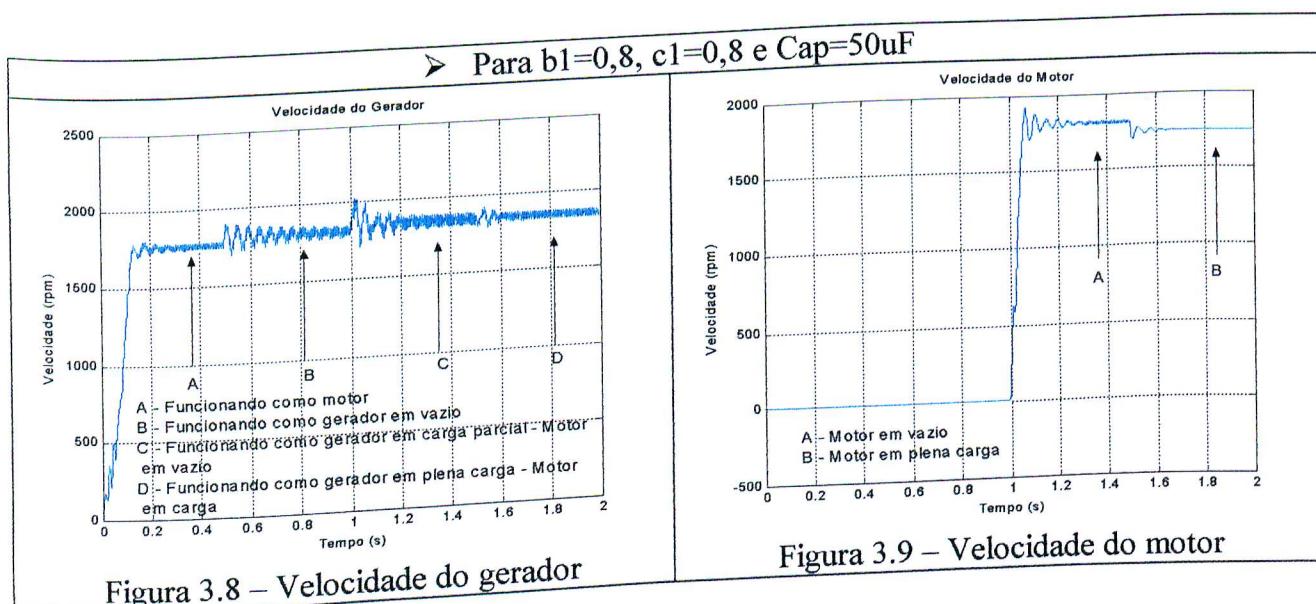
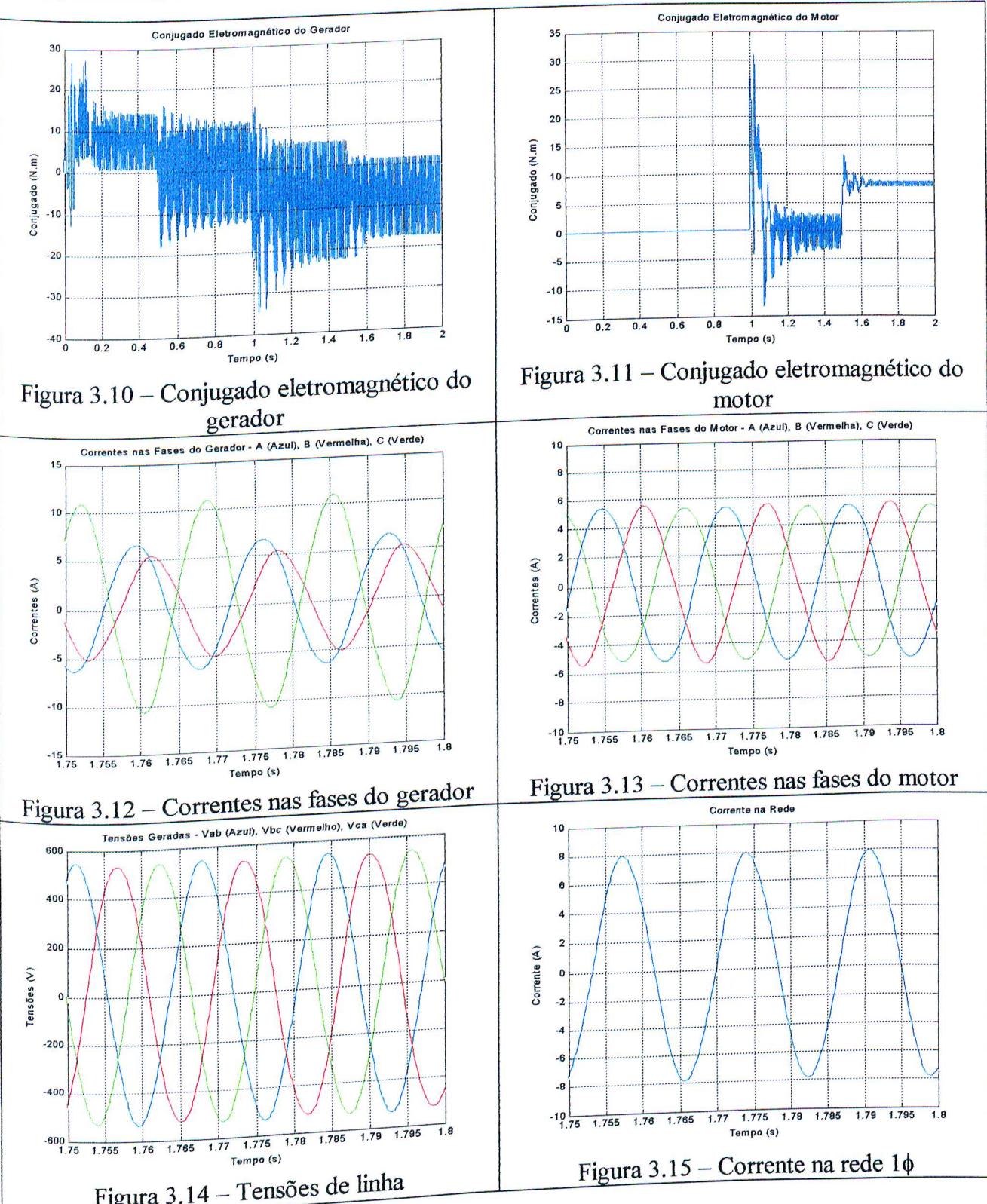


Figura 3.6 – Tensões máximas de linha geradas

Figura 3.7 – Correntes máximas nas fases

9. Com bases nas figuras geradas pelo PROG_3 para diversas combinações de “b1”, “c1” e “Cap”, uma tabela é construída com os melhores resultados. Ou seja, resultados em que apresentam valores de tensões de linha com um desbalanceamento máximo de 4%.
10. Após a seleção dos dados fornecidos pela tabela gerada, no item anterior, é feita uma nova simulação no domínio do tempo, utilizando PROG_2, para os casos selecionados. Porém, o capacitor utilizado é de valor fixo, não havendo variação do mesmo ao longo do tempo. Isto é feito com o intuito de analisar o comportamento das demais variáveis do sistema ainda não contempladas, como por exemplo, a correntes na rede monofásica e nas fases no motor. As figuras 3.8 a 3.15 exemplificam as variáveis do sistema para um dos casos específicos.





Por questões práticas, para as simulações realizadas dentro da sistemática descrita nos itens 1 a 9, foram adotados para o gerador assimétrico valores de “b1” e “c1” compreendidos entre 0,5 e 1,5. Relações de espiras diferentes da faixa adotada acredita-se que dificultaria a confecção de um protótipo sem alterar o tamanho das ranhuras da máquina original. Desta forma, através do método de tentativa e erro, foram combinados estes fatores “b1” e “c1” em conjunto com valores de capacitância de modo que o gerador assimétrico fornecesse tensões平衡adas à carga. Os valores de capacitância adotados foram compreendidos entre 10uF e 110uF, variando a cada 10uF. Foi observado ainda que para valores de capacitância maiores que os adotados, as correntes nas fases do gerador ficaram muito elevadas, bem como houve um distanciamento do ponto ideal de equilíbrio das tensões de linha, ou seja, tensões de linha totalmente equilibradas.

Salienta-se ainda que, para as simulações realizadas, dentro da sistemática de projeto, foram levados em consideração apenas os harmônicos espaciais de primeira ordem, $h=1$. Uma vez que os valores eficazes são facilmente calculados, pois nestas condições, as formas de onda obtidas nas simulações são senoidais.

Tomando-se como ponto de partida - para o projeto do gerador de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica - o equilíbrio das tensões de linha geradas, são apresentados os resultados das simulações que originaram um desequilíbrio máximo das tensões na ordem de até 4%, conforme tabela 3.3. São apresentados ainda, os valores das correntes nas fases do gerador, uma vez que de posse dos valores das correntes e das relações de números de espiras é possível estimar a viabilidade física da confecção do enrolamento do gerador assimétrico.

Tabela 3.3 – Dados do Gerador

Gerador Assimétrico de 2CV com Carga Motora de 2CV

Relações de Espiras		Capacitânc- cia	Correntes nas Fases (rms)			Tensões de Linha (rms)			Desbalanço de Tensão (Ref. Vca)	
b1	c1		Cap(uF)	lag(A)	Ibg(A)	Icg(A)	Vca(V)	Vab(V)	Vbc(V)	DVab
0,6	0,9	90	1,41	9,12	10,5	380	378,3	390,3	-0,45%	2,71%
0,6	1	90	1,13	9,54	10,4	380	381,8	386,8	0,47%	1,79%
0,7	0,8	60	3,96	5,2	8,83	380	381,1	366,3	0,29%	-3,61%
0,7	0,9	70	2,33	6,65	8,83	380	386	381,84	1,58%	0,48%
0,7	1	70	1,41	7	8,34	380	376,9	388,9	-0,82%	2,34%
0,8	0,7	40	6,36	2,26	8,27	380	376,9	365,6	-0,82%	-3,79%
0,8	0,8	50	4,6	3,68	7,78	380	381,8	376,9	0,47%	-0,82%
0,8	0,9	50	3,68	4,1	7	380	374,8	380,5	-1,37%	0,13%
0,9	0,6	30	8,41	0,5	8,76	380	386	371,2	1,58%	-2,32%
0,9	0,7	30	7	1	7,64	380	374,8	372,7	-1,37%	-1,92%
0,9	0,8	40	5,5	2,34	7	380	381,8	384	0,47%	1,05%
1	0,6	20	9,2	0,85	8,5	380	380,4	374	0,11%	-1,58%
1	0,7	20	8	0,9	7,21	380	369,2	374,8	-2,84%	-1,37%
1	0,8	30	6,36	1,34	6,36	380	377,6	387,5	-0,63%	1,97%
1,1	0,6	10	9,9	1,98	8,5	380	373,4	373,4	-1,74%	-1,74%
1,1	0,7	20	8,35	1,27	7	380	379,7	386	-0,08%	1,58%
1,2	0,6	10	10,4	2,34	8,5	380	381,8	381,4	0,47%	0,37%
1,2	0,7	10	9,2	2,2	7	380	370,5	381,84	-2,50%	0,48%
1,3	0,6	10	10,6	2,7	8,84	380	388,9	388,9	2,34%	2,34%
1,3	0,7	10	9,54	2,5	7,3	380	376,2	388,9	-1,00%	2,34%
1,4	0,7	10	9,9	2,8	7,42	380	381,84	395,2	0,48%	4,00%

3.4.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO

Analizando-se os resultados apresentados na tabela 3.3, obtidos das simulações, as alternativas de construção de protótipos são apresentadas na tabela 3.4. Embora outras combinações de “b1”, “c1” e “Cap” tenham satisfeito o ponto fundamental de projeto, ou seja, tensões geradas balanceadas, tornaram-se inviáveis por apresentarem correntes elevadas nas fases do gerador.

A máquina de indução trifásica original, tomada como referência, possui 42 espiras por fase e condutor de secção transversal de $0,6504 \text{ mm}^2$.

Tabela 3.4 – Alternativas de projeto

ALTERNATIVA 1			
Fases	A	B	C
Número de Espiras	42	33,6	33,6
Secção Transversal	$0,6504 \text{ mm}^2$	$0,827 \text{ mm}^2$	$1,049 \text{ mm}^2$
Correntes	4,6 A	3,68 A	7,78 A
Capacitor		50 μF	
ALTERNATIVA 2			
Fases	A	B	C
Número de Espiras	42	33,6	37,8
Secção Transversal	$0,6504 \text{ mm}^2$	$0,6504 \text{ mm}^2$	$(0,5253 + 0,3317) \text{ mm}^2$
Correntes	3,68 A	4,1 A	7,0 A
Capacitor		50 μF	
ALTERNATIVA 3			
Fases	A	B	C
Número de Espiras	42	37,8	33,6
Secção Transversal	$0,827 \text{ mm}^2$	$1,049 \text{ mm}^2$	$0,4171 \text{ mm}^2$
Correntes	5,5 A	2,34 A	7,0 A
Capacitor		40 μF	

Apesar da tabela 3.4 fornecer alternativas de projetos viáveis do gerador de indução trifásico assimétrico, será usado como gerador assimétrico nos ensaios experimentais, uma máquina de indução trifásica assimétrica já existente em laboratório. Esta máquina não satisfaz a condição de balanceamento das tensões de linha geradas, entretanto, ela permite fazer a comprovação teórica-experimental que dará credibilidade à modelagem desenvolvida. Desta forma, utilizar um protótipo com melhor ou pior balanceamento de tensões atinge o propósito deste trabalho.

A seguir são apresentados os dados da máquina de indução trifásica assimétrica, que será utilizada como gerador de indução trifásico assimétrico.

A máquina de indução trifásica assimétrica é de 1,73 CV, alimentação monofásica de 380V, relação do número de espiras $b_1=0,6$ e $c_1=1,4$, e capacitor de $40\mu F$.

- N° de espiras da fase “a” = 42 - Secção do fio da fase “a” = 0.65 mm^2
- N° de espiras da fase “b” = 25 - Secção do fio da fase “b” = 0.65 mm^2
- N° de espiras da fase “c” = 59 - Secção do fio da fase “c” = 0.32 mm^2

Os parâmetros do circuito equivalente são mostrados na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros do circuito equivalente

$Rs(\Omega)$	$Xs(\Omega)$	$Xm(\Omega)$	$Xr'(\Omega)$	$Rr'(\Omega)$
$3,80 \pm 0,03$	$3,10 \pm 0,03$	$72,15 \pm 0,70$	$3,10 \pm 0,03$	$3,01 \pm 0,03$

No próximo item será visto que a inclusão dos harmônicos espaciais nas simulações distorce as formas de onda como foi observado na prática.

3.4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – INCLUINDO OS EFEITOS DOS HARMÔNICOS ESPACIAIS DE ENROLAMENTO

Para a inclusão dos harmônicos espaciais da máquina na simulação digital, faz-se necessário conhecer os fatores de passo e distribuição dos enrolamentos das máquinas a serem utilizadas. Para ambas as máquinas – gerador e motor – os dados de enrolamento são os mesmos.

- Passo da bobina = 180° elétricos.
- Ângulo entre ranhuras adjacentes = 20° elétricos.
- Número de bobinas distribuídas por fase = 3.

Uma vez definidas as alternativas de projeto para o protótipo, e com os dados do enrolamento da máquina de referência - no intuito de tornar a análise mais próxima do comportamento real da máquina - simulações são realizadas com a inclusão dos harmônicos espaciais de enrolamento até a 25º ordem, embora tenha sido notado que a partir do 7º harmônico pouca diferença se obtém nos resultados. Desta forma, são apresentadas as simulações para as alternativas de projeto da tabela 3.4, e para a máquina assimétrica usada nos ensaios experimentais.

➤ Para $b_1=0,8$, $c_1=0,8$ e $\text{Cap}=50 \mu\text{F}$

Comportamento do Gerador Assimétrico

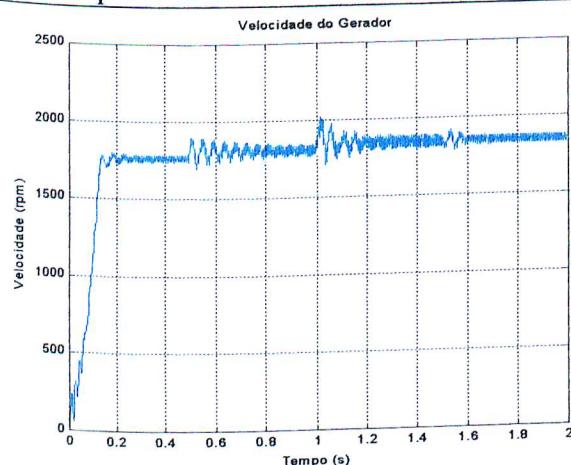


Figura 3.16 - Velocidade do gerador

Comportamento do Motor Simétrico

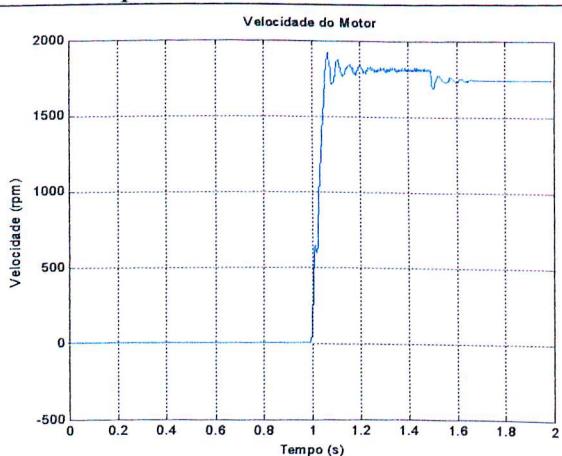


Figura 3.17 - Velocidade do Motor

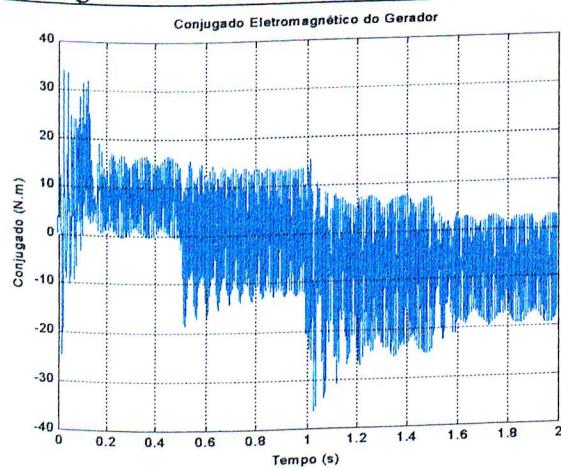


Figura 3.18 – Conjugado eletromagnético do gerador

Conjugado Eletromagnético do Motor

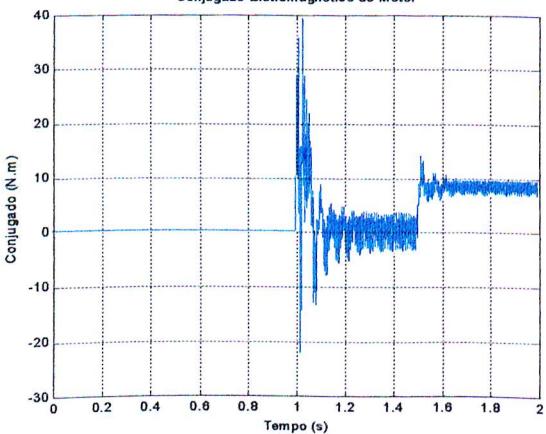


Figura 3.19 – Conjugado eletromagnético do motor

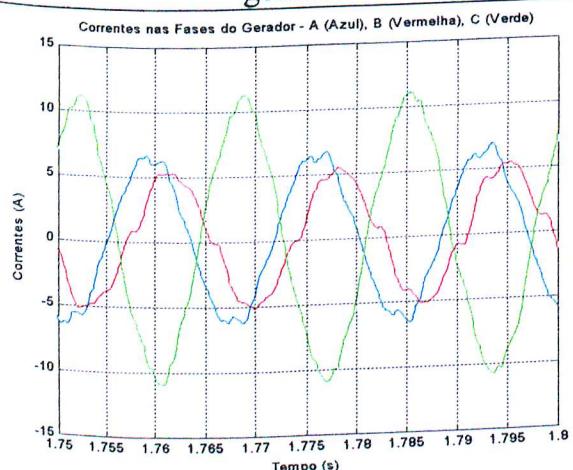


Figura 3.20 – Correntes nas fases do gerador

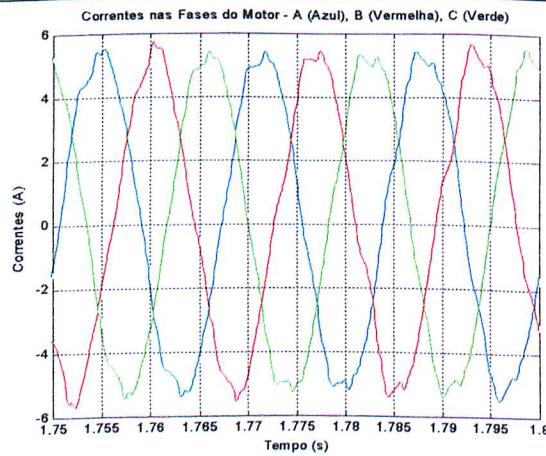


Figura 3.21 – Correntes nas fases do motor

Tensões no Barramento

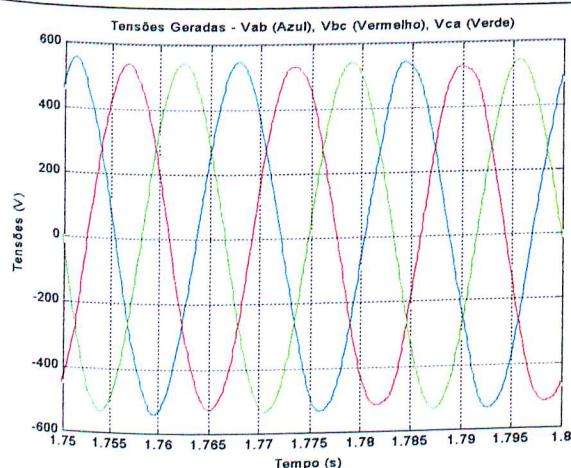


Figura 3.22 – Tensões de linha

Corrente na Rede 1φ

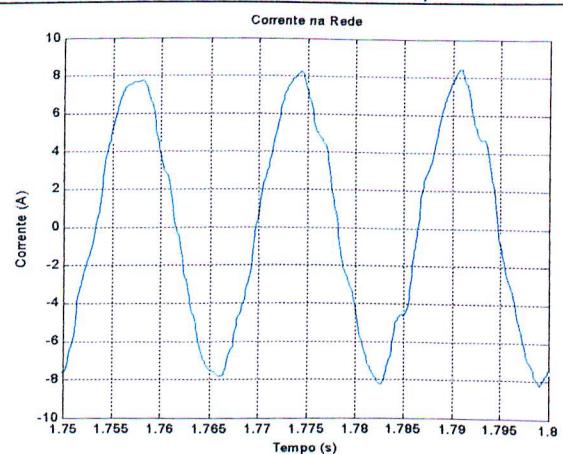


Figura 3.23 – Correntes na rede 1φ

➤ Para $b_1=0,8$, $c_1=0,9$ e $\text{Cap}=50 \mu\text{F}$

Comportamento do Gerador Assimétrico

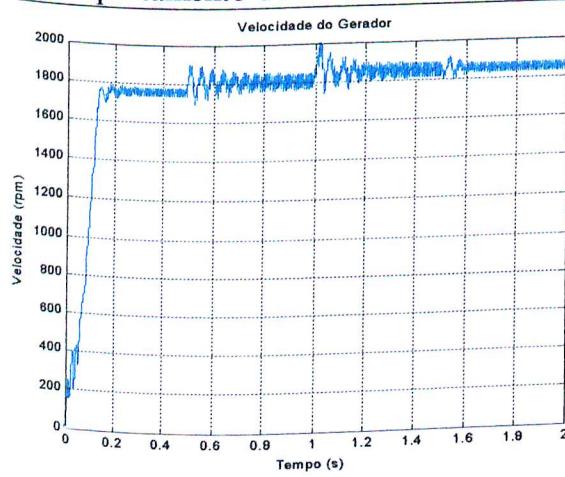


Figura 3.24 - Velocidade do gerador

Comportamento do Motor Simétrico

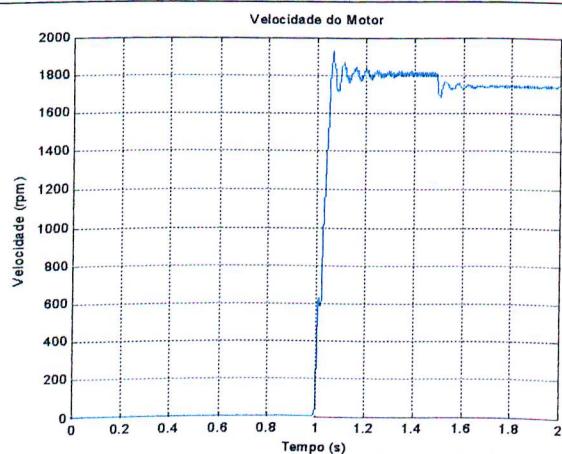


Figura 3.25 - Velocidade do Motor

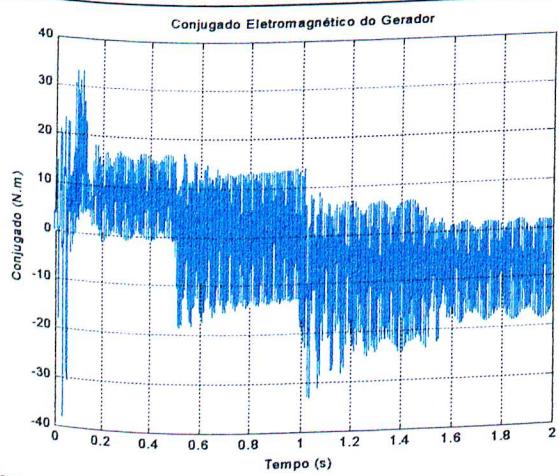


Figura 3.26 – Conjugado eletromagnético do gerador

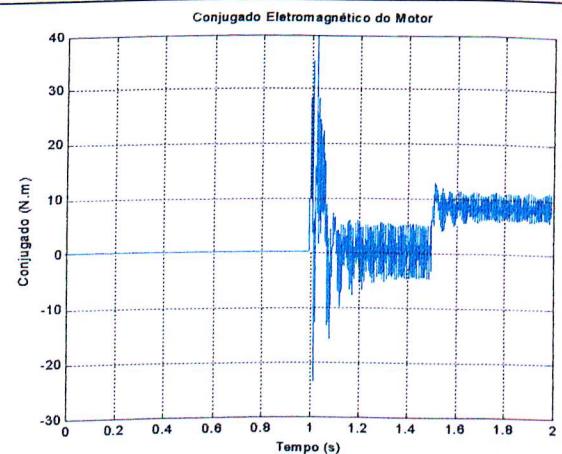


Figura 3.27 – Conjugado eletromagnético do motor

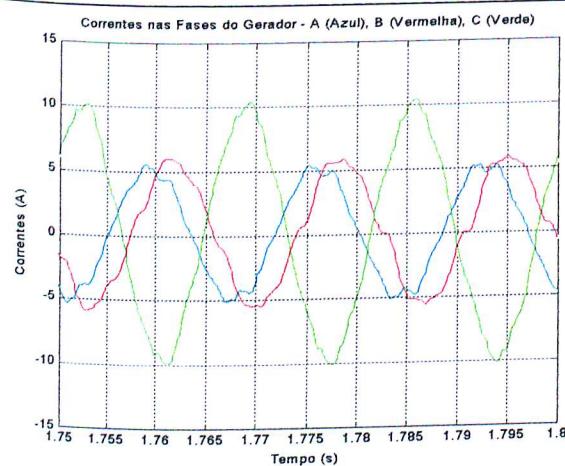


Figura 3.28 – Correntes nas fases do gerador

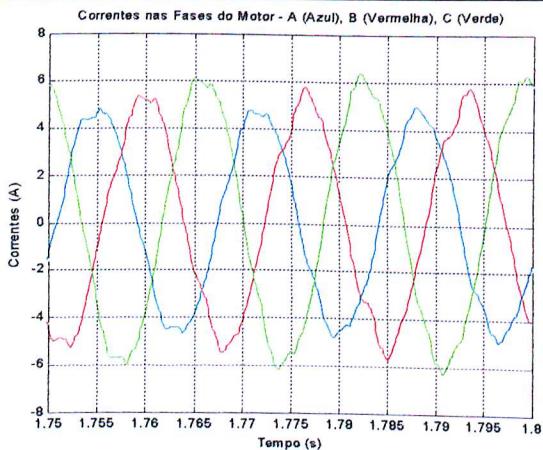


Figura 3.29 – Correntes nas fases do motor

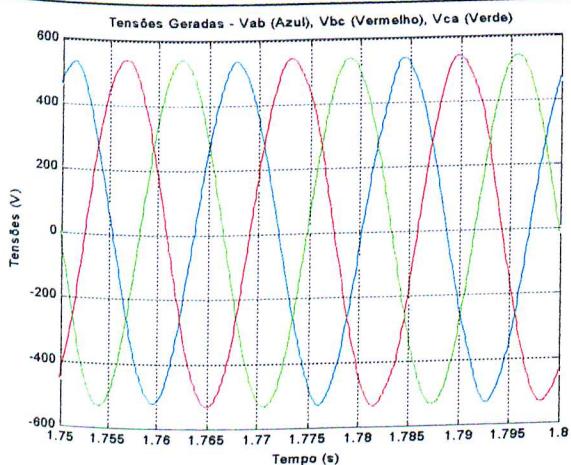


Figura 3.30 – Tensões de linha

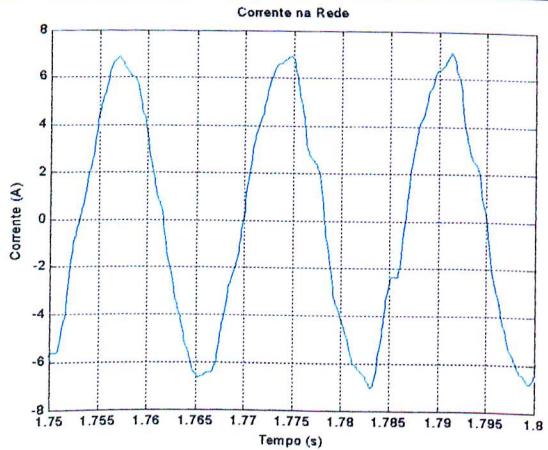
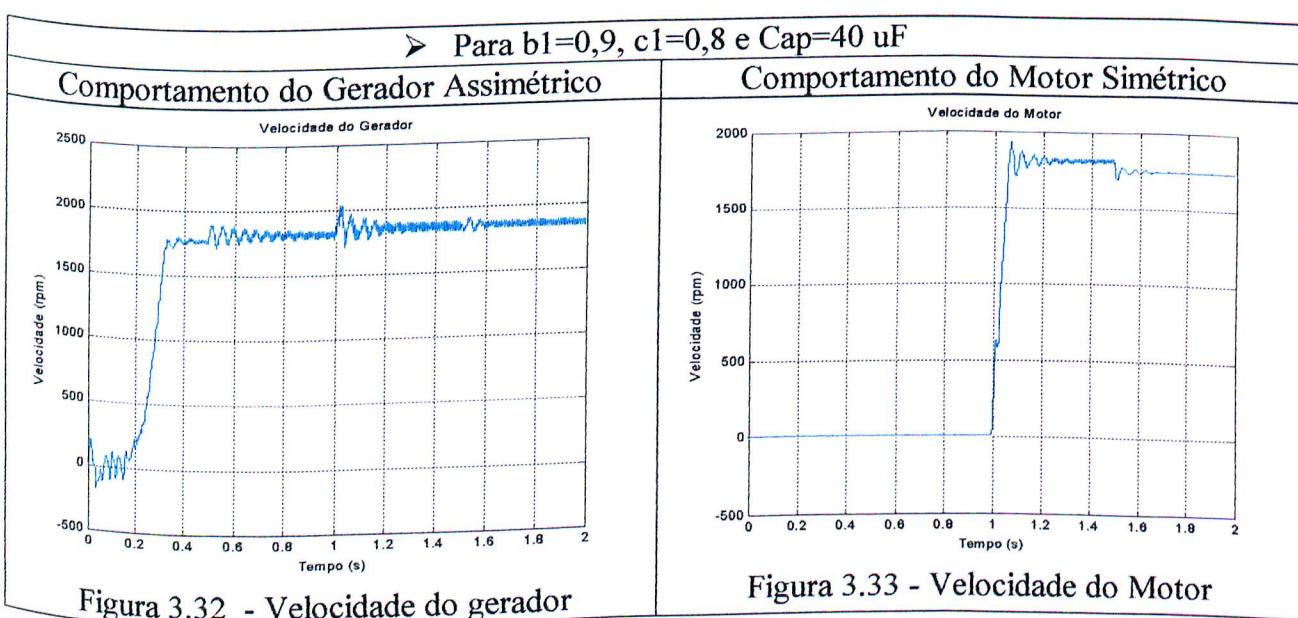


Figura 3.31 – Correntes na rede 1φ



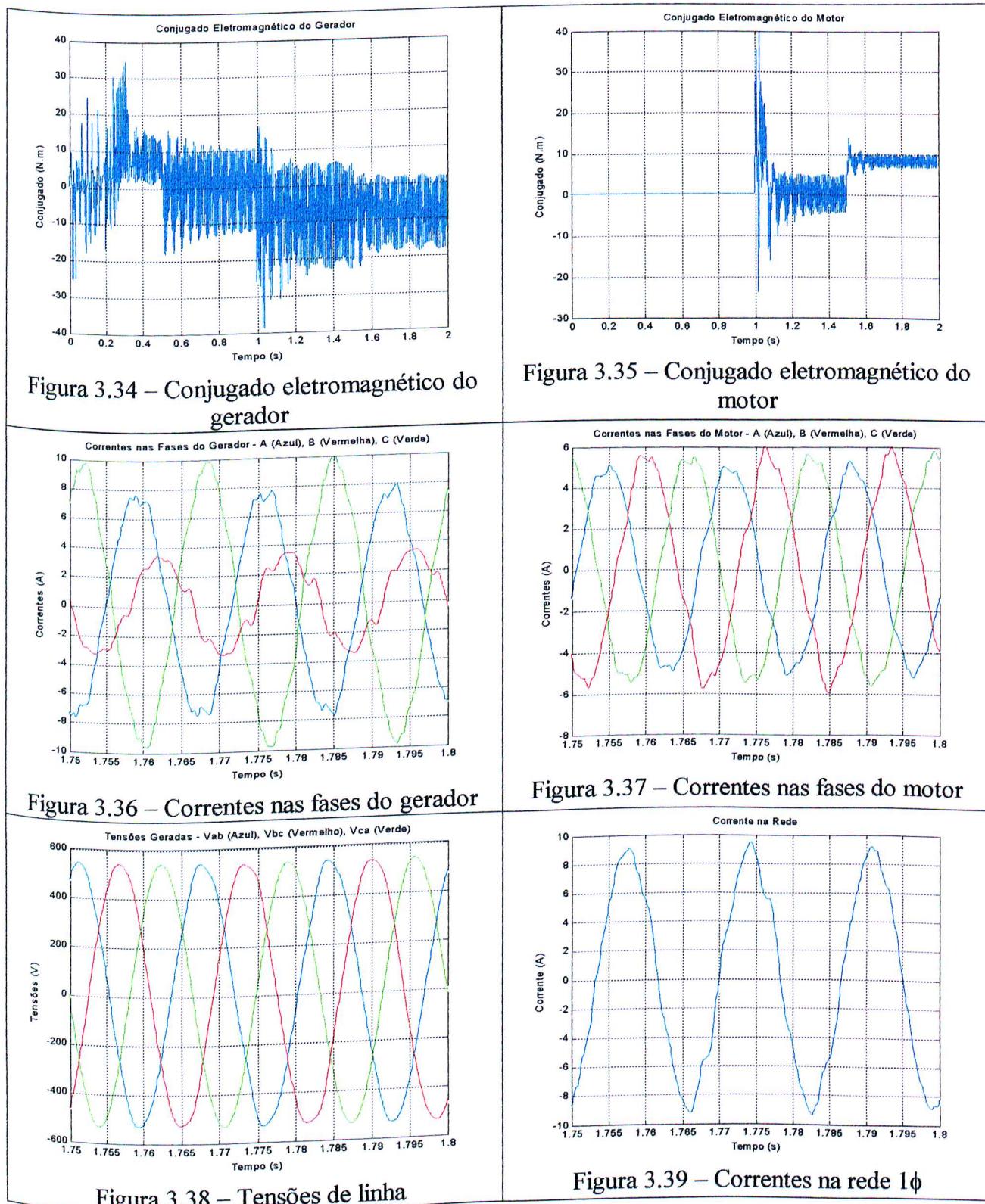


Figura 3.34 – Conjugado eletromagnético do gerador

Figura 3.35 – Conjugado eletromagnético do motor

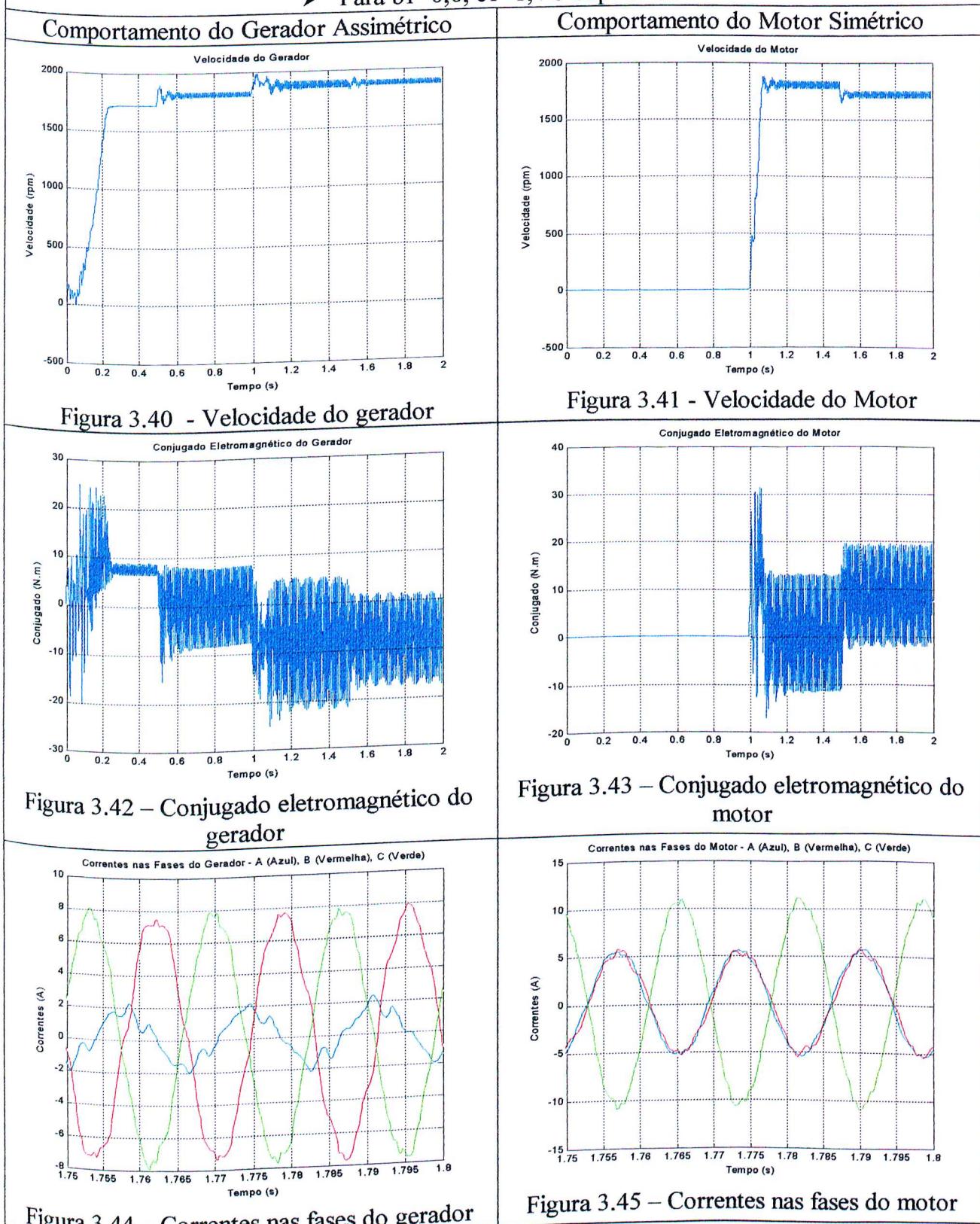
Figura 3.36 – Correntes nas fases do gerador

Figura 3.37 – Correntes nas fases do motor

Figura 3.38 – Tensões de linha

Figura 3.39 – Correntes na rede 1φ

➤ Para $b_1=0,6$, $c_1=1,4$ e $\text{Cap}=40 \mu\text{F}$



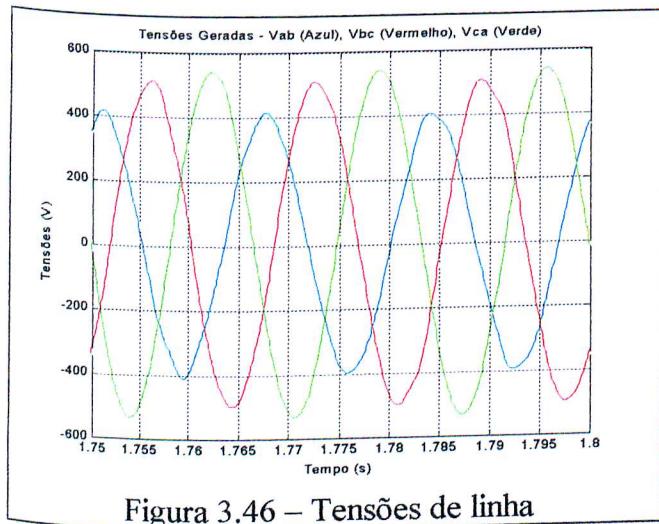


Figura 3.46 – Tensões de linha

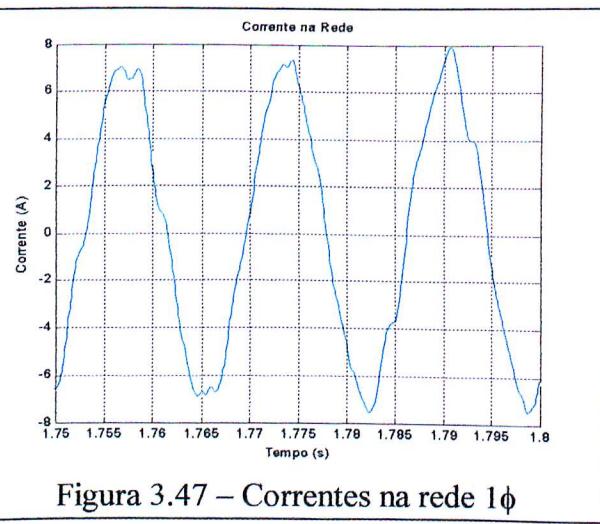


Figura 3.47 – Correntes na rede 1φ

3.5 SIMULAÇÃO DIGITAL - CONSIDERANDO VARIAÇÕES DE TENSÃO NA REDE

O sistema monofásico de distribuição de energia elétrica rural sofre, na prática, grandes variações de tensão, isto devido a uma certa fragilidade do sistema. Muito embora não seja objetivo desta tese, vale a pena atentar a este fato fazendo-se uma breve análise do comportamento do sistema elétrico proposto, em condições de variações de tensão. Desta forma, serão apresentadas simulações digitais para o gerador assimétrico - $b_1=0,80$, $c_1=0,80$ e $\text{Cap}=50\mu\text{F}$ - sob condições de variação de tensão da rede de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ e $\pm 30\%$. As variações são ocasionadas no intervalo de tempo entre 3 s e 4 s a partir do início da simulação.

Para melhor compreensão da simulação digital apresentada a seguir, é feito uma breve descrição dos intervalos de tempo que compõe a simulação.

- De 0s – 1s - a máquina assimétrica funciona como um motor em vazio;
- De 1s – 2s - a máquina assimétrica é levada a condição de gerador, por meio da aplicação de um conjugado de turbina nominal constante, e um motor trifásico simétrico em vazio é acoplado ao barramento;

- De 2s – 3s - o motor trifásico simétrico é levado a condição de regime de carga nominal;
- De 3s – 4s - é ocasionada uma variação de tensão da rede monofásica;
- De 4s – 5s - é restabelecida a condição nominal de tensão da rede monofásica.

➤ Variação de Tensão de +10%

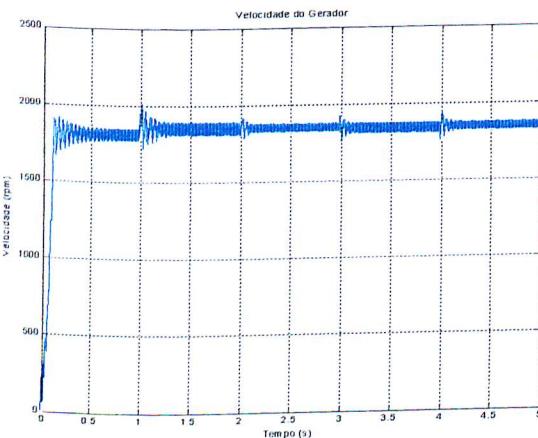


Figura 3.48 – Velocidade do gerador

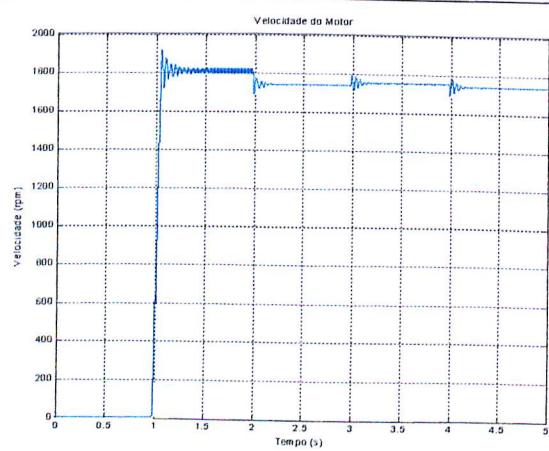


Figura 3.49 – Velocidade do motor

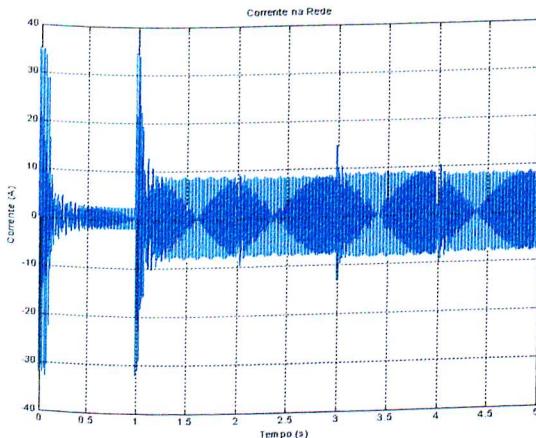


Figura 3.50 – Corrente na rede 1φ

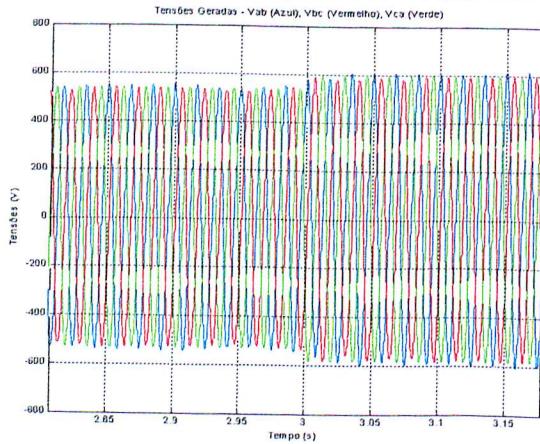


Figura 3.51 - Tensões no baramento

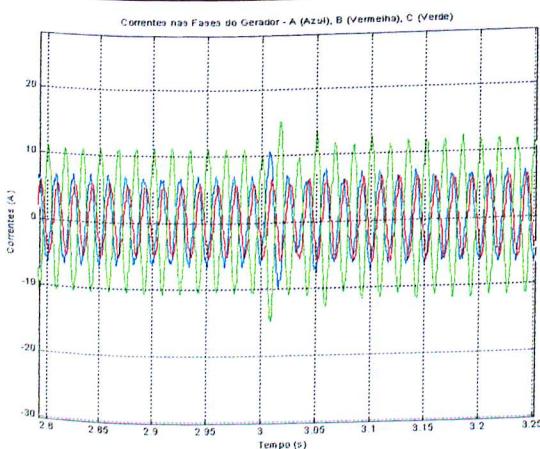


Figura 3.52 – Correntes no gerador

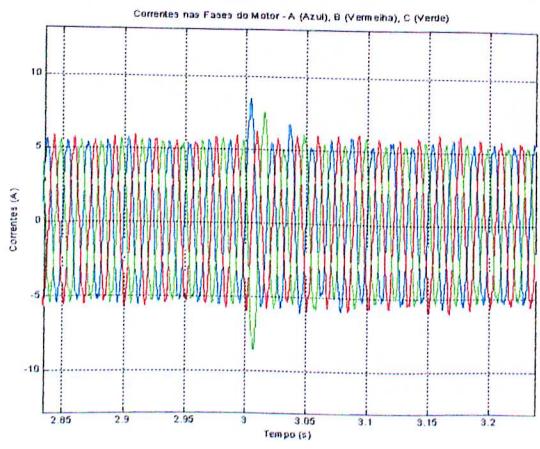


Figura 3.53 – Correntes no motor

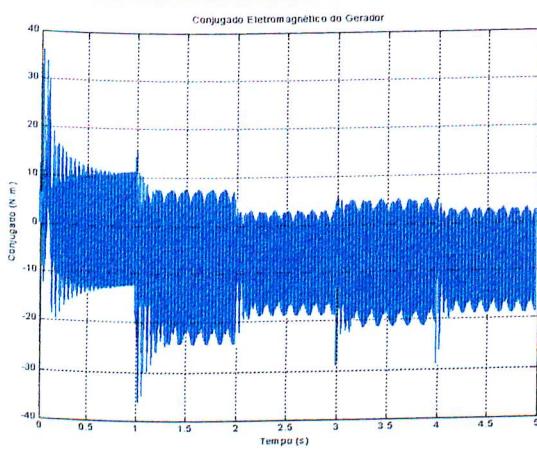


Figura 3.54 – Conjugado eletromagnético do gerador

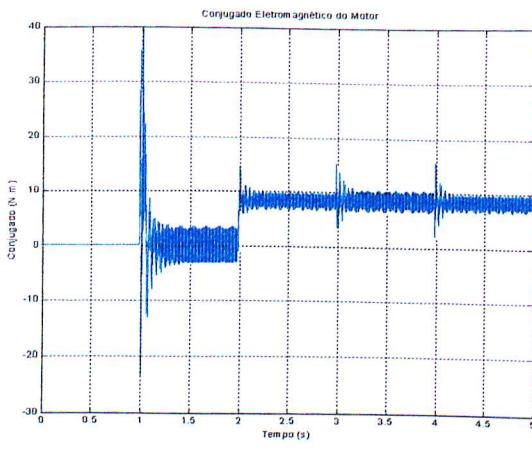


Figura 3.55 - Conjugado eletromagnético do motor

➤ Variação de Tensão de +20%

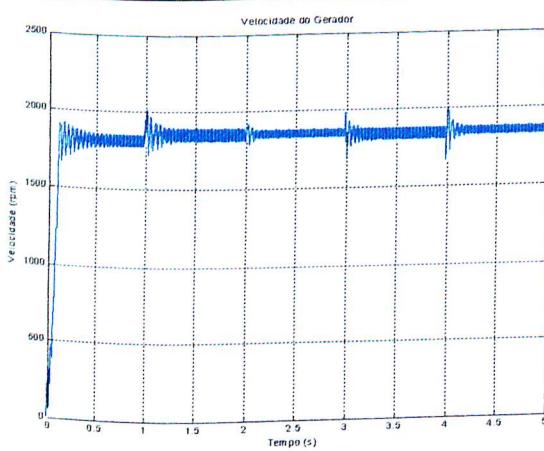


Figura 3.56 – Velocidade do gerador

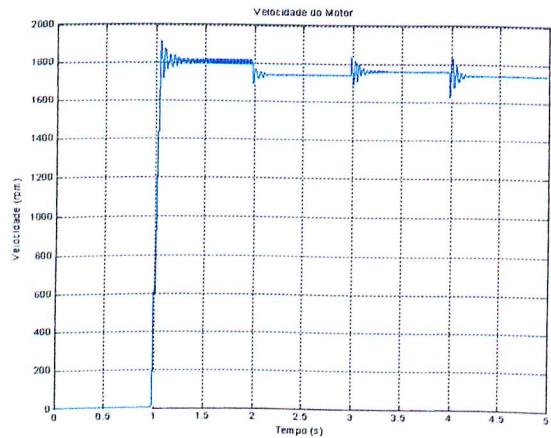


Figura 3.57 – Velocidade do motor

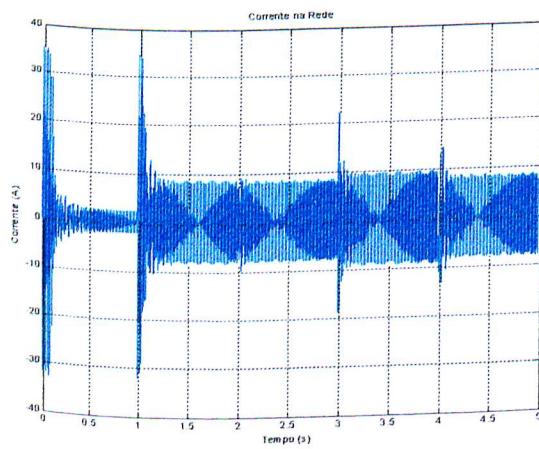


Figura 3.58 – Correntes na rede 1φ

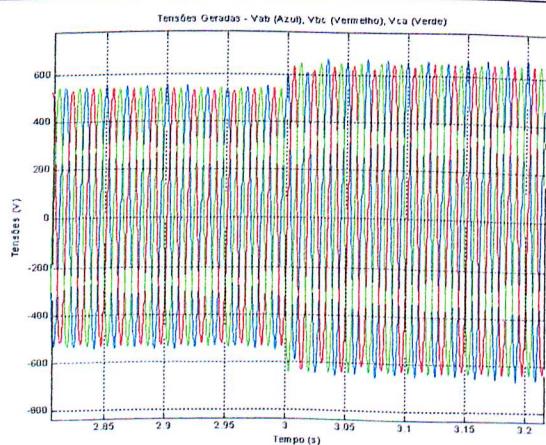


Figura 3.59 – Tensões no barramento

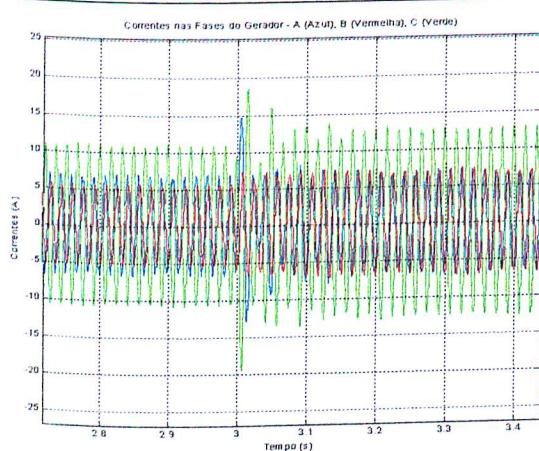


Figura 3.60 – Correntes no gerador

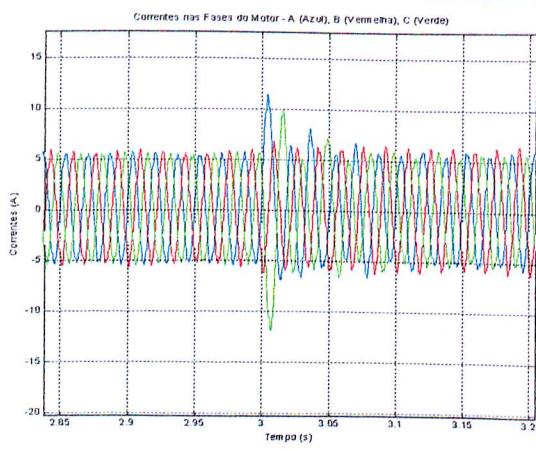


Figura 3.61 - Correntes no motor

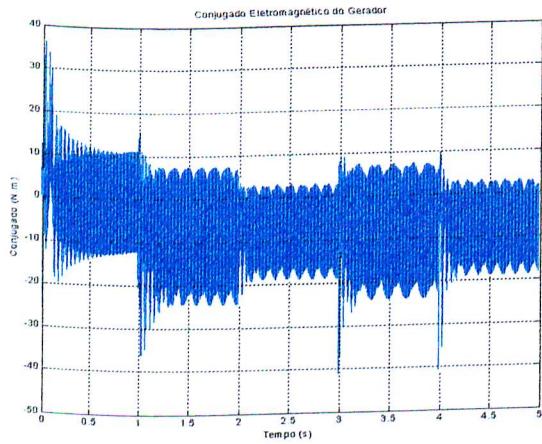


Figura 3.62 – Conjugado eletromagnético do gerador

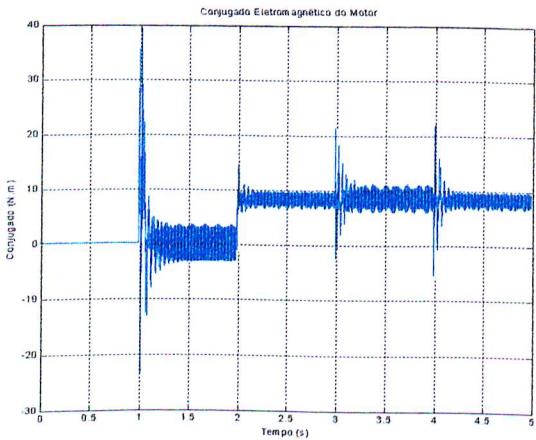


Figura 3.63 – Conjugado eletromagnético do motor

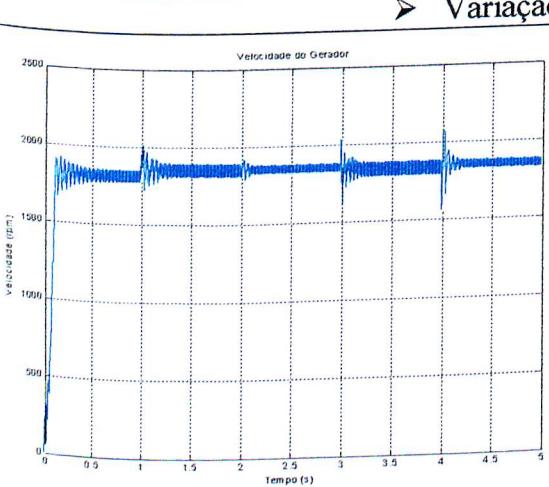


Figura 3.64 – Velocidade do gerador

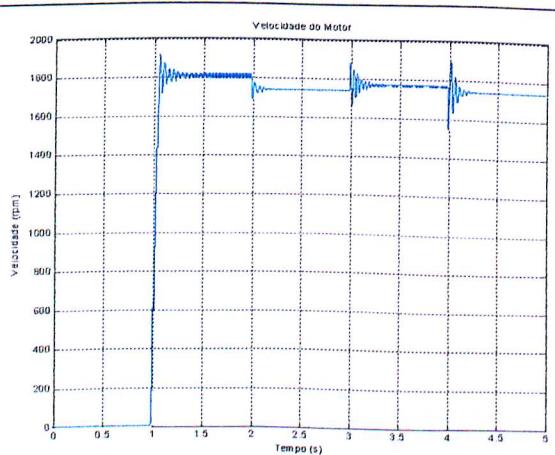


Figura 3.65 – Velocidade do motor

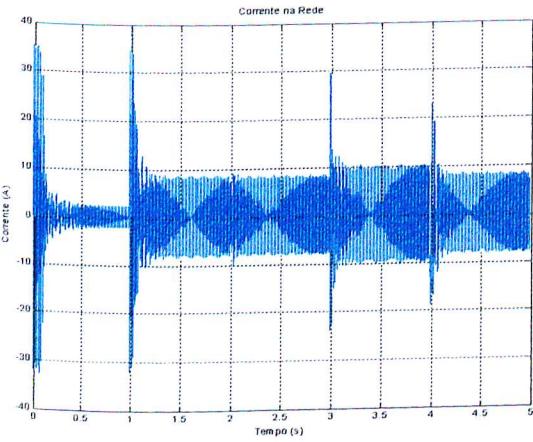


Figura 3.66 – Corrente na rede 1φ

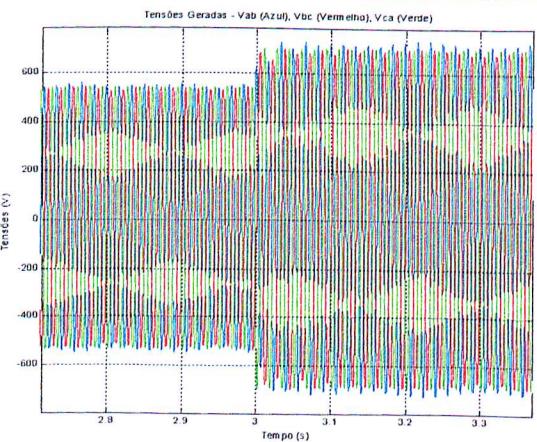


Figura 3.67 – Tensões no barramento

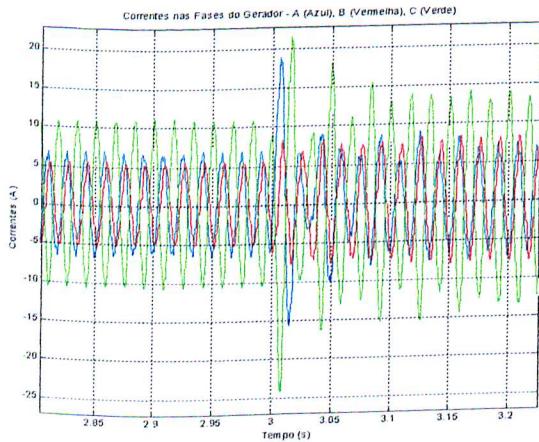


Figura 3.68 – Correntes no gerador

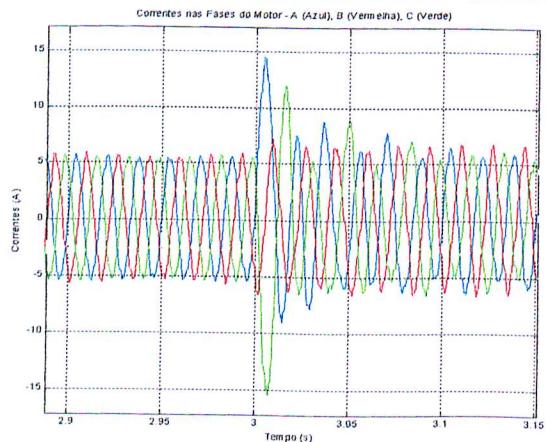


Figura 3.69 – Correntes no motor

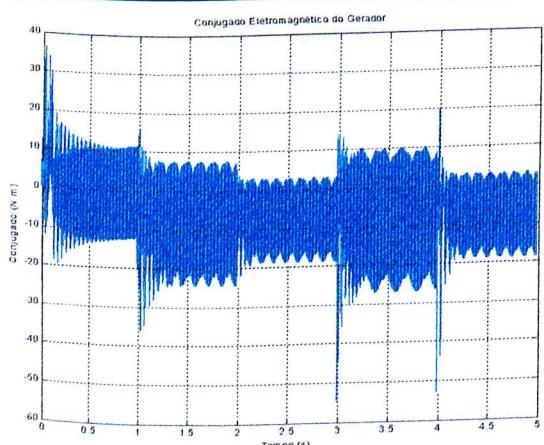


Figura 3.70 – Conjugado eletromagnético do gerador

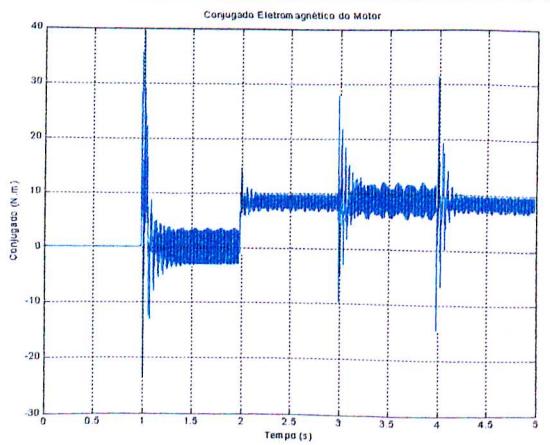


Figura 3.71 – Conjugado eletromagnético do motor

➤ Variação de Tensão de - 10%

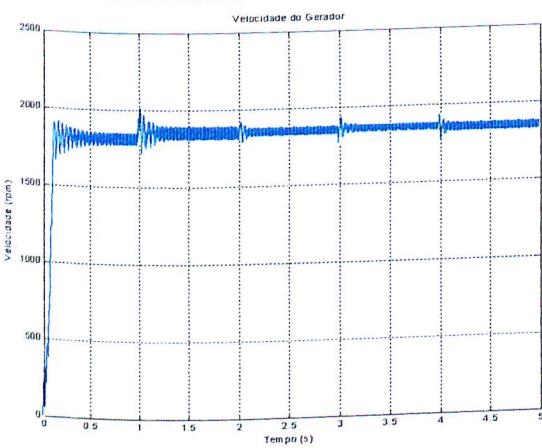


Figura 3.72 – Velocidade do gerador

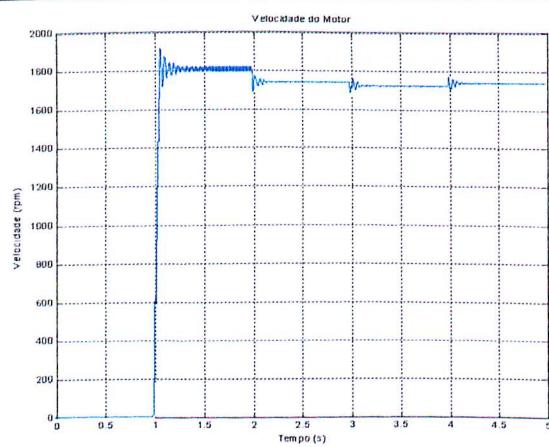


Figura 3.73 – Velocidade do motor

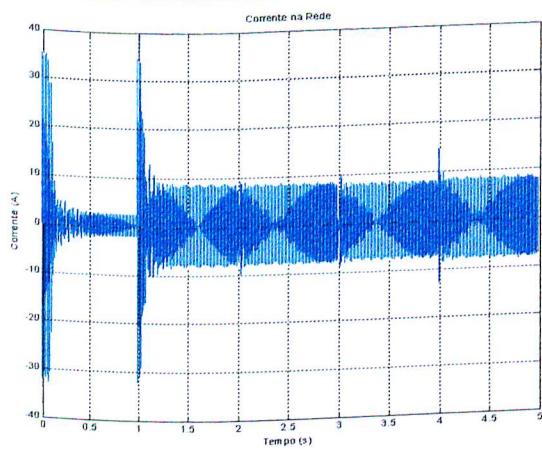


Figura 3.74 – Corrente na rede 1φ

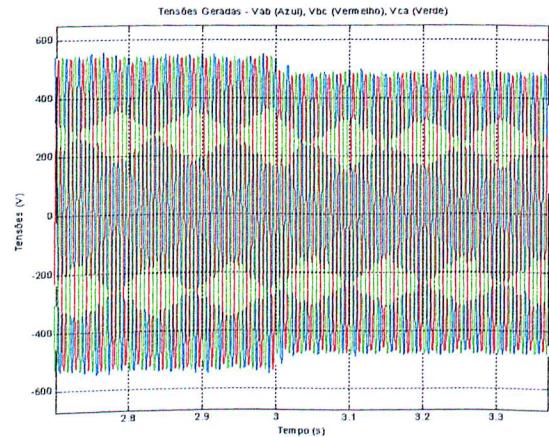


Figura 3.75 – Tensões no barramento

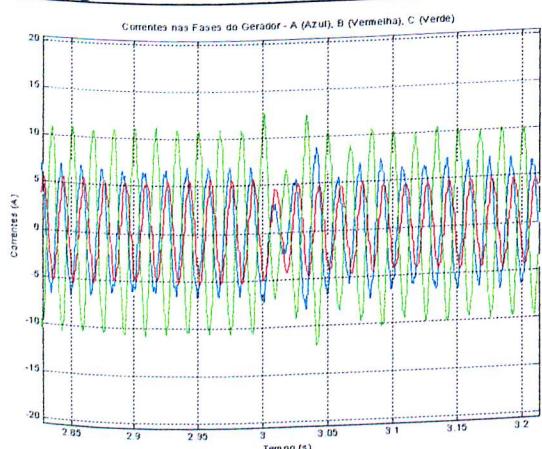


Figura 3.76 – Correntes do gerador

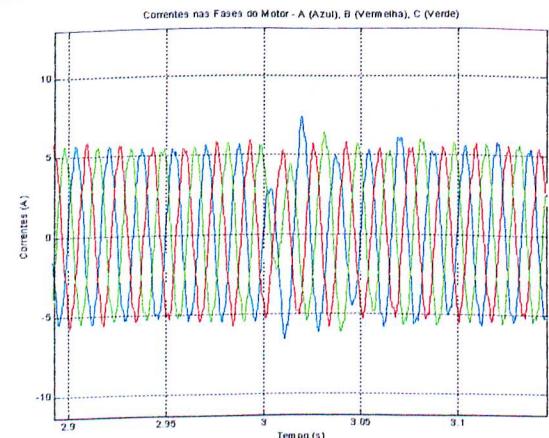


Figura 3.77 – Correntes do motor

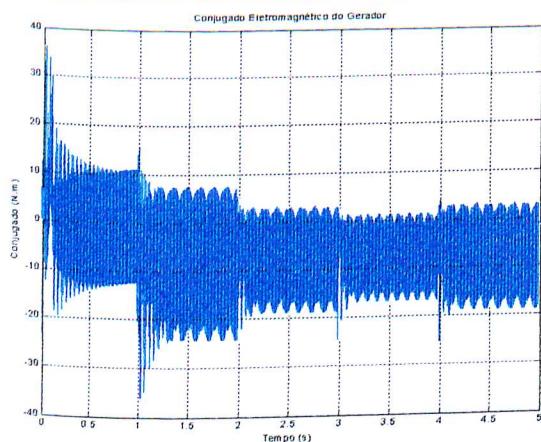


Figura 3.78 – Conjugado eletromagnético do gerador

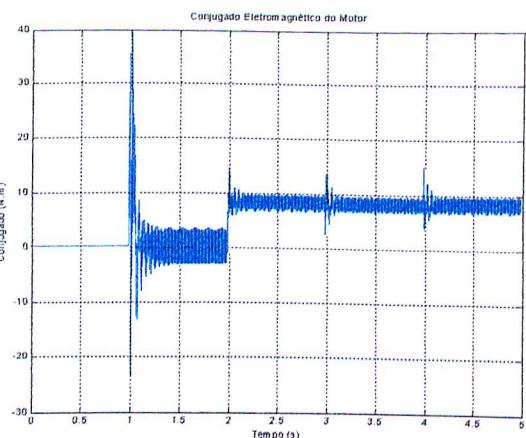


Figura 3.79 – Conjugado eletromagnético do motor

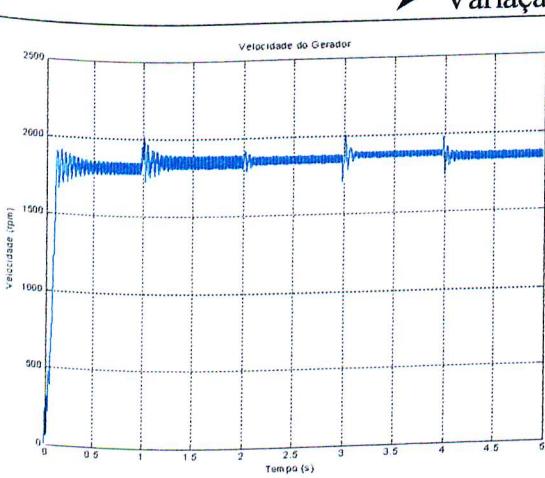


Figura 3.80 – Velocidade do gerador

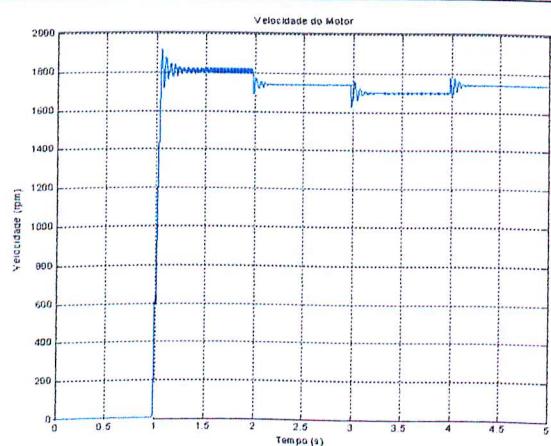


Figura 3.81 – Velocidade do motor

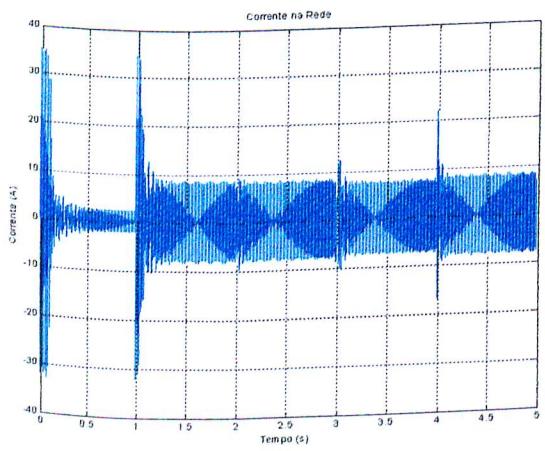


Figura 3.82 – Corrente na rede

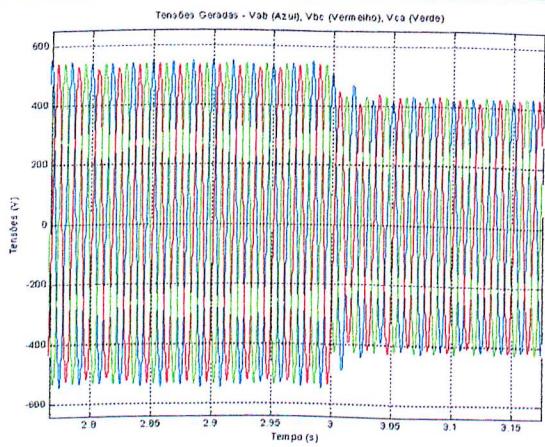
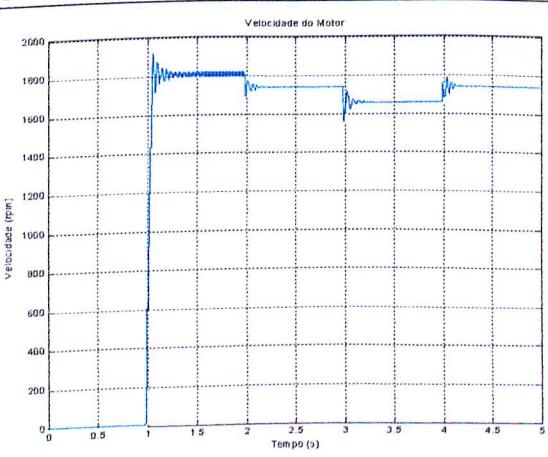
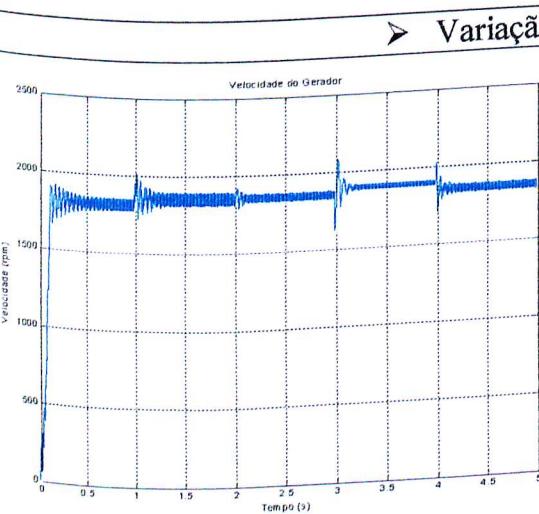
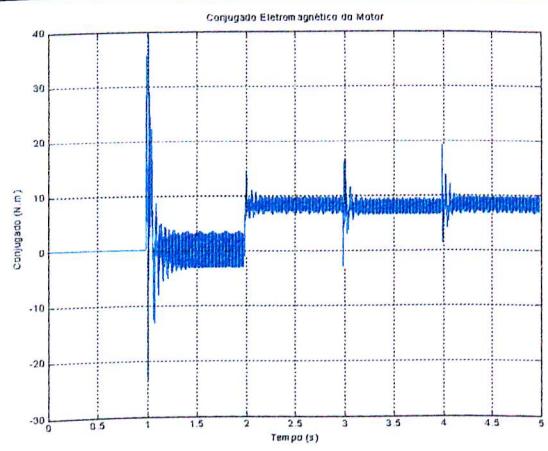
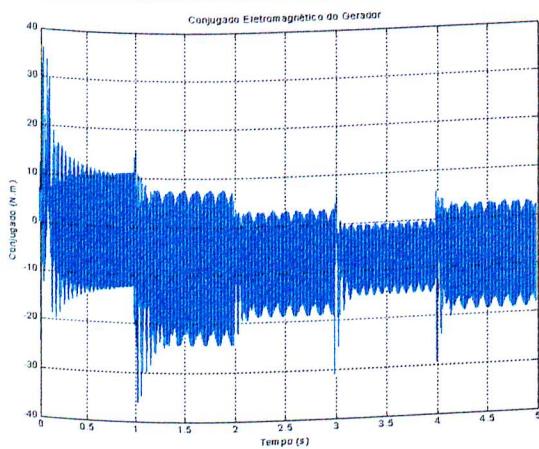
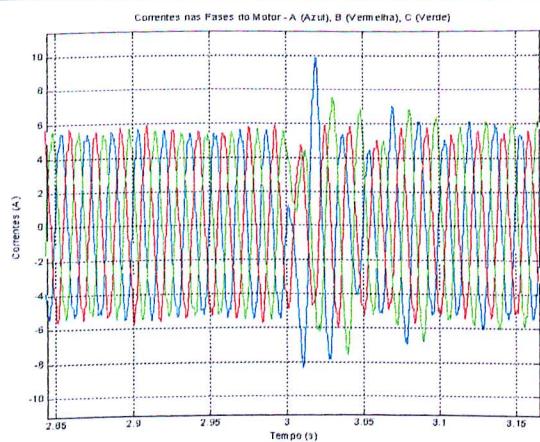
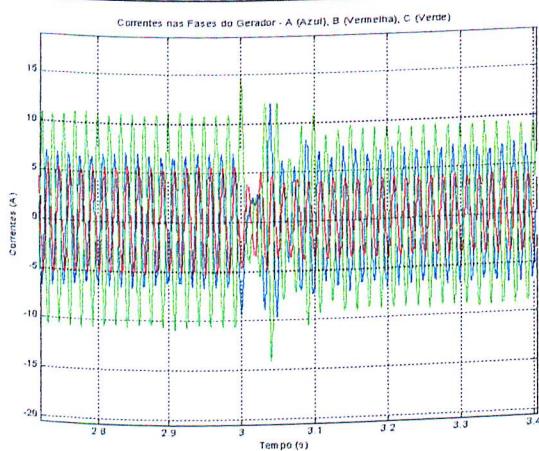


Figura 3.83 – Tensões no barramento



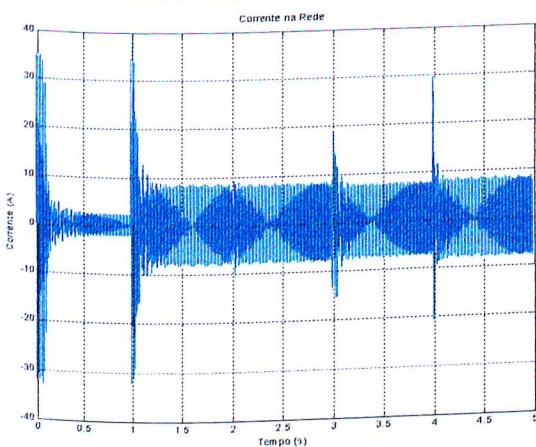


Figura 3.90 – Corrente na rede 1φ

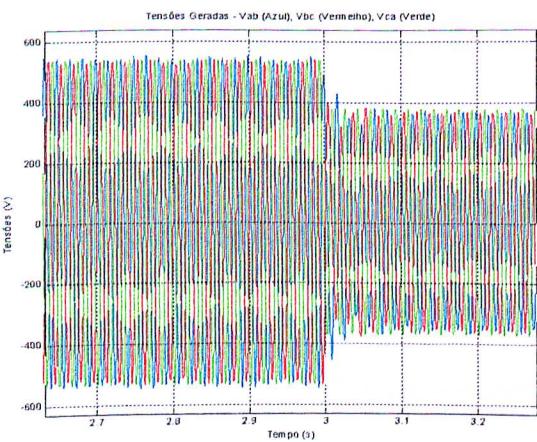


Figura 3.91 – Tensões no barramento

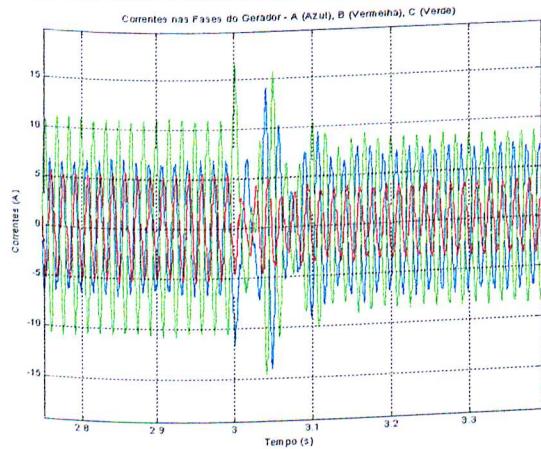


Figura 3.92 – Correntes no gerador

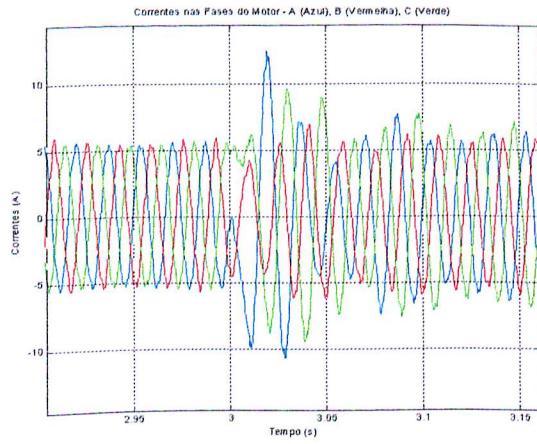


Figura 3.93 – Correntes no motor

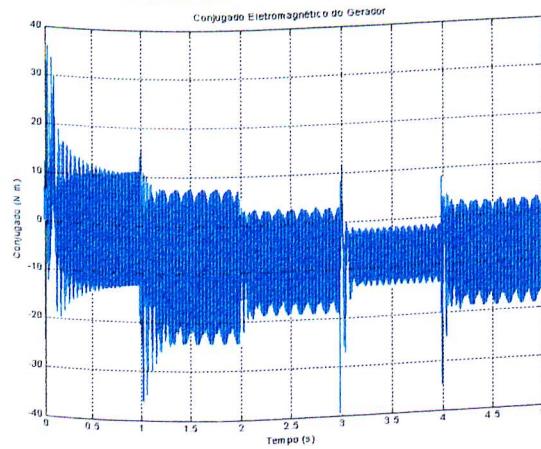


Figura 3.94 – Conjugado eletromagnético do gerador

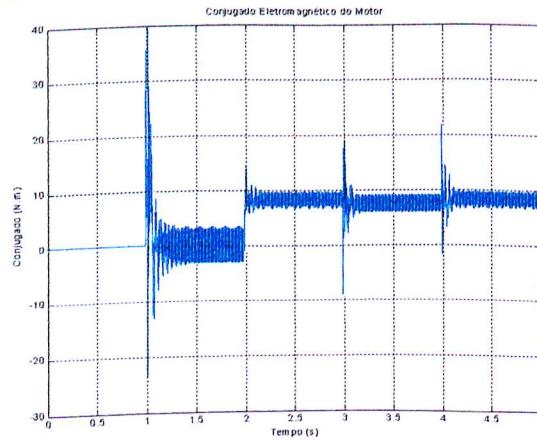


Figura 3.95 – Conjugado eletromagnético do motor

Fazendo-se uma breve análise das figuras 3.48 a 3.95, observa-se que para tensões acima da nominal, há um aumento na rotação do motor e uma queda na rotação do gerador, ocasionando assim uma elevação das correntes de fase do gerador e motor. Do ponto de vista do conjugado

eletromagnético, observa-se que tanto para o gerador quanto para o motor há um aumento da oscilação deste conjugado com um pequeno aumento do valor médio de conjugado para o motor. No entanto, para tensões abaixo da nominal, observa-se uma queda na rotação do motor e um aumento na rotação do gerador, acarretando uma elevação das correntes de fase do motor, bem como uma elevação na corrente da fase “a” do gerador e uma redução nas correntes das fases “b” e “c” do gerador. Do ponto de vista do conjugado eletromagnético, no gerador há uma redução da oscilação de conjugado e no motor há uma elevação desta oscilação com um valor médio menor.

Capítulo 4

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem como meta apresentar os resultados experimentais de uma máquina de indução trifásica assimétrica funcionando como gerador conectado em uma rede monofásica. Para explorar melhor o gerador em condições de trabalho, são realizados ensaios em vazio, bem como em condições de carga resistiva e em condição de carga motora.

Para os ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- ✓ Placa de aquisição de dados (conversor analógico/digital) que recebe os sinais analógicos de tensão. Por meio desta placa foram coletados os valores das tensões geradas pelo gerador assimétrico e os valores de corrente de linha da carga.
- ✓ Tacômetro digital para fazer a leitura da rotação do gerador e carga, quando motora.
- ✓ Osciloscópio digital para leitura das correntes nas fases do gerador e corrente da rede.
- ✓ Máquina de corrente contínua ligada ao eixo do gerador para entrar com o conjugado de turbina.
- ✓ Autotransformador para elevar a tensão de 220 V para 380 V.
- ✓ Banco de resistências, ligada em delta, $63,5 \Omega$ por fase, para servir de carga para o gerador.
- ✓ Motor de indução trifásico simétrico de 2 CV para servir de carga para o gerador
- ✓ Freio eletromagnético para servir de carga para o motor.

➤ ENSAIO EM VAZIO

- ✓ Para o gerador em vazio a 1800 rpm.

A montagem dos equipamentos para a realização dos ensaios no gerador de indução trifásico assimétrico em vazio está indicada na figura 4.1.

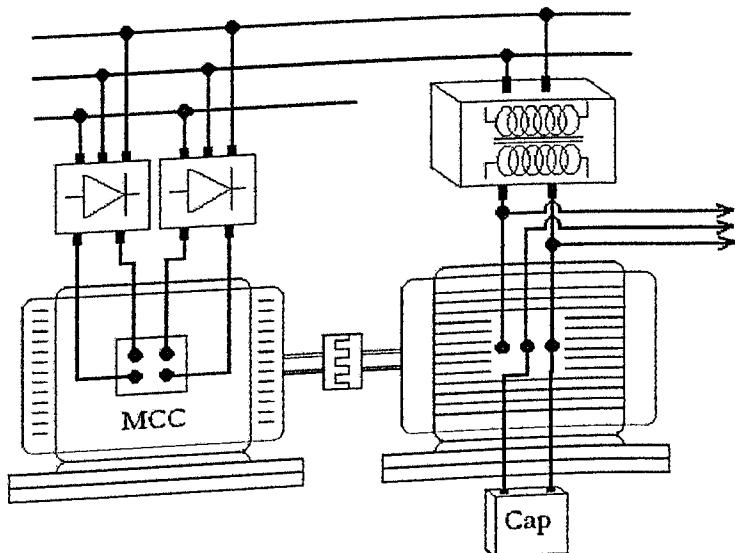


Figura 4.1 – Esquema de montagem da bancada de ensaios para o ensaio em vazio

As figuras a seguir mostram os resultados das tensões no barramento, tensão da rede, corrente da rede e correntes do gerador de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica.

➤ Para $b_1=0,6$, $c_1=1,4$ e $\text{Cap}=40 \mu\text{F}$

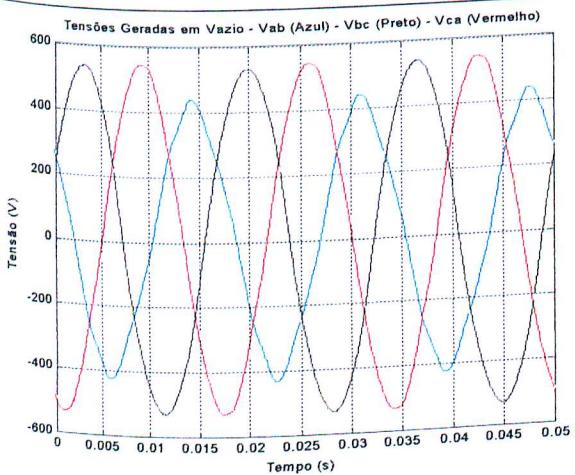


Figura 4.2 – Tensões de linha

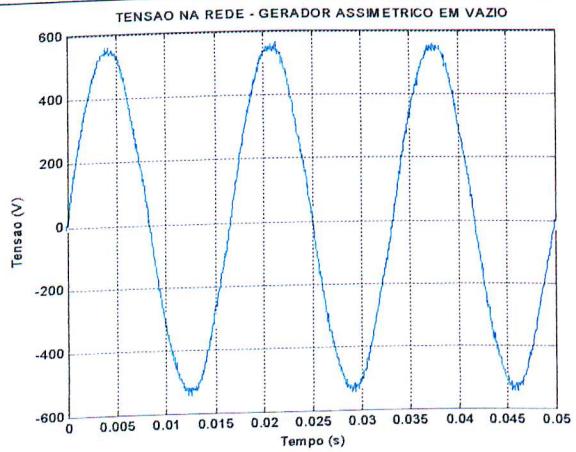


Figura 4.3 – Tensão da rede

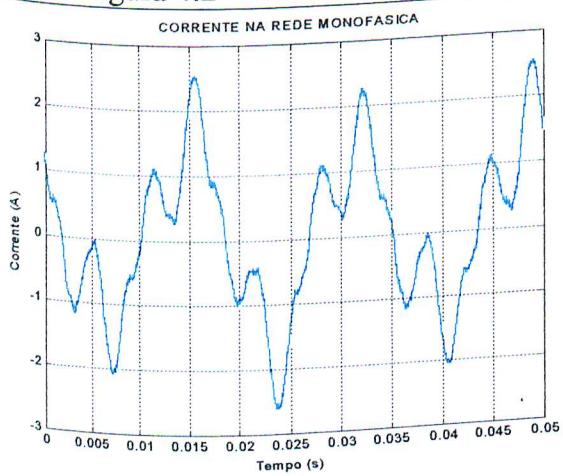


Figura 4.4 – Corrente na rede 1φ

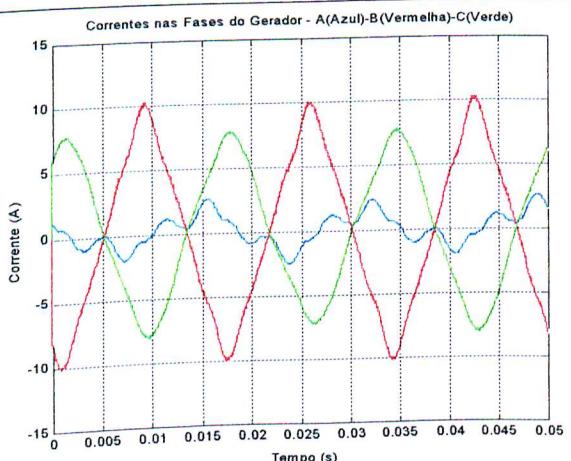


Figura 4.5 – Correntes nas fases do gerador

A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos no ensaio em vazio, para o gerador de indução assimétrico.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio em vazio.

V _{ca} (V)	V _{ab} (V)	V _{bc} (V)	I _r (A)	I _{ag} (A)	I _{bg} (A)	I _{cg} (A)	W _r (rpm)	Cosφ	Prede (W)
382,00	311,00	381,00	1,18	1,18	6,10	5,03	1800,00	0,85	383,14

➤ ENSAIO EM CARGA – CARGA RESISTIVA

- ✓ Para o gerador em carga a 1880 rpm.

A montagem dos equipamentos para a realização dos ensaios no gerador de indução trifásico assimétrico com carga resistiva é mostrada na figura 4.6.

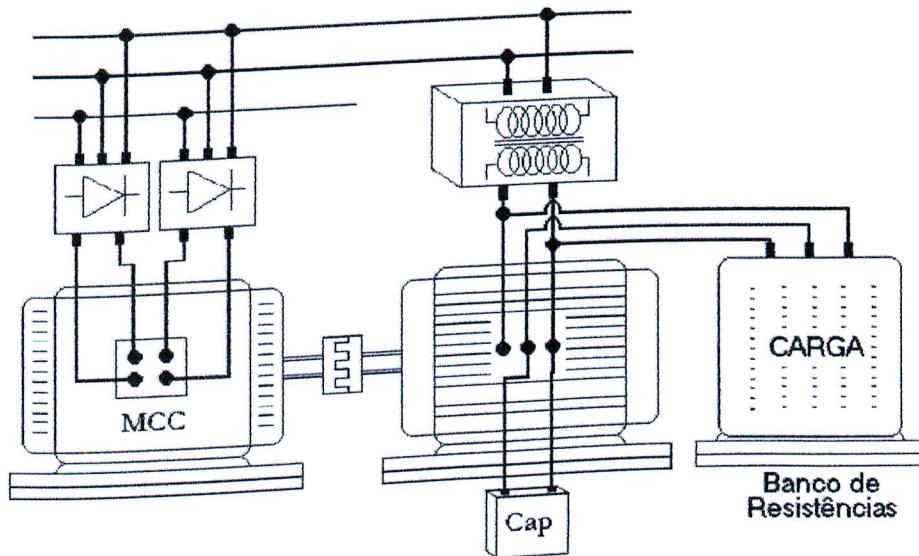


Figura 4.6 - Esquema de montagem da bancada de ensaios para o ensaio do gerador assimétrico com carga resistiva.

As figuras a seguir mostram os resultados das tensões no barramento, corrente da rede e correntes de linha da carga para o gerador de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica.

➤ Para $b_1=0,6$, $c_1=1,4$ e $\text{Cap}=40 \mu\text{F}$

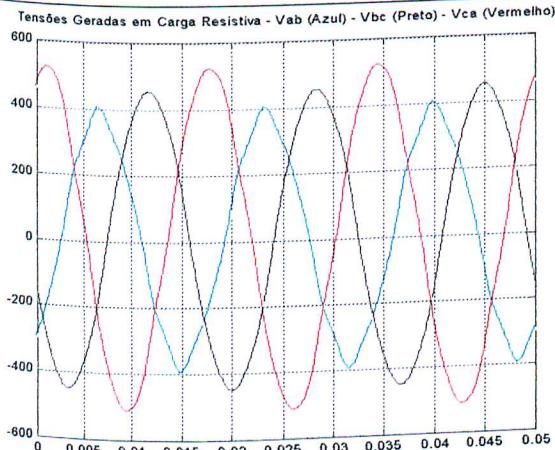


Figura 4.7 – Tensões de linha

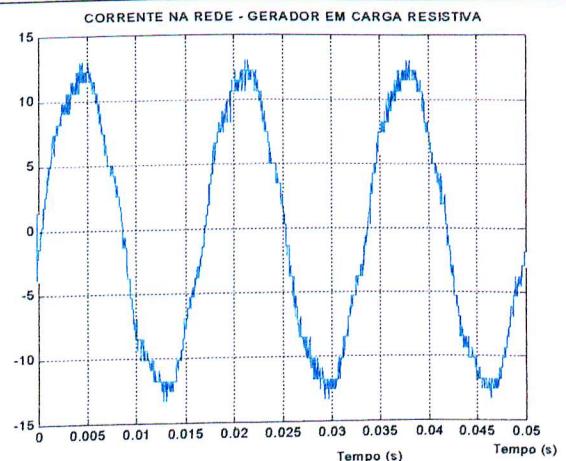


Figura 4.8 – Correntes na rede 1φ

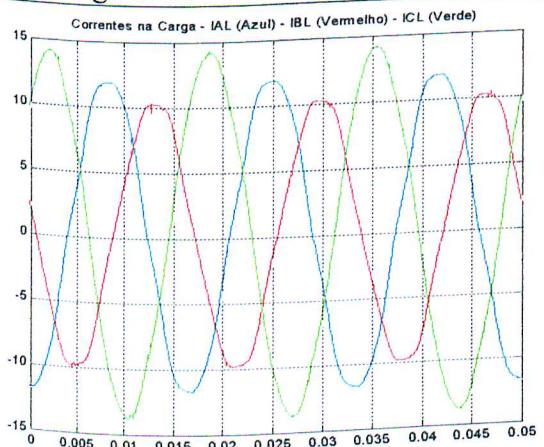


Figura 4.9 – Correntes de linha na carga

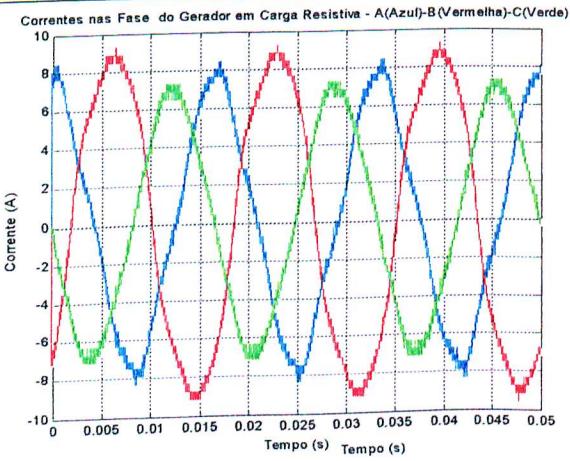


Figura 4.10 – Correntes no gerador

A tabela 4.2 mostra os dados obtidos no ensaio, com carga, do gerador de indução assimétrico.

Tabela 4.2 – Dados do ensaio com carga resistiva

Tensões no Barramento			Rede 1φ			
Vca (V)	Vab (V)	Vbc (V)	Vrede(V)	Ir (A)	Cosφ	P(W)
367,042	267,938	323,036	367,04	8,84	0,9823	3187,942
Gerador				Carga		
Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	IAL (A)	IBL (A)	ICL (A)	P (W)
5,32	6,45	4,73	8,61	7,21	9,83	4895,30

➤ ENSAIO EM CARGA – CARGA MOTORA

O esquema de montagem dos equipamentos para o gerador de indução trifásico assimétrico com carga motora está demonstrado na figura 4.11.

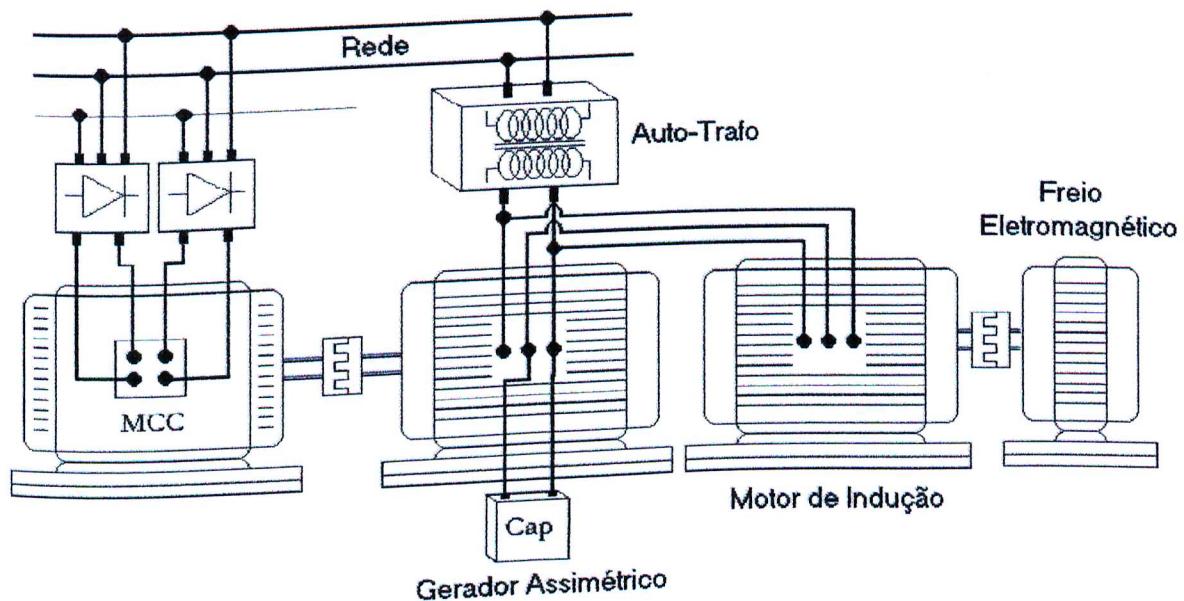


Figura 4.11 – Bancada de ensaios para o gerador com carga motora.

▪ MOTOR EM VAZIO

As figuras a seguir mostram os resultados das tensões no barramento, corrente da rede, correntes de linha da carga e correntes no gerador de indução trifásico assimétrico suprindo um motor de indução trifásico simétrico em vazio.

➤ Para $b_1=0,6$, $c_1=1,4$ e $\text{Cap}=40 \mu\text{F}$

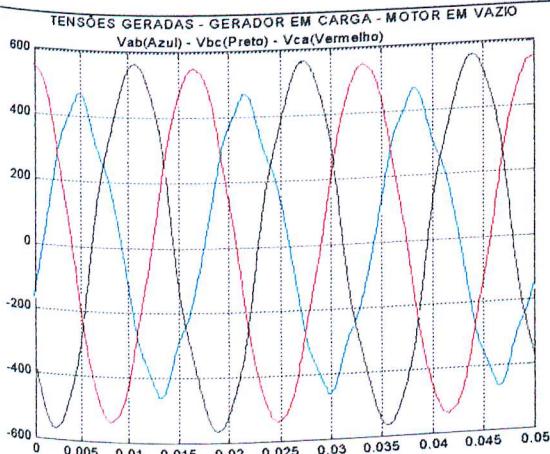


Figura 4.12 – Tensões de linha

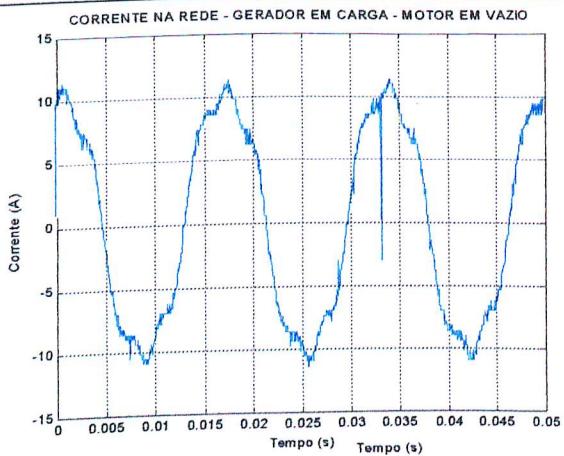


Figura 4.13 – Corrente na rede 1φ

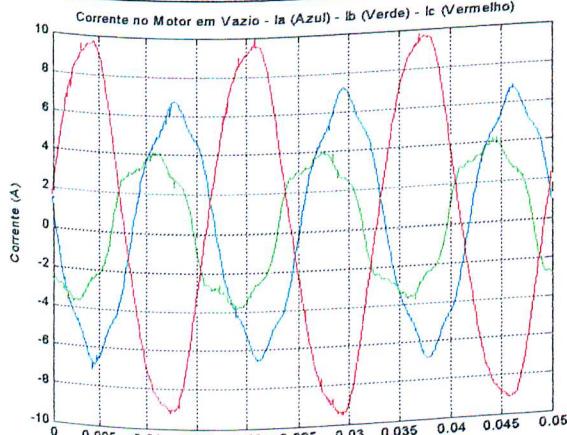


Figura 4.14 – Correntes do motor

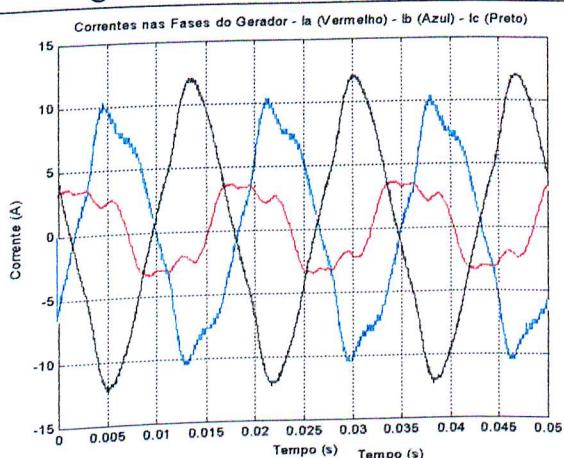


Figura 4.15 – Correntes do gerador

A tabela 4.3 mostra os dados obtidos no ensaio do gerador de indução trifásico assimétrico

com carga motora – motor em vazio.

Tabela 4.3 – Dados do ensaio com motor em vazio.

Tensões no Barramento			Rede 1φ			
Vca (V)	Vab (V)	Vbc (V)	Vrede(V)	Ir (A)	Cosφ	P(W)
386,172	308,282	403,253	386,172	7,73	-0,241	-721,86
Gerador – 1864 rpm				Motor – 1796 rpm		
Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	IAL (A)	IBL (A)	ICL (A)	P (W)
2,63	6,67	7,83	4,639	2,818	6,764	821,09

■ PARTIDA DA CARGA - MOTOR EM VAZIO

Apesar deste item, no contexto deste trabalho, ser de caráter apenas ilustrativo, permite verificar sem maiores análises o desempenho na partida do motor trifásico simétrico operando como carga para o gerador de indução trifásico assimétrico. Desta forma, são apresentadas as curvas das correntes nas fases do motor e a corrente na rede monofásica.

➤ Comportamento na partida

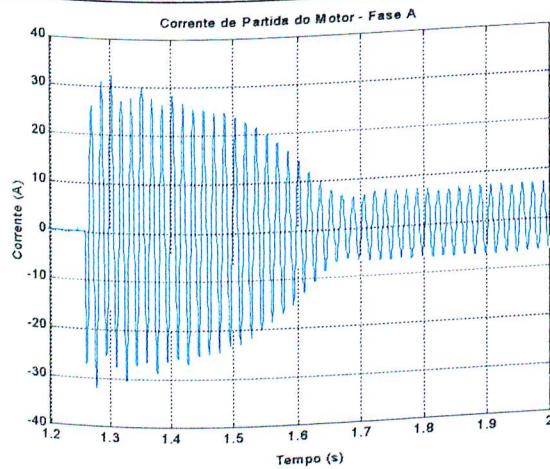


Figura 4.16 – Corrente da fases A do motor

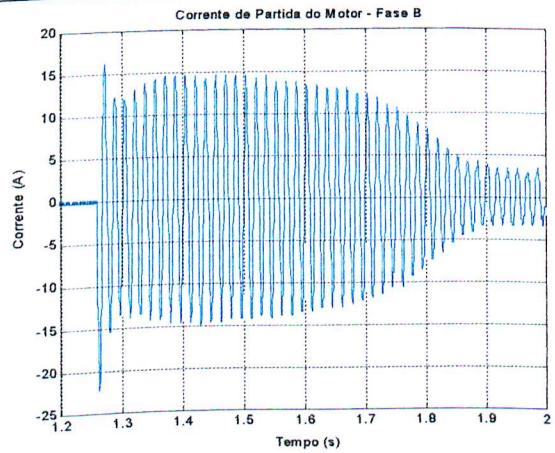


Figura 4.17 – Corrente da fases B do motor

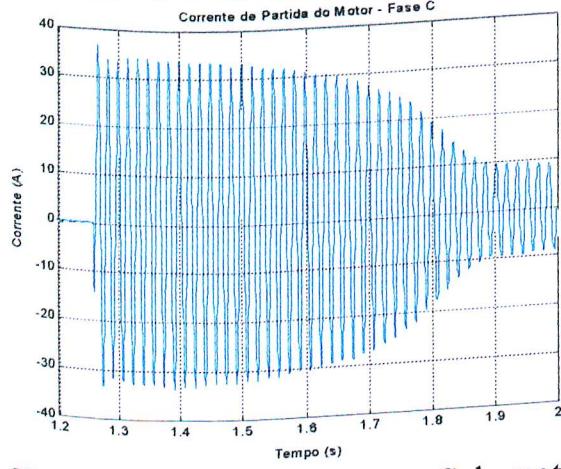


Figura 4.18 – Corrente da fases C do motor

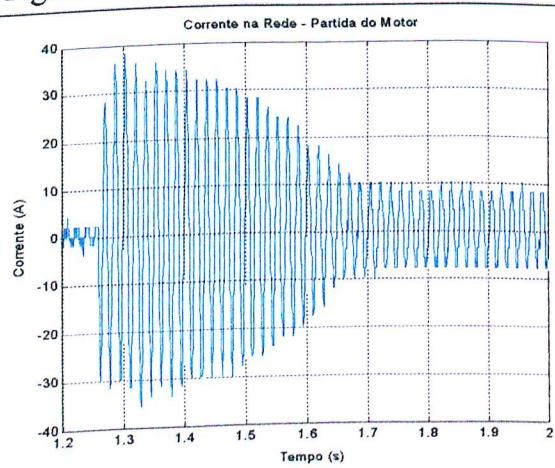


Figura 4.19 – Correntes na rede 1φ

Através das figuras 4.16 a 4.19, verifica-se o comportamento das correntes na carga e na rede no momento da partida. O comportamento das correntes, ainda que o protótipo do gerador de indução trifásico assimétrico não seja o ideal, é bastante satisfatório, uma vez que o tempo de partida para o motor é de aproximadamente 0,6 s com I_p/I_n de aproximadamente de 5,6.

▪ MOTOR EM CARGA

As figuras a seguir mostram os resultados das tensões no barramento, corrente da rede, correntes de linha da carga e correntes no gerador de indução trifásico assimétrico suprindo um motor de indução trifásico simétrico em carga.

➤ Para $b_1=0,6$, $c_1=1,4$ e $Cap=40\text{ }\mu\text{F}$

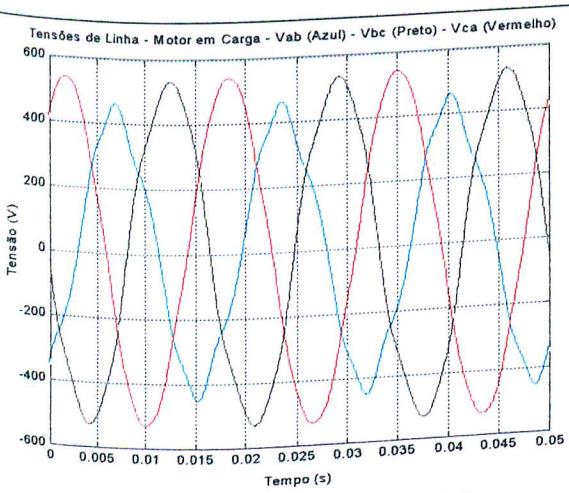


Figura 4.20 – Tensões de linha

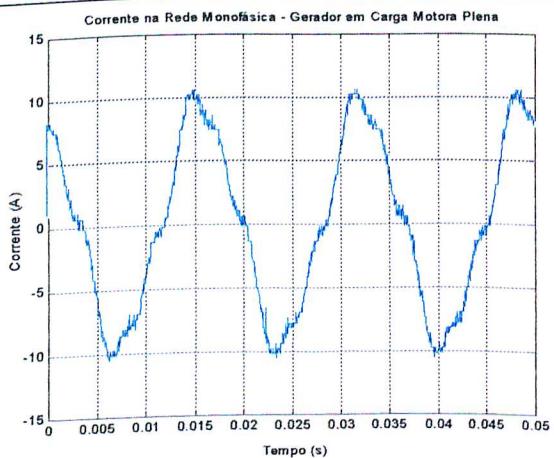
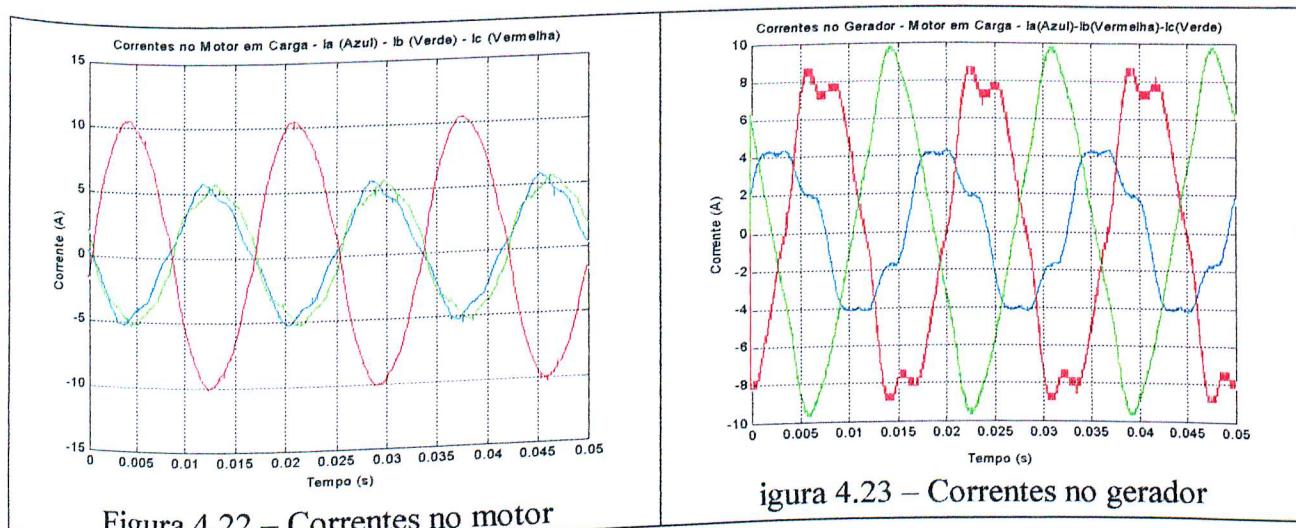


Figura 4.21 – Correntes na rede 1φ



A tabela 4.4 mostra os dados obtidos no ensaio do gerador de indução trifásico assimétrico

com carga motora – motor em carga.

Tabela 4.4 – Dados do ensaio com motor em carga.

Tensões no Barramento			Rede 1φ			
V _{ca} (V)	V _{ab} (V)	V _{bc} (V)	V _{rede} (V)	I _r (A)	Cosφ	P(W)
381,191	301,945	377,988	381,191	6,7	0,3054	779,98
Gerador – 1870 rpm				Motor – 1719 rpm		
I _a (A)	I _b (A)	I _c (A)	I _{AL} (A)	I _{BL} (A)	I _{CL} (A)	P (W)
3,45	6,29	6,91	3,573	3,835	7,331	2198,13

Através da tabela 4.4 é possível fazer o balanço das potências no sistema, pois com os valores das potências de entrada do motor trifásico e da rede monofásica, facilmente encontra-se o valor da potência que o gerador de indução trifásico assimétrico fornece ao sistema. A tabela 4.5 apresenta de forma simplificada o balanço das potências no sistema.

Tabela 4.5 – Balanço das potências no sistema

Potência da Rede 1φ (W)	Potência de Entrada do Motor (W)	Potência do Gerador (W)
779,98	2198,13	1418,2

Pelos dados apresentados tem-se o valor da potência de entrada no motor, porém seria interessante verificar a potência mecânica desenvolvida no eixo. Então, a verificação da potência entregue a carga é feita por meio de uma equação que representa o freio eletromagnético utilizado como carga. Esta equação foi levantada em ensaios no Laboratório de Máquinas Elétricas da UFU e há bastante tempo vem sendo utilizada para tal finalidade. A equação 4.1 abaixo estima a potência mecânica do freio eletromagnético usado como carga para o motor.

$$P_{mec} = 110 + 0,0024 \cdot \omega r^2 \cdot I_f^2 \quad (4.1)$$

onde:

P_{mec} – potência mecânica, em W;

ωr – velocidade, em rpm;

I_f – corrente, em A.

Então por meio da equação 4.1 é estimada a potência mecânica no eixo do motor trifásico. No ensaio do motor trifásico em carga, alimentado pelo sistema de co-geração apresentado, obteve-se os seguintes dados:

Tabela 4.6 – Dados do freio eletromagnético

Velocidade do Freio (rpm)	Corrente no Freio (A)	Potência Mecânica do Freio (W)
1719	0,42	1361

Uma vez estimada a potência mecânica no eixo do motor, é possível estimar o rendimento do motor, mesmo em condições de alimentação desbalanceada. Desta forma, tem-se:

$$\eta\% \text{ (estimado)} = 61,92 \%$$

É oportuno apresentar os valores obtidos em simulação digital para a condição em que o gerador assimétrico alimenta um motor de indução trifásico em plena carga. A tabela 4.7 apresenta os valores obtidos.

Tabela 4.7 – Resultados simulados para o motor em carga

Tensões no Barramento			Rede 1φ			
V _{ca} (V)	V _{ab} (V)	V _{bc} (V)	V _{rede} (V)	I _r (A)	Cosφ	P(W)
381,20	287,08	355,67	381,20	5,09	0,3796	736
Gerador – 1871,4 rpm				Motor – 1713,1 rpm		
I _a (A)	I _b (A)	I _c (A)	P (W)	I _{AL} (A)	I _{BL} (A)	I _{CL} (A)
1,18	5,37	5,60	1587,38	3,93	3,70	7,63
						1444,13

Devido ao modelo matemático ser desenvolvido para tensões de linha, as potências das máquinas são obtidas em função do conjugado de carga e da velocidade, o que representa a potência no eixo da máquina. Para estabelecer o balanço das potências é necessário determinar a potência elétrica de entrada do motor através dos valores da potência na rede e da potência no gerador assimétrico. Então o balanço das potências para a simulação é apresentado na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Balanço das potências no sistema

Potência da Rede 1φ (W)	Potência de Entrada do Motor (W)	Potência do Gerador (W)
736	2323,38	1587,38

Fazendo-se uma rápida análise das tabelas 4.5 e 4.8, verifica-se que na rede monofásica, a potência obtida experimentalmente é maior que a potência obtida por meio de simulação, e que as potências no motor e gerador obtidas experimentalmente são menores que as potências obtidas na simulação. Estas discrepâncias são, de fato, esperadas, visto que no modelo matemático não estão incluídas as perdas por atrito e ventilação, bem como as perdas no ferro para ambas máquinas de indução. Desta forma, no ensaio experimental a rede supriu as perdas no gerador, o que não acontece na simulação, pois estas perdas não são contempladas.

Capítulo 5

5. COMPROVAÇÃO TEÓRICA - EXPERIMENTAL

O ponto fundamental desta tese é apresentar um modelo matemático no domínio do tempo para uma nova concepção de co-geração de energia elétrica. Como já foi descrito no início deste trabalho, o ineditismo deste trabalho está no uso de uma máquina trifásica assimétrica ligada a uma rede monofásica para fins co-geração para a zona rural. Uma vez a máquina assimétrica modelada matematicamente (Capítulo 2), apresentada à filosofia de projeto (Capítulo 3), e realizados os ensaios experimentais com o protótipo (Capítulo 4), pode-se dizer que praticamente todos os elementos mais importantes para o projeto de um gerador de indução trifásico assimétrico ligado a uma rede monofásica foram apresentados. Ainda com base neste trabalho, fica evidenciada a possibilidade desta sistemática de projeto ser estendida a qualquer faixa de potência para este tipo de gerador. Desta forma, a fim de elucidar quaisquer dúvidas tocante a credibilidade deste trabalho, este capítulo tem como meta apresentar uma comprovação teórica-experimental, no qual os resultados obtidos por meio de simulações computacionais, para a máquina adotada como protótipo nesta tese, são comparados com os resultados experimentais obtidos em ensaios realizados em laboratório. Através desta comprovação pode-se atestar a veracidade e eficiência do modelo proposto, bem como consolidar os conceitos aqui apresentados.

5.1 COMPARAÇÃO TEÓRICA – EXPERIMENTAL

Para a comparação entre os resultados obtidos em simulação digital e em laboratório, são utilizados os seguintes regimes de funcionamento:

- Gerador de indução trifásico assimétrico em vazio pleno;
- Gerador de indução trifásico assimétrico com potência nominal suprindo uma carga trifásica resistiva;
- Gerador de indução trifásico assimétrico com potência nominal suprindo um motor de indução trifásico em vazio;
- Gerador de indução trifásico assimétrico com potência nominal suprindo um motor de indução trifásico em plena carga.

Para os resultados simulados apresentados na comprovação teórica e experimental a seguir, o valor da tensão na rede monofásica utilizada na simulação corresponde ao mesmo valor do obtido experimentalmente em cada regime de funcionamento. Salienta-se ainda que na simulação digital não estão inclusas as perdas por atrito e ventilação, bem como as perdas no ferro, tanto para o gerador como para o motor.

Para os ensaios em bancada de laboratório, o motor de indução trifásico simétrico encontra-se acoplado a um freio eletromagnético a todo instante, inclusive para o ensaio com o motor em vazio. Por estar acoplado, o momento de inércia do freio eletromagnético, que não foi considerado na simulação digital, exerce uma resistência mecânica ao motor ocasionando uma parcela de carga ao motor mesmo em condição de vazio.

A nomenclatura usada na legenda das figuras, resultado experimental, refere-se ao aparelho usado para medição, onde: AD – sistema de aquisição de dados; e Osc – osciloscópio digital.

Em todos os gráficos apresentados a seguir, as figuras à esquerda correspondem aos resultados obtidos em simulação digital e as figuras do lado direito correspondem aos resultados obtidos nos ensaios em laboratório.

5.1.1 GERADOR EM VAZIO

Simulação

Gerador Assimétrico – Vazio

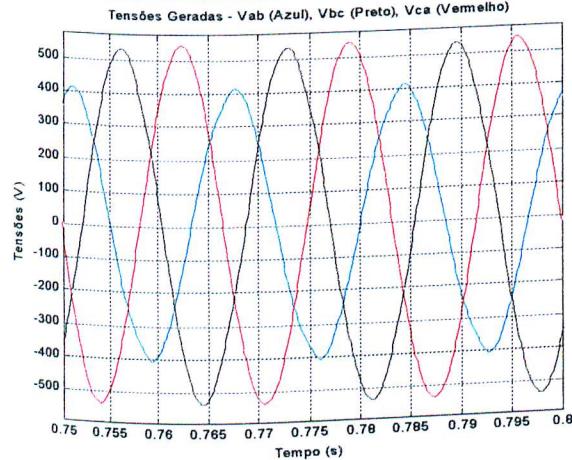


Figura 5.1 – Tensões de linha

Experimental

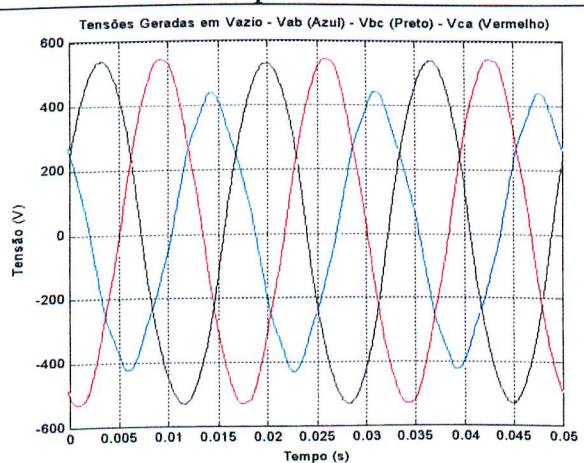


Figura 5.2 – Tensões de linha – AD

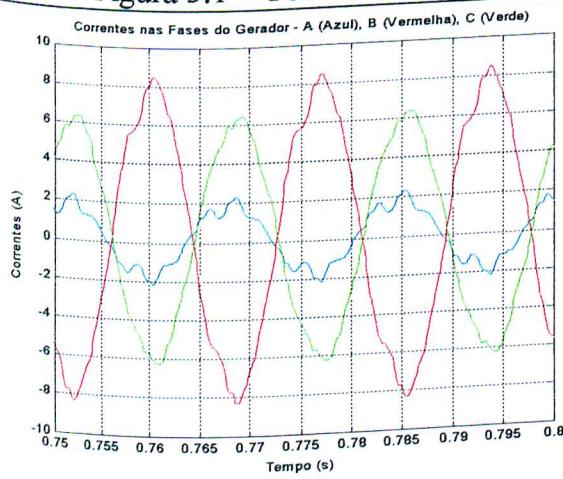


Figura 5.3 – Correntes no gerador

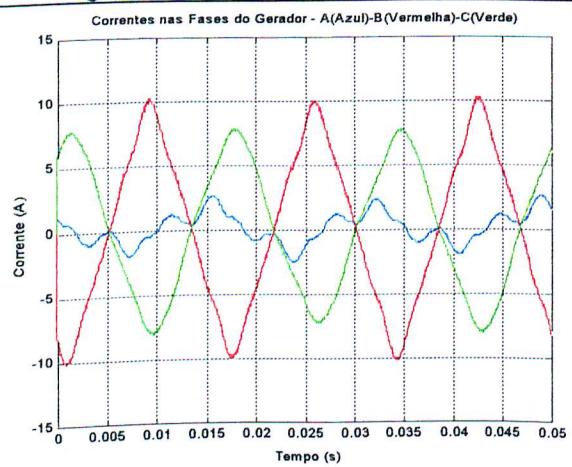


Figura 5.4 – Correntes no gerador – AD

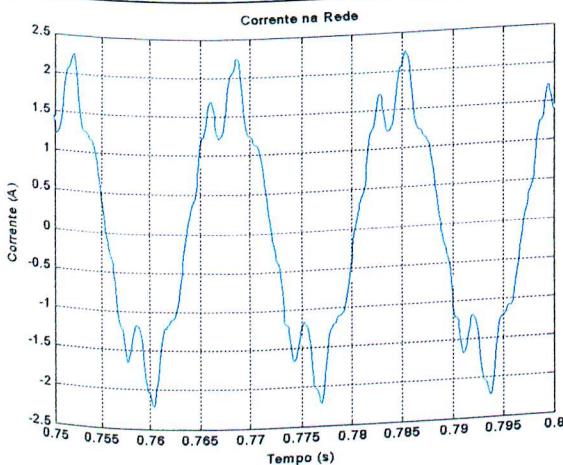


Figura 5.5 – Corrente na rede

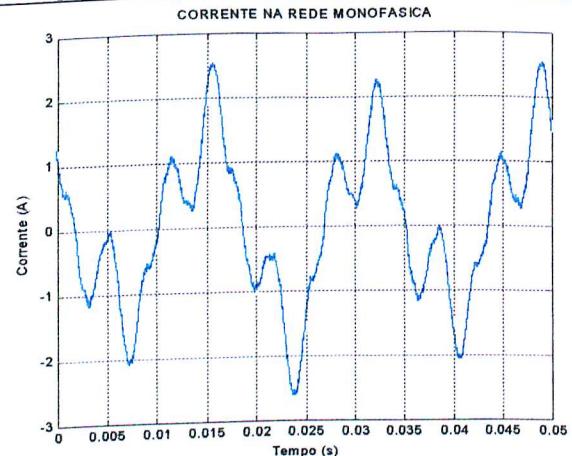


Figura 5.6 – Corrente na rede – Osc.

5.1.2 GERADOR EM CARGA RESISTIVA

Gerador Assimétrico – Carga Resistiva

Simulação

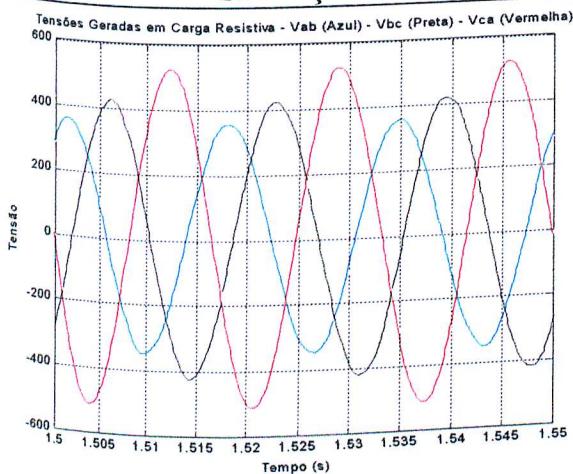


Figura 5.7 – Tensões de linha

Experimental

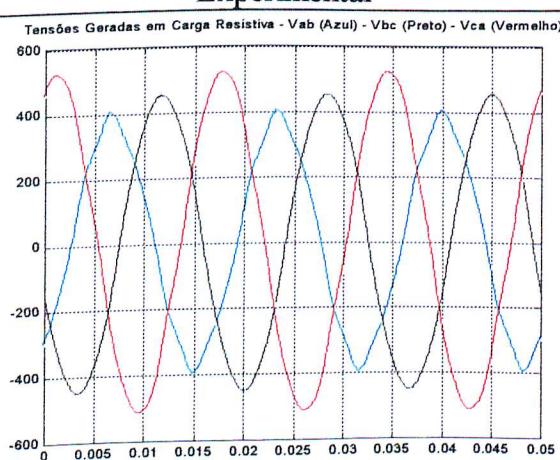


Figura 5.8 – Tensões de linha – AD.

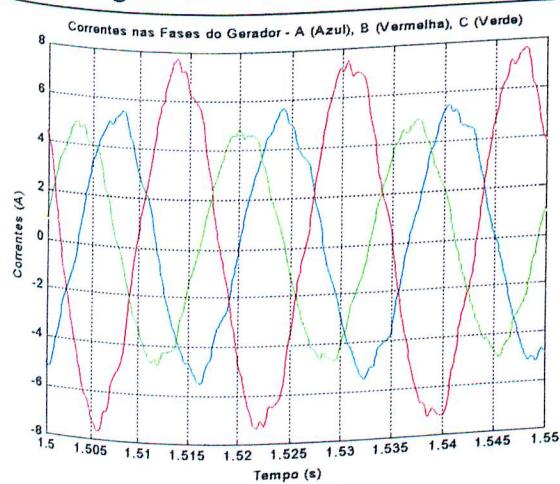


Figura 5.9 – Correntes no gerador

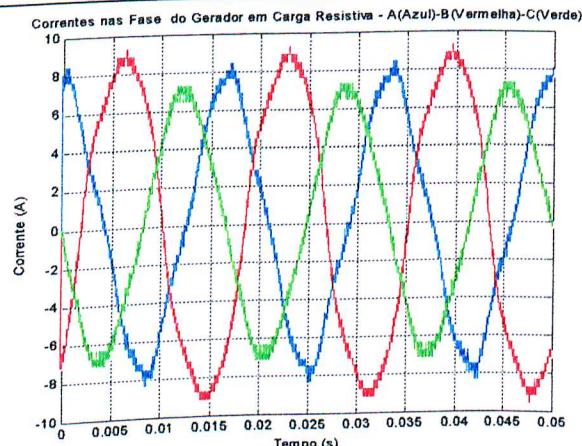


Figura 5.10 – Correntes no gerador – Osc.

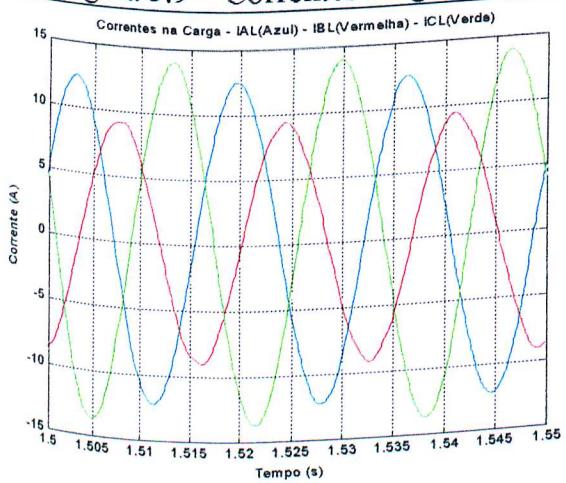


Figura 5.11 – Correntes de linha

Correntes na Carga - IAL(Azul) - IBL(Vermelho) - ICL(Verde)

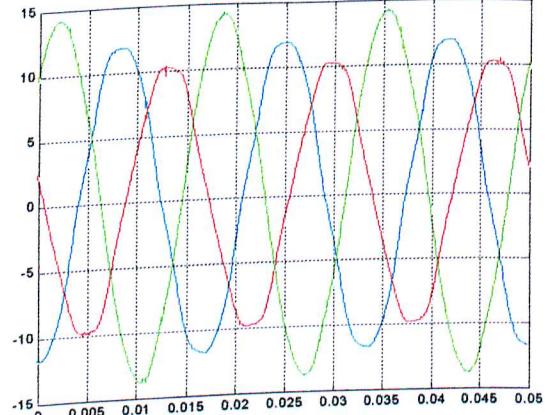
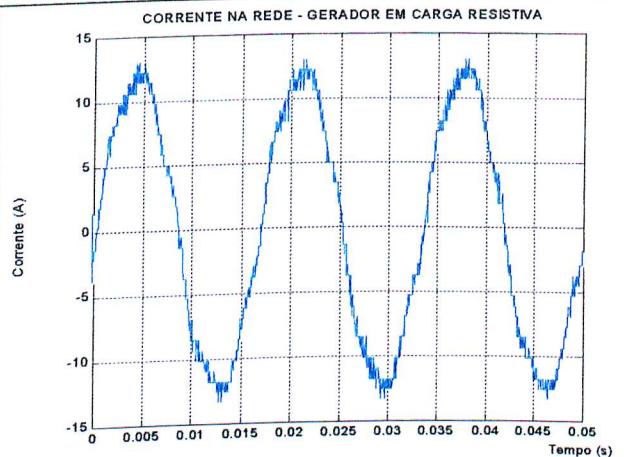
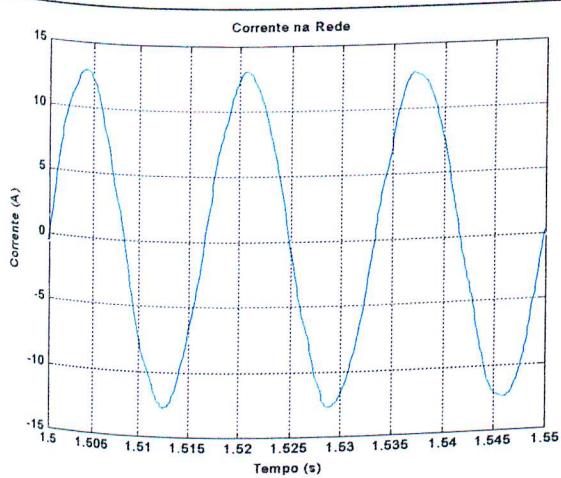
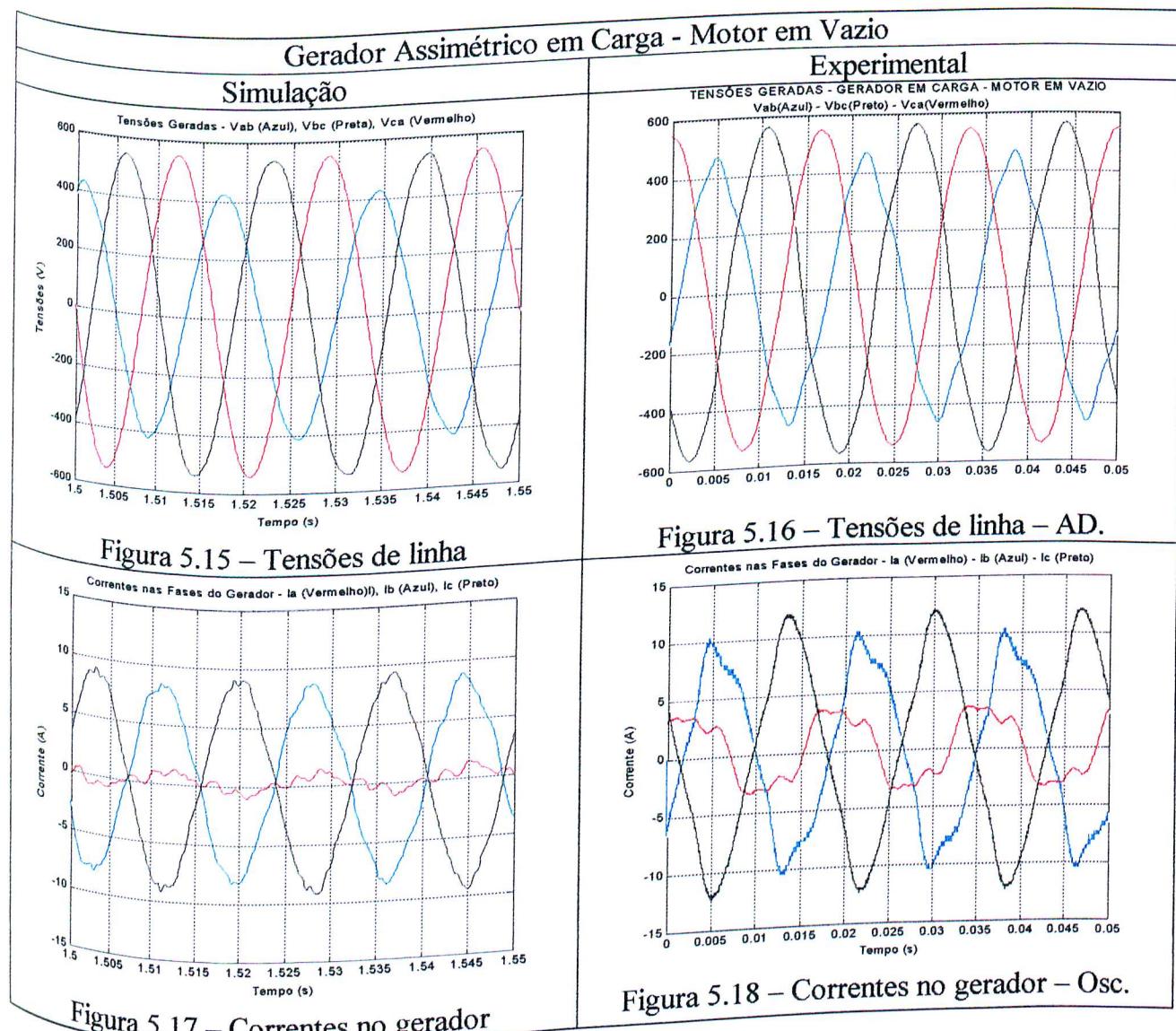


Figura 5.12 – Correntes de linha – AD.



5.1.3 GERADOR EM CARGA - MOTOR EM VAZIO



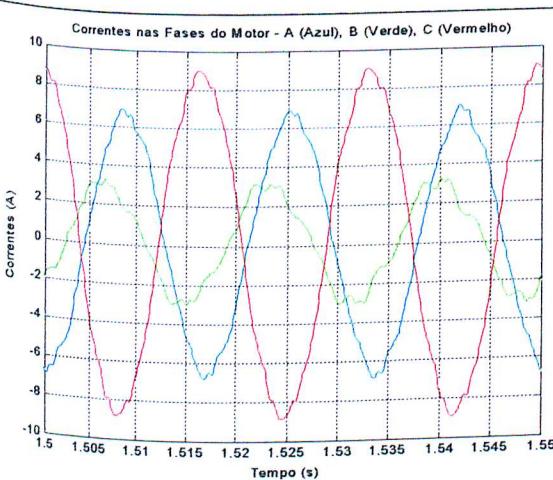


Figura 5.19 – Correntes no motor

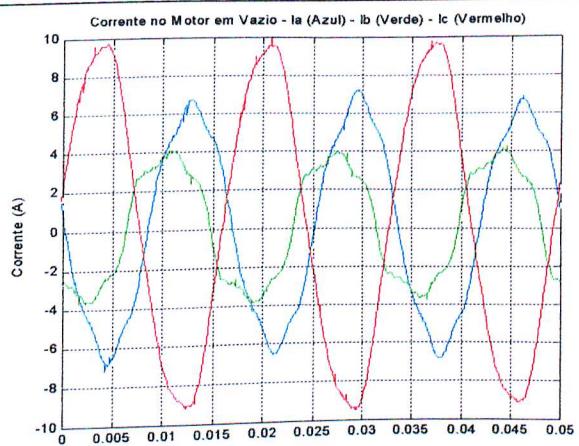


Figura 5.20 – Correntes no motor – AD.

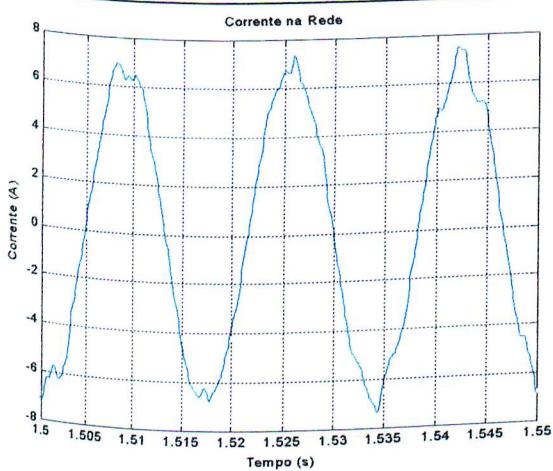


Figura 5.21 – Correntes na rede 1φ

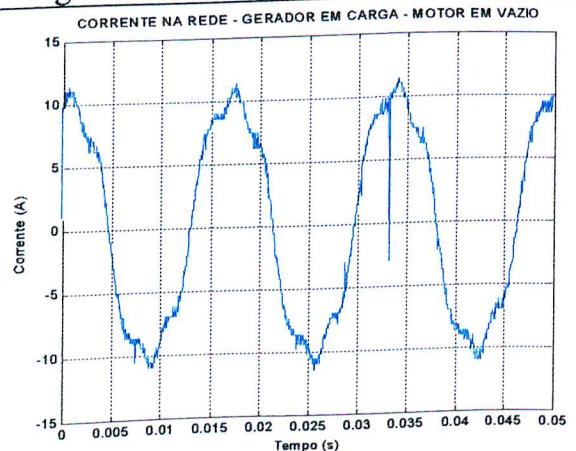


Figura 5.22 – Correntes na rede 1φ - Osc.

Correntes de Partida da Carga

Experimental

Simulação

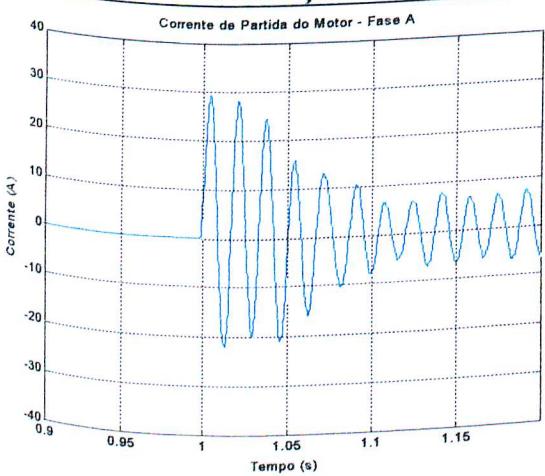


Figura 5.23 – Corrente da fase A

Corrente de Partida do Motor - Fase A

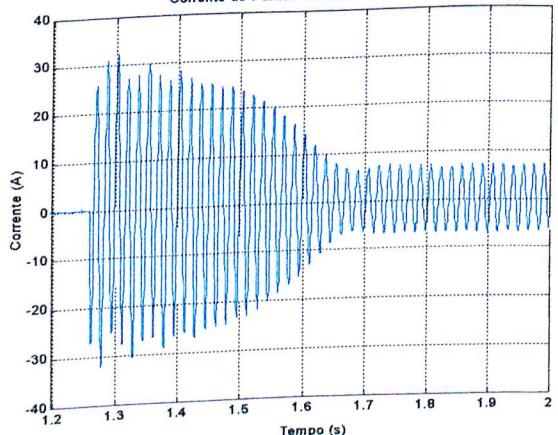
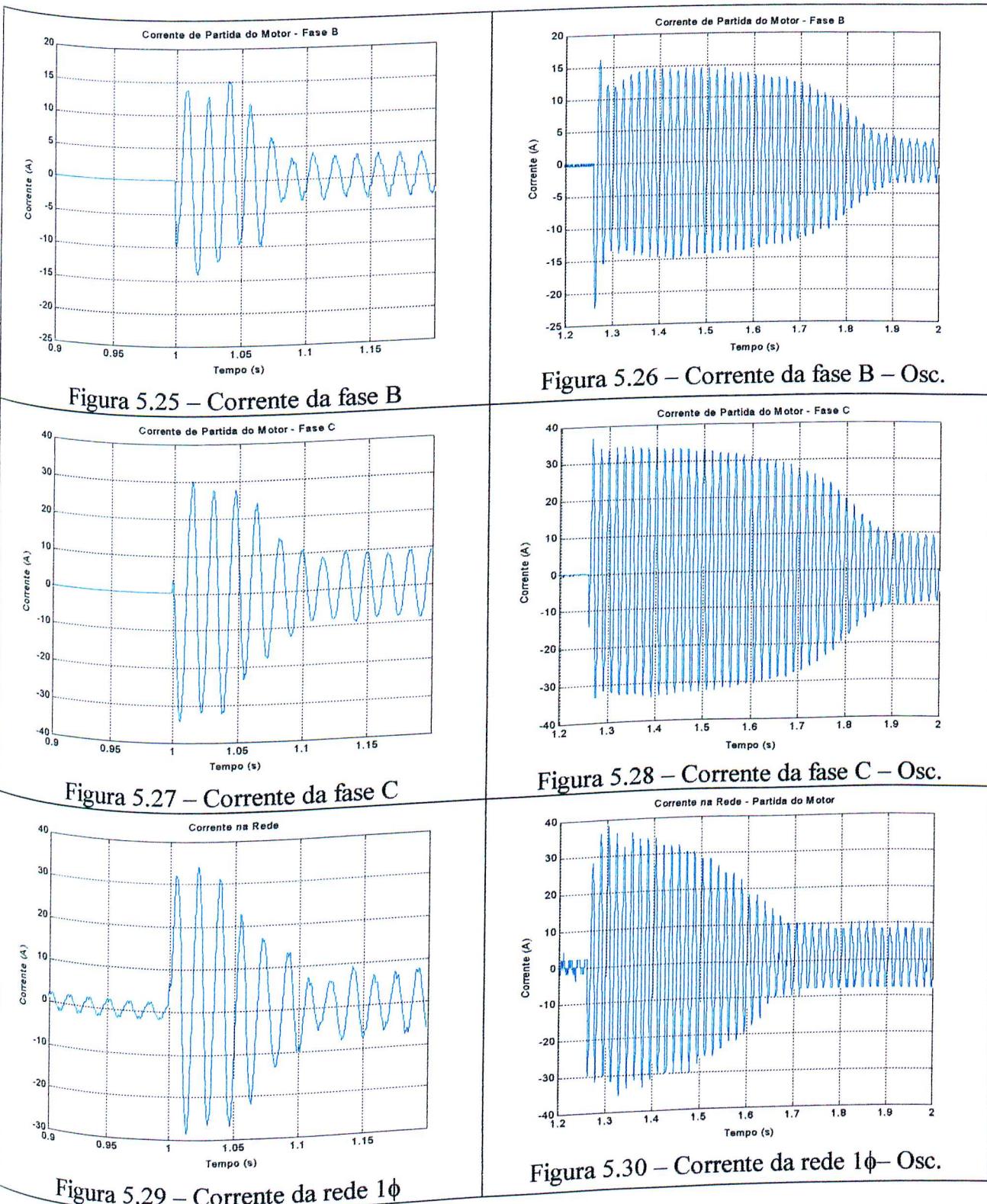


Figura 5.24 – Corrente da fase A – Osc.



5.1.4 GERADOR EM CARGA - MOTOR EM CARGA

Gerador Assimétrico em Carga - Motor em Carga

Simulação

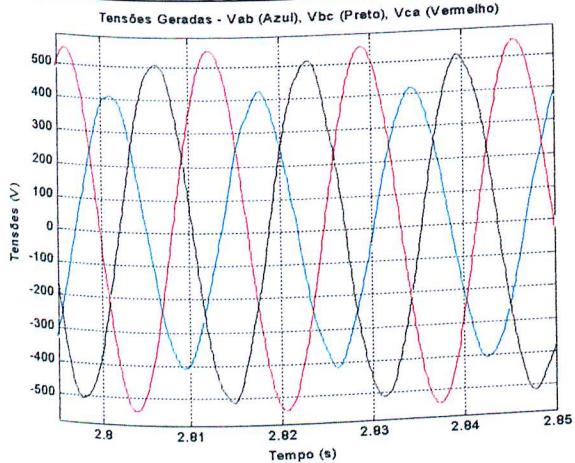


Figura 5.31 – Tensões de linha

Experimental

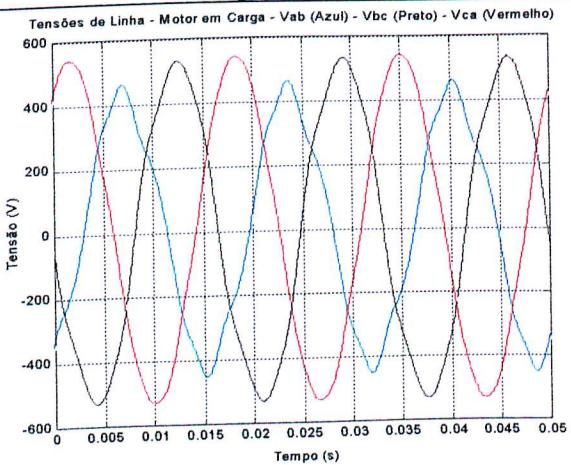


Figura 5.32 – Tensões no barramento – AD.

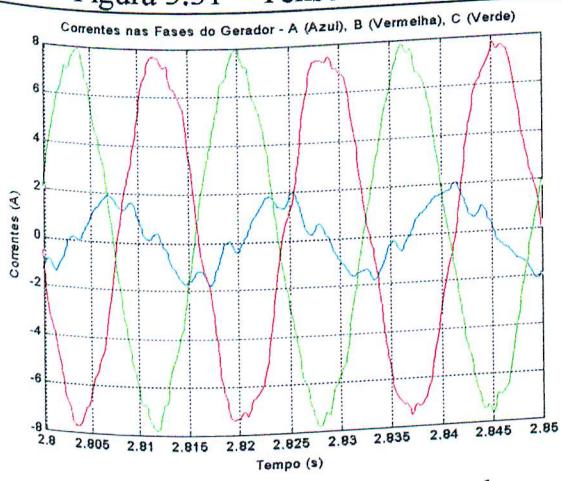


Figura 5.33 – Correntes no gerador

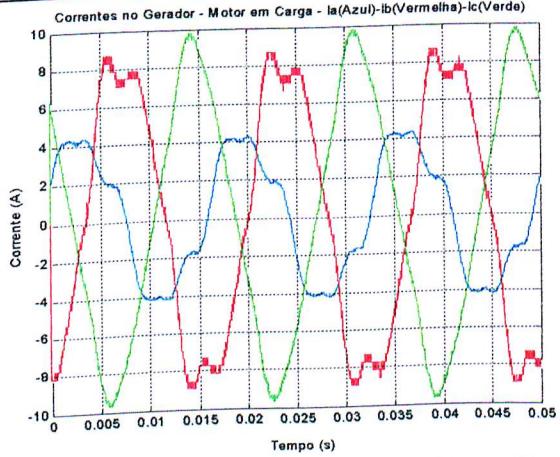


Figura 5.34 – Correntes no gerador – Osc.

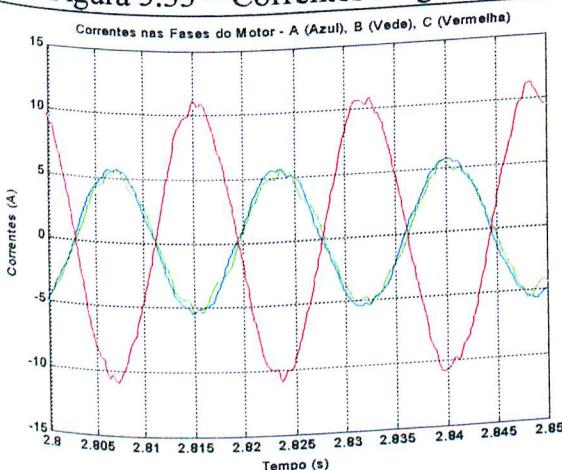


Figura 5.35 – Correntes no motor

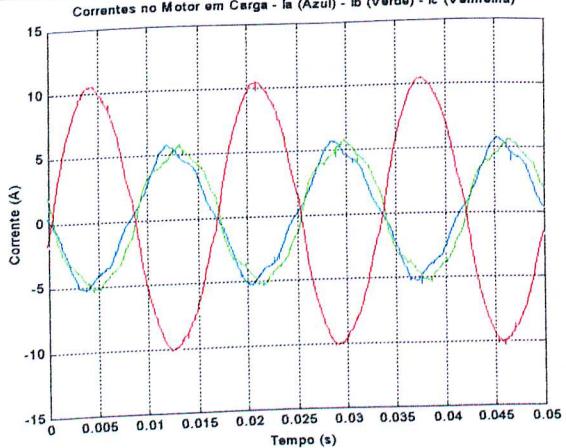
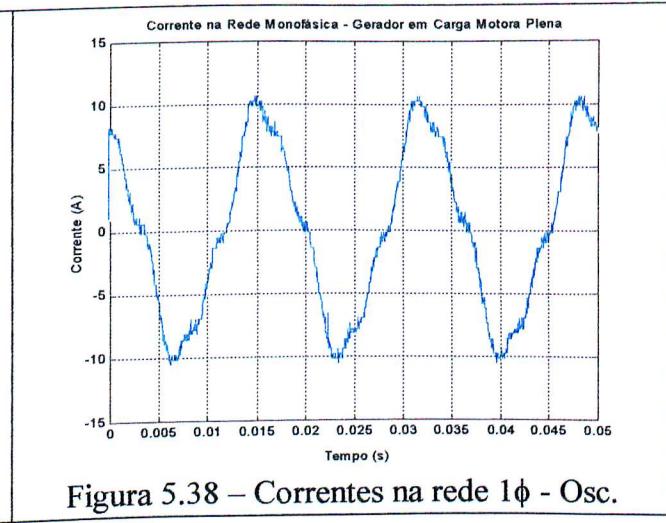
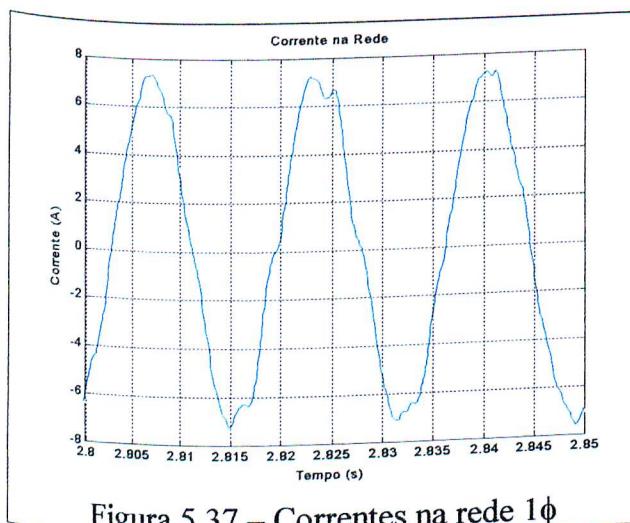


Figura 5.36 – Correntes no motor – AD.



5.2 ANÁLISE DA COMPROVAÇÃO TEÓRICA – EXPERIMENTAL

A análise da comprovação teórica – experimental será abordada por etapas, ou seja, por regime de carregamento.

5.2.1 Gerador em Vazio

Pelas figuras 5.1 a 5.2, verifica-se que uma pequena deformação nas formas de onda das tensões geradas de linha, tanto no simulado quanto no experimental. Porém, no experimental, as deformações nas ondas são um pouco mais pronunciadas e os valores eficazes são ligeiramente maiores, sendo presumido que este fato seja devido ao efeito da saturação magnética da máquina, fato não contemplado no modelo matemático. As deformações ocasionadas na simulação são provenientes dos harmônicos espaciais.

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam as formas de onda das correntes nas fases do gerador assimétrico, e claramente fica demonstrado que a deformação nas ondas, bem como a diferença entre os valores das mesmas, são ocasionados pelos efeitos dos harmônicos espaciais e por outros fatores como a saturação magnética. Vale ressaltar que as ondas de corrente na rede simulada e experimental apresentam formatos semelhantes, sendo nitidamente mostrada nas

figuras 5.5 e 5.6. Estas figuras representam a corrente na rede monofásica que em condição de vazio é a mesma corrente na fase “a” do gerador.

5.2.2 Gerador em Carga Resistiva

De forma análoga ao item 5.2.1, os mesmo efeitos de deformação e diferença entre os valores eficazes são verificados, porém nas correntes das fases do gerador são mais pronunciados que nas correntes da carga e da rede monofásica. Isto pelo fato da carga ser resistiva.

5.2.3 Gerador em Carga – Motor em Vazio

Pelas figuras 5.15 e 5.16, verifica-se que as deformações nas ondas de tensão são similares às observadas nos itens 5.2.1 e 5.2.2 e ocasionadas pelos mesmos efeitos. Porém, para as correntes nas fases do gerador e do motor, estas deformações são bastante acentuadas e ocasionadas em grande parte pelos harmônicos espaciais e em menor parte pela saturação magnética. Quanto aos valores eficazes, acredita-se que a assimetria das correntes nas fases do estator do gerador possa atuar como freio, fato este que merece um estudo aprofundado em trabalhos futuros. A corrente na rede monofásica evidencia, claramente, a influência dos harmônicos espaciais no formato da onda.

As figuras 5.23 a 5.30 apresentam as correntes nas fases do motor e na rede para o instante da partida do mesmo. Embora não seja possível, pelas figuras apresentadas, fazer uma comparação realista - pois na simulação foi levado em consideração apenas o momento de inércia do motor e desconsiderado o momento de inércia do freio acoplado - pode-se evidenciar que o tempo de partida do motor é bastante satisfatório, mesmo em condições de alimentação desbalanceada. Então, as figuras apresentadas têm caráter apenas ilustrativo, pois para uma

análise dinâmicas mais realista será necessário levantar o momento de inércia do freio eletromagnético, bem como as perdas por atrito e ventilação.

5.2.4 Gerador em Carga – Motor em Carga

Para o caso do motor em carga, verifica-se nas ondas de corrente das fases do motor e do gerador, figura 5.33 a 5.36, que os harmônicos espaciais são responsáveis pela grande parcela causadora de deformações nas ondas, tanto para o motor quanto para o gerador e as diferenças existentes entre valores deve-se em grande parte as perdas por atrito e ventilação não contemplados no modelo matemático. Ainda é observado que o formato das ondas de tensão e das correntes do motor, gerador e da linha monofásica, simuladas e experimentais, são bastante concordantes.

Capítulo 6

6 SIMULAÇÃO DIGITAL DE UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO DE 60 CV

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como finalidade mostrar a possibilidade de se projetar máquinas de indução trifásica assimétrica, com valor de potência usual na prática, para trabalhar como gerador, ligado a uma rede monofásica. Para estas simulações, foram tomados os dados dos parâmetros do circuito equivalente de uma máquina de indução trifásica tradicional de 60 cv, 220 V/ 380 V, 4 pólos, 1775 rpm, conforme referência [10]. Os dados do circuito equivalente são apresentados na tabela 6.1. Salienta-se ainda que os mesmos parâmetros serão utilizados tanto para o gerador como para o motor que servirá de carga.

Tabela 6.1 – Dados dos parâmetros do circuito equivalente

$Rs(\Omega)$	$Xs(\Omega)$	$Xm(\Omega)$	$Xr'(\Omega)$	$Rr'(\Omega)$
0,03518	0,14060	6,79256	0,14105	0,04603

6.2 PROJETO E PARÂMETROS

Com base na sistemática de projeto apresentada no item 3.4.1 são apresentados os resultados das simulações que originaram um desequilíbrio máximo das tensões na ordem de até 4%, conforme tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Dados do gerador assimétrico de 60 CV em carga.

Gerador Assimétrico de 60CV com Carga Motora de 60CV											
Relações de Espiras		Capaci- tância	Correntes nas Fases (rms)			Tensões de Linha (rms)			Desequilíbrio de Tensão (Ref. Vca)		
b1	c1		Cap(uF)	Iag(A)	Ibg(A)	Icg(A)	Vca(V)	Vab(V)	Vbc(V)	Dvab	DVbc
0,60	0,80	2.000,00	98,99	227,47	272,59	380,00	378,30	379,01	0,45%	0,26%	
		1.400,00	73,70	141,30	206,90	380,00	380,42	376,20	-0,11%	1,00%	
		1.500,00	76,01	152,38	215,67	380,00	384,31	381,13	-1,13%	-0,30%	
		1.600,00	79,55	164,05	225,21	380,00	388,34	386,08	-2,19%	-1,60%	
0,70	0,90	1.400,00	58,26	146,01	194,10	380,00	370,52	384,31	2,49%	-1,13%	
0,80	0,80	1.500,00	62,43	156,97	202,58	380,00	374,77	389,26	1,38%	-2,44%	
0,80	0,90	1.000,00	60,45	92,63	151,88	380,00	373,00	383,25	1,84%	-0,86%	
0,90	0,80	700,00	97,44	46,31	132,58	380,00	386,43	378,30	-1,69%	0,45%	
		600,00	84,85	55,15	114,26	380,00	371,58	376,53	2,22%	0,91%	
		700,00	79,76	58,97	120,20	380,00	375,83	382,19	1,10%	-0,58%	
0,90	1,00	800,00	59,25	75,80	118,08	380,00	370,52	391,74	2,49%	-3,09%	
1,00	0,90	600,00	94,75	46,10	106,06	380,00	384,24	389,49	-1,12%	-2,50%	
1,00	1,00	600,00	79,90	60,10	95,81	380,00	374,77	391,45	1,38%	-3,01%	

Uma vez determinada às relações de espiras e o capacitor, faz-se necessário a verificação da possibilidade de construção do enrolamento da máquina. Para tanto alguns dados de projeto devem ser adotados. Como valores usuais tem-se:

- Densidade de corrente de 6 A/mm^2 , porém podendo chegar a 8 A/mm^2 .
- Fator de enchimento da ranhura de 0,65, porém é aceitável até 0,80.

Considerando os dados de projeto e suas tolerâncias, apenas 7 casos têm possibilidade real de execução dentro das alternativas apresentadas na tabela 6.2.

Tabela 6.3 – Alternativa de projeto 1

ALTERNATIVA 1			
Fases	A (base)	B	C
Número de Espiras (p.u)	1	0,80	0,90
Secção do Condutor (mm ²)	7,5625	11,5875	19
Correntes (A)	60,5	92,7	152
Capacitor (uF)		1000	

Tabela 6.4 – Alternativa de projeto 2

ALTERNATIVA 2			
Fases	A (base)	B	C
Número de Espiras (p.u)	1	0,90	0,80
Secção do Condutor (mm ²)	12,1875	5,8125	16,575
Correntes (A)	97,5	46,5	132,6
Capacitor (uF)		700	

Tabela 6.5 – Alternativa de projeto 3

ALTERNATIVA 3			
Fases	A (base)	B	C
Número de Espiras (p.u)	1	0,90	0,90
Secção do Condutor (mm ²)	10,6125	6,9	14,2875
Correntes (A)	84,9	55,2	114,3
Capacitor (uF)		600	

Tabela 6.6 – Alternativa de projeto 4

ALTERNATIVA 4			
Fases	A (base)	B	C
Número de Espiras (p.u)	1	0,90	0,90
Secção do Condutor (mm ²)	9,975	7,375	15,025
Correntes (A)	79,8	59	120,2
Capacitor (uF)		700	

Tabela 6.7 – Alternativa de projeto 5

ALTERNATIVA 5			
Fases	A (base)	B	C
Número de Espiras (p.u)	1	0,90	1
Secção do Condutor (mm^2)	7,4125	9,475	14,7625
Correntes (A)	59,3	75,8	118,1
Capacitor (uF)		800	

Tabela 6.8 – Alternativa de projeto 6

ALTERNATIVA 6			
Fases	A (base)	B	C
Número de Espiras (p.u)	1	1	0,90
Secção do Condutor (mm^2)	11,85	5,7625	13,2625
Correntes (A)	94,8	46,1	106,1
Capacitor (uF)		600	

Tabela 6.9 – Alternativa de projeto 7

ALTERNATIVA 7			
Fases	A (base)	B	C
Número de Espiras (p.u)	1	1	1
Secção do Condutor (mm^2)	9,9875	7,5125	11,975
Correntes (A)	79,9	60,1	95,8
Capacitor (uF)		600	

6.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Das alternativas apresentadas, apenas como exemplo, será simulada a alternativa que apresenta o melhor balanço das tensões de linha, ou seja, $b = 0,90$; $c = 0,90$; e $\text{Cap} = 700 \text{ uF}$.

Na simulação, inicialmente a máquina funciona como motor em vazio até o instante 1,5 s, posteriormente é levada a condição de gerador por meio do conjugado nominal de turbina e uma carga motora de 60CV é acoplada aos terminais do gerador. Por questões de facilidade na obtenção dos valores eficazes do sistema, nesta simulação não é incluído o efeito dos harmônicos espaciais de enrolamento. A seguir são apresentadas as formas de onda do sistema.

Gerador Assimétrico 60 CV – Carga Motora de 60 CV
 $b = 0,90$, $b = 0,90$ e $\text{Cap} = 700 \mu\text{F}$

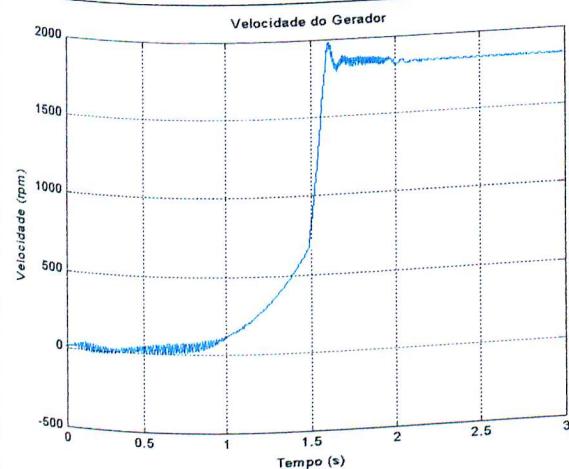


Figura 6.1 – Velocidade do gerador

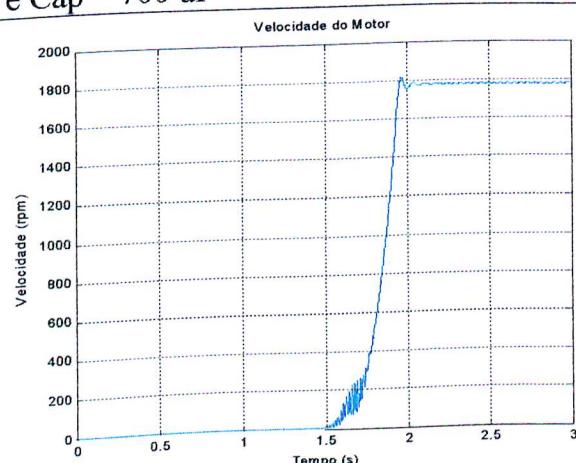


Figura 6.2 – Velocidade do motor

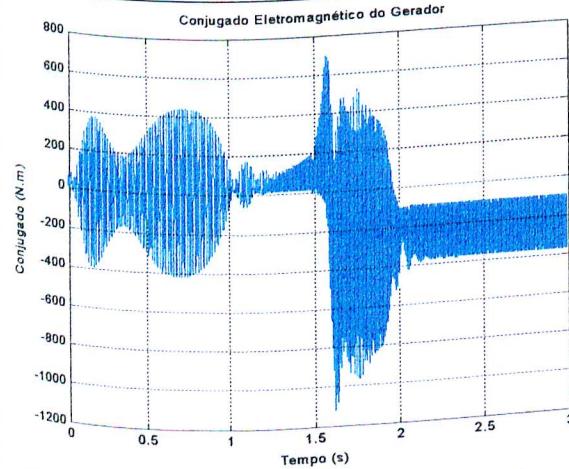


Figura 6.3 – Conjugado eletromagnético do gerador

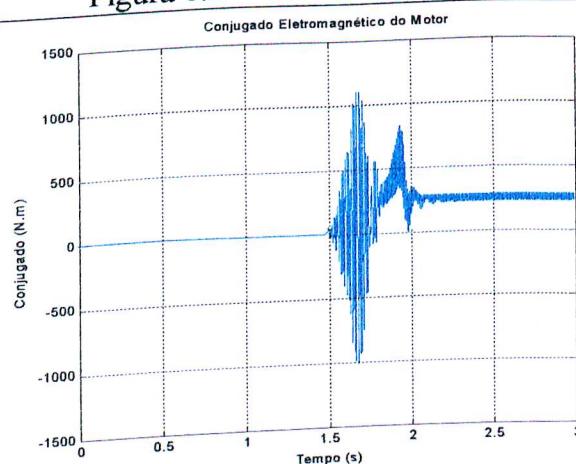


Figura 6.4 – Conjugado eletromagnético do motor

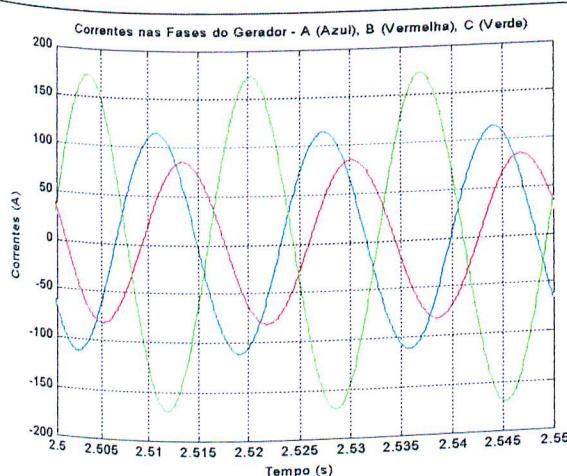


Figura 6.5 – Correntes nas fases do gerador

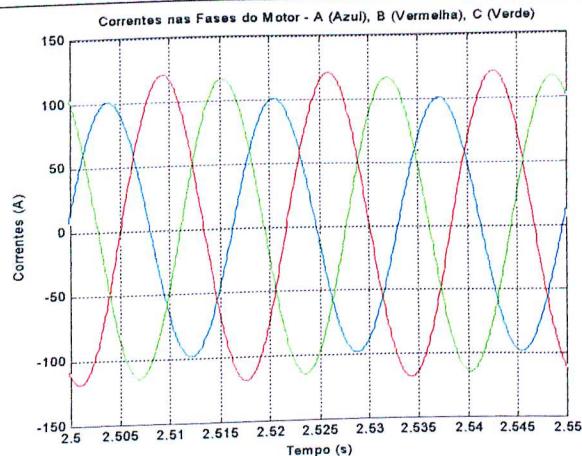


Figura 6.6 – Correntes nas fases do motor

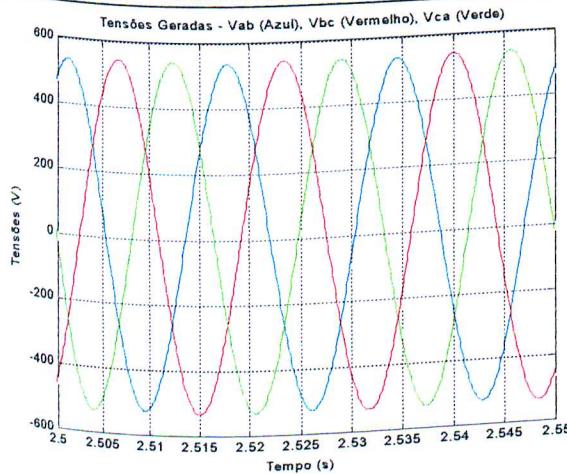


Figura 6.7 – Tensões de linha

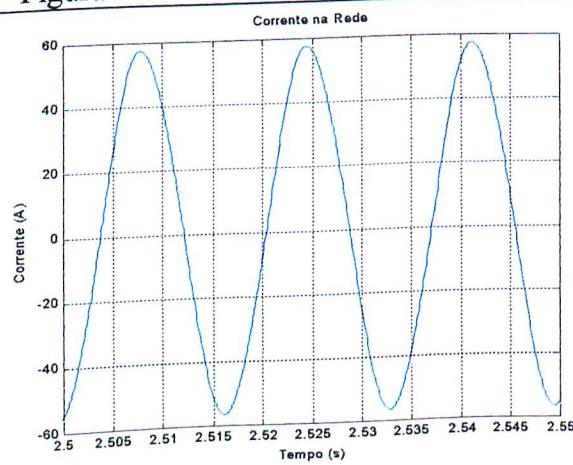


Figura 6.8 – Corrente na rede 1φ

Com base nas figuras 6.1 a 6.8 tem-se o valor eficaz das variáveis do sistema, sendo apresentados na tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Resultados simulados para o gerador com carga motora

Tensões no Barramento			Rede 1φ			
Vca (V)	Vab (V)	Vbc (V)	Vrede(V)	Ir (A)	Cosφ	P(W)
380	375,83	382,19	380	40,37	0,1249	1917,37
Gerador – 1823,2 rpm				Motor – 1772,1 rpm		
Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	P (W)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)
79,76	58,97	120,20	45917,47	70,71	84,85	82,02
						Peixo (W)
						44222,25

Devido ao modelo matemático ser desenvolvido para tensões de linha, as potências do motor e do gerador são obtidas em função do conjugado de carga e da velocidade, o que representa a potência no eixo da máquina. Para estabelecer o balanço das potências é necessário determinar a potência elétrica de entrada do motor através dos valores da potência na rede e da potência no gerador assimétrico. Assim o balanço das potências para a simulação é apresentado na tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Balanço da potência ativa no sistema

Potência da Rede 1φ (W)	Potência de Entrada do Motor (W)	Potência do Gerador (W)
1917,37	47834,84	45917,47

Através da tabela 6.11 verifica-se que uma grande parcela da potência ativa exigida pelo motor vem do gerador assimétrico, e uma pequena parcela vem da rede monofásica. Isto é explicado pelo fato das máquinas serem de mesma potência útil.

6.4 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA

Embora tenha sido feito anteriormente o balanço da potência ativa no sistema, o balanço da potência reativa não foi contemplado. Desta forma, é oportuno fazer a análise do fluxo das potências ativa e reativa do ponto de vista da rede monofásica através de simulação computacional, conforme figura 6.9, para as seguintes condições de funcionamento:

- A chave S1 aberta e o gerador fornecendo potência à rede;
- A chave S1 fechada e a carga solicitando potência do gerador e da rede;
- A chave S1 fechada e a carga solicitando potência apenas do gerador;
- A chave S1 fechada e o gerador enviando potência à carga e a rede.

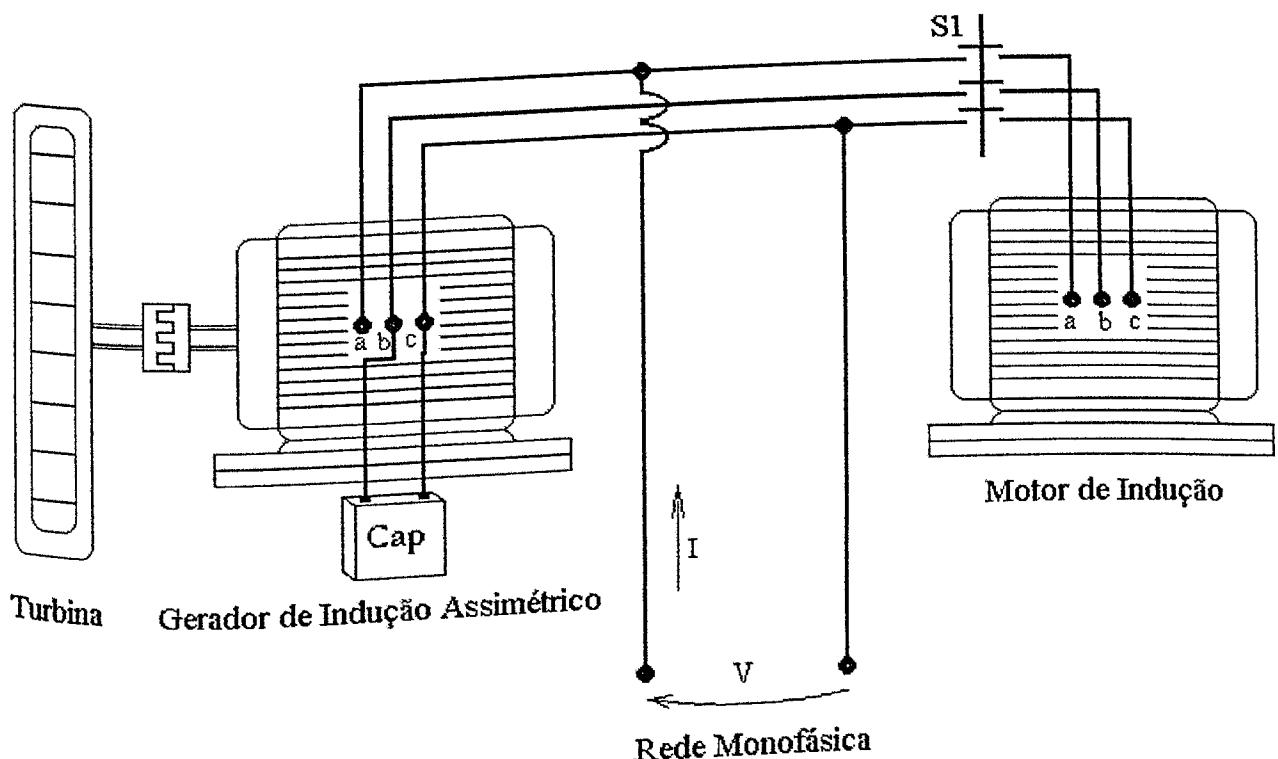


Figura 6.9 – Representação do sistema

6.4.1 GERADOR FORNECENDO POTÊNCIA A REDE

Neste item, é pressuposto que o gerador de indução trifásico assimétrico por meio do conjugado de turbina nominal fornece potência para rede, não tendo o motor de indução acoplado ao sistema. A tabela 6.12 mostra os valores obtidos das potências ativa e reativa na rede.

Tabela 6.12 - Dados simulados

Tensão - Rede (V)	Corrente - Rede (A)	Cos ϕ - Rede
380	112,78	-0,991
Potência Gerada (W)	Potência Ativa - Rede (W)	Potência Reativa - Rede (VAr)
48095,38	- 42498,49	5527,13

A figura 6.10 mostra o diagrama fasorial da tensão e corrente na rede monofásica, e através dele pode-se verificar o fluxo de potência ativa para a rede monofásica fornecida pelo gerador assimétrico, bem como o fluxo de potência reativa fornecida pela rede monofásica ao gerador.

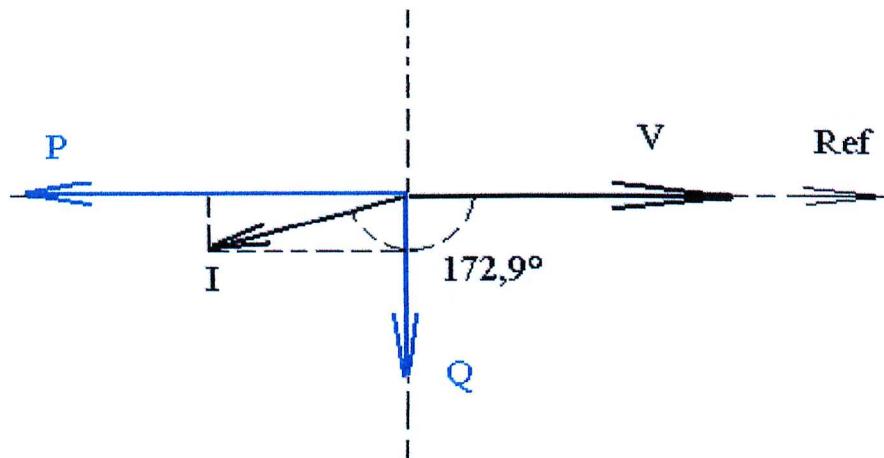


Figura 6.10 – Diagrama fasorial na rede

6.4.2 GERADOR E A REDE MONOFÁSICA FORNECENDO POTÊNCIA A CARGA

Pela figura 6.9, quando a chave S1 é fechada e quando o motor de indução estiver em plena carga, o gerador de indução trifásico assimétrico não fornece toda a potência exigida pelo motor, visto que ambos são de mesma potência útil. Desta forma, uma parcela da potência exigida é fornecida pela rede, conforme demonstrado visto anteriormente. A tabela 6.13 mostra os dados da rede, obtidos em simulação, para esta condição.

Tabela 6.13 - Dados simulados

Tensão - Rede (V)	Corrente - Rede (A)	Cos ϕ - Rede
380	40,37	0,1249
Potência Gerada (W)	Potência Ativa - Rede (W)	Potência Reativa - Rede (Var)
45917,47	1913,37	15220,305

A figura 6.11 mostra o diagrama fasorial da tensão e corrente na rede monofásica, e através dele pode-se verificar o fluxo de potência ativa e reativa na rede monofásica fornecida ao sistema.

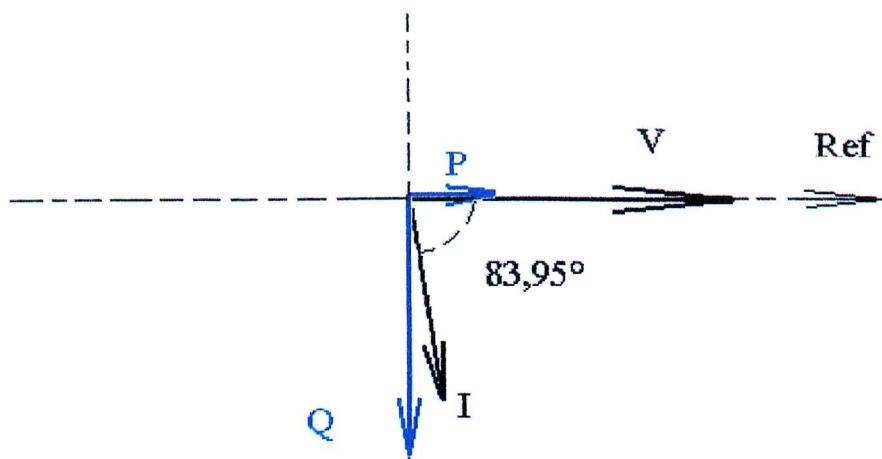


Figura 6.11 – Diagrama fasorial na rede

6.4.3 APENAS O GERADOR FORNECENDO POTÊNCIA ATIVA A CARGA

Para esta situação, presume-se que o motor de indução encontra-se muito próximo do carregamento nominal, por exemplo 97% de carga, e o gerador assimétrico fornece praticamente toda a potência ativa solicitada pelo motor e a rede monofásica se encarrega de fornecer a potência reativa ao sistema. A tabela 6.14 mostra os dados da rede, obtidos em simulação, para esta condição.

Tabela 6.14 - Dados simulados

Tensão - Rede (V)	Corrente - Rede (A)	Cos ϕ - Rede
380	39,38	0,0034
Potência Gerada (W)	Potência Ativa - Rede (W)	Potência Reativa - Rede (VAr)
46049,18	52,24	14966,58

A figura 6.12 mostra o diagrama fasorial da tensão e corrente na rede monofásica, e através dele pode-se verificar que a rede monofásica fornece a potência reativa e um mínimo de potência ativa para o sistema, sendo que o gerador assimétrico fornece quase a potência ativa total ao sistema.

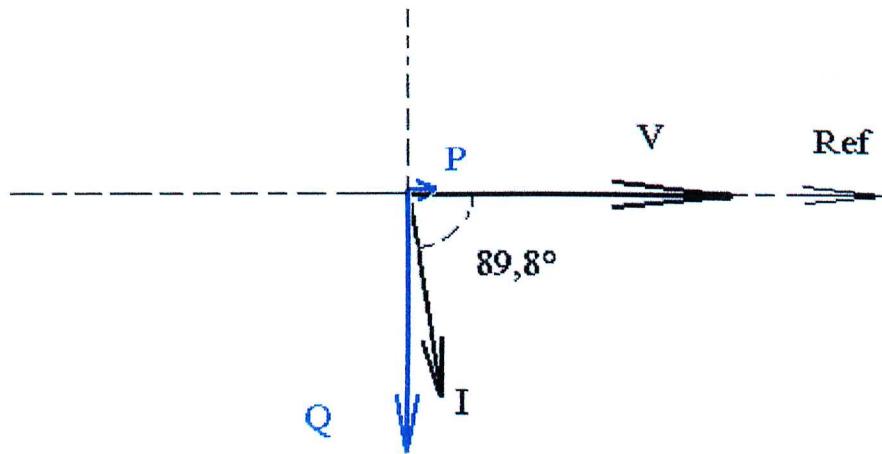


Figura 6.12 – Diagrama fasorial na rede

6.4.4 GERADOR FORNECENDO POTÊNCIA ATIVA A CARGA E A REDE MONOFÁSICA

Esta é uma situação em que se presume o motor de indução trabalhando em regime de meia carga, e o gerador assimétrico fornece potência ativa a carga e a rede monofásica. A tabela 6.15 mostra os dados da rede, obtidos em simulação, para esta condição.

Tabela 6.15 - Dados simulados

Tensão - Rede (V)	Corrente - Rede (A)	Cos ϕ - Rede
380	62,65	-0,8494
Potência Gerada (W)	Potência Ativa - Rede (W)	Potência Reativa - Rede (VAr)
46191,26	-20222,44	12562,88

A figura 6.13 mostra o diagrama fasorial da tensão e corrente na rede monofásica, e através dele pode-se verificar que o gerador fornece potência ativa a rede monofásica e ao motor de indução.

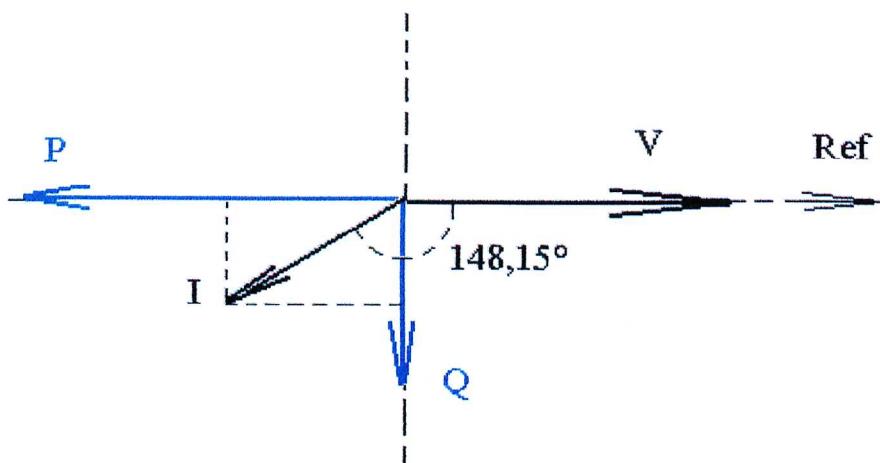


Figura 6.13 – Diagrama fasorial na rede

Fazendo-se uma rápida análise dos diagramas fasoriais apresentados, observa-se que em todas as situações a rede monofásica forneceu potência reativa ao sistema. Sendo assim, pode-se concluir que o capacitor acoplado nos terminais do gerador assimétrico, nestas condições, serve apenas para equilibrar as tensões de linha. Desta forma, uma maneira simples de resolver, o que seria um problema, o fornecimento da potência reativa ao sistema é a utilização de um banco de capacitores na entrada da rede monofásica para simples correção de fator de potência. Através da correção do fator de potência, a rede monofásica servirá apenas de referência de tensão e freqüência para o sistema.

Capítulo 7

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Foi levantado aqui, um dos problemas do produtor rural quando o mesmo possui uma rede monofásica em sua propriedade, ou seja, a sua dependência em relação às peculiaridades deste tipo de sistema sem poder expandir seu consumo de energia elétrica em termos de demanda máxima de potência, principalmente no âmbito da irrigação. Desta forma, esta tese teve como principal objetivo fornecer uma das soluções possíveis e viáveis para que o produtor rural possa ampliar sua demanda de potência a partir da co-geração de energia elétrica, utilizando para isto um gerador de indução trifásico assimétrico conectado a uma rede monofásica. E para compatibilizar a rede monofásica com o gerador trifásico, foi desenvolvido um modelo matemático que permite simular o sistema constituído pelo gerador assimétrico, rede monofásica e carga trifásica.

Por meio de simulações computacionais, alternativas de projeto do gerador assimétrico foram apresentadas nas potências de 2 cv e 60 cv. Utilizando um protótipo do gerador assimétrico de 2 cv, ensaios em laboratório foram realizados e uma comprovação teórico-experimental permitiu validar o modelo matemático desenvolvido nesta tese. Ainda foi possível mostrar a possibilidade e a viabilidade de se projetar geradores assimétrico em potências encontradas em mananciais energéticos na área rural, com um desempenho satisfatório, ou seja, tensões geradas equilibradas ou dentro de uma faixa aceitável de desequilíbrio. Desta forma, esta tese cumpriu o objetivo a qual foi destinada, oferecendo uma alternativa ao produtor rural em termos de expansão do potencial energético.

Embora as conclusões anteriores tenham sido de caráter mais geral, ao longo deste trabalho, algumas conclusões pontuais merecem registro:

- As inclusões dos harmônicos espaciais no modelo matemático tornaram os resultados, no tocante as deformações das ondas de corrente do motor e do gerador, mais próximas dos resultados obtidos experimentalmente. Isto ficou bastante claro quando observadas as curvas de corrente do gerador e do motor quando em regime de pleno carregamento, ficando comprovado que as distorções ocorridas nas ondas são provocadas em grande parte pelos harmônicos espaciais.
- A não concordância entre os valores eficazes das ondas de tensão e corrente, quando comparados os resultados teóricos com os experimentais, deve-se em grande parte, pela não consideração das perdas rotacionais na modelagem. Outro fator que também contribuiu foi à saturação magnética, porém em menor escala, pois apenas o seu efeito de distorcer as formas de onda é que não foi levado em consideração.
- O trabalho não fica comprometido ao se utilizar um protótipo fora das especificações desejadas, tensões de linha balanceadas. O objetivo do protótipo foi a comprovação teórica-experimental que mostrou a validade da proposta através da concordância entre os resultados apresentados.
- Tendo em vista a realidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica rural, o modelo apresentado propicia ainda a realização de transitórios elétricos no sistema, como a elevação e o afundamento de tensão. Foram realizadas simulações para valores de variação de tensão de até $\pm 30\%$ no qual observou-se que o gerador assimétrico se comporta de forma favorável, fato este que reforça a viabilidade da utilização do sistema proposto sem a preocupação com as oscilações de tensão na rede monofásica.

- O exemplo apresentado no Capítulo 6 mostra a grande viabilidade de se utilizar esta proposta para potências que facilmente são encontradas em mananciais energéticos na área rural.
- No exemplo do Capítulo 6 fica evidente a necessidade de se utilizar capacitores para fornecer o reativo para o gerador de indução. Porém, isto não representa empecilho, pois o procedimento já é largamente aplicado na correção do fator de potência de motores.

A grande conclusão que se obtém deste trabalho é a possibilidade de se aproveitar às vantagens técnicas e econômicas da geração assíncrona trifásica, mantendo-se como referência os valores de tensão e de freqüência provindos de uma rede elétrica monofásica, muito característico da eletrificação rural brasileira. Assim acredita-se que a aplicação prática desta tese possa representar uma modesta contribuição para a implantação definitiva da eletrificação rural no Brasil, não apenas para disponibilizar a energia elétrica para o conforto de vida na área rural, mas antes de tudo, em níveis de energia que possa alavancar a melhoria no setor produtivo rural.

Finalmente, como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Estudo da assimetria das correntes no gerador assimétrico;
- Estudo sobre o chaveamento inicial do gerador na rede monofásica;
- Inclusão das perdas no ferro da máquina, bem como as perdas rotacionais;
- Inclusão do modelo térmico da máquina, para efeito de projeto;
- Análise de desempenho do gerador assimétrico em condições de chaveamento abrupto de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

■ LIVROS

- [01] Slemon, G. R. ; Magnetoeletric Devices – Transducers, Transformers, And Machines. New York: John Wiley, 1966.
- [02] Fitzgerald, A. E. , Kingsley, C. Jr. e Kusko, A. ; Máquinas Elétricas. McGraw-Hill.
- [03] Matsch, L. W. and Morgan, J. D.; Electromagnetic and Electromechanical Machines. John Wiley & Sons,1987.
- [04] Nasar, S. A. and Unnewehr, L. E. ; Electromechanics and Electric Machnes. John Wiley & Sons.
- [05] Edminster, J. A. ; Teoria e Aplicação dos Circuitos Elétricos . Coleção Shaum.
- [06] Kraus, J. D. ; Carver, K. R. ; Eletromagnetismo. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, Segunda Edição, 1973.
- [07] Kostenko, M. ; Piotrovski, L. ; Máquinas Elétricas. Vol II, Máquinas de Corrente Alternada. Porto: Lopes da Silva, 1979.
- [08] Churchill, R. V. ; Variáveis Complexas e Suas Aplicações. São Paulo: McGraw-Hill/USP, 1975.

■ TRABALHOS CIENTÍFICOS

- [09] Martins Neto, Luciano. “Estudo de Um Motor de Indução Trifásico Convencional Operando Como Conversor de Número de Fases, Com Objetivo de Obter Elementos Para o Projeto de Um Conversor Mono-Trifásico”. Dissertação de Mestrado, USP – 1976.

- [10] Martins Neto, Luciano. "Motor de Indução Trifásico Assimétrico Funcionando Como Conversor de Número de Fases". Tese de Doutorado, USP – 1980.
- [11] Lynce Ribeiro Chaves, Marcelo. "Desenvolvimento e Construção de Sistemas Estáticos Para Alimentação de Cargas Trifásicas a Partir de Redes Monofásicas". Dissertação de Mestrado, UFU – 1987.
- [12] Martins Neto, Luciano. "Motor de Indução Trifásico Assimétrico Com Alimentação Monofásica". Projeto de Pesquisa, Relatório MIC/STI, 1988.
- [13] Richard, Jean-Claude. "Um Estudo Comparativo Entre os Motores de Indução Trifásico Assimétrico e Monofásico". Dissertação de Mestrado, UFU – 1993.
- [14] Pinheiro de Alvarenga, Bernardo. "Modelo Para o Cálculo do Conjugado de Uma Máquina de Indução Incluindo os Efeitos de Enrolamento e Saturação Magnética". Dissertação de Mestrado, UFU – 1993.
- [15] Gonçalves de Mendonça, Roberlam. "Estudo dos Conjugados Oscilantes do Motor de Indução Trifásico Assimétrico Com Alimentação Monofásica – Para Efeito de Projeto". Dissertação de Mestrado, UFU – 1997.
- [16] Resende, José Tarcísio de. "Modelagem da Máquina de Indução Trifásica Incluindo a Saturação Magnética – Análise Dinâmica do Gerador de Indução Auto-Excitado". Tese de Doutorado, UFU – 1999.
- [17] Souto, Olívio Carlos Nascimento. "Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação". Tese de Doutorado, UFU – 2001.

■ ARTIGOS E PUBLICAÇÕES

- [18] Martins Neto, Luciano. "Motor de Indução Trifásico Assimétrico Com Alimentação Monofásica". I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica – Belo Horizonte – Brasil, Outubro 1990.
- [19] Neto, L. M.; Mendonça, R.G.; Camacho, J.R.; Salerno, C.H. "The Asymmetrical Three-Phase Induction Motor Fed by Single Phase Source: Comparative Performance Analysis". IEEE-IEMDC, International Electric Machines and Drives Conference. Milwaukee, Wisconsin, May 1997.
- [20] Neto, L. M.; Salerno, C. H.; Bispo, D.; Alvarenga, B. P. "Induction Motor Torque: An Approach Including Windings And Saturation Effects". International Conference on Electrical Machines in Australia – ICEMA. Adelaide, University of South Australia, September 1993.
- [21] Neto, L. M.; Salerno, C. H.; Alvarenga, B. P. "Harmonics Inductances in the Linear Analysis of the Induction Motor. International Conference on Electrical Machines in Australia". ICEMA. Adelaide, University of South Australia, September 1993.
- [22] Oliveira, S. E. M. "Operation of Three-Phase Induction Motors Connected to One-Phase Supply". IEEE-Transaction Energy Conversion, vol 5, N°. 4, Dec. 1990.
- [23] Jha, R. S. and Jha, C. S. "Operation of Three-Phase Induction Motor Connected to a Single-Phase Supply System". IE Journal – EL vol. 58, June 1978.
- [24] Tozune, D. "Balance Operation of Three-Phase Induction Motor With Asymmetrical Stator Windings Connected to Single-Phase Supply System". IEE Proceedings-B, vol. 138, N°.4, July 1991.
- [25] Mendonça, R. G.; Neto, L. M. "Análise Comparativa de Desempenho: Motor de Indução Trifásico Simétrico e Motor de Indução Trifásico Assimétrico. Conjugados Oscilantes".

- Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference – XII CBA, vol. I, pp.243-247, September 1998. Uberlândia, MG, Brasil.
- [26] Neto, L. M.; Camacho, J. R.; Andrade, D. A.; Mendonça, R. G. "Asymmetrical Three-Phase Induction Motor Under Single-Phase Feeding: Oscillating Torque, Theoretical and Experimental Analysis – Harmonic Effects". International Conference on Electrical Machines - ICEM98. Istambul, Turkey, September 1998.
- [27] Neto, L. M.; Camacho, J. R.; Andrade, D. A.; Mendonça, R. G. "Single-Phase And Asymmetrical Three-Phase Induction Motor: A Comparative Steady-State Analysis Under Single-Phase Feeding". International Conference on Electrical Machines - ICEM98. Istambul, Turkey, September 1998.
- [28] Mendonça, R.G.; Neto, L. M.; Camacho, J. R.; Teixeira, H. B. "Dynamic Capacitance Switching Applied to Asymmetrical Three-Phase Induction Motor – The Load Diversity Condition". The 5th Brazilian Power Electronics Conference – COBEP99. Foz do Iguaçu, Brasil, September 1999.
- [29] Mendonça, R. G.; Neto, L. M.; Camacho, J. R. "Three-Phase Asymmetrical Induction Motor Fed by Single-Phase Distribution System – Detailed Mathematical Model". IEEE PES – Winter Meeting 2000. Singapore, January 2000.
- [30] Chan, T.F. "Performance Analysis of a Three-Phase Induction Generator Connected to a Single Power System". IEEE Transactions On Energy Conversion, vol. 13, pp. 205-211, September 1998.
- [31] Smith, O.J. "Three-Phase Induction Generator for Single-Phase Line". IEEE Transactions On Energy Conversion, vol. EC-2, pp. 382-387, September 1987.
- [32] Mendonça, R.G.; Neto, M.L.; Teixeira, H.B.; Camacho, J.R. "Asymmetrical Three-Phase Induction Motor Performance Through the Use of Dynamic Capacitance Switching".

International Conference on Electrical Machines – ICEM 2000. Helsinki, Finland, August 2000.

- [33] Mendonça, R.G.; Teixeira, H.B.; Neto, L.M. “Controle Eletrônico Para Redução de Oscilação de Conjugado Eletromagnético no Motor de Indução Trifásico Assimétrico”. CBA 2000. Florianópolis, Brasil, Setembro 2000.
- [34] Mendonça, R. G.; Neto, L. M. “Motor de Indução Trifásico Assimétrico – Uma Solução Para o Uso de Cargas Tipicamente Trifásicas na Zona Rural”. 1º Seminário Energia na Agricultura – Uberaba, Brasil, Outubro 2000.
- [35] Chan, T.F. “Performance Analysis of a Three-Phase Induction Generator Self-Excited With a Single Capacitance”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, Nº 4, pp. 894-900, December 1999.
- [36] Chan, T.F.; Lai, L. L. “Steady-State Analysis of a Three-Phase Induction Motor With the Smith Connection”. IEEE Power Engineering Review, vol. 20, Nº 10, pp. 45-46, October 2000.
- [37] Chan, T.F.; Lai, L. L. “A Novel Single-Phase Self-Regulated Induction Generator Using a Three-Phase Machine”. IEEE – Transactions on Energy Conversion, vol. 16, Nº 2, pp. 204-208, June 2001.
- [38] Chan, T.F.; Lai, L. L. “Steady-State Analysis and Performance of a Stand-Alone Three-Phase Induction Generator With Asymmetrically Connected Load impedances and Excitation Capacitance”. IEEE – Transactions on Energy Conversion, vol. 16, Nº 4, pp. 327-333, December 2001.
- [39] Chan, T.F.; Lai, L. L. “Capacitance Requirements of a Three-Phase Induction Generator Self-Excited With a Single Capacitance and Supplying a Single-Phase Load”. IEEE – Transactions on Energy Conversion, vol. 17, Nº 1, pp. 90-94, March 2002.

- [40] Chan, T.F.; Lai, L. L. "Single-Phase Operation of a Three-Phase Induction Generator With the Smith Connection". IEEE – Transactions on Energy Conversion, vol. 17, N° 1, pp. 47-54, March 2002.
- [41] Brown, J.E.; Jha, C.S. "The Starting of a Three-Phase Induction Motor Connected to a Single-Phase Suplly System". Proc. Inst. Elect. Eng. A, vol. 106, pp. 183-190, 1959.
- [42] Brown, J.E.; Butler, O.I. "A General Method of Analysis of Three-Phase Induction Motors With Asymmetrical Primary Connections". Proc. Inst. Elect. Eng.,pt.II, vol. 100, pp. 25-34, 1953.
- [43] Jabri, A. K.; Alolah, A. I. "Capacitance requirement for Isolated Self-Excited Induction Generator". Proc. Inst. Elect. Eng. B, vol. 137, pp.154-159, May 1990.
- [44] Bahrani, A. H.; Malik, N. H. " Steady-State Analysis and Performance Characteristics of a Three-Phase Generator Self-Excited With a Single Capacitor". IEEE Transaction Energy Conversion, vol. 5, pp. 725-732, December 1990.
- [45] Rabim, Y.H.; Alolah, A.I.; Al-Mudaiheem, R.I. " Performance of Single-Phase Induction Generator". IEEE Transaction Energy Conversion, vol. 8, pp. 389-395, September 1993.
- [46] Singh, B.; Saxena, R.B.; Murthy, S.S.; Singh, B. P. " A Single-Phase Self-Excited Induction Generator for Ligthing Loads in Remote Areas". Proc. Inst. Elect. Eng. Educ., vol.25, pp. 269-275, 1988.
- [47] Raina, G.; Malik, O. P. " Wind Energy Conversion Using a Self-Excited Induction Generator". IEEE Transactions Power Apparatus and System, vol. PAS-102, pp. 3933-3936, Dec. 1983.
- [48] Doxey, B. C. "Theory and Application of the Capacitor Excited Induction Generator". The Enginner, pp. 893-897, Novembro 1963.

- [49] Ooi, B. T.; David, R.A. "Induction-Generator/Synchronous-Condenser System for Wind-Turbine Power". Proc. IEE, vol. 126, N°1, pp. 69-74, January 1979.
- [50] Junior, S. C.; Caldas, F. P. "Utilização do Gerador de Indução em Usinas Hidroelétricas de Pequeno Porte". VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, pp. 1-18. Balneário Camboriú, Brasil, 1981.
- [51] Carlson, R.;Schineider, M. C. " Aproveitamento de Mini-Quedas D'Áqua Utilizando Geradores de Indução Auto Excitados". VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, pp. 923-933. Balneário Camboriú, Brasil, 1981
- [52] Pinheiro, R.F.; Carneiro, Jr. S.; Watanable, E. H.; Rego, J. I. " Controle de Gerador de Indução por Reator Controlado por Tiristores". 7º CBA – ITA, pp. 505-510. São José dos Campos 1981.
- [53] Murthy, S. S.; Malik, O. P.; Tandon, A. K. " Analysis of Self-Excited InductionGenerators". IEE Proc., vol. 129, Pt. C, N° 6, pp. 260-265, November 1982.
- [54] Quazene, L.; Mcpherson, G. " Analysis of the Isolated Induction Generator". IEEE Trasactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 102, N° 8, pp. 2793-2798, August 1983.
- [55] Elder, J. M.; Boys, J. T.; Woodward, J. L.; Fellow, B. E. " The Process of Self Excitation in Induction Generators". IEE Proc. Vol. 130, Pt. B, N° 2, pp. 103-108, March 1983.
- [56] Malik, N. H.; Mazi, A. A. " Capacitance Requirements for Isolated Self-Excited Induction Generators". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. Ec 2 , N° 1, pp. 62-69, March 1987.
- [57] Murthy, S. S.; Nagamani, C.;Satyanarayana, K. V V. " Studies on the Use of Conversion Induction Motors as Self-Excited Induction Generator". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 3, N° 4, pp. 842-847, December 1988.

- [58] Malik, N. H.; Al-Bahrani, A. H. "Influence of the Terminal Capacitor on the Performance Characteristics of a Self-Excited Induction Generator". IEE Proc. , vol. 137, Pt. C, N° 2, pp. 168-173, March 1990.
- [59] Al- Bahrani, A. H.; Malik, N. H. "Steady-State Análisis of Parallel-Operated Self-Excited Induction Generators". IEE Proc., vol. 140, N° 1, pp. 49-55, January 1993.
- [60] Alan, I.; Lipo, T.A. "Control of a Polyphase Induction Generator/Induction Motor Power Conversion System Completely Isolated from the Utility". IEEE Transactions on Industry Application, vol. 30, N° 3, pp. 636-647, May/June 1994.
- [61] Durham, M.O.; Ramakumar, R. "Power System Balancers for na Induction Generator". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-23, N° 6, pp. 1067 – 1072, November/December 1987.
- [62] Shridhar, L.; Singh, B.; Jha, C. S.; Singh, B. P. "Analysis of Self-Excited Induction Generator Feeding Induction Motor". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, N° 2, pp. 390-396, June 1994.
- [63] Chan, T. F. "Steady-State Analysis of Self-Excited Induction Generators". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, N° 2, pp. 288-296, June 1994.
- [64] Faiz, J.; Dadgari, A.A.; Horning, S.; Keyhani, A. "Design of a Three-Phase Self-Excited Induction Generator". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, N° 3, pp. 516-523, September 1995.
- [65] Murthy, S. S.; Rai, H.C.; Tandon, A.K. "A Novel Self-Excited Self-Regulated Single-Phase Induction Generator". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 8, N° 3, pp. 377-381, September 1993.
- [66] Brennen, M. B.; Abbondanti, A. "Static Exciters for Induction Generators". IEEE Transaction on Industry Application, vol. IA-13, N° 5, pp. 422-428, September/Octuber 1977.

- [67] Parsons, R.J. "Cogeneration Application of Induction Generators". IEEE Transactions on Industry Application, vol. IA-20, N° 3, pp. 497-503, May/June 1984.
- [68] Hallenius, K.E.; Vas, P.; Brown, J. E. " The Analysis of a Saturation Self-Excited Asynchronous Generator" . IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 6, N° 2, pp. 336-341, June 1991.
- [69] Jesus, J. M. F. " A Model for Saturation in Induction Machines". IEEE Trasactions on Energy Conversion, vol. 3, N ° 3, pp. 682-687, September 1988.
- [70] Levi, E. " General Method of Magnetising Flux saturation Modelling in d-q, Axis Models of Double-Cage Induction Machines". IEE proceedings Electric Power Applications, vol. 144, N° 2, pp. 101-109, March 1997.
- [71] Fazylov, Kh. F.; Allaev, K. R. "Calculation and Experimental Analysis of Eletrical Power Systems Containing Induction Generators". Power Engineering, New York, vol. 27, N° 6, pp. 27-34, 1989.