

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



**MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO EM REDE DE**  
**ALIMENTAÇÃO BIFÁSICA SIMÉTRICA COM**  
**CONDUTOR DE RETORNO**

*LINDOLFO MARRA DE CASTRO NETO*

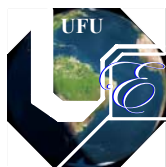
SETEMBRO  
2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

# UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



**NERFAE – NÚCLEO DE ELETRICIDADE  
RURAL E FONTES ALTERNATIVAS DE  
ENERGIA**

## **MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO EM REDE DE ALIMENTAÇÃO BIFÁSICA SIMÉTRICA COM CONDUTOR DE RETORNO**

TESE APRESENTADA POR LINDOLFO MARRA DE CASTRO NETO À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, PARA CUMPRIMENTO DO REQUISITO DA DEFESA DE TESE PARA DOUTORAMENTO EM CIÊNCIAS.

**BANCA EXAMINADORA:**

PROF. CARLOS HENRIQUE SALERNO, DR. (UFU) ;

PROF. JOSE ROBERTO CAMACHO, PhD. (UFU) – ORIENTADOR;

PROF. HAROLDO RODRIGUES DE AZEVEDO, DR. (FUND. LOGATTI) ;

PROF. IVAN EDUARDO CHABU, DR. (USP) ;

PROF. SEBASTIÃO CAMARGO GUIMARÃES JUNIOR, DR. (UFU);

PROF. VERA LÚCIA D. S. FRANCO, DR. (UFU) ;

UBERLÂNDIA, 27 DE SETEMBRO DE 2006.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C355m Castro Neto, Lindolfo Marra de, 1976 -  
Motor de indução bifásico em rede de alimentação bifásicas simétrica  
com condutor de retorno / Lindolfo Marra de Castro Neto. - 2006.  
128 f. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Máquinas elétricas - Teses. I. Camacho, José Roberto. II. Universidade  
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
III. Título.

CDU: 621.313

**MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO EM REDE DE  
ALIMENTAÇÃO BIFÁSICA SIMÉTRICA COM  
CONDUTOR DE RETORNO**

AUTOR:

*LINDOLFO MARRA DE CASTRO NETO*

TESE APRESENTADA POR LINDOLFO MARRA DE CASTRO  
NETO À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA,  
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM CIÊNCIA.

---

Prof. José Roberto Camacho,  
PhD (Orientador)

---

Prof. Darizon Alves de Andrade,  
PhD (Coordenador da Pós-  
Graduação)

BENDITO O HOMEM QUE CONFIA NO  
SENHOR, E CUJA CONFIANÇA É O  
SENHOR (JEREMIAS 17.7)

DEDICO ESTA TESE A MINHA ESPOSA FLAVIA FERNANDES DE LEVA E AOS MEUS PAIS, EDUARDO MARRA DA COSTA E MARTA HELENA ROCHA COSTA, MINHA IRMÃ ADRIANY ROCHA COSTA E MEU IRMÃO EDUARDO MARRA DA COSTA FILHO.

## AGRADECIMENTOS

*DEUS – ÚNICO E SOBERANO, E SEM ELE NADA É  
POSSÍVEL.*

## AGRADEÇO:

- À MINHA ESPOSA FLAVIA FERNANDES DE LEVA, POR SUA PACIÊNCIA E DEDICAÇÃO;
- AO MEU PAI EDUARDO MARRA DA COSTA, MINHA MÃE MARTA HELENA ROCHA COSTA, MINHA IRMÃ ADRIANY ROCHA COSTA E MEU IRMÃO EDUARDO MARRA DA COSTA;
- ÀS MINHAS AVÓS IRENE DO NASCIMENTO ROCHA E MARIA DE CASTRO E MEU AVÔ LINDOLFO MARRA DE CASTRO;
- ÀS MINHAS TIAS LUZIA DE CASTRO VILELA E MARILENE ROCHA;
- AO PROFESSOR HAROLDO RODRIGUES DE AZEVEDO PELA SUA IDÉIA INICIAL E PELAS PROVEITOSAS DISCUSSÕES SOBRE O ASSUNTO;
- AO PROFESSOR JOSÉ ROBERTO CAMACHO PELA SUA DEDICAÇÃO À PESQUISA, SEM ELE EU NÃO TERIA DESENVOLVIDO OS ESTUDOS NESSE ASSUNTO.
- AGRADEÇO À INDÚSTRIA DE MOTORES WEG POR SUA COLABORAÇÃO NA CONSTRUÇÃO E ENSAIOS DO MOTOR BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO.
- ESTENDO TAMBÉM MEUS AGRADECIMENTOS A TODOS QUE PORVENTURA CONTRIBUÍRAM DE ALGUMA FORMA PARA A REALIZAÇÃO DESSE TRABALHO.



## RESUMO

**CASTRO NETO, LINDOLFO MARRA DE;** MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO EM REDE DE ALIMENTAÇÃO SIMÉTRICA COM CONDUTOR DE RETORNO, UBERLÂNDIA 2006.

O OBJETIVO PRINCIPAL DESTE TRABALHO É FORNECER UMA CONTRIBUIÇÃO QUE AJUDARÁ NO ENTENDIMENTO COM MAIOR PROFUNDIDADE SOBRE O FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO PARA APLICAÇÕES EM LOCAIS ONDE EXISTA A POSSIBILIDADE DE UMA REDE DE ALIMENTAÇÃO BIFÁSICA.

AS CONTRIBUIÇÕES MAIS IMPORTANTES FORAM OBTIDAS COM O AUXÍLIO DO MODELO DINÂMICO NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA MÁQUINAS BIFÁSICAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO.

ATRAVÉS DAS CONTRIBUIÇÕES OBTIDAS FOI POSSÍVEL MOSTRAR QUE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO PODE FUNCIONAR COMO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO PELA FASE OU PELO NEUTRO, SEM QUE O MESMO NECESSITE DE DETERMINADOS COMPONENTES DE PARTIDA, TAIS COMO, CHAVE CENTRIFUGA E CAPACITORES. ISTO FICOU PROVADO ATRAVÉS DOS ENSAIOS A VAZIO E COM CARGA E TAMBÉM POR INTERMÉDIO DAS COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS.

COM ISTO PROCUROU-SE REVITALIZAR A TEORIA DO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO, QUE POSSUI FORÇA MAGNETOMOTRIZ E TORQUE ELETROMAGNÉTICO NÃO UNIFORME.

### **PALAVRA-CHAVE:**

MOTOR DE INDUÇÃO, MOTOR BIFÁSICO ASSIMÉTRICO, RETORNO PELA FASE OU NEUTRO, FMM E TORQUE NÃO UNIFORME.

## ABSTRACT

THE MAIN TASK OF THIS WORK IS TO PROVIDE A CONTRIBUTION TO HELP A MORE DEEP UNDERSTANDING ON THE OPERATION OF THE ASYMMETRICAL TWO-PHASE INDUCTION MOTOR WITH RETURN FOR APPLICATIONS IN PLACES WHERE A POSSIBILITY OF A TWO-PHASE NETWORK FEEDING EXISTS.

IMPORTANT CONTRIBUTIONS WERE OBTAINED WITH THE HELP OF A TIME DOMAIN DYNAMIC MODEL FOR SYMMETRICAL AND ASYMMETRICAL TWO-PHASE MACHINES DEVELOPED AS PART OF THIS WORK.

WITH SUCH CONTRIBUTIONS IT WAS POSSIBLE TO SHOW THAT A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR CAN WORK AS A TWO-PHASE ASYMMETRICAL INDUCTION MOTOR WITH RETURN THROUGH A PHASE OR NEUTRAL CONDUCTOR, WITHOUT THE NEED OF SOME STARTING DEVICES, SUCH AS, CENTRIFUGAL SWITCH AND CAPACITORS. THIS WAS PROVED THROUGH LOAD AND NO-LOAD TESTS AND BY WAY OF COMPARISONS BETWEEN THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS.

HENCE, WITH SUCH A WORK, WE ARE SEEKING FOR THE REVITALIZATION OF THE ASYMMETRICAL TWO-PHASE INDUCTION MOTOR THEORY, A MACHINE THAT PRESENTS A NON-UNIFORM MAGNETOMOTIVE FORCE AND ELECTROMAGNETIC TORQUE.

### **KEY-WORDS:**

INDUCTION MOTOR, ASYMMETRICAL TWO-PHASE, PHASE OR NEUTRAL RETURN, NON-UNIFORM MAGNETOMOTIVE FORCE AND TORQUE.

# **MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO EM REDE COM ALIMENTAÇÃO BIFÁSICA SIMÉTRICA COM CONDUTOR DE RETORNO**

## **SUMÁRIO**

### **CAPÍTULO 1**

#### **INTRODUÇÃO**

<b>1.1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>ESTRUTURA DA TESE.....</b>	<b>6</b>

### **CAPÍTULO 2**

#### **FORÇA MAGNETOMOTRIZ PRODUZIDA POR MÁQUINAS BIFÁSICAS – UMA ABORDAGEM GENÉRICA**

<b>2.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>CAMPOS MAGNÉTICOS GIRANTES EM MÁQUINAS BIFÁSICAS.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3</b>	<b>OBTENÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE UNIFORME.....</b>	<b>12</b>

<b>2.4</b>	<b>FORÇA MAGNETOMOTRIZ EM MÁQUINAS BIFÁSICAS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>16</b>

## **CAPÍTULO 3**

### **MODELO DINÂMICO GENÉRICO PARA MÁQUINAS DE INDUÇÃO BIFÁSICAS**

<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>EQUAÇÕES ELÉTRICAS GENÉRICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>MODELO GENÉRICO DA MÁQUINA BIFÁSICA NO DOMÍNIO DO TEMPO.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1</b>	<b>INDUTÂNCIAS HARMÔNICAS DA MÁQUINA BIFÁSICA.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.2</b>	<b>CONCATENAMENTOS DE FLUXO MAGNÉTICO DAS MÁQUINAS BIFÁSICAS.....</b>	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>EQUAÇÕES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DA MÁQUINA BIFÁSICA.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5</b>	<b>RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DA MÁQUINA BIFÁSICA.....</b>	<b>35</b>
<b>3.6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>

## **CAPÍTULO 4**

### **FORÇA MAGNETOMOTRIZ EM MOTORES DE INDUÇÃO BIFÁSICOS SIMÉTRICOS E ASSIMÉTRICOS**

<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>38</b>
------------	------------------------	-----------

<b>4.2</b>	MOTORES BIFÁSICOS SIMÉTRICOS COM $\beta$ E $\varphi$ IGUAIS A $90^0$ .....	<b>40</b>
4.2.1	MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM $\beta$ E $\varphi$ IGUAIS A $90^0$ .....	<b>54</b>
4.2.2	MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM $\beta$ IGUAL A $80^0$ E $\varphi$ IGUAL A $90^0$ .....	<b>56</b>
<b>4.3</b>	MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM $\beta$ IGUAL A $60^0$ E $\varphi$ IGUAL A $60^0$ , $90^0$ E $120^0$ .....	<b>58</b>
<b>4.4</b>	MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM $\beta$ IGUAL A $120^0$ E $\varphi$ IGUAL A $120^0$ , $90^0$ E $60^0$ .....	<b>63</b>
<b>4.5</b>	COMPARAÇÃO DAS FORÇAS MAGNETOMOTRIZES NAS MÁQUINAS BIFÁSICAS ASSIMÉTRICAS COM RETORNO.....	<b>67</b>
<b>4.6</b>	CONCLUSÃO.....	<b>69</b>

## CAPÍTULO 5

### SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E ENSAIOS DO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO, COM RETORNO

<b>5.1</b>	INTRODUÇÃO.....	<b>71</b>
<b>5.2</b>	SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO BIFÁSICAS ASSIMÉTRICAS COM RETORNO.....	<b>72</b>
<b>5.3</b>	ENSAIO DO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO.....	<b>79</b>
<b>5.4</b>	ENSAIOS DOS MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO.....	<b>82</b>
5.4.1	ENSAIO A VAZIO E COM CARGA DOS MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO.....	<b>83</b>
5.4.2	ENSAIO DE ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DOS MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO.....	<b>87</b>

<b>5.5</b>	COMPARAÇÃO DOS MOTORES DE INDUÇÃO BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO.....	<b>89</b>
<b>5.6</b>	CONCLUSÃO.....	<b>92</b>

## **CAPÍTULO 6**

### **CALCULO DOS PARÂMETROS DO MOTOR BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO, ANÁLISE DA FMM, TORQUE E VELOCIDADE**

<b>6.1</b>	INTRODUÇÃO.....	<b>94</b>
<b>6.2</b>	CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E BIFÁSICO ASSIMÉTRICO.....	<b>95</b>
<b>6.2.1</b>	CALCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E BIFÁSICO ASSIMÉTRICO.....	<b>97</b>
<b>6.2.2</b>	RESULTADOS DOS TESTES EM VAZIO E ROTOR BLOQUEADO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E BIFÁSICO ASSIMÉTRICOS.....	<b>106</b>
<b>6.3</b>	ANÁLISE DA FORÇA MAGNETOMOTRIZ E TORQUE ELETROMAGNÉTICO DO MOTOR BIFÁSICO ASSIMÉTRICOS COM RETORNO.....	<b>108</b>
<b>6.4</b>	ANÁLISE DE VELOCIDADE DO MOTOR BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO.....	<b>117</b>
<b>6.5</b>	CONCLUSÃO.....	<b>119</b>

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES FINAIS**

<b>7.0</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>120</b>
------------	-------------------------------	------------

### **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>124</b>
--	--	------------

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>125</b>
--	--	------------

### **ANEXO (CDROM)**

	<b>DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO AO REDOR DO ENTREFERRO NOS MOTORES DE INDUÇÃO ASSÍNCRONOS.....</b>	<b>128</b>
--	---	------------

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

**FIGURA 1.1** – Consumo final da energia elétrica;

## CAPÍTULO 2

**FIGURA 2.1** – Estator totalmente e parcialmente preenchido com os enrolamentos das fases;

**FIGURA 2.2** – Bobinas da fase “a” e fase “b” do estator do motor bifásico;

**FIGURA 2.3** – Forças magnetomotrizes resultantes dos motores bifásicos.

## CAPÍTULO 3

**FIGURA 3.1** – Distribuição das bobinas do enrolamento da fase “j”;

**FIGURA 3.2** – Esquema das fases das máquinas de indução bifásicas assimétricas;

**FIGURA 3.3** – Detalhe do sistema bifásico e algumas conexões das máquinas de indução bifásicas assimétricas (estator e rotor).



## CAPÍTULO 4

**FIGURA 4.1** – Motor de indução bifásico;

**FIGURA 4.2** – Fator de enrolamento para os motores bifásicos da Figura 4.1;

**FIGURA 4.3** – Fator de enrolamento do estator para os motores bifásicos da Figura 4.1;

**FIGURA 4.4** – Fator de enrolamento do rotor para os motores bifásicos da Figura 4.1;

**FIGURA 4.5** – Fator de enrolamento entre estator e rotor para os motores bifásicos da Figura 4.1;

**FIGURA 4.6** – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico;

**FIGURA 4.7** – Força magnetomotriz do motor bifásico;

**FIGURA 4.8** – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico;

**FIGURA 4.9** – Força magnetomotriz do motor bifásico;

**FIGURA 4.10** – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico;

**FIGURA 4.11** – Força magnetomotriz do motor bifásico;

**FIGURA 4.12** – Motor de indução bifásico assimétrico com retorno;

**FIGURA 4.13** – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico;

**FIGURA 4.14** – Força magnetomotriz do motor bifásico;

**FIGURA 4.15** – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico;

**FIGURA 4.16** – Força magnetomotriz do motor bifásico;

**FIGURA 4.17** – Forças magnetomotrizes dos motores bifásicos.

## CAPÍTULO 5

**FIGURA 5.1** – Sistema trifásico de alimentação;

- FIGURA 5.2** – Formas de onda de tensão do sistema trifásico;
- FIGURA 5.3** – Sistema de ligação do motor bifásico assimétrico com retorno, ligação Y bifásica e  $\Delta$  aberto, sem o enrolamento da fase “c”;
- FIGURA 5.4** – Formas de onda de tensão do sistema bifásico ligação Y bifásica, com retorno pelo neutro e ligação  $\Delta$  aberto com retorno pela fase “c”;
- FIGURA 5.5** – Sistema de ligação do motor bifásico assimétrico com retorno, ligação Y bifásica e  $\Delta$  aberto, sem o enrolamento da fase “b”;
- FIGURA 5.6** – Formas de onda de tensão do sistema bifásico ligação Y bifásica, com retorno pelo neutro e ligação  $\Delta$  aberto com retorno pela fase “b”;
- FIGURA 5.7** – Sistema de ligação do motor bifásico assimétrico com retorno, ligação Y bifásica e  $\Delta$  aberto, sem o enrolamento da fase “a”;
- FIGURA 5.8** – Formas de onda de tensão do sistema bifásico ligação Y bifásica, com retorno pelo neutro e ligação  $\Delta$  aberto com retorno pela fase “a”;
- FIGURA 5.9** – Esquema de ligação estrela e triângulo aberto do motor indução bifásico assimétrico com retorno com perda da fase “c” da rede e perda do enrolamento da fase “c” do motor;
- FIGURA 5.10** – Esquema de bobinagem motor indução trifásico;
- FIGURA 5.11** – Esquema de ligação em estrela e delta do motor indução trifásico;
- FIGURA 5.12** – Motor de indução trifásico e bifásico com retorno;
- FIGURA 5.13** – Esquema de ligação em delta dos motores bifásicos assimétricos com retorno;

## CAPÍTULO 6

- FIGURA 6.1** – Circuito equivalente completo do motor de indução trifásico e bifásico simétrico;
- FIGURA 6.2** – Circuito equivalente por fase do motor bifásico assimétrico. (a) Circuito para seqüência positiva; (b) Circuito para seqüência negativa.

- FIGURA 6.3** – Teste em vazio do motor trifásico e bifásico;
- FIGURA 6.4** – Circuito equivalente para o teste em vazio;
- FIGURA 6.5** – Teste de rotor bloqueado do motor trifásico e bifásico;
- FIGURA 6.6** – Circuito equivalente para o teste de rotor bloqueado;
- FIGURA 6.7** – Circuito equivalente por fase do motor bifásico assimétrico;
- FIGURA 6.8** – Tensão trifásica equilibrada;
- FIGURAS 6.9** – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor trifásico simétrico  $M_{3\phi - s}$ ;
- FIGURA 6.10** – Tensão bifásica equilibrada;
- FIGURA 6.11** – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi 1 - ACR}$ ;
- FIGURA 6.12** – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi 2 - ACR}$ ;
- FIGURA 6.13** – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi 3 - ACR}$ ;
- FIGURA 6.14** – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico com retorno  $M_{2\phi - ACR}$ .
- FIGURA 6.15** – Torques eletromagnéticos do motor bifásico com retorno  $M_{2\phi - ACR}$ .
- FIGURA 6.16** – Forma de onda da velocidade do motor trifásico  $M_{3\phi - s}$  e bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi 1 - ACR}$ , com  $h = 1$ ;
- FIGURA 6.17** – Forma de onda da velocidade do motor trifásico  $M_{3\phi - s}$  e bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi 1 - ACR}$ , com  $h = 6n \pm 1$ ;
- FIGURA 6.18** – Forma de onda da velocidade do motor trifásico  $M_{3\phi - s}$  e bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi 1 - ACR}$ , com  $h = 3n$  e  $6n \pm 1$ .

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

**TABELA 2.1** – Situações de fmms uniformes e não uniformes.

### CAPÍTULO 4

**TABELA 4.1** – Parâmetros por fase do motor trifásico;

**TABELA 4.2** – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{wh}$ .

**TABELA 4.3** – Parâmetros de simulação do motor bifásico;

**TABELA 4.4** – Parâmetros de simulação que variam ao longo do tempo;

**TABELA 4.5** – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{whe}$ .

**TABELA 4.6** – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{whr}$ .

**TABELA 4.7** – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{wher}$ .

**TABELA 4.8** – Parâmetros de simulação dos motores bifásicos assimétricos com retorno.

**TABELA 4.9** – Parâmetros de simulação que variam ao longo do tempo.

**TABELA 4.10** - Parâmetros de simulação dos motores bifásicos assimétricos com retorno.

**TABELA 4.11** - Parâmetros de simulação que variam ao longo do tempo.

### CAPÍTULO 5

**TABELA 5.1** – Dados de placa do motor de indução trifásico;

**TABELA 5.2** – Ensaio a vazio do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 1}$  – ACR;

**TABELA 5.3** – Ensaio com carga do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 1}$  – ACR;

**TABELA 5.4** – Ensaio a vazio do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 2}$  – ACR;

**TABELA 5.5** – Ensaio com carga do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 2}$  – ACR;

**TABELA 5.6** – Ensaio a vazio do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 3}$  – ACR;

**TABELA 5.7** – Ensaio com carga do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 3}$  – ACR;

**TABELA 5.8** – Ensaio de Elevação de Temperatura do motor  $M_{2\varnothing 1}$  – ACR;

**TABELA 5.9** – Ensaio de Elevação de Temperatura do motor  $M_{2\varnothing 2}$  – ACR;

**TABELA 5.10** – Ensaio de Elevação de Temperatura do motor  $M_{2\varnothing 3}$  – ACR;

**TABELA 5.11** – Motores assíncronos (1,5CV) – Carcaça 80;

**TABELA 5.12** – Motores assíncronos (1,5CV) – Carcaça 80 e 90L;

**TABELA 5.13** – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80;

**TABELA 5.14** – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80 e 90S;

**TABELA 5.15** – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80;

**TABELA 5.16** – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80;

## CAPÍTULO 6

**TABELA 6.1** – Ensaio a vazio e rotor bloqueado;

**TABELA 6.2** – Parâmetros do circuito equivalente por fase dos motores de indução trifásico e bifásico assimétrico com retorno;

# SIMBOLOGIA

## CAPÍTULO 2

- $F_{mmr}$  → Força magnetomotriz resultante;
- $F_{mma}$  → Força magnetomotriz da fase “a”;
- $F_{mmb}$  → Força magnetomotriz da fase “b”;
- $F_{ap}$  → Força magnetomotriz de pico da fase “a”;
- $F_{bp}$  → Força magnetomotriz de pico da fase “b”;
- $F_{mma\_max}$  → Força magnetomotriz máxima da fase “a”;
- $F_{mmb\_max}$  → Força magnetomotriz máxima da fase “b”;
- $F_1$  → Força magnetomotriz resultante no sentido horário;
- $F_2$  → Força magnetomotriz resultante no sentido anti-horário;
- $\theta$  → ângulo medido a partir do eixo do enrolamento de referência;
- $\beta$  → ângulo de defasamento entre as tensões;
- $\alpha$  → ângulo de defasamento entre as correntes;
- $\varphi$  → ângulo de defasamento entre os enrolamentos;
- $\omega$  → frequência angular;
- $i_a$  → corrente da fase “a”;
- $i_b$  → corrente da fase “b”;
- $i_{am\acute{a}x}$  → corrente máxima da fase “a”;
- $i_{bm\acute{a}x}$  → corrente máxima da fase “b”;
- $q$  → relação entre as forças magnetomotrizes das fases “a” e “b”;
- $A_m$  → magnitude da força magnetomotriz;
- $\delta$  → fase inicial;
- $U_m$  → normalização da magnitude da força magnetomotriz;
- $M_{2\emptyset-S}$  → motor de indução bifásico simétrico;
- $M_{1\emptyset-A}$  → motor de indução monofásico assimétrico;
- $M_{2\emptyset-ACR}$  → motor de indução bifásico assimétrico, com retorno;

## CAPÍTULO 3

- $v_i$  → tensão na fase “i”;  
 $v_j$  → tensão na fase “j”;  
 $r_i$  → resistência na fase “i”;  
 $r_j$  → resistência na fase “j”;  
 $i_i$  → corrente na fase “i”;  
 $i_j$  → corrente na fase “j”;  
 $\lambda_i$  → concatenamentos de fluxo magnético na fase “i”;  
 $\lambda_j$  → concatenamentos de fluxo magnético na fase “j”;  
 $L_{ii}$  → indutância própria da fase “i” sem dispersão;  
 $L_{jj}$  → indutância própria da fase “j” sem dispersão;  
 $L_{ij}$  → indutância mútua da fase “i”;  
 $L_{ji}$  → indutância mútua da fase “j”;  
 $L_{di}$  → indutância de dispersão da fase “i”;  
 $L_{dj}$  → indutância de dispersão da fase “j”;  
 $h$  → seqüência harmônica;  
 $\gamma_j$  → passo relativo da bobina;  
 $n_j$  → número de bobinas por pólo;  
 $\delta_{Rj}$  → ângulo entre ranhuras;  
 $\mu_o$  → permeabilidade magnética do ar;  
 $\sigma$  → comprimento radial do entreferro.  
 $N_i$  → número de espiras da fase “i”;  
 $N_j$  → número de espiras da fase “j”;  
 $k_{dih}$  → fator de distribuição da fase “i”;  
 $k_{djh}$  → fator de distribuição da fase “j”;  
 $k_{pih}$  → fator de passo da fase “i”;  
 $k_{pjh}$  → fator de passo da fase “j”;  
 $k_{wih}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “i”;  
 $k_{wjh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “i”;  
 $l$  → comprimento do cilindro rotórico;

- $R$  → raio do entreferro;  
 $2p$  → número de pólos da máquina;  
 $n_i$  → número de bobinas da fase “i”;  
 $n_j$  → número de bobinas da fase “j”;  
 $\lambda_{ijh}$  → fluxo concatenado de dispersão da fase;  
 $L_{ijh}$  → indutância harmônica de ordem h entre as fases “i” e “j”;  
 $\lambda_{di}$  → fluxo de dispersão;  
 $k_{di}$  → permeância do circuito magnético de dispersão.  
 $\lambda_i'$  → concatenamento de fluxo;  
 $\varphi_a$  → ângulo de referência fase “a”;  
 $\varphi_{ab}$  → ângulo entre a fase “a” e a fase “b”;  
 $\varphi_{ba}$  → ângulo entre a fase “b” e a fase “a”;  
 $\varphi_{AB}$  → ângulo entre a fase “A” e a fase “B”;  
 $\varphi_{BA}$  → ângulo entre a fase “B” e a fase “A”;  
 $\varphi_{aA}$  → ângulo entre a fase “a” e a fase “A”;  
 $\varphi_{Aa}$  → ângulo entre a fase “A” e a fase “a”;  
 $\varphi_{bB}$  → ângulo entre a fase “b” e a fase “B”;  
 $\varphi_{Bb}$  → ângulo entre a fase “B” e a fase “b”;  
 $\varphi_{aB}$  → ângulo entre a fase “a” e a fase “B”;  
 $\varphi_{Ba}$  → ângulo entre a fase “B” e a fase “a”;  
 $\varphi_{bA}$  → ângulo entre a fase “b” e a fase “A”;  
 $\varphi_{Ab}$  → ângulo entre a fase “A” e a fase “b”;  
 $L_{aa}$  → indutância própria da fase “a”;  
 $L_{bb}$  → indutância própria da fase “b”;  
 $L_{AA}$  → indutância própria da fase “A”;  
 $L_{BB}$  → indutância própria da fase “B”;  
 $L_{ab}$  → indutância mútua entre a fase “a” e a fase “b”;  
 $L_{ba}$  → indutância mútua entre a fase “b” e a fase “a”;  
 $L_{AB}$  → indutância mútua entre a fase “A” e a fase “B”;  
 $L_{BA}$  → indutância mútua entre a fase “B” e a fase “A”;  
 $L_{aA}$  → indutância mútua entre a fase “a” e a fase “A”;



- $L_{bB}$  → indutância mútua entre a fase “b” e a fase “B”;  
 $L_{Aa}$  → indutância mútua entre a fase “A” e a fase “a”;  
 $L_{Bb}$  → indutância mútua entre a fase “B” e a fase “b”;  
 $L_{abh}$  → indutância harmônica mútua entre a fase “a” e a fase “b”;  
 $L_{bah}$  → indutância harmônica mútua entre a fase “b” e a fase “a”;  
 $L_{ABh}$  → indutância harmônica entre a fase “A” e a fase “B”;  
 $L_{BAh}$  → indutância harmônica entre a fase “B” e a fase “A”;  
 $k_{aah}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “a”;  
 $k_{bbh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “b”;  
 $k_{AAh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “A”;  
 $k_{BBh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “B”;  
 $k_{abh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “a” e da fase “b”;  
 $k_{bah}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “b” e da fase “a”;  
 $k_{ABh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “A” e da fase “B”;  
 $k_{BAh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “B” e da fase “A”;  
 $k_{aAh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “a” e da fase “A”;  
 $k_{bBh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “b” e da fase “B”;  
 $k_{AAh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “A” e da fase “a”;  
 $k_{BBh}$  → fator de enrolamento harmônico da fase “B” e da fase “b”;  
 $L_{da}$  → indutância de dispersão da fase “a”;  
 $L_{db}$  → indutância de dispersão da fase “b”;  
 $L_{dA}$  → indutância de dispersão da fase “A”;  
 $L_{dB}$  → indutância de dispersão da fase “B”;  
 $\lambda_a$  → concatenamento total de fluxo na fase “a”;  
 $\lambda_b$  → concatenamento total de fluxo na fase “b”;  
 $\lambda_A$  → concatenamento total de fluxo na fase “A”;  
 $\lambda_B$  → concatenamento total de fluxo na fase “B”;  
 $\lambda_{aah}$  → concatenamento harmônico de fluxo da fase “a”;  
 $\lambda_{bbh}$  → concatenamento harmônico de fluxo da fase “b”;  
 $\lambda_{AAh}$  → concatenamento harmônico de fluxo da fase “A”;  
 $\lambda_{BBh}$  → concatenamento harmônico de fluxo da fase “B”;

- $\lambda_{ab h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “a” e a fase “b”;  
 $\lambda_{ba h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “b” e a fase “a”;  
 $\lambda_{AB h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “A” e a fase “B”;  
 $\lambda_{BA h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “B” e a fase “A”;  
 $\lambda_{aA h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “a” e a fase “A”;  
 $\lambda_{Aa h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “A” e a fase “a”;  
 $\lambda_{bB h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “b” e a fase “B”;  
 $\lambda_{Bb h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “B” e a fase “b”;  
 $\lambda_{aB h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “a” e a fase “B”;  
 $\lambda_{Ba h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “B” e a fase “a”;  
 $\lambda_{bA h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “b” e a fase “A”;  
 $\lambda_{Ab h}$  → concatenamento harmônico de fluxo entre a fase “A” e a fase “b”;  
 $\lambda_{da}$  → concatenamento de fluxo de dispersão da fase “a”;  
 $\lambda_{db}$  → concatenamento de fluxo de dispersão da fase “b”;  
 $\lambda_{dA}$  → concatenamento de fluxo de dispersão da fase “A”;  
 $\lambda_{dB}$  → concatenamento de fluxo de dispersão da fase “B”;  
 $V_a$  → tensão da fase “a”;  
 $V_b$  → tensão da fase “b”;  
 $V_c$  → tensão da fase “c”;  
 $V_A$  → tensão da fase “A”;  
 $V_B$  → tensão da fase “B”;  
 $i_a$  → corrente da fase “a”;  
 $i_b$  → corrente da fase “b”;  
 $i_A$  → corrente da fase “A”;  
 $i_B$  → corrente da fase “B”;  
 $r_a$  → resistência da fase “a”;  
 $r_b$  → resistência da fase “b”;  
 $r_A$  → resistência da fase “A”;  
 $r_B$  → tensão da fase “B”;  
 $L$  → matriz de indutâncias;  
 $J$  → momento de inércia das partes girantes;

- $\omega_R$  → velocidade angular da máquina;
- $\theta_R$  → deslocamento angular, em graus mecânicos;
- $T_m$  → conjugado eletromagnético;
- $T_c$  → conjugado resistente;
- $p$  → numero de pólos;
- $\theta_e$  → é o ângulo de deslocamento entre os eixos das fases “a” e “b” em graus elétricos;
- $\theta_R$  → deslocamento angular em graus mecânicos;

## CAPÍTULO 4

- $r_s$  → resistência por fase do estator;
- $r_r$  → resistência por fase do rotor;
- $x_s$  → reatância por fase do estator;
- $x_r$  → reatância por fase do rotor;
- $x_m$  → reatância de magnetização;
- $N_{rs}$  → número de ranhuras por fase do estator;
- $N_{rr}$  → número de ranhuras por fase do rotor;
- $N_f$  → número de fases do motor;
- $\delta_{rs}$  → ângulo entre as ranhuras do estator;
- $\delta_{rr}$  → ângulo entre as ranhuras do rotor;
- $\gamma_{rbs}$  → passo relativo da bobina do estator;
- $\gamma_{rbr}$  → passo relativo da bobina do rotor;
- $h$  → seqüência harmônica;
- $\beta$  → ângulo de defasamento entre as tensões de alimentação;
- $\phi$  → ângulo de defasamento entre os enrolamentos das fases do motor;
- $V_n$  → tensão nominal;
- $P_n$  → potência nominal;
- $I_o$  → corrente a vazio;
- $I_n$  → corrente nominal;

$T_o$  → torque a vazio;  
 $\varphi_{as}$  → ângulo de referência fase “a”;  
 $\varphi_{ab}$  → ângulo entre as fases “a” e fase “b”;  
 $\varphi_{ba}$  → ângulo entre as fases “b” e fase “a”;  
 $\varphi_{AB}$  → ângulo entre as fases “A” e fase “B”;  
 $\varphi_{BA}$  → ângulo entre as fases “B” e fase “A”;  
 $\varphi_{aA}$  → ângulo entre as fases “a” e fase “A”;  
 $\varphi_{bB}$  → ângulo entre as fases “b” e fase “B”;  
 $\varphi_{aB}$  → ângulo entre as fases “a” e fase “B”;  
 $\varphi_{bA}$  → ângulo entre as fases “b” e fase “A”;

## CAPÍTULO 5

$V_L$  → tensão de linha;  
 $V_f$  → tensão de fase;  
 $V_{ab}$  → tensão de linha\_a\_b;  
 $V_{bc}$  → tensão de linha\_b\_c;  
 $V_{ca}$  → tensão de linha\_c\_a;  
 $V_{an}$  → tensão de fase\_a\_n;  
 $V_{bn}$  → tensão de fase\_b\_n;  
 $V_{cn}$  → tensão de fase\_c\_n;  
 $M_{3\emptyset-S}$  → motor de indução trifásico;  
 $M_{1\emptyset-A}$  → motor de indução monofásico;  
 $M_{2\emptyset-ACR}$  → motor de indução bifásico assimétrico com retorno;  
 $M_{2\emptyset1-ACR}$  → motor de indução bifásico assimétrico 1 com retorno;  
 $M_{2\emptyset2-ACR}$  → motor de indução bifásico assimétrico 2 com retorno;  
 $M_{2\emptyset3-ACR}$  → motor de indução bifásico assimétrico 3 com retorno;  
 $V_a$  → tensão da fase “a”;  
 $V_b$  → tensão da fase “b”;  
 $V_c$  → tensão da fase “c”;

- $n$  → neutro;
- $i_{ab}$  → corrente de linha “a\_b”;
- $i_{bc}$  → corrente de linha “b\_c”;
- $i_{ca}$  → corrente de linha “c\_a”;
- $i_a$  → corrente da fase “a”;
- $i_b$  → corrente da fase “b”;
- $i_c$  → corrente da fase “c”;
- $i_r$  → corrente de retorno;
- $V_o$  → tensão a vazio;
- $V_{Bb}$  → tensão de rotor bloqueado;
- $I_{oL}$  → corrente a vazio de linha;
- $I_{nL}$  → corrente nominal de linha;
- $I_{o-ac}$  → corrente a vazio a\_c;
- $I_{o-bc}$  → corrente a vazio b\_c;
- $I_{n-ac}$  → corrente nominal a\_c;
- $I_{n-bc}$  → corrente nominal b\_c;
- $I_{Bb}$  → corrente de rotor bloqueado;
- $P_{N-3\emptyset IP55-W21}$  → potência nominal do  $M_{3\emptyset-IP55-W21}$ ;
- $P_{N-2\emptyset 1}$  → potência nominal do  $M_{2\emptyset 1-ACR}$ ;
- $P_{N-2\emptyset 2}$  → potência nominal do  $M_{2\emptyset 2-ACR}$ ;
- $P_{N-2\emptyset 3}$  → potência nominal do  $M_{2\emptyset 3-ACR}$ ;
- $P_o$  → potência a vazio;
- $P_{Bb}$  → potência de rotor bloqueado;
- $W_n$  → velocidade nominal;
- $T_N$  → torque nominal;
- $T_{N-3\emptyset/IP55}$  → torque nominal do motor trifásico da linha IP55 W21 Standard;
- $T_{N-3\emptyset ARP}$  → torque nominal do motor trifásico da linha alto rendimento plus;
- $T_{N-2\emptyset}$  → torque nominal do  $M_{2\emptyset-ACR}$ ;
- $T_{N-2\emptyset 1}$  → torque nominal do  $M_{2\emptyset 1-ACR}$ ;
- $T_{N-2\emptyset 2}$  → torque nominal do  $M_{2\emptyset 2-ACR}$ ;

$T_{N-2\phi 3}$  → torque nominal do  $M_{2\phi 3-ACR}$ ;

$\theta_m$  → temperatura no motor;

$\theta_a$  → temperatura ambiente;

$E_T$  → elevação da temperatura.

## CAPÍTULO 6

$r_c$  → resistência de perdas no núcleo;

$s$  → escorregamento;

$(r_r/s)$  → seqüência positiva;

$(r_r/2-s)$  → seqüência negativa;

$P_{oT}$  → potência total a vazio do motor trifásico;

$P_{oB}$  → potência total a vazio do motor bifásico;

$P_{rbT}$  → potência total com rotor bloqueado do motor trifásico;

$P_{rbB}$  → potência total com rotor bloqueado do motor bifásico;

$i_{oT}$  → corrente total a vazio do motor trifásico;

$i_{oB}$  → corrente total a vazio do motor bifásico;

$i_{rbT}$  → corrente total com rotor bloqueado do motor trifásico;

$i_{rbB}$  → corrente total com rotor bloqueado do motor bifásico;

$Z_{oT}$  → impedância a vazio do motor trifásico;

$Z_{oB}$  → impedância a vazio do motor bifásico;

$Z_{rbT}$  → impedância com rotor bloqueado do motor trifásico;

$Z_{rbB}$  → impedância com rotor bloqueado do motor bifásico;

$R_{oT}$  → resistência a vazio do motor trifásico;

$R_{oB}$  → resistência a vazio do motor bifásico;

$R_{rbT}$  → resistência com rotor bloqueado do motor trifásico;

$R_{rbB}$  → resistência com rotor bloqueado do motor bifásico;

$X_{oT}$  → reatância a vazio do motor trifásico;

$X_{oB}$  → reatância a vazio do motor bifásico;

$X_{rbT}$  → reatância com rotor bloqueado do motor trifásico;

$X_{rbB}$  → reatância com rotor bloqueado do motor bifásico;

$r_{sT}$  → resistência do estator por fase do motor trifásico;  
 $r_{sB}$  → resistência do estator por fase do motor bifásico;  
 $r_{rT}$  → resistência do rotor por fase do motor trifásico;  
 $r_{rB}$  → resistência do rotor por fase do motor bifásico;  
 $x_{sT}$  → reatância do estator por fase do motor trifásico;  
 $x_{sB}$  → reatância do estator por fase do motor bifásico;  
 $x_{rT}$  → reatância do rotor por fase do motor trifásico;  
 $x_{rB}$  → reatância do rotor por fase do motor bifásico;  
 $x_{mT}$  → reatância mutua do motor trifásico;  
 $x_{mB}$  → reatância mutua do motor bifásico;  
 $r_{cT}$  → resistência de perdas do núcleo do motor trifásico;  
 $r_{cB}$  → resistência de perdas do núcleo do motor bifásico;  
 $i_{cT}$  → corrente de perdas do núcleo do motor trifásico;  
 $i_{cB}$  → corrente de perdas do núcleo do motor bifásico;  
 $P_{cT}$  → perdas do núcleo do motor trifásico;  
 $P_{cB}$  → perdas do núcleo do motor bifásico;  
 $I_{cT}$  → resistência de perda no núcleo no motor trifásico;  
 $I_{cB}$  → resistência de perda no núcleo no motor bifásico;  
 $q_{fT}$  → número de fases do motor trifásico;  
 $q_{fB}$  → número de fases do motor bifásico;  
 $P_{rotT}$  → perdas rotacionais do motor trifásico;  
 $P_{rotB}$  → perdas rotacionais do motor bifásico;  
 $L_{mT}$  → indutância de magnetização do motor trifásico;  
 $L_{mB}$  → indutância de magnetização do motor bifásico;  
 $L_{sT}$  → indutância de dispersão do estator do motor trifásico;  
 $L_{sB}$  → indutância de dispersão do estator do motor bifásico;  
 $L_{rT}$  → indutância de dispersão do rotor do motor trifásico;  
 $L_{rB}$  → indutância de dispersão do rotor do motor bifásico;  
 $f$  → frequência.

# CAPITULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, o sistema elétrico tem passado por muitas mudanças, principalmente no lado da demanda. Os consumidores (demanda) estão preocupados com a qualidade de energia e principalmente com a qualidade dos equipamentos de uso final, como por exemplo, lâmpadas, refrigeradores, *motores elétricos*, e outros; devido aos atuais problemas no que diz respeito ao consumo de energia elétrica.

Dentre os exemplos de equipamentos para uso final de energia os motores elétricos são responsáveis por grande parte do consumo de energia, em geral destacam-se os motores de indução trifásicos (indústria) e equipamentos elétricos que funcionam com motores monofásicos (indústria, comércio e residência). Nas Figuras 1.1a, 1.1b e 1.1c estão representados os consumos finais de energia elétrica nos setores industrial, comercial e residencial, respectivamente.

Os motores de indução têm inúmeras aplicações, tais como: trituradores e picadores de alimentos, esteiras, máquinas de lavar roupa, máquinas de lavar louças, geladeiras, espremedores de frutas, bombas para piscinas domésticas, motores de portas de garagem, aparelhos de ar condicionado, ventiladores, exaustores, moinhos, máquinas de jato de água, motores usados em maquinário de construção civil de pequeno porte como betoneiras, serras, vibradores, compressores e outros. Estas inúmeras aplicações podem ter um papel muito importante no contexto mundial, como por exemplo, no aspecto de conservação de energia: um dos aspectos está relacionado com a obtenção de equipamentos (motores) que tenham maior eficiência energética.



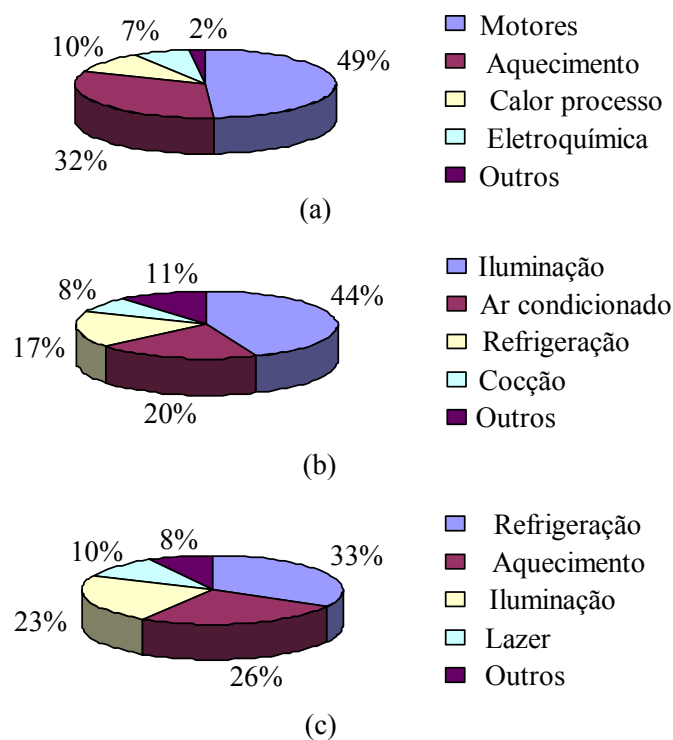


Figura 1.1 – Consumo final da energia elétrica.

Os motores de indução trifásicos e monofásicos são os mais utilizados pelos consumidores em geral, quer seja nos setores industriais, comerciais e residenciais. No setor industrial e comercial utilizam-se motores trifásicos e monofásicos, enquanto que nos setores residências o mais comum é a utilização de motores monofásicos, devido às características de aplicação e custo do sistema. O motor de indução monofásico tem um custo maior que o motor de indução trifásico, entretanto, o custo de uma instalação trifásica é maior do que a instalação bifásica ou monofásica.

Atualmente, existem vários tipos de motores monofásicos, tais como: os motores de indução monofásicos com partida à resistência, com partida a capacitor, com capacitor permanente de um só valor e com capacitor de dois valores, entre outros.

Comercialmente só existem motores de indução trifásico e monofásico, mas, contudo existe também uma linha alternativa de motores que se encontra em fase de pesquisa na Universidade Federal de Uberlândia - UFU, que é a

linha dos motores de indução bifásicos assimétricos alimentados por uma tensão bifásica simétrica com retorno. Estes motores funcionam sem os artifícios usados pelos motores monofásicos, tais como: capacitores e chaves centrifugas. Sem estes componentes o motor bifásico assimétrico com retorno já teria uma vantagem sobre os motores monofásicos, que seria um custo menor. A priori o motor de indução bifásico assimétrico seria utilizado na zona urbana uma vez que o mesmo teria a necessidade de uma fonte de tensão bifásica com retorno.

Os motores bifásicos assimétricos podem ser construídos com a mesma potência dos motores trifásicos ou monofásicos. Os motores bifásicos com retorno possuem algumas vantagens sobre os motores monofásicos, tais como, construção simples (equivalente ao motor trifásico), custo reduzido (inexistência de equipamentos auxiliares de partida ou funcionamento), existência de conjugado de partida (sem auxílio de equipamentos para a partida), facilidade de operação (permite inversão no sentido de rotação pela simples inversão da seqüência de fases) e facilidade de manutenção.

Com a instalação do motor bifásico assimétrico na zona urbana combateríamos os problemas de desperdício de energia (maior eficiência energética), que é enfocado pela conservação de energia, ou seja, atacaríamos diretamente a quantidade de potência reativa na rede de distribuição, que particularmente está relacionada com os motores de indução monofásicos com capacitor permanente de um só valor ou de dois valores, uma vez que a necessidade de uma eficiência energética maior nos motores monofásicos está diretamente relacionada com o uso de capacitor permanente.

O motor de indução bifásico assimétrico com retorno foi estudado primeiro por JORDÃO [1], onde se introduziu o conceito de funcionamento do motor bifásico assimétrico com retorno através da obtenção do campo magnético girante através da relação  $\alpha$  (ângulo de defasamento entre as correntes) e  $\varphi$  (ângulo de defasamento entre os enrolamentos).

Na referência [1] é mostrado que o motor trifásico sem uma de suas fases trabalharia como um motor bifásico assimétrico. O motor seria

alimentado por uma tensão bifásica com retorno pelo neutro. Ao aplicar uma tensão bifásica, cujas tensões das fases “a” e “b” estão defasadas de  $120^{\circ}$  elétricos no tempo, no enrolamento bifásico, cujos eixos das bobinas das fases “a” e fase “b” estão defasados  $120^{\circ}$  elétricos no espaço, surgiria uma corrente bifásica, cujas correntes das fases “a” e “b” estariam defasadas de  $60^{\circ}$  elétricos no tempo, produzindo então, uma força magnetomotriz resultante constante no motor.

O segundo a realizar estudos a respeito de tal motor foi CASTRO NETO [2], onde também, se introduziu um conceito diferente para o funcionamento do motor bifásico assimétrico com retorno, mas, partindo da mesma relação entre  $\alpha$  e  $\varphi$ . Na referência [2] é mostrado que o motor trifásico sem uma de suas fases trabalharia como um motor bifásico assimétrico. O motor seria alimentado por uma tensão bifásica com retorno pelo neutro. Ao aplicar uma tensão bifásica, cujas tensões das fases “a” e “b”, estão defasadas de  $120^{\circ}$  elétricos no tempo, no enrolamento bifásico, cujos eixos das bobinas das fases “a” e fase “b” estão defasados  $60^{\circ}$  elétricos no espaço, surgiria uma corrente bifásica, cujas correntes das fases “a” e “b” estariam defasadas de  $120^{\circ}$  elétricos no tempo, produzindo então, uma força magnetomotriz resultante constante no motor.

Observa-se que existe um grande vazio na pesquisa sobre o motor bifásico assimétrico com retorno, desde a primeira pesquisa feita por Rubens Guedes Jordão em 1963 e a segunda realizada por Lindolfo Marra de Castro Neto em 2002.

Então, o objetivo deste trabalho é antes de tudo é dar contribuições que servirão para esclarecer dúvidas a respeito do funcionamento do motor de indução bifásico assimétrico com retorno para aplicações onde exista uma fonte de alimentação bifásica com retorno. Além disso, pretende-se mostrar que é possível produzir torque uniforme ou não em motores bifásicos assimétricos através da obtenção de uma força magnetomotriz resultante uniforme ou não uniforme. Contudo, a análise puramente matemática através das equações de campo magnético girante efetuado por JORDÃO [1] e CASTRO

NETO [2] é insuficiente para a análise dos motores bifásicos assimétricos com retorno, por isso, foi proposto o desenvolvimento de um modelo matemático dinâmico genérico no domínio do tempo para a análise das máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas, onde se apresentam as equações elétricas e mecânicas das máquinas bifásicas. No modelo matemático foram incluídas as harmônicas espaciais de campo magnético provindo dos enrolamentos da máquina; esta inclusão se faz por intermédio do conceito de indutâncias harmônicas ALVARENGA [3], através da formulação espacial detalhada do motor.

O enfoque principal desta tese é analisar as máquinas de indução bifásicas assimétricas com retorno pelo neutro ou pela fase. Estes motores podem ser alimentados na ligação “fase-fase-neutro” ou “fase-fase-fase”. A execução das ligações dos motores bifásicos assimétricos com retorno também será abordada através deste trabalho, bem como os seus ensaios com carga, vazio e rotor bloqueado. Através dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado pode-se realizar o cálculo dos parâmetros por fase do circuito equivalente de seqüência positiva e negativa do motor bifásico assimétrico com retorno. Além disso será mostrado o que acontece com a distribuição do fluxo ao redor do entreferro no motor bifásico com retorno através da análise de elementos finitos.

No motor trifásico existe a presença das harmônicas espaciais de campo de ordem  $6n \pm 1$ . Quando o motor trifásico passa a funcionar como bifásico assimétrico com retorno, além das harmônicas de ordem  $6n \pm 1$  existem também as harmônicas de ordem  $3n$ . A presença das harmônicas de ordem  $3n$  causa problemas na partida do motor bifásico assimétrico com retorno, devido a isto, será feita também a análise da velocidade do motor bifásico com retorno.

Com tudo isto, obtém-se desta forma resultados que podem ser utilizados na compreensão de tal motor, além de ajudar a mudar um paradigma sobre motores de indução, paradigma relacionado à possibilidade de só existir motores de indução trifásicos e monofásicos.

**1.2 – ESTRUTURA DA TESE**

Esta tese é composta dos seguintes capítulos:

**CAPÍTULO 1** – Introdução: motivos e vantagens da utilização do motor de indução bifásico assimétricos com retorno;

**CAPÍTULO 2** – Força magnetomotriz produzida por máquinas bifásicas – uma abordagem genérica: equações de campo magnético girante para obtenção de uma fmm uniforme ou não uniforme em máquinas bifásicas;

**CAPÍTULO 3** – Modelagem dinâmica genérica para máquinas de indução bifásicas: desenvolvimento do modelo dinâmico contendo as equações elétricas e mecânicas dos motores bifásicos simétricos e assimétricos, incluindo os efeitos das harmônicas espaciais de campo providas dos enrolamentos da máquina;

**CAPÍTULO 4** – Força magnetomotriz em motores de indução simétricos e assimétricos: análise das fmms em motores bifásicos simétrico, assimétricos e assimétricos com retorno;

**CAPÍTULO 5** – Sistema de alimentação e ensaios do motor de indução bifásico assimétrico com retorno: sistema de alimentação dos motores trifásico, monofásicos e bifásicos com retorno e também dos ensaios a vazio e com carga do motor bifásico assimétrico com retorno;

**CAPÍTULO 6** – Cálculo dos parâmetros do motor bifásico assimétrico com retorno, análise da força magnetomotriz, torque eletromagnético e de velocidade: equacionamento para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor bifásico assimétrico com retorno e também das análises das fmms, torques e de velocidade do motor bifásico com retorno;

**CAPÍTULO 7** – Conclusões finais: conclusões relativas aos resultados teóricos e experimentais e citação das principais contribuições do trabalho.

## CAPÍTULO 2

# FORÇA MAGNETOMOTRIZ PRODUZIDA POR MÁQUINAS BIFÁSICAS – UMA ABORDAGEM GENÉRICA

### 2.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o equacionamento matemático genérico do campo magnético girante das máquinas de indução bifásicas simétricas, monofásicas e bifásicas assimétricas com retorno ([1] e [2]).

As máquinas que serão analisadas nesse item são:

- A máquina de indução bifásica simétrica possui o estator totalmente preenchido com os enrolamentos das fases “a” e “b” (Figura 2.1a). Os eixos dos enrolamentos das duas fases estão defasados entre si de  $90^0$  elétricos no espaço. As correntes que excitam o motor bifásico simétrico estão defasadas uma da outra de  $90^0$  no tempo; para isto acontecer na prática, tem-se que utilizar um inversor;
- A máquina de indução monofásica possui o estator parcialmente ou totalmente preenchido com os enrolamentos das fases “a” e “b” (Figuras 2.1a e 2.1b), respectivamente. Os eixos dos enrolamentos das duas fases estão defasados de  $90^0$  elétricos no espaço. As correntes que excitam o motor monofásico estão defasadas uma da outra de aproximadamente  $80^0$  no tempo; para isto acontecer na prática, tem-se que utilizar um capacitor;

- A máquina bifásica assimétrica com retorno possui o estator parcialmente ou totalmente preenchido com os enrolamentos das fases “a” e “b” (Figuras 2.1a e 2.1b); os eixos dos enrolamentos das duas fases estão defasados de certo ângulo  $\varphi$  elétricos no espaço. Para a análise do motor bifásico assimétrico com retorno, supõe-se que as correntes que excitam os enrolamentos do estator são de mesma amplitude e defasadas uma da outra de certo ângulo  $\alpha$  no tempo.

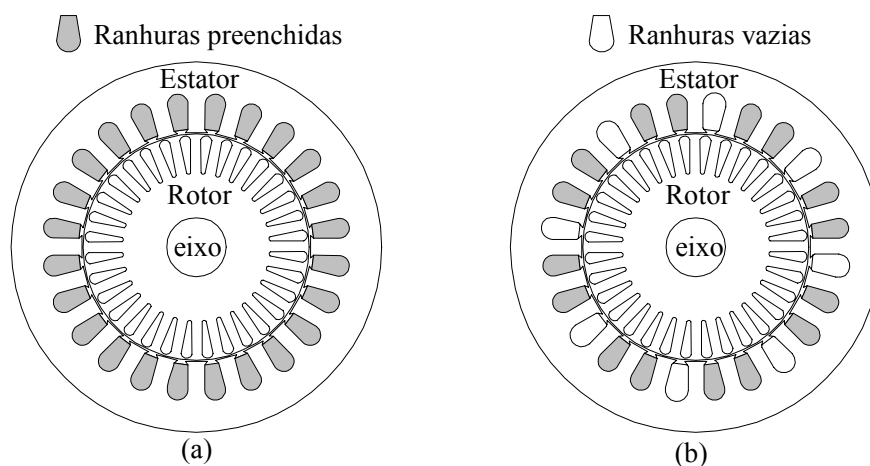


Figura 2.1 – Estator totalmente e parcialmente preenchido com os enrolamentos das fases.

Na prática é possível construir motores assimétricos com retorno com diferentes defasamentos entre os eixos dos enrolamentos, mas, entretanto será realizada somente a análise teórica dos motores bifásicos assimétricos com retorno que têm condição de aplicabilidade prática.

O objetivo desse capítulo é analisar e comparar as forças magnetomotrizes produzidas por motores de indução bifásicos através de um equacionamento matemático genérico.

O equacionamento matemático genérico desenvolvido neste capítulo permite que se faça uma análise prévia do campo magnético girante em motores de indução bifásicos simétricos, assimétricos (monofásicos) e assimétricos com retorno, de modo que se obtenha uma força magnetomotriz uniforme ou não uniforme.

## 2.2 – CAMPOS MAGNÉTICOS GIRANTES EM MÁQUINAS BIFÁSICAS

Considerando-se um estator dotado de dois enrolamentos, fases “a” e “b”, dispostos de tal forma que o ângulo entre os seus eixos seja  $\varphi$ , conforme mostrado na Figura 2.2. Se estes enrolamentos forem excitados pelas correntes  $i_a$  e  $i_b$ , respectivamente, eles gerarão forças magnetomotrizes  $F_{mma}$  e  $F_{mmb}$ . As distribuições de  $F_{mma}$  e  $F_{mmb}$  são representadas pelas Equações 2.1 e 2.2.

$$F_{mma} = F_{ap} \cdot \cos\theta \quad (2.1)$$

$$F_{mmb} = F_{bp} \cdot \cos(\theta - \varphi) \quad (2.2)$$

Onde,  $F_{ap}$  e  $F_{bp}$  são os valores instantâneos de pico das forças motrizes geradas e o ângulo  $\theta$  é medido a partir do eixo do enrolamento da fase “a”.

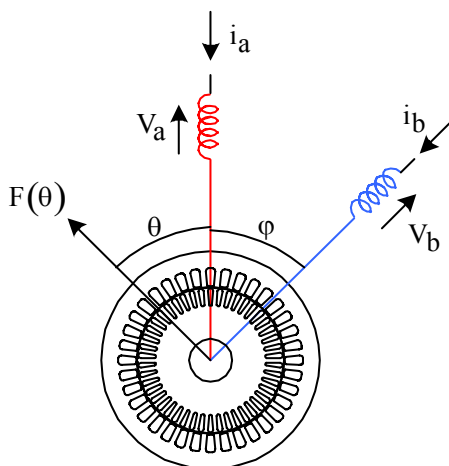


Figura 2.2 – Bobinas da fase “a” e fase “b” do estator do motor bifásico.

A força magnetomotriz resultante no entreferro terá, então, a seguinte distribuição, que é representada através da Equação 2.3.

$$F(\theta) = F_{mma} + F_{mmb} = F_{ap} \cdot \cos(\theta) + F_{bp} \cdot \cos(\theta - \varphi) \quad (2.3)$$



Suponha esses enrolamentos sejam percorridos pelas correntes  $i_a$  e  $i_b$  senoidais de mesma frequência angular  $\omega$ , defasadas por um ângulo  $\alpha$  e de amplitudes  $i_{a\max}$  e  $i_{b\max}$  respectivamente, representadas pelas Equações 2.4 e 2.5.

$$i_a = i_{a\max} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

$$i_b = i_{b\max} \cdot \cos(\omega t - \alpha) \quad (2.5)$$

Os valores instantâneos de pico das forças magnetomotrizes poderão ser expressos pelas Equações 2.6 e 2.7;

$$F_{ap} = F_{mma\_max} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

$$F_{bp} = F_{mmb\_max} \cdot \cos(\omega t - \alpha) \quad (2.7)$$

Onde:

$$F_{mma\_max} = F_m \quad (2.8)$$

$$F_{mmb\_max} = q \cdot F_m \quad (2.9)$$

E  $q$  é a relação entre as forças magnetomotrizes  $F_{mmb\_max}$  e  $F_{mma\_max}$ . Para obter a força magnetomotriz instantânea, basta substituir as Equações 2.6 e 2.7 na equação 2.3. A força motriz instantânea esta representada pela Equação 2.10.

$$F(\theta, t) = F_m [\cos(\omega t) \cdot \cos(\theta) + q \cdot \cos(\omega t - \alpha) \cdot \cos(\theta - \alpha)] \quad (2.10)$$

Então, através de desenvolvimentos matemáticos, chega-se a equação resultante (2.11).

A Equação 2.11 é genérica para o calculo da força magnetomotriz de motores de indução bifásicos. Ela descreve a força magnetomotriz instantânea resultante para qualquer ângulo  $\theta$  e  $\alpha$ ; e qualquer relação  $q$  entre as fmm's. Para

qualquer valor de  $q$ ,  $\varphi$  e  $\alpha$ ; resultará em uma força magnetomotriz resultante não uniforme, isto é, terá velocidade angular não constante e apresentará flutuação na amplitude e fase instantânea da força magnetomotriz, levando o motor a apresentar um torque pulsante.

$$F_{mmr}(\theta,t) = \frac{F_m}{2} \left[ \sqrt{1+q^2+2\cos(\alpha-\varphi)} \cdot \cos\left(\theta - \omega t + \arctan \frac{q \cdot \sin(\alpha-\varphi)}{1+\cos(\alpha-\varphi)}\right) \right] + \frac{F_m}{2} \left[ \sqrt{1+q^2+2\cos(\alpha+\varphi)} \cdot \cos\left(\theta + \omega t - \arctan \frac{q \cdot \sin(\alpha+\varphi)}{1+\cos(\alpha+\varphi)}\right) \right] \quad (2.11)$$

Na Equação 2. resultante, identificam-se duas parcelas, que são:

- Primeira parcela  $\rightarrow$  apresenta o termo  $\theta - \omega t$ ;
- Segunda parcela  $\rightarrow$  apresenta o termo  $\theta + \omega t$ .

Essas parcelas correspondem a duas componentes de fmm que giram em sentidos opostos. As duas parcelas mencionadas se constituem na conhecida teoria das duas reações para motores monofásicos [6]. Para maior clareza, as duas componentes  $F_1(\theta,t)$  e  $F_2(\theta,t)$  são expressas pelas Equações 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$F_{mmr}(\theta,t) = F_1(\theta,t) + F_2(\theta,t) \quad (2.12)$$

$$F_1(\theta,t) = \frac{F_m}{2} \sqrt{1+q^2+2\cos(\alpha-\varphi)} \cdot \cos\left[\theta - \omega t + \arctan \frac{q \cdot \sin(\alpha-\varphi)}{1+\cos(\alpha-\varphi)}\right] \quad (2.13)$$

$$F_2(\theta,t) = \frac{F_m}{2} \sqrt{1+q^2+2\cos(\alpha+\varphi)} \cdot \cos\left[\theta + \omega t - \arctan \frac{q \cdot \sin(\alpha+\varphi)}{1+\cos(\alpha+\varphi)}\right] \quad (2.14)$$

---

<sup>1</sup> O desenvolvimento completo da Equação 2.11 pode ser encontrado na referência [2].

### 2.3 – OBTENÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE UNIFORME

Um campo magnético girante uniforme, com velocidade constante e sem flutuação na amplitude ou fase, pode ser descrito através das Equações 2.15 e 2.16.

$$A_1(\theta,t) = A_{m1}\cos(\theta - \omega t + \delta_1) \quad (2.15)$$

$$A_2(\theta,t) = A_{m2}\cos(\theta + \omega t - \delta_2) \quad (2.16)$$

Pode-se observar que as Equações 2.15 e 2.16 são análogas às Equações 2.13 e 2.14. Onde,  $A_{m1}$  e  $A_{m2}$  são as magnitudes da forças magnetomotrizes e os parâmetros constantes  $\delta_1$  e  $\delta_2$  são as fases iniciais. Nota-se que a cada instante o valor de máxima força magnetomotriz ocorre em uma posição diferente. Tomando-se, por exemplo, as Equações 2.15 e 2.16, a posição de máximo ocorrerá sempre que, os ângulos  $(\theta - \omega t + \delta_1)$  e  $(\theta + \omega t - \delta_2)$  forem expressos pelas Equações 2.17 e 2.18, respectivamente.

$$\theta - \omega t + \delta_1 = 180^0 \quad (2.17)$$

$$\theta + \omega t - \delta_2 = 180^0 \quad (2.18)$$

Observa-se que as Equações 2.15 e 2.16 expressam as forças magnetomotrizes, que giram em sentidos opostos; Se as duas componentes existirem simultaneamente (Equação 2.11), não seria possível obter um campo magnético girante uniforme. Então, uma dessas componentes deve ser eliminada.

Portanto, para se obter um campo magnético girante uniforme para produzir uma força magnetomotriz uniforme na Equação 2.11 é necessário atender às seguintes condições:

- A → Ter fmms  $F_{am}$  e  $F_{bm}$  iguais; isto é,  $q$  igual a um;
- B → Para eliminar a componente  $F_2(\theta, t)$  da Equação 2.11, tem-se que impor  $\alpha + \varphi = 180^\circ$ ;
- C → Para eliminar a componente  $F_1(\theta, t)$  da Equação 2.11, tem-se que impor  $\alpha - \varphi = 180^\circ$ ;

Então, escolhendo as condições A e B, a Equação 2.12 se transformará na equação 2.19.

$$F_{mmr}(\theta, t) = \frac{F_m}{2} \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\alpha - \varphi)} \cdot \cos\left[\theta - \omega t + \arctan \frac{1 \cdot \sin(\alpha - \varphi)}{1 + \cos(\alpha - \varphi)}\right] \quad (2.19)$$

Por outro lado, escolhendo as condições A e C, a Equação 2.12 se transformará na equação 2.20.

$$F_{mmr}(\theta, t) = \frac{F_m}{2} \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\alpha + \varphi)} \cdot \cos\left[\theta + \omega t + \arctan \frac{1 \cdot \sin(\alpha + \varphi)}{1 + \cos(\alpha + \varphi)}\right] \quad (2.20)$$

Nas Equações 2.19 e 2.20 as magnitudes das forças magnetomotrizes girantes são dadas pelas equações 2.21 e 2.22, respectivamente. Normalizando-se as Equações 2.21 e 2.22, em relação a  $F_m$  têm-se as Equações 2.23 e 2.24:

$$A_{m1} = \frac{F_m}{2} \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\alpha - \varphi)} \quad (2.21)$$

$$A_{m2} = \frac{F_m}{2} \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\alpha + \varphi)} \quad (2.22)$$

$$U_{m1} = \frac{A_{m1}}{F_m} = \frac{1}{2} \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\alpha - \varphi)} \quad (2.23)$$

$$U_{m2} = \frac{A_{m2}}{F_m} = \frac{1}{2} \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\alpha + \varphi)} \quad (2.24)$$

## 2.4 – FORÇA MAGNETOMOTRIZ EM MÁQUINAS BIFÁSICAS

Neste item, serão mostradas algumas situações onde se pode obter campo girante uniforme ou não uniforme nas máquinas de indução bifásicas simétricas, monofásicas e assimétricas com retorno. As máquinas (Tabela 2.1) que serão analisadas são as seguintes:  $M_{2\varnothing - S}$  (motor de indução bifásico simétrico);  $M_{1\varnothing - A}$  (motor de indução monofásico) e  $M_{2\varnothing - ACR}$  (motor de indução bifásico assimétrico com retorno). Para a obtenção dos gráficos de força magnetomotriz resultante, consideram-se as correntes  $I_a$  e  $I_b$  que circulam nos enrolamentos dos motores de indução bifásicos simétricos e assimétricos defasados entre si de certo ângulo  $\varphi$ , tenham amplitudes iguais e defasadas de certo ângulo  $\alpha$ , no tempo, uma da outra.

Na Tabela 2.1 estão representadas algumas situações de uma força magnetomotriz resultante uniforme ou não uniforme, para as máquinas de indução bifásicas.

Tabela 2.1 – Situações de fmms uniforme ou não uniforme.

Situações	Motores	$\alpha$	$\varphi$	$F_{mnr}(t)$
1	$M_{2\varnothing - S}$	$90^0$	$90^0$	uniforme
2	$M_{1\varnothing - A}$	$80^0$	$90^0$	não uniforme
3	$M_{2\varnothing - ACR}$	$60^0$	$60^0$	não uniforme
4	$M_{2\varnothing - ACR}$	$60^0$	$90^0$	não uniforme
5	$M_{2\varnothing - ACR}$	$60^0$	$120^0$	uniforme
6	$M_{2\varnothing - ACR}$	$120^0$	$60^0$	uniforme
7	$M_{2\varnothing - ACR}$	$120^0$	$90^0$	não uniforme
8	$M_{2\varnothing - ACR}$	$120^0$	$120^0$	não uniforme

Na Figura 2.3 estão representadas as forças magnetomotrizes resultantes ( $F_{mnr}(t)$ ) mostradas na Tabela 2.1, onde:

- Situação 1 → corresponde a fmm ( $F_{mnr1}(t)$ ) resultante do motor bifásico simétrico ( $M_{2\varnothing - S}$ ) com  $\alpha = 90^0$  e  $\varphi = 90^0$ ;

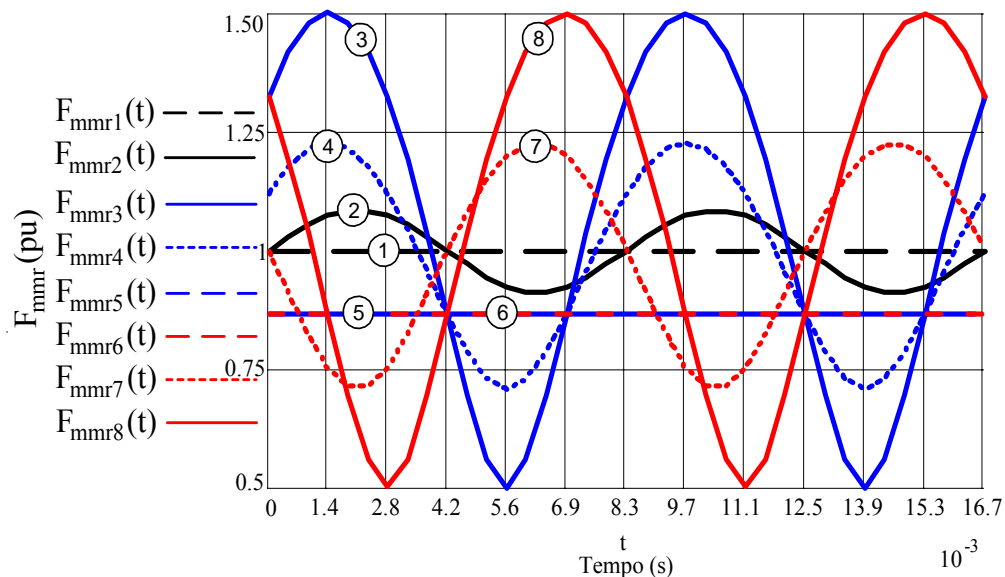


Figura 2.3 – Forças magnetomotrizas resultantes dos motores bifásicos.

- Situação 2 → corresponde a fmm ( $F_{mmr2}(t)$ ) resultante do motor bifásico assimétrico com retorno ( $M_{1\varnothing-A}$ ) com  $\alpha = 80^{\circ}$  e  $\varphi = 90^{\circ}$ ;
- Situação 3 → corresponde a fmm ( $F_{mmr3}(t)$ ) resultante do motor bifásico assimétrico com retorno ( $M_{2\varnothing-ACR}$ ) com  $\alpha = 60^{\circ}$  e  $\varphi = 60^{\circ}$ ;
- Situação 4 → corresponde a fmm ( $F_{mmr4}(t)$ ) resultante do motor bifásico assimétrico ( $M_{2\varnothing-ACR}$ ) com  $\alpha = 60^{\circ}$  e  $\varphi = 90^{\circ}$ ;
- Situação 5 → corresponde a fmm ( $F_{mmr5}(t)$ ) resultante do motor bifásico assimétrico ( $M_{2\varnothing-ACR}$ ) com  $\alpha = 60^{\circ}$  e  $\varphi = 120^{\circ}$ ;
- Situação 6 → corresponde a fmm ( $F_{mmr6}(t)$ ) resultante do motor bifásico assimétrico ( $M_{2\varnothing-ACR}$ ) com  $\alpha = 120^{\circ}$  e  $\varphi = 60^{\circ}$ ;
- Situação 7 → corresponde a fmm ( $F_{mmr7}(t)$ ) resultante do motor bifásico assimétrico ( $M_{2\varnothing-ACR}$ ) com  $\alpha = 120^{\circ}$  e  $\varphi = 90^{\circ}$ ;
- Situação 8 → corresponde a fmm ( $F_{mmr8}(t)$ ) resultante do motor bifásico assimétrico ( $M_{2\varnothing-ACR}$ ) com  $\alpha = 120^{\circ}$  e  $\varphi = 120^{\circ}$ ;

## 2.5 – CONCLUSÃO

O equacionamento matemático genérico apresentado no Capítulo 2 realiza a análise do campo magnético girante em máquinas de indução bifásicas. O equacionamento desenvolvido pode ser usado para análise da força magnetomotriz resultante (Equação 2.11) em motores de indução bifásicos simétricos, monofásicos e bifásicos assimétricos com retorno.

Por intermédio da relação  $\alpha$  (ângulo de defasamento entre as correntes das fases “a” e “b”) e  $\varphi$  (ângulo de defasamento entre os eixos dos enrolamentos das fases “a” e “b”) é possível obter situações teóricas (Tabela 2.1), onde a força magnetomotriz resultante é uniforme ou não uniforme. Todavia, independentemente do campo magnético girante ser uniforme ou não, uma força magnetomotriz resultante será criada, em consequência disso obtém-se um torque de partida não nulo. É possível obter teoricamente um campo magnético uniforme ou não uniforme em qualquer máquina de indução bifásica (Figura 2.11), quer seja, um motor de indução simétrico ( $M_{2\varnothing - S}$ ), monofásico ou bifásico assimétrico ( $M_{1\varnothing - A}$ ), ou bifásico assimétrico com retorno ( $M_{2\varnothing - ACR}$ ).

Para obter uma força magnetomotriz uniforme basta manter uma das relações:

- $\alpha - \varphi = 180^0$  ou  $\alpha + \varphi = 180^0$ .

Entretanto, para obter uma força magnetomotriz não uniforme basta manter uma das relações:

- $\alpha - \varphi \neq 180^0$  ou  $\alpha + \varphi \neq 180^0$ .

Contudo, a análise de campo magnético girante através desse equacionamento é realizada supondo teoricamente uma determinada corrente bifásica, com características específicas, tais como: amplitude e defasamento angular ( $\alpha$ ). Com isso, a análise fica dependente do conhecimento das características das correntes na prática.

Surge então a seguinte pergunta:

Como seria o comportamento das forças magnetomotrizes das máquinas de indução bifásicas assimétricas com retorno ( $M_{2\phi - ACR}$ ), frente a uma fonte de alimentação bifásica simétrica com retorno pelo neutro ou pela fase, cujas tensões estão defasadas no tempo de certo ângulo  $\beta$ ?

Para responder esta pergunta, necessita-se do desenvolvimento de um modelo dinâmico genérico para máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas.

O objetivo deste modelo é verificar o comportamento das correntes que surgirão nos enrolamentos do estator dos motores bifásicos assimétricos com retorno, quando os mesmos estiverem sendo alimentados por fontes de tensões bifásicas simétricas com retorno pelo neutro ou pela fase, e com isso determinarem as forças magnetomotrizes resultantes. Para o cálculo das forças magnetomotrizes através do modelo dinâmico pode-se utilizar a mesma Equação 2.11, apresentada neste capítulo.

O modelo dinâmico genérico para máquinas bifásicas será desenvolvido através de conceitos descritos por ALVARENGA [3]. E as simulações das forças magnetomotrizes resultantes dos motores bifásicos assimétricos com retorno, bem como, a de outros motores serão realizadas com o auxílio de um programa (software). O modelo dinâmico para motores bifásicos é o assunto que será abordado no próximo capítulo.



## CAPÍTULO 3

# MODELO DINÂMICO GENÉRICO PARA MÁQUINAS DE INDUÇÃO BIFÁSICAS

### 3.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo será desenvolvido um modelo dinâmico genérico para a análise de máquinas de indução bifásicas simétricas, assimétricas e assimétricas com retorno.

O modelo será desenvolvido através de conceitos apresentados por ALVARENGA [3], conceitos relacionados com efeitos das harmônicas espaciais de campo em motores trifásicos.

O intuito principal desse capítulo é fornecer um modelo dinâmico genérico capaz de analisar as forças magnetomotrizes resultantes presentes nas máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas; e em particular, às presentes nos motores bifásicos assimétricos com retorno. Estas máquinas são alimentadas por uma fonte de tensão bifásica simétrica, cujas tensões estão defasadas entre si, de certo ângulo  $\beta$ . Através da análise da fmm por intermédio do modelo que será apresentado posteriormente, pretende-se verificar qual a melhor relação entre  $\varphi$  e  $\beta$ , para o funcionamento do motor bifásico assimétrico com retorno. Para se obter um comportamento mais próximo do real dos motores foram incluídas no modelo dinâmico no domínio do tempo as harmônicas espaciais de campo magnético oriundas nos enrolamentos da máquina. Esta inclusão se faz através dos conceitos de indutâncias harmônicas.

Através do modelo que será descrito nesse capítulo, pode-se fazer também o estudo do comportamento das máquinas bifásicas em regime permanente e transitório.

### 3.2 – EQUAÇÕES ELÉTRICAS GENÉRICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Por questões de simplicidade, as equações no domínio do tempo são desenvolvidas apenas para as duas fases genéricas “i” e “j” da máquina. Somente os resultados finais do desenvolvimento matemático é que são apresentados nas 2 fases do estator e 2 fases do rotor.

Imaginando-se duas fases genéricas “i” e “j” do motor bifásico simétrico;

$$v_i = r_i \cdot i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (3.1)$$

$$v_j = r_j \cdot i_j + \frac{d\lambda_j}{dt} \quad (3.2)$$

$$v_i = r_i \cdot i_i + \frac{d(L_{ii} \cdot i_i + L_{ij} \cdot i_j + L_{di} \cdot i_i)}{dt} \quad (3.3)$$

$$v_j = r_j \cdot i_j + \frac{d(L_{jj} \cdot i_j + L_{ji} \cdot i_i + L_{dj} \cdot i_j)}{dt} \quad (3.4)$$

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 em “serie de Fourier”. Cada componente harmônico da referida distribuição, por sua vez, provoca uma componente harmônica de concatenamento de fluxo magnético, por exemplo, da 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 imbricado de dupla camada, formado por  $n_j$  bobinas distribuídas, centrado na posição  $\varphi_j$ , na qual circula a corrente  $i_j$ , segundo referência [3]. Admitindo-se que cada bobina possui  $N_j$  espiras, passo da bobina igual a  $\gamma_j \cdot \pi$ , a componente harmônica de ordem  $h$  da força magneto motriz da fase “ $j$ ”,  $F_{mm_{jh}}$ , é dada pela Equação 3.5.

$$F_{mm_{jh}}(\varphi) = \frac{4}{\pi} \cdot N_j \cdot n_j \cdot k_{pjh} \cdot k_{djh} \cdot i_j \cdot \frac{1}{h} \cdot \cos[h \cdot (\varphi - \varphi_j)] \quad (3.5)$$

Onde:

$k_{pjh}$ ,  $k_{djh}$  – fatores de passo e distribuição, respectivamente, para a seqüência harmônica  $h$ , dados pelas Equações 3.6 e 3.7, segundo a referência [3].

$$k_{pjh} = \text{sen} \left( h \cdot \gamma_j \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.6)$$

$$k_{djh} = \frac{\text{sen} \left( h \cdot n_j \cdot \frac{\delta_{Rj}}{2} \right)}{n_j \cdot \text{sen} \left( h \cdot \frac{\delta_{Rj}}{2} \right)} \quad (3.7)$$

A Figura 3.1 mostra um corte transversal do enrolamento, onde o eixo de referência  $\varphi$  está fixo no estator da máquina e serve para localizar qualquer fase da mesma.

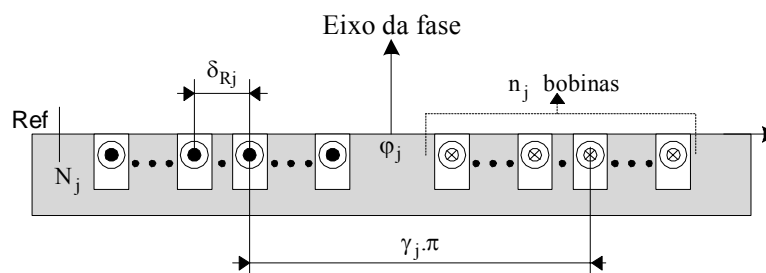


Figura 3.1 – Distribuição das bobinas do enrolamento da fase “ $j$ ”

A distribuição de densidade de fluxo magnético  $B_{jh}$  produzida por  $F_{mm_{jh}}$  ( $\varphi$ ) é obtida pela lei de Ampère e resulta na Equação 3.8. Neste caso a relutância do circuito magnético do ferro é desprezada em relação a relutância do entre ferro, considerada uniforme.

$$B_{jh} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_o}{\sigma} \cdot N_j \cdot n_j \cdot k_{pjh} \cdot k_{djh} \cdot \frac{1}{h} \cdot \cos[h \cdot (\varphi - \varphi_j)] \quad (3.8)$$

Onde:

$\mu_o$  é a permeabilidade magnética do ar [Newton/Ampère<sup>2</sup>] e  $\sigma$  é o comprimento radial do entreferro [mm].

Para a obtenção do concatenamento de fluxo magnético da fase “j” na fase “i”,  $\lambda_{ijh}$ , deve-se obter o fluxo magnético produzido pela fase “j” que enlaça a fase “i”. Sendo assim, da referência [3] partindo-se da Equação 3.8, obtém-se o referido fluxo magnético e em seguida obtém-se o concatenamento  $\lambda_{ijh}$ , expresso pela Equação 3.9.

$$\lambda_{ijh} = k_1 \cdot N_i \cdot N_j \cdot i_j \cdot \frac{k_{wih} \cdot k_{wjh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi - \varphi_j)] \quad (3.9)$$

$$k_{wih} = k_{pjh} \cdot k_{dih} \quad (3.10)$$

$$k_{wjh} = k_{pjh} \cdot k_{djh} \quad (3.11)$$

$$k_1 = 4 \cdot \frac{p \cdot l \cdot R \cdot n_i \cdot n_j \cdot \mu_o}{\pi \cdot \sigma} \quad (3.12)$$

Onde:

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

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

$k_{pjh}$  e  $k_{pjh}$  – fatores de passo das fases “i” e “j”, respectivamente;

- $l$  – comprimento do cilindro rotórico;  
 $R$  – raio do entreferro;  
 $p$  – número de pólos da máquina;  
 $n_i$  e  $n_j$  – números de bobinas das fases “i” e “j”, respectivamente;

É importante observar que  $\lambda_{ijh}$  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 pela equação a seguir.

$$L_{ijh} = L_m \frac{\lambda_{ijh}}{i_j} \quad (3.13)$$

Onde:

$L_m$  – indutância mútua;

Desta forma, substituindo-se (3.9) em (3.13) tem-se:

$$L_{ijh} = L_1 \cdot N_i \cdot N_j \cdot \frac{k_{ijh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_i - \varphi_j)] \quad (3.14)$$

$$k_{ijh} = k_{wih} \cdot k_{wjh} \quad (3.15)$$

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

$$\lambda_i = \lambda_i' + \lambda_{di} \quad (3.16)$$

$$\lambda_{di} = L_{di} \cdot \dot{i}_i \quad (3.17)$$

Onde:

$L_{di}$  – indutância de dispersão da fase “i”.

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

$$L_{di} = p_{di} \cdot N_i^2 \quad (3.18)$$

Onde:

$p_{di}$  - permeância do circuito magnético de dispersão.

Segundo a referência [3], o concatenamento de fluxo  $\lambda_i'$  pode ser obtido pela superposição das componentes harmônicas de concatenamento  $\lambda_{ijh}$  de todas as fases. Desta forma pode-se escrever:

$$\lambda_i' = \sum_j \cdot \sum_h \lambda_{ijh} \quad (3.19)$$

Das Equações 3.3 e 3.19 vem:

$$\lambda_i' = \sum_j \cdot \sum_h L_{ijh} \cdot i_j \quad (3.20)$$

De (3.17), (3.18) e (3.20) obtém-se:

$$\lambda_i = L_{di} \cdot i_i + \sum_j \cdot \sum_h L_{ijh} \cdot i_j \quad (3.21)$$

Finalmente, substituindo-se (3.21) em (3.1) tem-se:

$$v_i = r_i \cdot i_i + L_{di} \cdot \frac{di_i}{dt} + \sum_h \cdot \sum_j \left[ L_{ijh} \cdot \frac{di_j}{dt} + i_j \cdot \frac{dL_{ijh}}{dt} \right] \quad (3.22)$$

### 3.3 – MODELO GENÉRICO DA MÁQUINA BIFÁSICA NO DOMÍNIO DO TEMPO

De acordo com o Item 3.1, será desenvolvido aqui um modelo dinâmico genérico, com o objetivo de analisar o comportamento de máquina bifásica simétrica e assimétrica, tendo como prioridade a avaliação da máquina de indução bifásica assimétrica com retorno. Tais motores possuem os enrolamentos das duas fases do estator idênticas, defasadas de um ângulo  $\varphi_s$  para o estator e ângulo  $\varphi_r$  para o rotor, no espaço com o rotor da máquina em gaiola de esquilo.

A modelagem descrita no Item 3.2 refere-se às fases “i” e “j” genéricas; então, a gaiola de esquilo deve ser representada por um enrolamento bifásico equivalente.

Então, a partir deste ponto as fases “i” e “j” representadas no Item 3.2 assumirão as seguintes nomenclaturas: as fases “a” e “b” representarão o enrolamento bifásico do estator e as fases “A” e “B” representarão o enrolamento bifásico do rotor em gaiola. Desta forma, os ângulos  $\varphi_i$  e  $\varphi_j$  assumem os seguintes valores.

$$\varphi_a = \varphi_{as} \quad (3.23)$$

$$\varphi_{ab} = \varphi_{ba} \quad (3.24)$$

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BA} \quad (3.25)$$

$$\varphi_{aA} = \theta_e \quad (3.26)$$

$$\varphi_{Aa} = \theta_e \quad (3.27)$$

$$\varphi_{bB} = \theta_e \quad (3.28)$$

$$\varphi_{Bb} = \theta_e \quad (3.29)$$

$$\varphi_{aB} = \varphi_{aA} + \varphi_{AB} \quad (3.30)$$

$$\varphi_{Ba} = \varphi_{bB} + \varphi_{ab} \quad (3.31)$$

$$\varphi_{bA} = \varphi_{bB} - \varphi_{AB} \quad (3.32)$$

$$\varphi_{Ab} = \varphi_{aA} - \varphi_{ab} \quad (3.33)$$

Na Figura 3.2 estão representados os esquemas de possíveis configurações, que podem ser representadas pela modelagem genérica da máquina de indução bifásica.

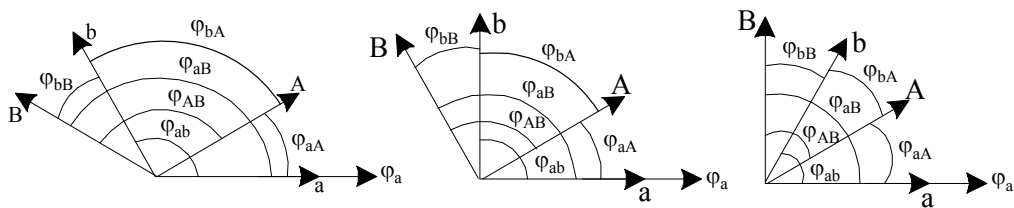


Figura 3.2 – Esquema dos eixos das fases das máquinas de indução bifásicas assimétricas.

Onde:

$\varphi_a$  – ângulo de referência da fase “a”;

$\varphi_{ab}$  e  $\varphi_{ba}$  – ângulo entre as fases “a” e “b” do estator;

$\varphi_{AB}$  e  $\varphi_{BA}$  – ângulo entre as fases “A” e “B” do rotor;

$\varphi_{aA}$  e  $\varphi_{Aa}$  – ângulo entre as fases “a” do estator e “A” do rotor;

$\varphi_{bB}$  e  $\varphi_{Bb}$  – ângulo entre as fases “b” do estator e “B” do rotor;

$\varphi_{aB}$  e  $\varphi_{Ba}$  – ângulo entre as fases “a” do estator e “B” do rotor;

$\varphi_{bA}$  e  $\varphi_{Ab}$  – ângulo entre as fases “b” do estator e “A” do rotor;

$\theta_e$  é o ângulo entre os eixos das fases do estator e rotor em graus elétricos.



### 3.3.1 – INDUTÂNCIAS HARMÔNICAS DA MÁQUINA BIFÁSICA

Com base nas Equações 3.14 e 3.18 e com os valores das Equações 3.23 a 3.33 pode-se determinar as indutâncias harmônicas e de dispersão para a máquina assimétrica (Equações 3.34 a 3.48).

$$L_{aah} = L_{aa} \cdot k_{aah} / h^2 \quad (3.34)$$

$$L_{bbh} = L_{bb} \cdot k_{bbh} / h^2 \quad (3.35)$$

$$L_{AAh} = L_{AA} \cdot k_{AAh} / h^2 \quad (3.36)$$

$$L_{BBh} = L_{BB} \cdot k_{BBh} / h^2 \quad (3.37)$$

$$L_{abh} = L_{bah} = L_{ab} \cdot \frac{k_{abh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{ab})] \quad (3.38)$$

$$L_{ABh} = L_{BAh} = L_{AB} \cdot \frac{k_{ABh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{AB})] \quad (3.39)$$

$$L_{aAh} = L_{Aah} = L_{aA} \cdot \frac{k_{aAh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{aA})] \quad (3.40)$$

$$L_{aBh} = L_{Bah} = L_{aB} \cdot \frac{k_{aBh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{aB})] \quad (3.41)$$

$$L_{bBh} = L_{Bbh} = L_{bB} \cdot \frac{k_{bBh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{bB})] \quad (3.42)$$

$$L_{bAh} = L_{Bbh} = L_{bB} \cdot \frac{k_{bBh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{bB})] \quad (3.43)$$

$$L_{da} \quad (3.44)$$

$$L_{db} \quad (3.45)$$

$$L_{dA} \quad (3.46)$$

$$L_{dB} \quad (3.47)$$

### 3.3.2 – CONCATENAMENTOS DE FLUXO MAGNÉTICO DA MÁQUINA BIFÁSICA

Obtêm-se o concatenamento de fluxo total em uma fase a partir da Equação 3.21, fazendo “i” e “j” varrer todas as fases “a”, “b”, “A” e “B”. Desta forma da Equação 3.21 e com os resultados das Equações 3.34 a 3.47 têm-se as Equações 3.48 a 3.71.

- Concatenamento de fluxo total da fase “a”:

$$\lambda_a = \lambda_{aa h} + \lambda_{ab h} + \lambda_{aA h} + \lambda_{aB h} + \lambda_{da} \quad (3.48)$$

Onde:

$$\lambda_{aa h} = L_{aa} \cdot \sum_h \frac{k_{aa h}}{h^2} \cdot i_a \quad (3.49)$$

$$\lambda_{ab h} = L_{ab} \cdot \sum_h \frac{k_{ab h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{ab})] \cdot i_b \quad (3.50)$$

$$\lambda_{aA h} = L_{aA} \cdot \sum_h \frac{k_{aA h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{aA})] \cdot i_A \quad (3.51)$$

$$\lambda_{aB h} = L_{aB} \cdot \sum_h \frac{k_{aB h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{aB})] \cdot i_B \quad (3.52)$$

$$\lambda_{da} = L_{da} \cdot i_a \quad (3.53)$$

- Concatenamento de fluxo total da fase “b”:

$$\lambda_b = \lambda_{bb h} + \lambda_{ba h} + \lambda_{bB h} + \lambda_{bA h} + \lambda_{db} \quad (3.54)$$

Onde:

$$\lambda_{bb h} = L_{bb} \cdot \sum_h \frac{k_{bb h}}{h^2} \cdot i_b \quad (3.55)$$

$$\lambda_{ba h} = L_{ba} \cdot \sum_h \frac{k_{ba h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{ba})] \cdot i_a \quad (3.56)$$

$$\lambda_{bB h} = L_{bB} \cdot \sum_h \frac{k_{bB h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{bB})] \cdot i_B \quad (3.57)$$

$$\lambda_{bA h} = L_{bA} \cdot \sum_h \frac{k_{bA h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{bA})] \cdot i_A \quad (3.58)$$

$$\lambda_{db} = L_{db} \cdot i_b \quad (3.59)$$

- Concatenamento de fluxo total da fase “A”:

$$\lambda_A = \lambda_{AA h} + \lambda_{AB h} + \lambda_{Aa h} + \lambda_{Ab h} + \lambda_{dA} \quad (3.60)$$

Onde:

$$\lambda_{AA h} = L_{AA} \cdot \sum_h \frac{k_{AA h}}{h^2} \cdot i_A \quad (3.61)$$

$$\lambda_{AB h} = L_{AB} \cdot \sum_h \frac{k_{AB h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{AB})] \cdot i_B \quad (3.62)$$

$$\lambda_{Aa h} = L_{Aa} \cdot \sum_h \frac{k_{Aa h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Aa})] \cdot i_a \quad (3.63)$$

$$\lambda_{Ab h} = L_{Ab} \cdot \sum_h \frac{k_{Ab h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Ab})] \cdot i_b \quad (3.64)$$

$$\lambda_{dA} = L_{dA} \cdot i_A \quad (3.65)$$

- Concatenamento de fluxo total da fase “B”:

$$\lambda_B = \lambda_{BB h} + \lambda_{BA h} + \lambda_{Bb h} + \lambda_{Ba h} + \lambda_{dB} \quad (3.66)$$

Onde:

$$\lambda_{BB h} = L_{BB} \cdot \sum_h \frac{k_{BB h}}{h^2} \cdot i_B \quad (3.67)$$

$$\lambda_{BAh} = L_{BA} \cdot \sum_h \frac{k_{BAh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{BA})] \cdot i_A \quad (3.68)$$

$$\lambda_{Bbh} = L_{Bb} \cdot \sum_h \frac{k_{Bbh}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Bb})] \cdot i_b \quad (3.69)$$

$$\lambda_{Ba h} = L_{Ba} \cdot \sum_h \frac{k_{Ba h}}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Ba})] \cdot i_a \quad (3.70)$$

$$\lambda_{dB} = L_{dB} \cdot i_B \quad (3.71)$$

Colocando-se as Equações 3.48 a 3.71 na forma matricial, tem-se:

$$[\lambda] = [L] \cdot [I] \quad (3.72)$$

Onde:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_A \\ \lambda_B \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$L_{11} = L_{aa} \cdot \sum_h \frac{k_{aa} h}{h^2} + L_{da} \quad (3.76)$$

$$L_{22} = L_{bb} \cdot \sum_h \frac{k_{bb} h}{h^2} + L_{db} \quad (3.77)$$

$$L_{33} = L_{AA} \cdot \sum_h \frac{k_{AA} h}{h^2} + L_{dA} \quad (3.78)$$

$$L_{44} = L_{BB} \cdot \sum_h \frac{k_{BB} h}{h^2} + L_{dB} \quad (3.79)$$

$$L_{12} = L_{ab} \cdot \sum_h \frac{k_{ab} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{ab})] \quad (3.80)$$

$$L_{21} = L_{ba} \cdot \sum_h \frac{k_{ba} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{ba})] \quad (3.81)$$

$$L_{13} = L_{aA} \cdot \sum_h \frac{k_{aA} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{aA})] \quad (3.82)$$

$$L_{31} = L_{Aa} \cdot \sum_h \frac{k_{Aa} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Aa})] \quad (3.83)$$

$$L_{14} = L_{aB} \cdot \sum_h \frac{k_{aB} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{aB})] \quad (3.84)$$

$$L_{41} = L_{Ba} \cdot \sum_h \frac{k_{Ba} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Ba})] \quad (3.85)$$

$$L_{23} = L_{bA} \cdot \sum_h \frac{k_{bA} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{bA})] \quad (3.86)$$

$$L_{32} = L_{Ab} \cdot \sum_h \frac{k_{Ab} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Ab})] \quad (3.87)$$

$$L_{24} = L_{bB} \cdot \sum_h \frac{k_{bB} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{bB})] \quad (3.88)$$

$$L_{42} = L_{Bb} \cdot \sum_h \frac{k_{Bb} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{Bb})] \quad (3.89)$$

$$L_{34} = L_{AB} \cdot \sum_h \frac{k_{AB} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{AB})] \quad (3.90)$$

$$L_{43} = L_{BA} \cdot \sum_h \frac{k_{BA} h}{h^2} \cdot \cos[h \cdot (\varphi_{BA})] \quad (3.91)$$

### 3.4 – EQUAÇÕES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DA MÁQUINA BIFÁSICA

As máquinas bifásica simétrica e assimétrica podem ser alimentadas por um sistema de tensão bifásico Fase – Fase – Neutro ou Fase – Fase – Fase, cujas tensões estão defasadas de um ângulo  $\beta$  qualquer entre si, como mostrado na Figura 3.3.

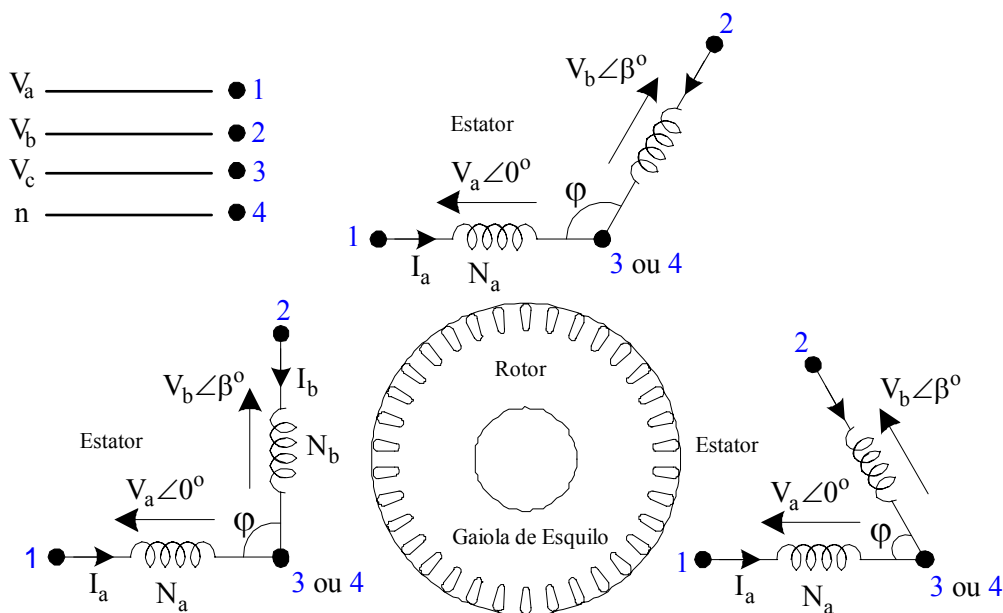


Figura 3.3 – Detalhe do sistema trifásico e algumas conexões das máquinas de indução bifásica simétrica e assimétrica (estator e rotor).

Fazendo-se uma análise completa das equações elétricas e mecânicas da máquina assimétrica, baseando-se nas equações preestabelecidas anteriormente para uma máquina de indução bifásica genérica, tem-se:

- para o estator:

$$V_a = r_a \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \tag{3.92}$$

$$V_b = r_b \cdot i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (3.93)$$

- para o rotor:

$$V_A = r_A \cdot i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad (3.94)$$

$$V_B = r_B \cdot i_B + \frac{d\lambda_B}{dt} \quad (3.95)$$

Onde:

$$V_A = V_B = 0$$

Para resolver o sistema de Equações 3.92 a 3.95 deve-se inicialmente relacionar os concatenamentos de fluxo magnéticos com as correntes. Para a máquina assimétrica, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_A \\ \lambda_B \end{bmatrix} = [L] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

Onde:

[L] - matriz de indutâncias Equação 3.78.

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

$$T_m - T_c = J \cdot \frac{d\omega_R}{dt} \quad (3.97)$$

$$\omega_R = \frac{d\theta_R}{dt} \quad (3.98)$$

O conjugado eletromagnético é dado por:

$$T_m = \frac{p}{4} \cdot [i_a \quad i_b \quad i_A \quad i_B] \cdot \left[ \frac{d[L]}{d\theta} \right] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (3.99)$$

Onde:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \cdot \theta_R \quad (3.100)$$

$p$  – número de pólos;

$\theta_R$  - deslocamento angular em graus mecânicos;

Fazendo-se a derivada da matriz de indutâncias,  $[L]$ , em relação ao ângulo  $\theta$  vem:

$$\left[ \frac{d[L]}{d\theta} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & dL_{13} & dL_{14} \\ 0 & 0 & dL_{23} & dL_{24} \\ dL_{31} & dL_{32} & 0 & 0 \\ dL_{41} & dL_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.101)$$

Onde:

$$dL_{13} = -L_{aA} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{aAh}}{h} \cdot \text{sen} [h \cdot (\theta_R)] \quad (3.102)$$



$$dL_{31} = -L_{Aa} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{Aah}}{h} \cdot \text{sen}[h \cdot (\theta_R)] \quad (3.103)$$

$$dL_{14} = -L_{aB} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{aBh}}{h} \cdot \text{sen}[h \cdot (\theta_R + \varphi_{AB})] \quad (3.104)$$

$$dL_{41} = -L_{Ba} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{Bah}}{h} \cdot \text{sen}[h \cdot (\theta_R + \varphi_{ab})] \quad (3.105)$$

$$dL_{23} = -L_{bA} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{bAh}}{h} \cdot \text{sen}[h \cdot (\theta_R - \varphi_{AB})] \quad (3.106)$$

$$dL_{32} = -L_{Ab} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{Abh}}{h} \cdot \text{sen}[h \cdot (\theta_R - \varphi_{ab})] \quad (3.107)$$

$$dL_{24} = -L_{bB} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{bBh}}{h} \cdot \text{sen}[h \cdot (\theta_R)] \quad (3.108)$$

$$dL_{42} = -L_{Bb} \cdot \frac{p}{2} \cdot \omega_r \cdot \sum_h \frac{k_{Bbh}}{h} \cdot \text{sen}[h \cdot (\theta_R)] \quad (3.109)$$

Através das Equações 3.100 e 3.101 pode-se obter:

$$T_m = -\frac{p}{2} \cdot [C_1 \cdot i_a + C_2 \cdot i_b] \quad (3.110)$$

Onde:

$$C_1 = L_{13} \cdot i_A + L_{14} \cdot i_B \quad (3.111)$$

$$C_2 = L_{23} \cdot i_A + L_{24} \cdot i_B \quad (3.112)$$

**3.5 – RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DA MÁQUINA BIFÁSICA**

Com a união das equações elétricas 3.92 a 3.95 e das equações mecânicas 3.97 a 3.112 se obtém o sistema de equações que representa o funcionamento da máquina de indução bifásica. O sistema matricial de equações é representado pela Equação 3.113.

$$\frac{d[\lambda]}{dt} = [V] - [R] \cdot [I] \quad (3.113)$$

Onde:

$$[\lambda] = [L] \cdot [I] \quad (3.114)$$

Como;

$$\frac{d[\lambda]}{dt} = \frac{d[L]}{dt} \cdot [I] + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (3.115)$$

Da Equação 3.113 vem:

$$\left[ \frac{d[I]}{dt} \right] = [L]^{-1} \left\{ [V] - \left[ \left[ R \right] + \left( \frac{d[L]}{dt} \right) \right] \cdot [I] \right\} \quad (3.116)$$

Onde:

$$[V] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{T_c}{J} \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.117)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_A \\ i_B \\ \omega_R \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.118)$$

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_A \\ \lambda_B \\ \omega_R \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.119)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_B & 0 & 0 \\ T_1 & T_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{p}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.120)$$

$$T_1 = -\frac{p \cdot C_1}{2 \cdot J} \quad (3.121)$$

$$T_2 = -\frac{p \cdot C_2}{2 \cdot J} \quad (3.122)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & 0 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & 0 & 0 \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.123)$$

$$\left[ \frac{d[L]}{dt} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & dL_{13} & dL_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dL_{23} & dL_{24} & 0 & 0 \\ dL_{31} & dL_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ dL_{41} & dL_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.124)$$

### 3.6 – CONCLUSÃO

Neste capítulo foi desenvolvido um modelo dinâmico genérico para o estudo de máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas.

Observa-se que através das Equações 3.23 a 3.33 pode-se fazer o estudo de diversas máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas, e posteriormente realizar a análise das forças magnetomotrizes resultante, em tais motores.

O modelo dinâmico, além de permitir a análise da fmm resultante em varias máquinas bifásicas, também permite o estudo do comportamento dos motores bifásicos em regime transitório e permanente.

Através do modelo podem-se realizar os seguintes estudos de:

- Tensão de alimentação;
- Correntes no estator e rotor;
- Oscilação na velocidade;
- Oscilação no torque eletromagnético;
- Fator de potência e rendimento para várias situações de carregamento em regime estático e dinâmico; e
- Outros.

A análise das forças magnetomotrizes em máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas através do modelo dinâmico apresentado neste capítulo é um dos assuntos que serão abordados no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 4

# FORÇA MAGNETOMOTRIZ EM MOTORES DE INDUÇÃO BIFÁSICOS SIMÉTRICOS E ASSIMÉTRICOS

### 4.1 – INTRODUÇÃO

Como mostrado no Capítulo 2, na prática necessita-se de um conhecimento prévio das particularidades das correntes que alimentam os motores bifásicos, para que posteriormente se efetue a análise da força magnetomotriz resultante em tais máquinas.

As análises das forças magnetomotrizes (Capítulo 2) foram realizadas utilizando a relação entre os ângulos  $\alpha$  (ângulo de defasamento entre as correntes) e  $\varphi$  (ângulo elétrico de defasamento entre os eixos dos enrolamentos de campo).

Contudo, estas análises não representam as reais condições das fmms resultantes em tais motores, principalmente em motores bifásicos com retorno.

Então, neste capítulo serão feitas as mesmas análises do Capítulo 2, mas, utilizando a relação entre os ângulos  $\beta$  (ângulo de defasamento entre as tensões) e  $\varphi$ .

Por intermédio da relação entre  $\beta$  e  $\varphi$ , serão feitas as análises das forças magnetomotrizes das máquinas de indução bifásicas simétricas, assimétricas e assimétricas com retorno. O objetivo é de se averiguar como se comportam as correntes em tais máquinas.

Pretende-se também que, através das análises das oscilações das fmms nas máquinas bifásicas com retorno, obtenham-se as melhores condições de funcionamento para tais máquinas, estas condições também serão as condições de construção dos motores.

As análises das forças magnetomotrizes serão feitas através da Equação 2.11 (Capítulo 2) para máquinas de indução bifásicas simétricas, assimétricas e assimétricas com retorno, e com o auxílio do modelo dinâmico genérico para máquinas bifásicas simétricas e assimétricas apresentado no Capítulo 3.

Utilizando-se dos conceitos apresentados no Capítulo 3 nos quais as harmônicas espaciais de campo são incorporadas no modelo dinâmico através da referência [3], onde o termo  $h$  (seqüência harmônica) pode assumir os seguintes valores, fundamental,  $6n \pm 1$  e  $3n$ . Com  $n$  podendo ser um número inteiro positivo, de acordo com a máquina de indução a ser avaliada, ou de acordo com a análise que se pretende fazer.

Analisando-se os esquemas da Figura 3.2 (Capítulo 3 - item 3.3) e relacionando-os com as Equações 3.23 a 3.33 (Item 3.3), podem-se determinar através da Equação 2.11 as forças magnetomotrizes para motores bifásicos simétricos e assimétricos.

As determinações das forças magnetomotrizes serão feitas com o auxílio do modelo dinâmico apresentado no Capítulo 3, e de acordo com as Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, e as Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.12.

Os motores bifásicos a seguir serão analisados de acordo com a relação entre  $\beta$  e  $\varphi$ , que são:

- $\beta = 90^0$  e  $\varphi = 90^0 \rightarrow$  motor bifásico simétrico;
- $\beta = 80^0$  e  $\varphi = 90^0 \rightarrow$  motor bifásico assimétrico ou monofásico;
- $\beta = 60^0$  e  $\varphi = 120^0 \rightarrow$  motor bifásico assimétrico com retorno;
- $\beta = 60^0$  e  $\varphi = 90^0 \rightarrow$  motor bifásico assimétrico com retorno;
- $\beta = 60^0$  e  $\varphi = 60^0 \rightarrow$  motor bifásico assimétrico com retorno;
- $\beta = 120^0$  e  $\varphi = 60^0 \rightarrow$  motor bifásico assimétrico com retorno;
- $\beta = 120^0$  e  $\varphi = 90^0 \rightarrow$  motor bifásico assimétrico com retorno;
- $\beta = 120^0$  e  $\varphi = 120^0 \rightarrow$  motor bifásico assimétrico com retorno.

## 4.2 – MOTORES BIFÁSICOS SIMÉTRICOS COM $\beta$ E $\varphi$ IGUAIS A $90^0$

Para a realização das análises das forças magnetomotrizes nas máquinas de indução bifásicas simétricas, assimétricas e assimétricas com retorno serão utilizados os seguintes parâmetros para as simulações, tais como:

- $r_s$  → resistência por fase do estator;
- $r_r$  → resistência por fase do rotor;
- $x_s$  → reatância por fase do estator;
- $x_r$  → reatância por fase do rotor;
- $x_m$  → reatância mutua;
- $N_{rs}$  → número de ranhuras do estator;
- $N_{rr}$  → número de ranhuras do rotor;
- $N_f$  → número de fases;
- $N_{rps}$  → número de ranhuras por pólo do estator;
- $N_{rpr}$  → número de ranhuras por pólo do rotor;
- $\delta_{rs}$  → ângulo entre ranhuras do estator;
- $\delta_{rr}$  → ângulo entre ranhuras do rotor;
- $\gamma_{rbs}$  → passo relativo da bobina do estator;
- $\gamma_{rbr}$  → passo relativo da bobina do rotor.

Os parâmetros que serão utilizados nas simulações e seus valores são mostrados na Tabela 4.1.

Se admitido, que não exista mudanças nos parâmetros por fase de um motor trifásico simétrico para um motor bifásico simétrico, os parâmetros da Tabela 4.1 podem ser usados nas simulações dos motores de indução bifásicos simétrico, assimétrico e assimétrico com retorno.

Na Tabela 4.1 estão representados os parâmetros por fase do motor de indução trifásico simétrico.

Tabela 4.1 – Parâmetros por fase do motor trifásico.

$P_n = 1,5CV$	Pólos = 4
$V_n = 220V/380V$	$W_n = 1740 \text{ rpm}$
$I_o = 1,56/2,83 \text{ [A]}$	$T_o = 0,010Kgf.m$
$I_n = 2,56/4,43 \text{ [A]}$	$T_n = 0,620Kgf.m$
$r_s$	5,3 $\Omega$
$r_r$	3,9 $\Omega$
$x_s$	5,6 $\Omega$
$x_r$	5,6 $\Omega$
$x_m$	128 $\Omega$
$N_{rs}$	24
$N_{rr}$	32
$N_f$	3
$N_{rps}$	2
$N_{rpr}$	2,667
$\delta_{rs}$	300
$\delta_{rr}$	22,50
$\gamma_{rbs}$	1
$\gamma_{rbr}$	1

A seguir será analisada a força magnetomotriz do motor bifásico simétrico apresentado no Item 2.1, cujos enrolamentos das fases “a” e “b” estão defasados de certo ângulo  $\varphi$  entre si, no espaço; e alimentados por uma fonte de tensão simétrica, cujas tensões das fases “a” e “b” estão defasadas de certo ângulo  $\beta$ . Para a análise desse motor os ângulos  $\beta$  e  $\varphi$  são iguais a  $90^0$ .

Na Figura 4.1 estão representadas duas configurações para a máquina de indução bifásica simétrica. Na Figura 4.1a está representado um motor bifásico com o estator totalmente preenchido com os enrolamentos das fases “a” e “b”, concêntricos e de camada única e na Figura 4.1b está representado um motor bifásico com 2/3 do estator preenchido, com os enrolamentos das fases “a” e “b”, concêntricos e de camada única.

Os motores representados na Figura 4.1 estão com as bobinas do estator defasadas uma da outra de  $90^0$  elétricos no espaço.



Na Figura 4.2 e na Tabela 4.2 estão representados os fatores de enrolamento normalizados de ordem harmônicas  $k_{wh}$  de seqüência fundamental,  $6n \pm 1$  e  $3n$ , com  $n$  variando de 1 até 9, inteiro positivo, para os motores bifásicos (Figura 4.1).

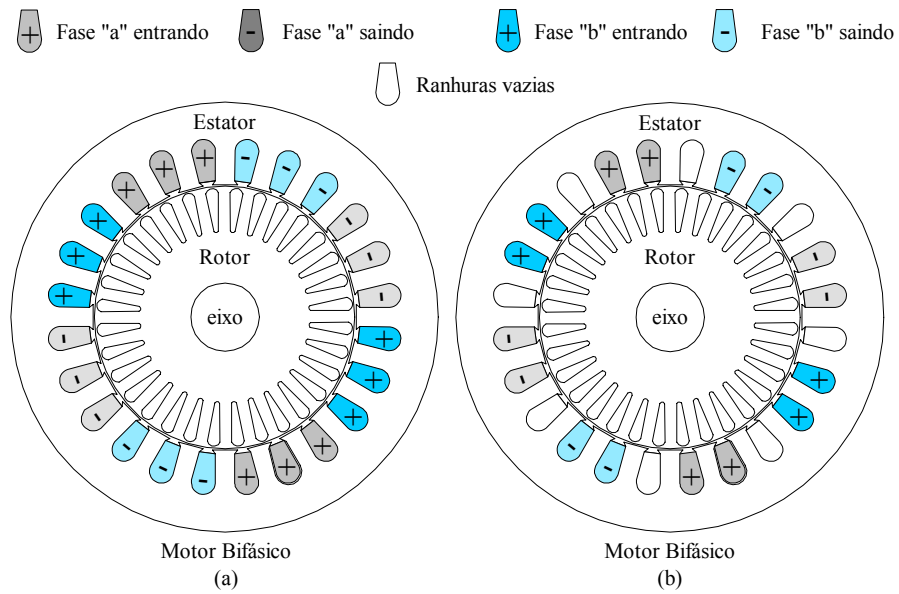


Figura 4.1– Motores de indução bifásicos.

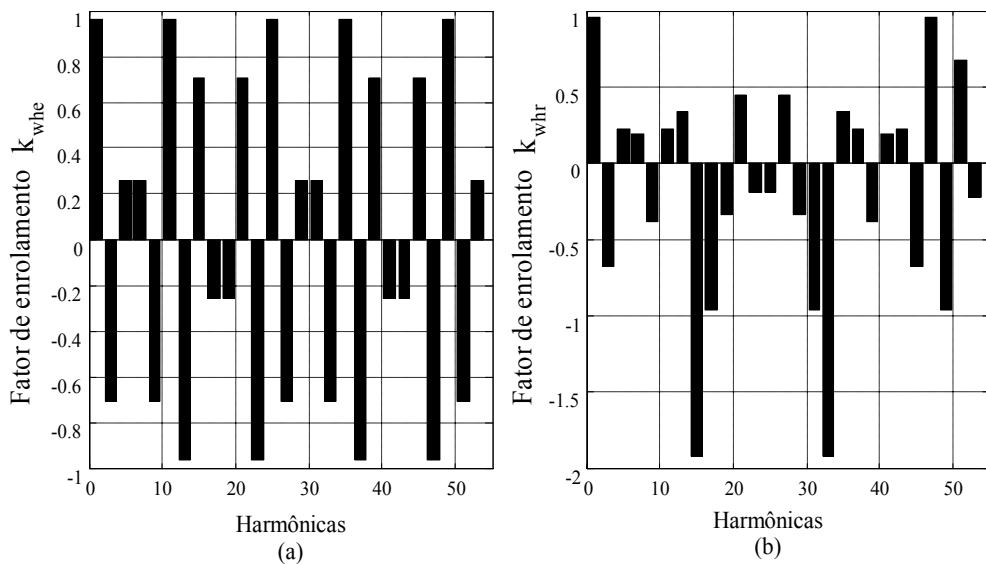


Figura 4.2 – Fatores de enrolamento para os motores bifásicos da Figura 4.1.

Na Figura 4.2a estão representados os fatores  $k_{whe}$  (fatores de enrolamento normalizados de ordem harmônicas do estator) e na Figura 4.2b

estão representados os fatores  $k_{whr}$  (fatores de enrolamento normalizados de ordem harmônicas do rotor). Os fatores de enrolamento foram calculados através das Equações 3.6, 3.7, 3.10 e 3.11.

Tabela 4.2 – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{wh}$ .

$k_{wh}$	$k_{whe}$	$k_{whr}$
$k_{wh1}$	0,96593	0,96109
$k_{wh3}$	-0,70711	-0,67498
$k_{wh5}$	0,25882	0,22550
$k_{wh7}$	0,25882	0,19117
$k_{wh9}$	-0,70711	-0,38235
$k_{wh11}$	0,96593	0,22550
$k_{wh13}$	-0,96593	0,33749
$k_{wh15}$	0,70711	-0,19222
$k_{wh17}$	-0,25882	-0,96109
$k_{wh19}$	-0,25882	-0,33749
$k_{wh21}$	0,70711	0,45101
$k_{wh23}$	-0,96593	-0,19117
$k_{wh25}$	0,96593	-0,19117
$k_{wh27}$	-0,70711	0,45101
$k_{wh29}$	0,25882	-0,33749
$k_{wh31}$	0,25882	-0,96109
$k_{wh33}$	-0,70711	-0,19222
$k_{wh35}$	0,96593	0,33749
$k_{wh37}$	-0,96593	0,22550
$k_{wh39}$	0,70711	-0,38235
$k_{wh41}$	-0,25882	0,19117
$k_{wh43}$	-0,25882	0,22550
$k_{wh45}$	0,70711	-0,67498
$k_{wh47}$	-0,96593	0,96109
$k_{wh49}$	0,96593	-0,96109
$k_{wh51}$	-0,70711	0,67498
$k_{wh53}$	0,25882	-0,22550

Amplamente conhecida na literatura as harmônicas de seqüência  $3n$  não prejudicam as máquinas de indução trifásicas, uma vez que, as harmônicas  $3n$  se anulam por causa da ligação trifásica. Entretanto em máquinas de indução bifásicas as harmônicas  $3n$  estão presentes, e trazem uma constante preocupação, pois neste caso, as harmônicas não se anulam através da ligação

bifásica. Contudo, as harmônicas de seqüência  $3n$  podem ser amenizadas ou até anuladas, através da alteração no fator de passo e distribuição dos enrolamentos dos motores bifásicos.

Na Tabela 4.3 estão representados os dados de configuração para o motor bifásico simétrico e assimétrico a ser simulado conforme mostrado na Figura 4.1 e conceitos apresentados no Capítulo 3. O tempo de simulação é de 0,0s(inicial) a 2,4s(final). Os parâmetros da Tabela 4.3 não sofreram modificações durante todo o tempo de simulação.

Na Tabela 4.4 estão representados os parâmetros do motor bifásico que sofreram mudanças ao longo do tempo da simulação conforme a Tabela 4.1. Durante a simulação alguns parâmetros, tais como:  $N_f$ ,  $\gamma_{rbs}$  e  $h$  na Tabela 4.1 sofreram modificações, isto pode ser visto na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Parâmetros de simulação do motor bifásico.

Tempo	0,0s até 2,4s
$\beta$	$90^\circ$
$\varphi$	$90^\circ$
$\varphi_{as}$	$0^\circ$
$\varphi_{ab}$	$90^\circ$
$\varphi_{AB}$	$90^\circ$
$\varphi_{aA}$	$\theta_e$
$\varphi_{bB}$	$\theta_e$
$\varphi_{aB}$	$\varphi_{aA} + \varphi_{AB}$
$\varphi_{bA}$	$\varphi_{bB} - \varphi_{AB}$

Tabela 4.4 – Parâmetros de simulação que variam ao longo do tempo.

Tempo	$N_f$	$p_{rbs}$	$h$
0,0s – 0,2s	3	1	1
0,2s – 0,4s	3	1	$6n \pm 1$
0,4s – 0,6s	3	1	$3n$ e $6n \pm 1$
0,6s – 0,8s	2	1	$6n \pm 1$
0,8s – 1,0s	2	1	$3n$ e $6n \pm 1$
1,0s – 1,2s	2	0,833	$6n \pm 1$
1,2s – 1,6s	2	0,833	$3n$ e $6n \pm 1$
1,6s – 2,0s	2	0,666	$6n \pm 1$
2,0s – 2,4s	2	0,666	$3n$ e $6n \pm 1$

Na Figura 4.3 e Tabela 4.5 estão representados os fatores de enrolamento normalizados de ordem harmônica  $k_{whe}$  de seqüência fundamental,  $3n$  e  $6n \pm 1$ , com  $n$  variando de 1 até 9, inteiro positivo, para os motores bifásicos.

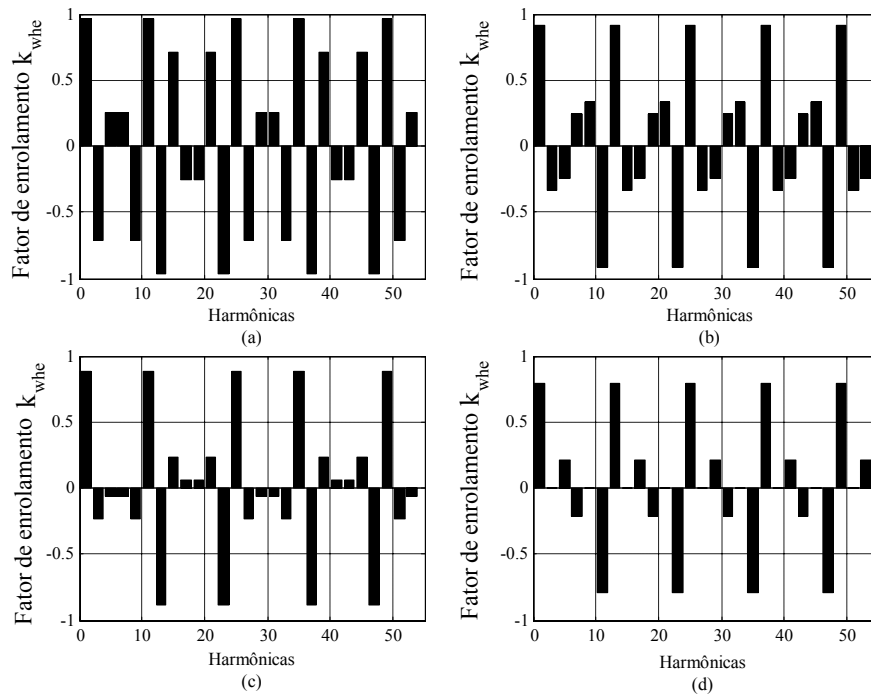


Figura 4.3 – Fatores de enrolamento do estator para os motores bifásicos da Figura 4.1.

Na Figura 4.3a e na Tabela 4.5a estão representados os fatores  $k_{whe}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1b. Na Figura 4.3a e na Tabela 4.5a os fatores  $k_{whe}$  são determinados com o  $N_f$  igual a 3 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 1.

Na Figura 4.3b e na Tabela 4.5b estão representados os fatores  $k_{whe}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1a. Na Figura 4.3b e na Tabela 4.5b os fatores  $k_{whe}$  são determinados com o  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 1.

Na Figura 4.3c e na Tabela 4.5c estão representados os fatores  $k_{whe}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1a. Na

Figura 4.3c e na Tabela 4.5c os fatores  $k_{whe}$  são determinados com  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 0,833.

Na Figura 4.3d e na Tabela 4.5d estão representados os fatores  $k_{whe}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1a. Na Figura 4.3d e na Tabela 4.5d os  $k_{whe}$  são determinados com  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 0,666.

Tabela 4.5 – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{whe}$ .

$k_{whe}$	(a)	(b)	(c)	(d)
$k_{wh1}$	0,96593	0,91068	0,87965	0,78868
$k_{wh3}$	-0,70711	-0,33333	-0,23570	0,00000
$k_{wh5}$	0,25882	-0,24402	-0,063156	0,21132
$k_{wh7}$	0,25882	0,24402	-0,063156	-0,21132
$k_{wh9}$	-0,70711	0,33333	-0,23570	0,00000
$k_{wh11}$	0,96593	-0,91068	0,87965	-0,78868
$k_{wh13}$	-0,96593	0,91068	-0,87965	0,78868
$k_{wh15}$	0,70711	-0,33333	0,23570	0,00000
$k_{wh17}$	-0,25882	-0,24402	0,063156	0,21132
$k_{wh19}$	-0,25882	0,24402	0,063156	-0,21132
$k_{wh21}$	0,70711	0,33333	0,23570	0,00000
$k_{wh23}$	-0,96593	-0,91068	-0,87965	-0,78868
$k_{wh25}$	0,96593	0,91068	0,87965	0,78868
$k_{wh27}$	-0,70711	-0,33333	-0,23570	0,00000
$k_{wh29}$	0,25882	-0,24402	-0,063156	0,21132
$k_{wh31}$	0,25882	0,24402	-0,063156	-0,21132
$k_{wh33}$	-0,70711	0,33333	-0,23570	0,00000
$k_{wh35}$	0,96593	-0,91068	0,87965	-0,78868
$k_{wh37}$	-0,96593	0,91068	-0,87965	0,78868
$k_{wh39}$	0,70711	-0,33333	0,23570	0,00000
$k_{wh41}$	-0,25882	-0,24402	0,063156	0,21132
$k_{wh43}$	-0,25882	0,24402	0,063156	-0,21132
$k_{wh45}$	0,70711	0,33333	0,23570	0,00000
$k_{wh47}$	-0,96593	-0,91068	-0,87965	-0,78868
$k_{wh49}$	0,96593	0,91068	0,87965	0,78868
$k_{wh51}$	-0,70711	-0,33333	-0,23570	0,00000
$k_{wh53}$	0,25882	-0,24402	-0,063156	0,21132

Na Figura 4.4 e Tabela 4.6 estão representados os fatores de enrolamento normalizados de ordem harmônica  $k_{whr}$  de seqüência fundamental,

$3n$  e  $6n \pm 1$ , com  $n$  variando de 1 até 9, inteiro positivo, para os motores bifásicos.

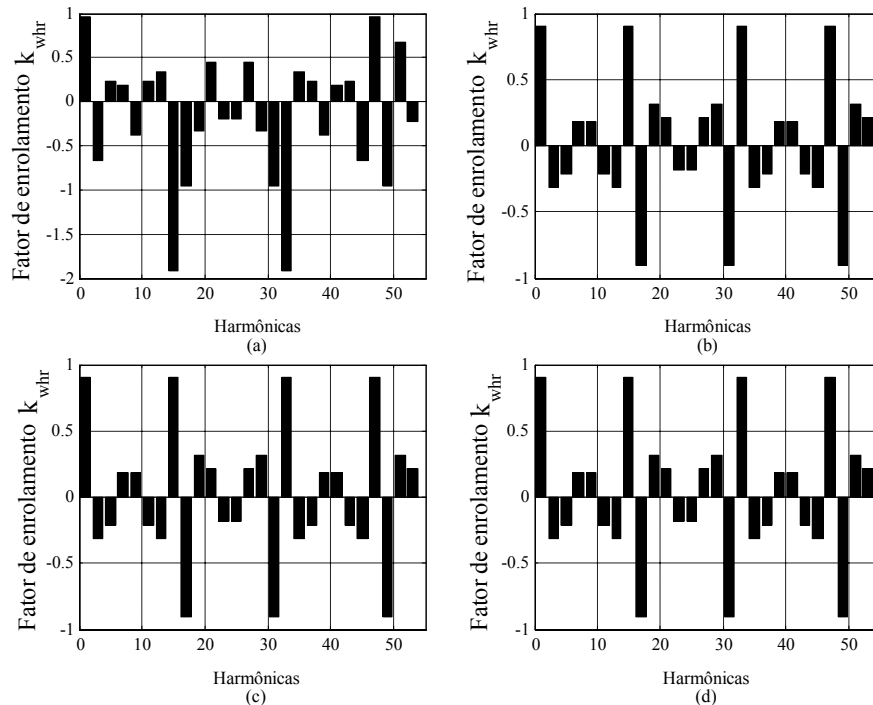


Figura 4.4 – Fatores de enrolamento do rotor para os motores bifásicos da Figura 4.1.

Na Figura 4.4a e na Tabela 4.6a estão representados os fatores  $k_{w_{hr}}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1b. Na Figura 4.4a e na Tabela 4.6a os fatores  $k_{w_{hr}}$  são determinados com o  $N_f$  igual a 3 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 1.

Na Figura 4.4b e na Tabela 4.6b estão representados os fatores  $k_{w_{hr}}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1a. Na Figura 4.4b e na Tabela 4.6b os fatores  $k_{w_{hr}}$  são determinados com o  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 1.

Na Figura 4.4c e na Tabela 4.6c estão representados os fatores  $k_{w_{hr}}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1a. Na Figura 4.4c e na Tabela 4.6c os fatores  $k_{w_{hr}}$  são determinados com  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 0,833.

Na Figura 4.4d e na Tabela 4.6d estão representados os fatores  $k_{whr}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Figura 4.1a. Na Figura 4.4d e na Tabela 4.6d os  $k_{whr}$  são determinados com  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 0,666.

Tabela 4.6 – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{whr}$ .

$k_{whr}$	(a)	(b)	(c)	(d)
$k_{wh1}$	0,96109	0,90613	0,90613	0,90613
$k_{wh3}$	-0,67498	-0,31819	-0,31819	-0,31819
$k_{wh5}$	0,22550	-0,21261	-0,21261	-0,21261
$k_{wh7}$	0,19117	0,18024	0,18024	0,18024
$k_{wh9}$	-0,38235	0,18024	0,18024	0,18024
$k_{wh11}$	0,22550	-0,21261	-0,21261	-0,21261
$k_{wh13}$	0,33749	-0,31819	-0,31819	-0,31819
$k_{wh15}$	-0,19222	0,90613	0,90613	0,90613
$k_{wh17}$	-0,96109	-0,90613	-0,90613	-0,90613
$k_{wh19}$	-0,33749	0,31819	0,31819	0,31819
$k_{wh21}$	0,45101	0,21261	0,21261	0,21261
$k_{wh23}$	-0,19117	-0,18024	-0,18024	-0,18024
$k_{wh25}$	-0,19117	-0,18024	-0,18024	-0,18024
$k_{wh27}$	0,45101	0,21261	0,21261	0,21261
$k_{wh29}$	-0,33749	0,31819	0,31819	0,31819
$k_{wh31}$	-0,96109	-0,90613	-0,90613	-0,90613
$k_{wh33}$	-0,19222	0,90613	0,90613	0,90613
$k_{wh35}$	0,33749	-0,31819	-0,31819	-0,31819
$k_{wh37}$	0,22550	-0,21261	-0,21261	-0,21261
$k_{wh39}$	-0,38235	0,18024	0,18024	0,18024
$k_{wh41}$	0,19117	0,18024	0,18024	0,18024
$k_{wh43}$	0,22550	-0,21261	-0,21261	-0,21261
$k_{wh45}$	-0,67498	-0,31819	-0,31819	-0,31819
$k_{wh47}$	0,96109	0,90613	0,90613	0,90613
$k_{wh49}$	-0,96109	-0,90613	-0,90613	-0,90613
$k_{wh51}$	0,67498	0,31819	0,31819	0,31819
$k_{wh53}$	-0,22550	0,21261	0,21261	0,21261

Na Figura 4.5 e Tabela 4.7 estão representados os fatores de enrolamento de ordem harmônica  $k_{wher}$  de seqüência fundamental,  $3n$  e  $6n \pm 1$ , com  $n$  variando de 1 até 9, inteiro positivo, para os motores bifásicos. Os

fatores de enrolamento  $k_{w\text{her}}$  entre estator e rotor são calculados através das Equações 3.10 e 3.11.

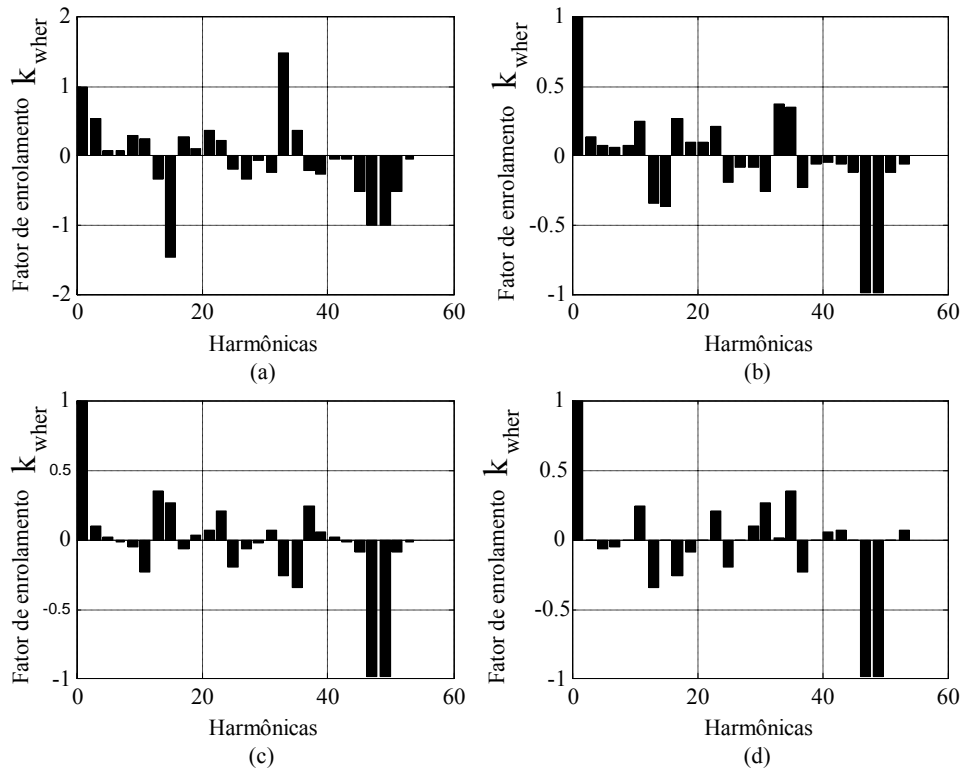


Figura 4.5 – Fatores de enrolamento entre estator e rotor para os motores bifásicos da Figura 4.1.

Na Figura 4.5a e na Tabela 4.7a estão representados os fatores  $k_{w\text{her}}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Figura 4.1b. Na Figura 4.5a e na Tabela 4.7a os fatores  $k_{w\text{her}}$  são determinados com o  $N_f$  igual a 3 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 1.

Na Figura 4.5b e na Tabela 4.7b estão representados os fatores  $k_{w\text{her}}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Figura 4.1a. Na Figura 4.5b e na Tabela 4.7b os fatores  $k_{w\text{her}}$  são determinados com o  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 1.

Na Figura 4.5c e na Tabela 4.7c estão representados os fatores  $k_{w\text{her}}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Figura 4.1a. Na Figura 4.5c e na Tabela 4.7c os fatores  $k_{w\text{her}}$  são determinados com  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 0,833.



Na Figura 4.5d e na Tabela 4.7d estão representados os fatores  $k_{wher}$  de acordo com a Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Figura 4.1a. Na Figura 4.5d e na Tabela 4.7d os  $k_{wher}$  são determinados com  $N_f$  igual a 2 e o  $\gamma_{rbs}$  igual a 0,666.

Tabela 4.7 – Fatores normalizados de ordem harmônica  $k_{wher}$ .

$k_{wher}$	(a)	(b)	(c)	(d)
$k_{wh1}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$k_{wh3}$	0,5141	0,1285	0,0941	0,0000
$k_{wh5}$	0,0629	0,0629	0,0168	-0,0629
$k_{wh7}$	0,0533	0,0533	-0,0143	-0,0533
$k_{wh9}$	0,2912	0,0728	-0,0533	0,0000
$k_{wh11}$	0,2346	0,2346	-0,2346	0,2346
$k_{wh13}$	-0,3512	-0,3512	0,3512	-0,3512
$k_{wh15}$	-1,4641	-0,3660	0,2679	0,0000
$k_{wh17}$	0,2679	0,2679	-0,0718	-0,2679
$k_{wh19}$	0,0941	0,0941	0,0252	-0,0941
$k_{wh21}$	0,3435	0,0859	0,0629	0,0000
$k_{wh23}$	0,1989	0,1989	0,1989	0,1989
$k_{wh25}$	-0,1989	-0,1989	-0,1989	-0,1989
$k_{wh27}$	-0,3435	-0,0859	-0,0629	0,0000
$k_{wh29}$	-0,0941	-0,0941	-0,0252	0,0941
$k_{wh31}$	-0,2679	-0,2679	0,0718	0,2679
$k_{wh33}$	1,4641	0,3660	-0,2679	0,0000
$k_{wh35}$	0,3512	0,3512	-0,3512	0,3512
$k_{wh37}$	-0,2346	-0,2346	0,2346	-0,2346
$k_{wh39}$	-0,2912	-0,0728	0,0533	0,0000
$k_{wh41}$	-0,0533	-0,0533	0,0143	0,0533
$k_{wh43}$	-0,0629	-0,0629	-0,0168	0,0629
$k_{wh45}$	-0,5141	-0,1285	-0,0941	0,0000
$k_{wh47}$	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000
$k_{wh49}$	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000
$k_{wh51}$	-0,5141	-0,1285	-0,0941	0,0000
$k_{wh53}$	-0,0629	-0,0629	-0,0168	0,0629

Nas Figuras 4.6 e nas Figuras 4.7 estão representados os gráficos das correntes na fase “a” e na fase “b” do estator e da força magnetomotriz do motor bifásico simétrico e assimétrico ao longo do tempo, respectivamente de acordo com a Tabela 4.7.

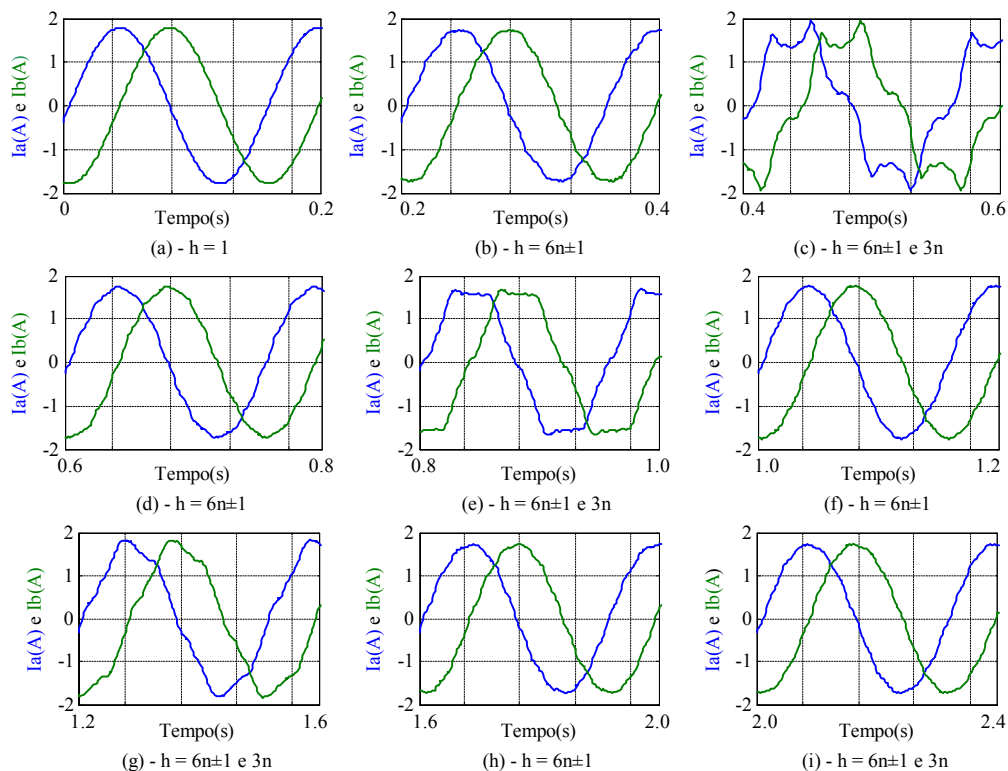


Figura 4.6 – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico.

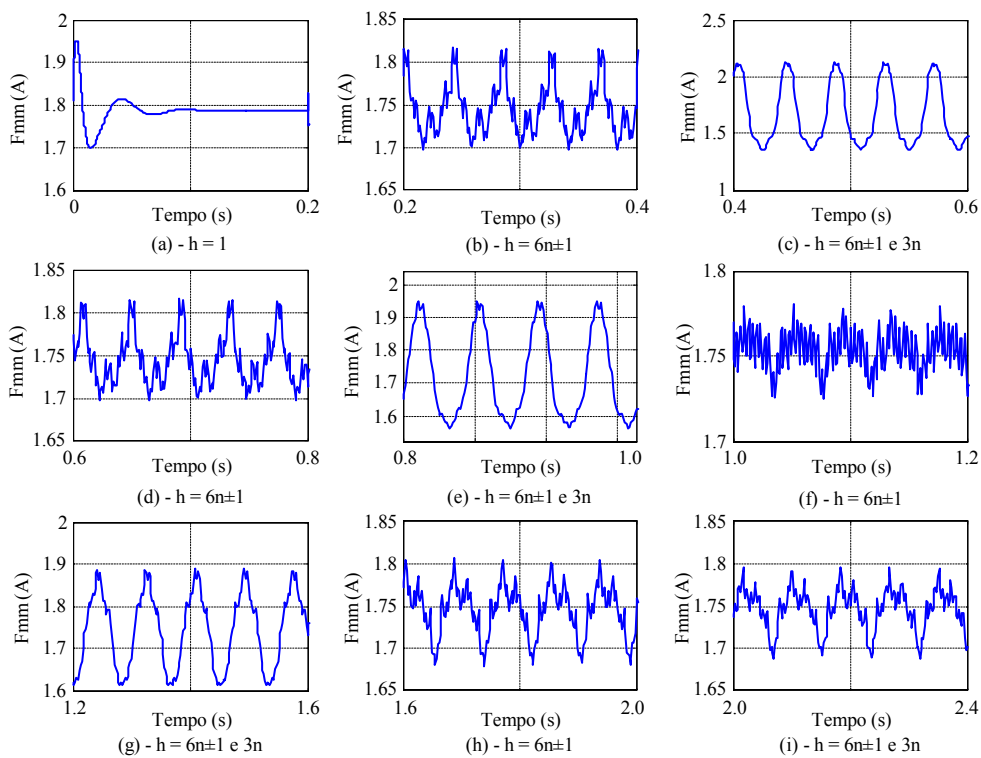


Figura 4.7 – Força magnetomotriz do motor bifásico.

Analisando o motor bifásico simétrico de acordo com as Figuras 4.6 e 4.7 no intervalo de tempo de:

- 0,0s a 0,2s → a presença da fundamental ( $h = 1$ ), não causa distorções na corrente e com isso não provoca oscilações na fmm do motor bifásico (Figura 4.6a e Figura 4.7a);
- 0,2s a 0,4s → a presença das harmônicas de seqüência  $6n \pm 1$  não provoca aumento na amplitude da corrente, mas, causa distorções nas ondas de corrente do estator (Figura 4.6b), com isso, provoca oscilações medias na força magnetomotriz do motor bifásico (Figura 4.7b);
- 0,4s a 0,6s → a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  provoca um pequeno aumento na amplitude da corrente, mas, não causa grandes mudanças na formas de ondas de corrente do estator (Figura 4.6c), com isso, provoca oscilações elevadas na força magnetomotriz do motor bifásico (Figura 4.7c);
- 0,6s a 0,8s → neste intervalo a análise é idêntica ao intervalo de tempo 0,2s a 0,4s, uma vez que não houve mudanças nos fatores de ordem harmônica da seqüência  $6n \pm 1$  (Tabela 4.7a e 4.7b);
- 0,8s a 1,0s → a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  não provoca mais aumento na amplitude da corrente, mas continuam causando distorções nas ondas de corrente do estator, contudo as distorções são bem menores (Figura 4.6e), isto é resultado da diminuição dos fatores de enrolamento de seqüência  $3n$  da Tabela 4.7a, que diminuíram 75% para a Tabela 4.7b. E com isso, resulta numa menor oscilação na força magnetomotriz do motor bifásico (Figura 4.7e);
- 1,0s a 1,2s → a presença das harmônicas de seqüência  $6n \pm 1$  não provoca aumento na amplitude da corrente, mas, causa distorções nas ondas de corrente do estator (Figura 4.6f), com isso, provoca oscilações pequenas na força

magnetomotriz do motor bifásico (Figura 4.7f), contudo, estas oscilações são menores que as anteriores, isto é devido à mudança nos fatores de enrolamento da seqüência  $6n\pm 1$ , que diminuíram da Tabela 4.7b para a Tabela 4.7c;

- 1,2s a 1,6s → a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  não provoca mais aumento na amplitude da corrente, mas continua causando uma distorção nas ondas de corrente do estator (Figura 4.6g). Isto é resultado da diminuição dos fatores de enrolamento de seqüência  $3n$  da Tabela 4.7b para a Tabela 4.7c, com isso, causa uma menor oscilação na força magnetomotriz do motor bifásico (Figura 4.7g). Enquanto que, as harmônicas de seqüência  $6n\pm 1$  provocam uma pequena distorção nas ondas de corrente do estator (Figura 4.6f) e causaram uma oscilação bem menor na fmm (Figura 4.7f) do que as provocadas pelas de seqüência  $3n$ ;

- 1,6s a 2,0s → a presença das harmônicas de seqüência  $6n\pm 1$  não provoca aumento na amplitude da corrente, mas, causa distorções nas ondas de corrente do estator (Figura 4.6h), com isso, provoca oscilações medias na força magnetomotriz do motor bifásico (Figura 4.7h), nota-se que, estas oscilações são maiores que as do intervalo de tempo 1,0s a 1,2s, isto é devido à mudança nos fatores de enrolamento da seqüência  $6n\pm 1$ , que são idênticos (Tabela 4.7a para a Tabela 4.7d), mas, com sinais trocados;

- 2,0s a 2,4s → a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  não provoca mais aumento na amplitude da corrente e não causam distorção nas correntes (Figura 4.6i), isto é, devido à completa anulação dos fatores de enrolamento de seqüência  $3n$  da Tabela 4.7c para a Tabela 4.7d, com isso, não provocam oscilação na fmm do motor bifásico (Figura 4.7i).

Observa-se que, os resultados da fmm (Figura 4.7a) para o motor bifásico simétrico podem ser estendidos para um motor de indução trifásico, bastando, para isto, multiplicar seu valor por 1,5.

**4.2.1 – MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM  $\beta$  E  $\varphi$  IGUAIS A  $90^\circ$** 

Neste item, será analisada a força magnetomotriz do mesmo motor bifásico do Item 4.2, mas, com uma diferença, que é o valor da tensão eficaz da fase “b”, que teve uma diminuição de 220V para 200V (Tabela 4.1). A análise desse motor será feita a partir das Tabelas 4.1 a 4.7; e das Figuras 4.1 e 4.2 utilizadas no Item 4.2. Com a mudança na tensão da fase “b” a fonte de alimentação deixa de ser simétrica, com isso o motor mesmo sendo simétrico, passa a se comportar com motor bifásico assimétrico.

Nas Figuras 4.8 e nas 4.9 estão representados os gráficos das correntes no estator das fases “a” e “b” e da força magnetomotriz do motor bifásico ao longo do tempo, de acordo com a Tabela 4.1 a 4.7, e Figuras 4.1 a 4.5.

Analisando os intervalos de tempo nas Figuras 4.8 e 4.9, observa-se que, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$  não provocam grandes mudanças na corrente se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto na Figura 4.8c, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa fortes distorções nas ondas de corrente do estator; E na Figura 4.9, observa-se que, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$ , não provocam grandes mudanças na fmm se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto na Figura 4.9c, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa fortes distorções na onda da fmm.

Observa-se que, a mudança da fonte de alimentação do motor bifásico simétrico, devido à alteração no valor da tensão eficaz da fase “b”, provoca uma diferença na amplitude da corrente da fase “b”, com isso, o motor bifásico simétrico que possuía força magnetomotriz constante em  $h$  igual a 1 no Item 4.2 (Figura 4.7a), passou a ter fmm não constante no Item 4.2.1 (Figura 4.9a), caracterizando um motor de indução bifásico assimétrico.

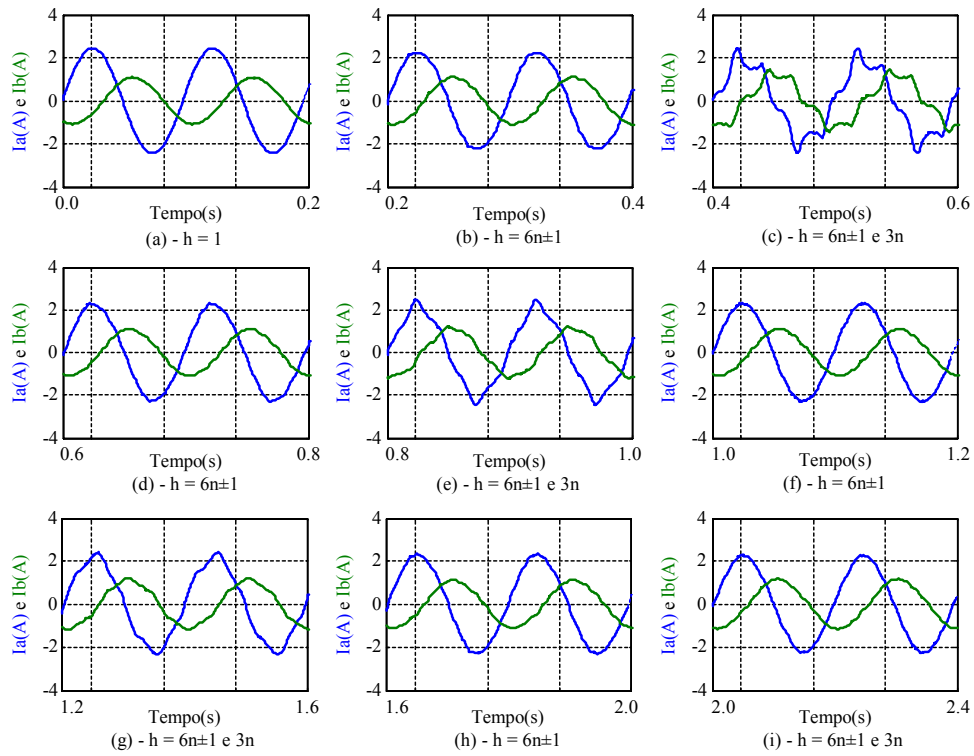


Figura 4.8 - Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico.

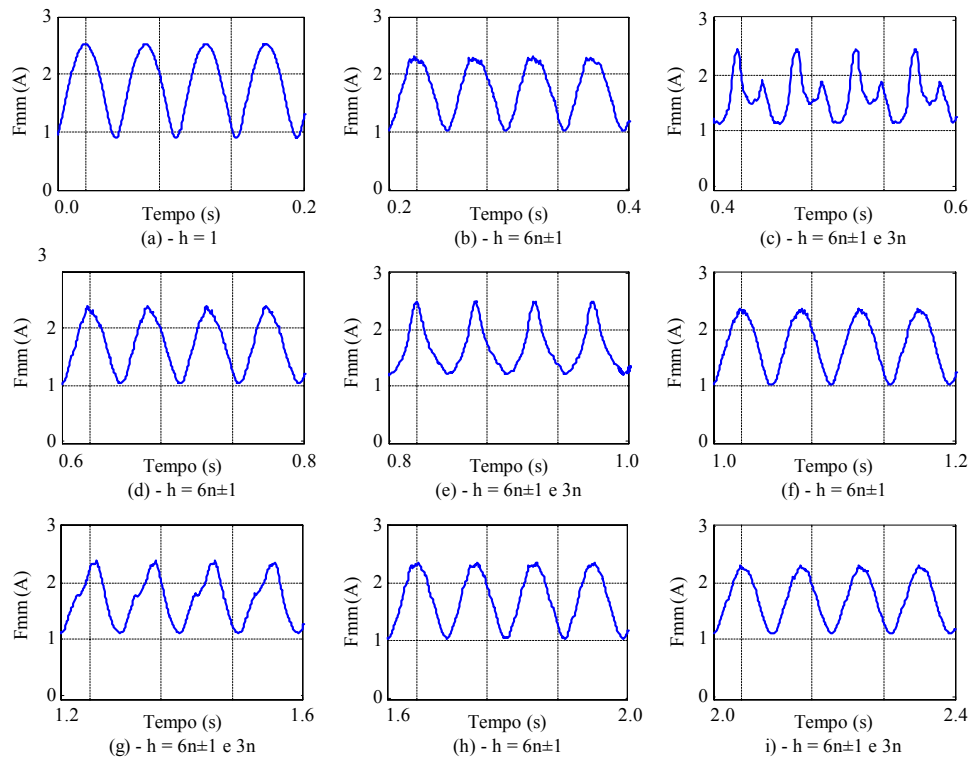


Figura 4.9 – Força magnetomotriz do motor bifásico.

**4.2.2 – MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM  $\beta$  IGUAL A  $80^0$  E  $\varphi$  IGUAL A  $90^0$** 

Neste item, será analisada a força magnetomotriz do mesmo motor bifásico assimétrico do Item 4.2.1, mas, com uma diferença, que é o ângulo de defasamento  $\beta$  entre as tensões, que passou de  $90^0$  para  $80^0$ . A análise desse motor será feita a partir das Tabelas 4.1 a 4.7; e das Figuras 4.1 a 4.5, utilizadas no Item 4.2.

Nas Figuras 4.10 e nas 4.11 estão representados os gráficos das correntes no estator das fases “a” e “b” e da força magnetomotriz do motor bifásico ao longo do tempo.

Analisando os intervalos de tempo nas Figuras 4.10 e 4.11, observa-se que, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$  não provocam grandes mudanças na corrente se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto na Figura 4.10c, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa distorções na onda de corrente do estator; E na Figura 4.11 observa-se que, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$ , não provocam grandes mudanças na força magnetomotriz se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto na Figura 4.11c, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa distorções na onda da fmm.

Observa-se que, a mudança do ângulo  $\beta$  da tensão de alimentação, de  $90^0$  para  $80^0$ , faz com que, a força magnetomotriz do motor bifásico assimétrico do Item 4.2.2 (Figura 4.11a) oscile mais, do que a do Item 4.2.1 (Figura 4.9a). As mudanças nos fatores de enrolamento não causam grandes mudanças na forma de onda da força magnetomotriz do motor bifásico

Nos itens anteriores, foram realizadas análises nas forças magnetomotrizes em motores bifásicos simétricos e assimétricos. Nos próximos itens, serão analisados os motores assimétricos com retorno pelo neutro ou pela fase e que são alimentados por uma fonte de tensão bifásica simétrica, provida da rede de distribuição.

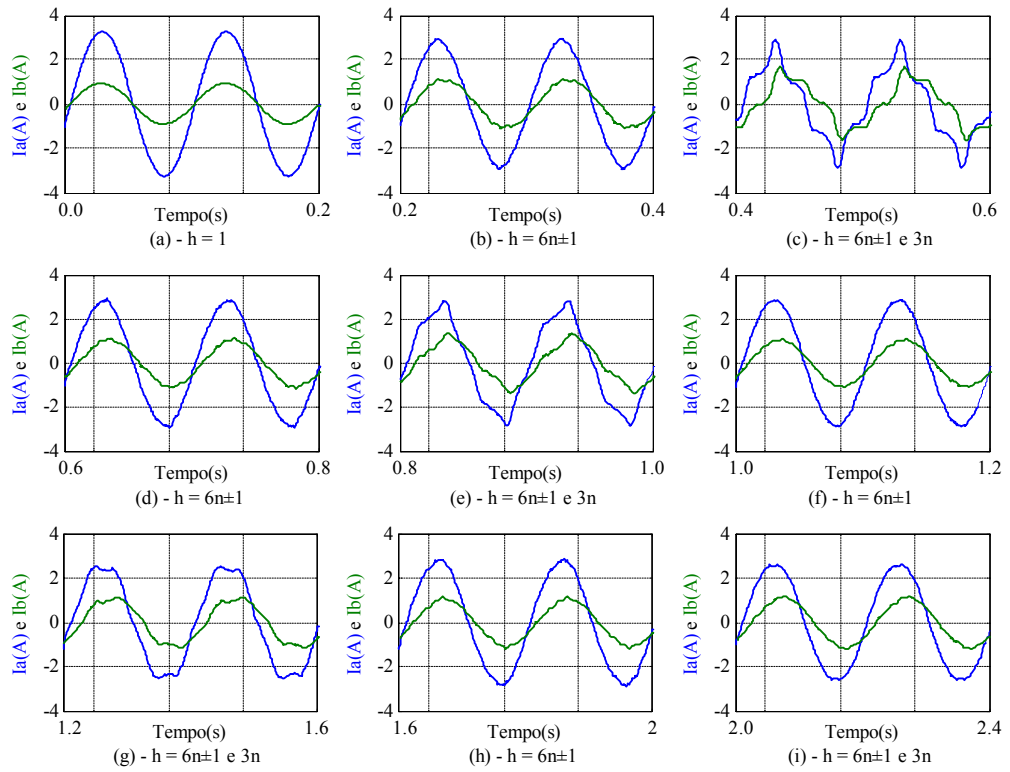


Figura 4.10 – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico.

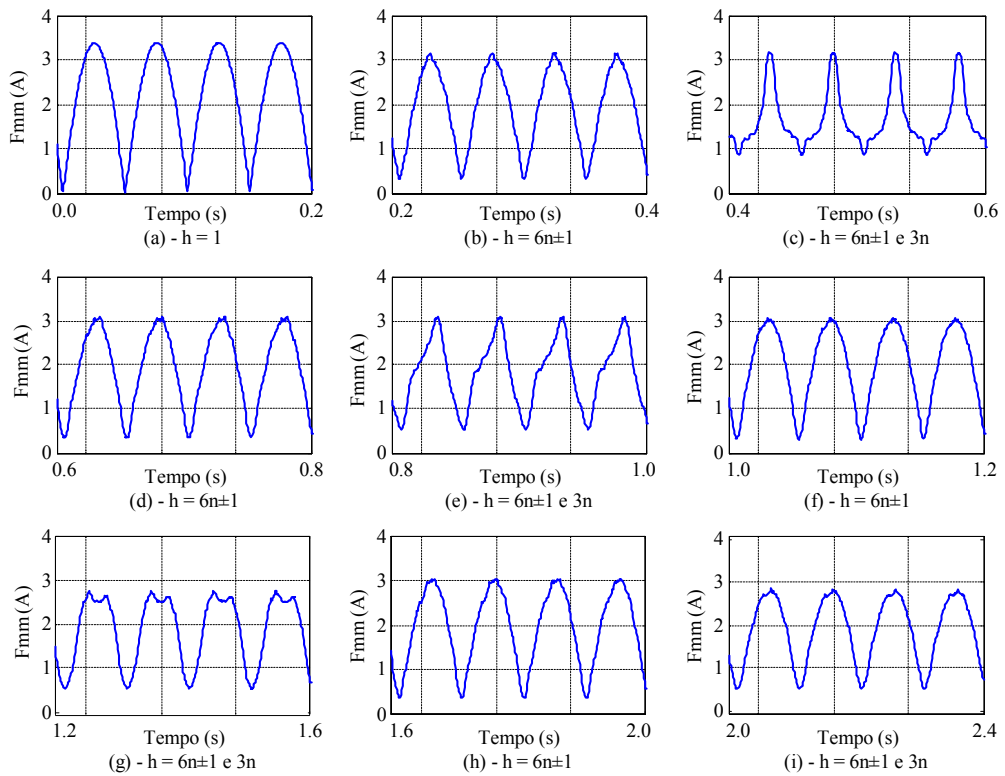


Figura 4.11 – Força magnetomotriz do motor bifásico.



### 4.3 – MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM $\beta$ IGUAL A $60^\circ$ E $\varphi$ IGUAL A $60^\circ, 90^\circ$ E $120^\circ$ COM RETORNO

Neste item, serão analisadas as forças magnetomotrices das máquinas de indução bifásicas assimétricas com retorno, alimentadas por uma fonte de tensão bifásica simétrica, cujas tensões estão defasadas, uma da outra, de  $60^\circ$ , no tempo. Os motores de indução assimétricos com retorno possuem os enrolamentos das fases “a” e “b” idênticos e defasados de certo ângulo  $\varphi$  elétrico no espaço, entre si. O objetivo principal dessa análise é de averiguar como estariam as correntes nos enrolamentos das máquinas de indução assimétrica com retorno, frente a uma alimentação bifásica, e com isso avaliar o grau de oscilação das forças magnetomotrices e compará-las.

Na Figura 4.12 estão representadas três configurações possíveis para a máquina de indução bifásica assimétrica com retorno.

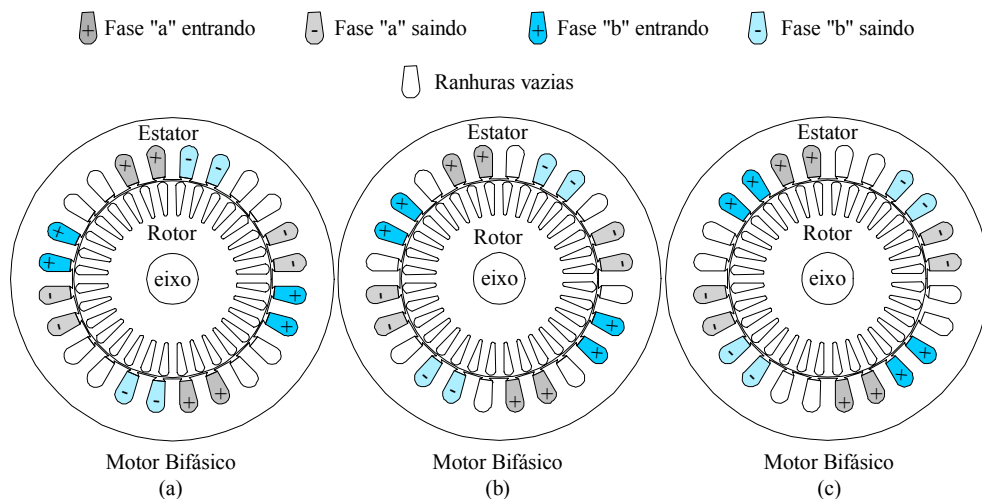


Figura 4.12 – Motores de indução bifásicos assimétricos com retorno.

Todos os motores bifásicos assimétricos com retorno representados na Figura 4.12 estão com apenas 2/3 do estator preenchido pelos enrolamentos das fases “a” e “b”, concêntricos e de camada única, isto é devido ao ângulo  $\varphi$  de

defasagem entre os enrolamentos, que se pretende conseguir para cada máquina a ser analisada.

Na Figura 4.12a está representado o motor bifásico assimétrico com o ângulo  $\varphi$  igual a  $120^0$  elétricos no espaço; Na Figura 4.12b está representado o motor bifásico assimétrico com ângulo  $\varphi$  igual a  $90^0$  elétricos no espaço e na Figura 4.12c está representado o motor bifásico com ângulo  $\varphi$  igual a  $60^0$  elétricos no espaço. O motor bifásico assimétrico com retorno da Figura 4.12a é simplesmente um motor trifásico sem uma das suas fases, por exemplo, sem o enrolamento da fase “c” do estator. A análise desses motores será feita a partir das Tabelas 4.1 e 4.2; e das Figuras 4.2 e 4.12.

Na Tabela 4.8 estão representados os dados da configuração para o motor bifásico assimétrico com retorno a ser simulado, conforme Figura 4.12 e conceitos apresentados no Capítulo 3.

Tabela 4.8 – Parâmetros de simulação dos motores bifásicos assimétricos com retorno.

Tempo	0,0s a 3,0s	3,0s a 6,0s	6,0s a 9,0s
$\beta$	$60^0$	$60^0$	$60^0$
$\varphi$	$60^0$	$90^0$	$120^0$
$\varphi_{as}$	$0^0$	$0^0$	$0^0$
$\varphi_{ab}$	$60^0$	$90^0$	$120^0$
$\varphi_{AB}$	$60^0$	$90^0$	$120^0$
$\varphi_{aA}$	$\theta_e$	$\theta_e$	$\theta_e$
$\varphi_{bB}$	$\theta_e$	$\theta_e$	$\theta_e$
$\varphi_{aB}$	$\varphi_{aA} + \varphi_{AB}$	$\varphi_{aA} + \varphi_{AB}$	$\varphi_{aA} + \varphi_{AB}$
$\varphi_{bA}$	$\varphi_{bB} - \varphi_{AB}$	$\varphi_{bB} - \varphi_{AB}$	$\varphi_{bB} - \varphi_{AB}$

Durante a simulação dos motores bifásicos assimétricos com retorno não ocorrerão mudanças nos parâmetros da Tabela 4.1, pois serão estudados os casos específicos de cada motor bifásico mostrados na Figura 4.12. Por isso, não ocorrerão mudanças no número de fases  $N_f$  e no passo relativo da bobina

do estator  $\gamma_{rbs}$ . O  $N_f$  e o  $\gamma_{rbs}$  são iguais a 3 e 1, respectivamente. Na Tabela 4.9 estão representados os dados da configuração para o motor bifásico assimétrico com retorno a ser simulado.

Tabela 4.9 – Parâmetros de simulação que variam ao longo do tempo.

Tempo	$N_f$	$p_{rbs}$	6,0s a 9,0s
0,0s – 1,0s	3	1	1
1,0s – 2,0s	3	1	$6n \pm 1$
2,0s – 3,0s	3	1	$3n$ e $6n \pm 1$
3,0s – 4,0s	3	1	1
4,0s – 5,0s	3	1	$6n \pm 1$
5,0s – 6,0s	3	1	$3n$ e $6n \pm 1$
6,0s – 7,0s	3	1	1
7,0s – 8,0s	3	1	$6n \pm 1$
8,0s – 9,0s	3	1	$3n$ e $6n \pm 1$

Onde o tempo de simulação de:

- 0,0s a 3,0s → representa a simulação do motor bifásico assimétrico com retorno de acordo com a Figura 4.12(c);
- 3,0s a 6,0s → representa a simulação do motor bifásico assimétrico com retorno de acordo com a Figura 4.12(b);
- 6,0s a 9,0s → representa a simulação do motor bifásico assimétrico com retorno de acordo com a Figura 4.12(a).

Nas Figuras 4.13 e nas 4.14 estão representados os gráficos da corrente no estator das fases “a” e “b” e das forças magnetomotrizes do motor bifásico assimétrico com retorno (Figura 4.12) ao longo do tempo e de acordo com a Tabela 4.8 e 4.9.

Analisando o intervalo de tempo nas Figuras 4.13 e 4.14 para o motor bifásico assimétrico com retorno, resulta:

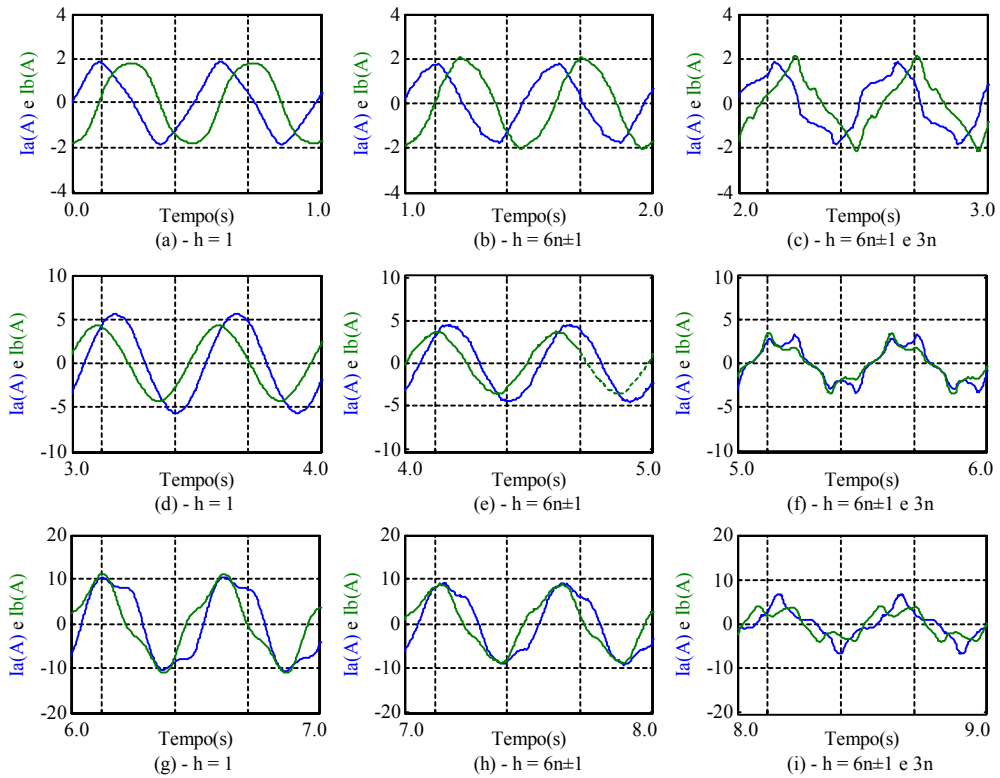


Figura 4.13 – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico.

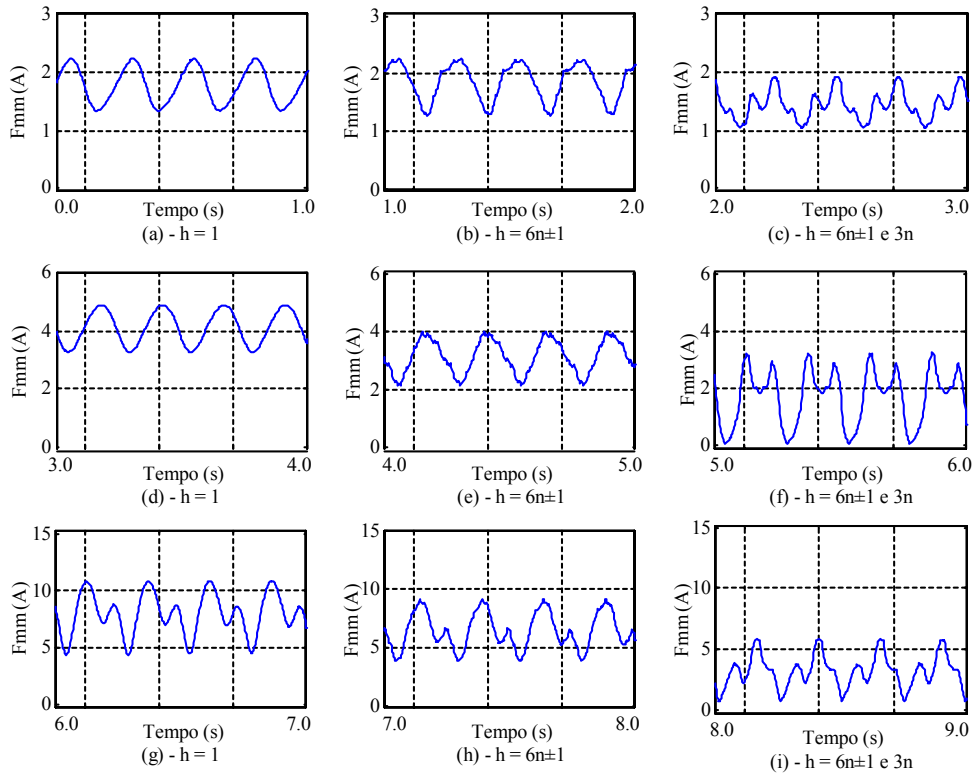


Figura 4.14 – Força magnetomotriz do motor bifásico.

- para os tempos da Figura 4.13, observa-se que, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$ , não provocam grandes mudanças na corrente se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto nas Figuras 4.13c, 4.13f e 4.13i, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa distorções nas formas de onda das correntes;
- para os tempos da Figura 4.14, observa-se que, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$ , não provocam grandes mudanças nas forças magnetomotrizes se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto nas Figuras 4.14c, 4.14f e 4.14i, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa distorções nas fmm's dos motores bifásicos assimétricos.

A presença das harmônicas de campo de seqüência  $6n\pm 1$  (Figuras 4.14e e 4.14h) e  $3n$  (Figuras 4.14c, 4.14f e 4.14i) causam mudanças no valor médio das forças magnetomotrizes dos motores bifásicos assimétricos com retorno.

Deve ser observado que, quanto maior a diferença entre o ângulo  $\beta$  da tensão de alimentação e o ângulo  $\varphi$  dos enrolamentos do estator, maior a sobrecorrente no estator e maior a oscilação na força magnetomotriz. Observa-se que, a melhor condição de funcionamento para o motor bifásico assimétrico com retorno, alimentado por uma fonte de tensão bifásica simétrica, cujas tensões estão defasadas uma da outra, de  $60^\circ$  no tempo, é quando o ângulo  $\varphi$  assume o valor igual ao do ângulo  $\beta$ . Além disso, se for comparado o valor da amplitude da corrente do motor bifásico assimétrico com retorno na condição  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^\circ$  (Figuras 4.13a, 4.13b e 4.13c), com o valor da amplitude da corrente do motor bifásico simétrico do Item 4.2 (Figuras 4.6a, 4.6b e 4.6c), observa-se que ocorreu um pequeno aumento na amplitude da corrente do motor bifásico simétrico para o motor bifásico assimétrico com retorno, entretanto para as condições  $\beta$  diferentes de  $\varphi$ , ocorreu uma elevação maior na amplitude da corrente do motor bifásico assimétrico com retorno (Figuras 4.13d, e, f, g, h e i).

4.4 – MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM  $\beta$  IGUAL A  $120^0$  E  $\varphi$  IGUAL A  $120^0$ ,  $90^0$  E  $60^0$  COM RETORNO

Neste item, serão analisadas as forças magnetomotrizes das máquinas de indução bifásicas assimétricas com retorno do Item 4.3, com o ângulo  $\varphi$  variando de  $120^0$ ,  $90^0$  e  $60^0$  elétricos no espaço, mas, de acordo com a Tabela 4.10 e Tabela 4.11.

Observe que, trata-se da mesma máquina do Item 4.3, mas, com uma diferença, que é o ângulo  $\beta$  da tensão. O ângulo  $\beta$  passou de  $60^0$  para  $120^0$ , ou seja, o motor bifásico assimétrico com retorno passou a ser alimentado por uma fonte de tensão simétrica, cujas tensões estão defasadas uma da outra, de  $120^0$  no tempo. Equivalente ao Item 4.3, o intuito principal dessa análise é de averiguar como estariam as correntes nos enrolamentos das máquinas de indução não convencionais, frente a uma alimentação bifásica que é encontrada nas residências, e com isso, avaliar o grau de oscilação das forças magnetomotrizes e compará-las.

Na Tabela 4.10 estão representados os dados da configuração para o motor bifásico assimétrico com retorno a ser simulado, conforme Figura 4.12 e conceitos apresentados no Capítulo 3.

Tabela 4.10 - Parâmetros de simulação dos motores bifásicos assimétricos com retorno.

Tempo	0,0s a 3,0s	3,0s a 6,0s	6,0s a 9,0s
$\beta$	$120^0$	$120^0$	$120^0$
$\varphi$	$120^0$	$90^0$	$60^0$
$\varphi_{as}$	$0^0$	$0^0$	$0^0$
$\varphi_{ab}$	$120^0$	$90^0$	$60^0$
$\varphi_{AB}$	$120^0$	$90^0$	$60^0$
$\varphi_{aA}$	$\theta_e$	$\theta_e$	$\theta_e$
$\varphi_{bB}$	$\theta_e$	$\theta_e$	$\theta_e$
$\varphi_{aB}$	$\varphi_{aA} + \varphi_{AB}$	$\varphi_{aA} + \varphi_{AB}$	$\varphi_{aA} + \varphi_{AB}$
$\varphi_{bA}$	$\varphi_{bB} - \varphi_{AB}$	$\varphi_{bB} - \varphi_{AB}$	$\varphi_{bB} - \varphi_{AB}$

Na Tabela 4.11 estão representas os dados da configuração para o motor bifásico assimétrico com retorno a ser simulado.

Tabela 4.11 - Parâmetros de simulação que variam ao longo do tempo.

Tempo	$N_f$	$p_{rbs}$	6,0s a 9,0s
0,0s – 1,0s	3	1	1
1,0s – 2,0s	3	1	$6n \pm 1$
2,0s – 3,0s	3	1	$3n$ e $6n \pm 1$
3,0s – 4,0s	3	1	1
4,0s – 5,0s	3	1	$6n \pm 1$
5,0s – 6,0s	3	1	$3n$ e $6n \pm 1$
6,0s – 7,0s	3	1	1
7,0s – 8,0s	3	1	$6n \pm 1$
8,0s – 9,0s	3	1	$3n$ e $6n \pm 1$

Onde o tempo de simulação de:

- 0,0s a 3,0s → representa a simulação do motor bifásico assimétrico com retorno de acordo com a Figura 4.12(a);
- 3,0s a 6,0s → representa a simulação do motor bifásico assimétrico com retorno de acordo com a Figura 4.12(b);
- 6,0s a 9,0s → representa a simulação do motor bifásico assimétrico com retorno de acordo com a Figura 4.12(c);

Nas Figuras 4.15 e nas 4.16 estão representados os gráficos da corrente no estator das fases “a” e “b” e das forças magnetomotrizes do motor bifásico assimétrico com retorno (Figura 4.12) ao longo do tempo e de acordo com a Tabela 4.10 e 4.11.

Analisando o intervalo de tempo nas Figuras 4.15 e 4.16 para o motor bifásico assimétrico com retorno, resulta:

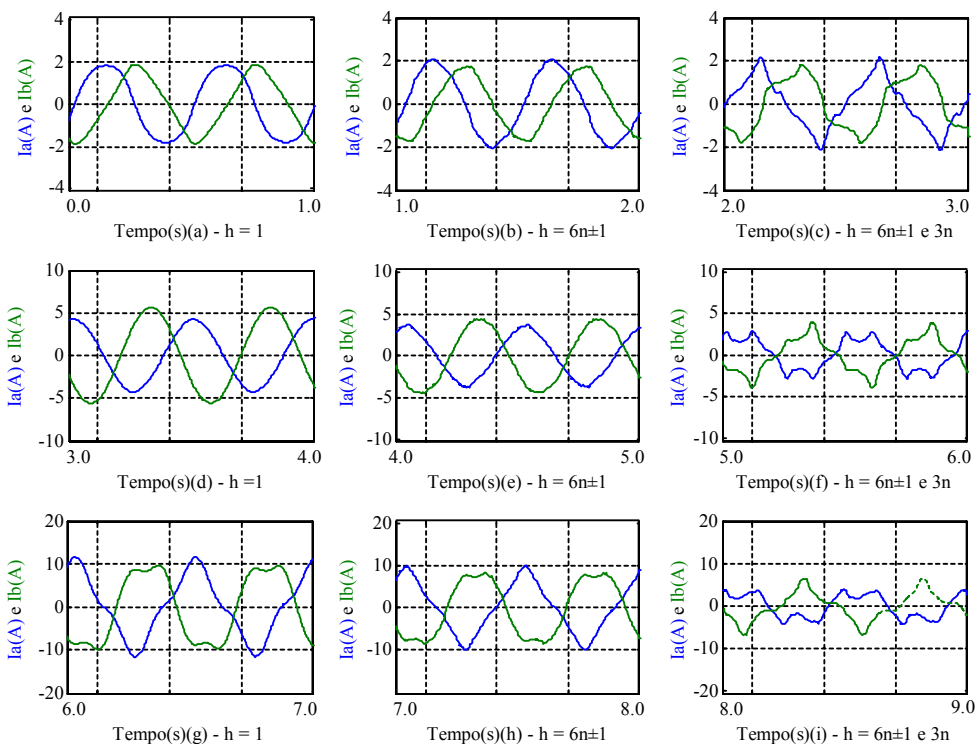


Figura 4.15 – Correntes no estator das fases “a” e “b” do motor bifásico.

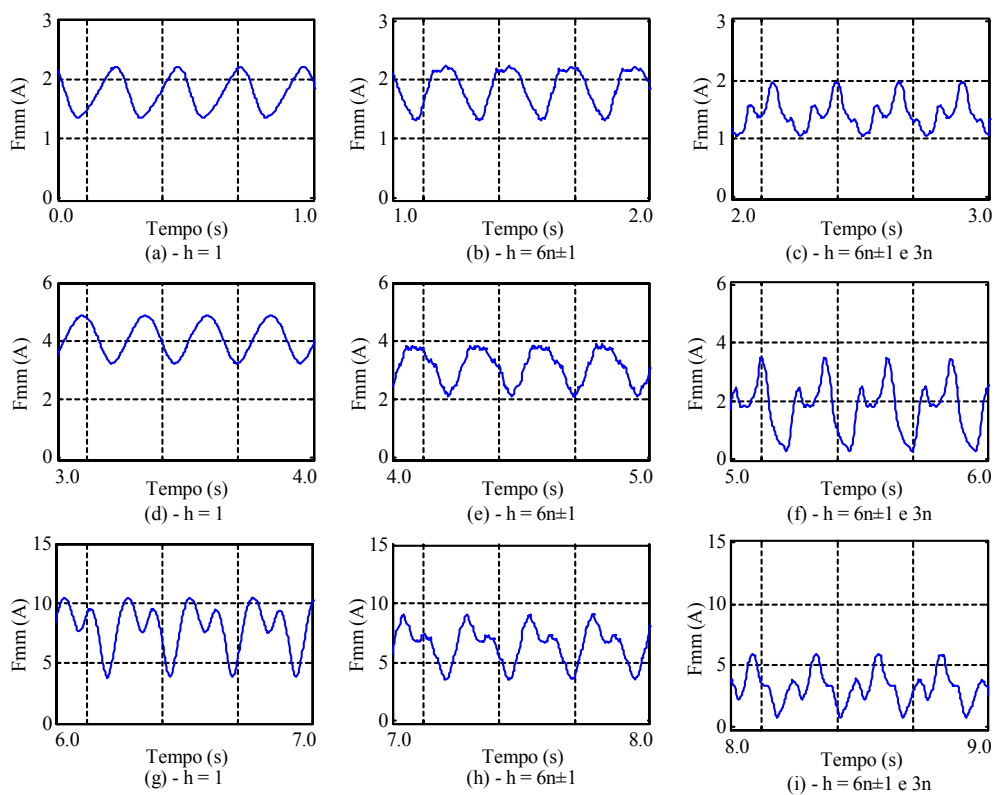


Figura 4.16 – Força magnetomotriz do motor bifásico.



- para os tempos da Figura 4.15, observa-se que, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$ , não provocam grandes mudanças na corrente se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto nas Figuras 4.15c, 4.15f e 4.15i, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa distorções nas formas de onda de corrente do estator;
- para os tempos da Figura 4.16, a presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e de seqüência  $6n\pm 1$ , não provocam grandes mudanças na força magnetomotriz se comparado com a seqüência  $h$  igual a 1, exceto nas Figuras 4.16c, 4.16f e 4.16i, onde a presença da seqüência  $3n$ , causa distorções na fmm.

Contudo a presença das harmônicas de campo de seqüência  $6n\pm 1$  (Figuras 4.16e e 4.16h) e  $3n$  (Figuras 4.16c, 4.16f e 4.16i) causam mudanças no valor médio das forças magnetomotrizes dos motores bifásicos assimétricos com retorno, idem à análise feita no motor bifásico assimétrico no Item 4.3.

Deve ser observado que, quanto maior a diferença entre o ângulo  $\beta$  da tensão de alimentação e o ângulo  $\varphi$  dos enrolamentos do estator, maior a sobrecorrente no estator e maior a oscilação na força magnetomotriz, ou seja, a melhor condição de funcionamento para o motor bifásico assimétrico com retorno, alimentado por uma fonte de tensão bifásica simétrica, cujas tensões estão defasadas uma da outra, de  $120^0$  no tempo, é quando o ângulo  $\varphi$  assume o valor igual ao do ângulo  $\beta$ . Além disso, comparado o valor da amplitude da corrente do motor bifásico assimétrico com retorno na condição  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $120^0$  (Figuras 4.15a, 4.15b e 4.15c), com o valor da amplitude da corrente do motor bifásico simétrico (Figuras 4.6a, 4.6b e 4.6c), observa-se que ocorreu um pequeno aumento na amplitude da corrente do motor bifásico simétrico para o motor bifásico assimétrico com retorno, entretanto para as condições  $\beta$  diferentes de  $\varphi$ , ocorreu uma elevação maior na amplitude da corrente do motor bifásico assimétrico com retorno (Figuras 4.15d, e, f, g, h e i).

#### 4.5 – COMPARAÇÃO DAS FORÇAS MAGNETOMOTRIZES NAS MÁQUINAS BIFÁSICAS ASSIMÉTRICAS COM RETORNO

Neste item, serão comparadas as forças magnetomotrizes das máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas, entre o equacionamento matemático mostrado no Capítulo 2 e o modelo dinâmico do Capítulo 3. A comparação entre o modelo matemático do Capítulo 2 e o modelo dinâmico do Capítulo 3, foi realizada considerando somente a componente fundamental. Para a análise das forças magnetomotrizes através do Capítulo 2 foram utilizadas as correntes das máquinas que foram simuladas através do modelo dinâmico.

Na Figura 4.17 estão representadas as forças magnetomotrizes resultantes ( $F_{mmr}(t)$ ) dos motores bifásicos. Na Figura 4.17a estão representadas as forças magnetomotrizes resultantes calculadas através do modelo matemático mostrado no Capítulo 2. E na Figura 4.17b estão representadas as fmm resultantes calculadas através do modelo dinâmico desenvolvido no Capítulo 3.

Na Figura 4.17 as forças magnetomotrizes resultantes são:

- $F_{mmr1}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 90^0$  e  $\varphi = 90^0$ ;
- $F_{mmr2}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 80^0$  e  $\varphi = 90^0$ ;
- $F_{mmr3}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 60^0$  e  $\varphi = 60^0$ ;
- $F_{mmr4}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 60^0$  e  $\varphi = 90^0$ ;
- $F_{mmr5}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 60^0$  e  $\varphi = 120^0$ ;
- $F_{mmr6}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 120^0$  e  $\varphi = 60^0$ ;
- $F_{mmr7}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 120^0$  e  $\varphi = 90^0$ ;
- $F_{mmr8}(t)$  → representa a fmm dos motores bifásicos com  $\beta = 120^0$  e  $\varphi = 120^0$ .

Deve ser observado que a fmm calculada pelos modelos em certos casos são parecidas e em outros não, por exemplo, a fmm calculada para os motores bifásicos simétricos ( $F_{m_{mr1}}(t)$ ), assimétricos ( $F_{m_{mr2}}(t)$ ) e assimétricos com retorno ( $F_{m_{mr3}}(t)$ ,  $F_{m_{mr4}}(t)$ ,  $F_{m_{mr7}}(t)$  e  $F_{m_{mr8}}(t)$ ) são parecidas, entretanto as fmm dos motores assimétricos com retorno  $F_{m_{mr5}}(t)$  e  $F_{m_{mr6}}(t)$  são muito diferentes.

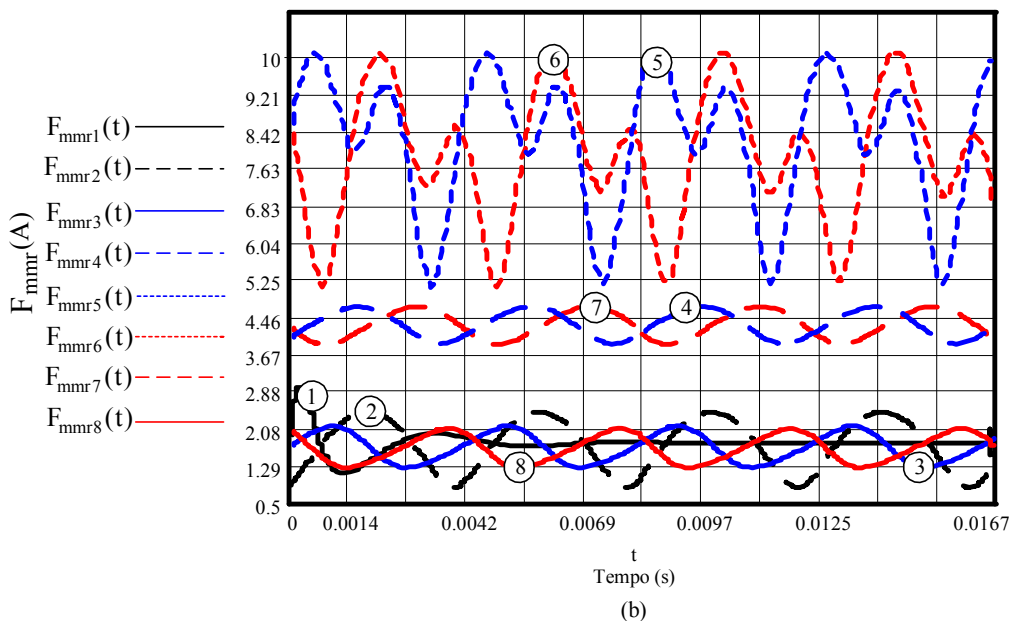
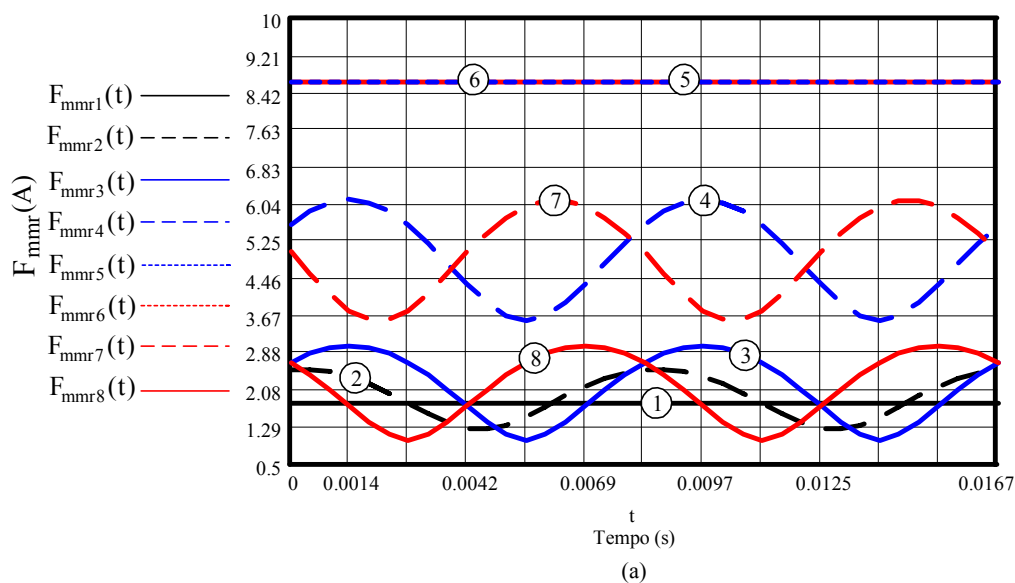


Figura 4.17 – Forças magnetomotriz dos motores bifásicos.

## 4.6 – CONCLUSÃO

Neste capítulo foram realizadas as análises das forças magnetomotrizes em máquinas de indução bifásicas simétricas, assimétricas e assimétricas com retorno.

A presença das harmônicas de campo de seqüência  $3n$  não se anula em máquinas de indução bifásicas como acontece em máquinas de indução trifásicas. As harmônicas de seqüência  $3n$  estão presentes nos motores bifásicos e são de constante preocupação. Mudanças no fator de distribuição e de passo têm grandes influências na diminuição das distorções na corrente e na oscilação da força magnetomotriz em máquinas simétricas e assimétricas; devido às mudanças que ocorrem nos fatores de enrolamento de ordem harmônica. Entretanto, pode-se observar que as mudanças nos fatores de distribuição e de passo afetam mais os fatores de enrolamento de ordem harmônica de seqüência  $3n$  do que as de seqüência  $6n\pm 1$  (Tabela 4.7).

Em motores bifásicos simétricos (Item 4.2) a força magnetomotriz é constante, somente com  $h$  igual a 1, pois, quando se considera as harmônicas de seqüências  $6n\pm 1$  e  $3n$ , a fmm não é mais uniforme. Em motores bifásicos assimétricos (Item 4.2.1 a 4.4) a força magnetomotriz não é constante, mesmo com  $h$  igual a 1.

Nos motores bifásicos simétrico, assimétrico e assimétrico com retorno as harmônicas de seqüência  $3n$  causam maiores oscilações na força magnetomotriz do que as harmônicas de seqüência  $6n\pm 1$ . Todavia, os motores bifásicos simétricos (Item 4.2) são máquinas que sofrem mais a influência das harmônicas de seqüência  $3n$  e  $6n\pm 1$ , pois a fmm em tais motores é teoricamente uniforme (Figura 4.6a). Entretanto, em motores bifásicos assimétricos as harmônicas de seqüência  $3n$  e  $6n\pm 1$  não causam grandes mudanças na força magnetomotriz de tais máquinas, devido que, a fmm em tais motores já é oscilante, mesmo com  $h$  igual a 1.

A corrente e a força magnetomotriz em motores de indução assimétricos com retorno alimentados por uma fonte de tensão bifásica simétrica é mais oscilante quanto maior for a diferença entre o ângulo  $\beta$  e  $\varphi$ . Observa-se então, que de acordo com os Itens 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, as melhores condições para o funcionamento do motor bifásico assimétrico, com retorno são:

- com  $\beta = \varphi = 60^\circ$ ;
- com  $\beta = \varphi = 120^\circ$ .

Estas condições também são as de construção do motor bifásico, com retorno, uma vez que,  $\beta$  e  $\varphi$  são os ângulos de defasamento entre as tensões e os enrolamentos, respectivamente. Contudo, a condição  $\beta = \varphi = 60^\circ$  fica condicionada a ligação delta aberto (duas fases) com retorno pela fase, caracterizando o motor bifásico assimétrico com retorno pela fase. E a condição  $\beta = \varphi = 120^\circ$  fica condicionada a ligação estrela bifásica (duas fases e neutro), caracterizando o motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro.

Com isso, podem-se tirar outras conclusões, que são: o motor trifásico simétrico funcionaria como um motor bifásico assimétrico com retorno pela fase ou pelo neutro, pois o motor bifásico assimétrico do Item 4.3 e do Item 4.4 com  $\beta = \varphi$ , trata-se de um motor trifásico sem uma de suas fases (Figura 4.12a). Pode-se verificar que um motor de indução trifásico não pararia de funcionar, caso o mesmo viesse a perder qualquer uma de suas fase. Claro que isso está condicionado ao tipo de ligação que está alimentando o motor, se é delta aberto ou estrela bifásica.

A forma de ligação dos motores bifásicos assimétricos com retorno é um dos assuntos que serão abordados no próximo capítulo, bem como, alguns ensaios realizados no motor bifásico assimétrico com retorno.

## **CAPÍTULO 5**

# **SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E ENSAIOS DO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO**

### **5.1 – INTRODUÇÃO**

Neste capítulo, serão mostrados os sistemas de alimentação para as máquinas de indução bifásicas assimétricas com retorno, pela fase ou pelo neutro.

Serão mostrados também, os ensaios realizados nos motores bifásicos com retorno, por exemplo, ensaio de rotor bloqueado, ensaio a vazio e carga, temperatura e ruído; será feita também, uma comparação entre as grandezas dos motores bifásicos, tais como, velocidade e conjugado.

A máquina de indução trifásica a ser analisada é um motor de indução trifásico de 1,5CV da linha IP55 W21, com:

- 36 ranhuras no estator;
- 44 ranhuras no rotor (gaiola de esquilo);
- número de espiras por fase igual a 46.

Neste capítulo, o objetivo é mostrar passo a passo, como um motor de indução trifásico comercial passa a se comportar como bifásico assimétrico com retorno, na ligação estrela bifásica e delta aberto e com isso comprovar na prática os estudos feitos nos capítulos anteriores.

## 5.2 – SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO BIFÁSICAS ASSIMÉTRICAS COM RETORNO

Na prática, existem dois sistemas que são utilizados para excitação de máquinas assíncronas; o primeiro é o sistema trifásico ( $M_{3\phi - S}$ ) e o segundo é o monofásico ( $M_{1\phi - A}$ ), que excitam respectivamente os motores de indução trifásicos e monofásicos.

Na Figura 5.1 estão representados os sistemas de alimentação para motores trifásicos e monofásicos. E na Figura 5.2 estão representados os gráficos das formas de onda de tensão de alimentação dos sistemas representados na Figura 5.1.

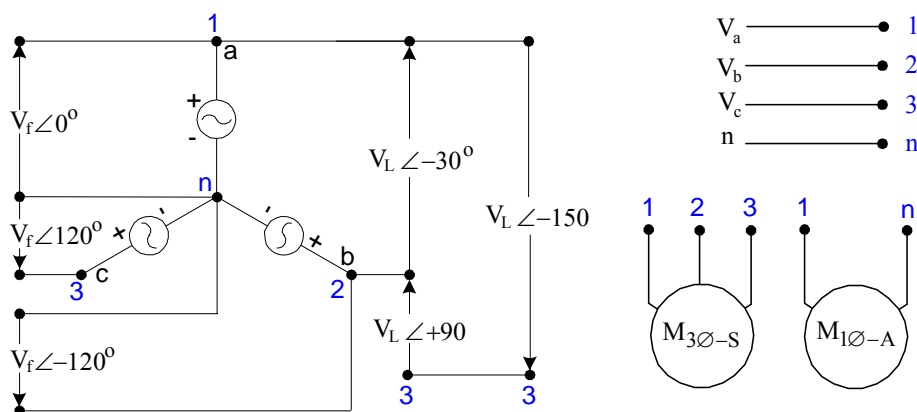


Figura 5.1 – Sistema trifásico de alimentação.

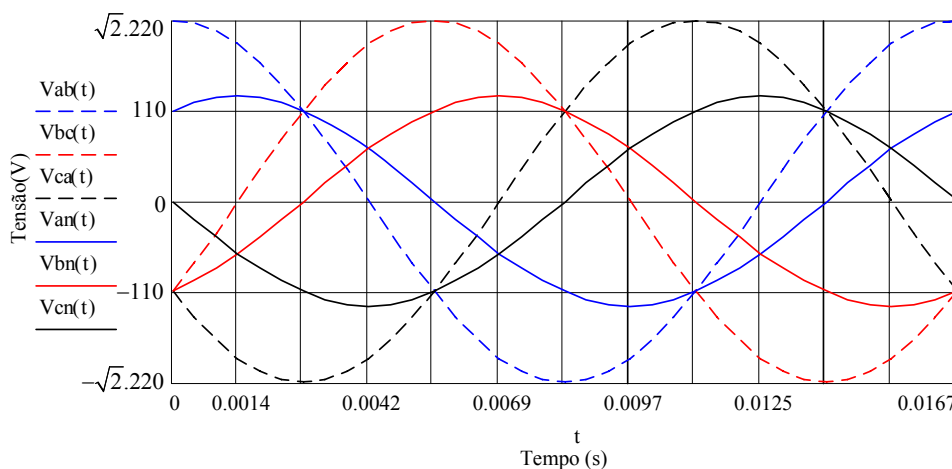


Figura 5.2 – Formas de onda de tensão do sistema trifásico.

Onde:

- $V_{an} = V_f \angle 0^0$ ;
- $V_{bn} = V_f \angle -120^0$ ;
- $V_{cn} = V_f \angle +120^0$ ;
- $V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_L \angle -30^0$ ;
- $V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = V_L \angle +90^0$ ;
- $V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = V_L \angle -150^0$ .

O sistema representado na Figura 5.1 pode ser utilizado na alimentação de motores de indução trifásicos  $M_{3\phi - s}$  e motores de indução monofásicos  $M_{1\phi - A}$ .

Entretanto, o sistema representado na Figura 5.1 também pode ser utilizado na alimentação de motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\phi - ACR}$  pela fase ou pelo neutro.

O sistema bifásico com retorno possui uma fonte de tensão bifásica com retorno pela fase ou pelo neutro, cujas tensões estão defasadas de certo ângulo  $\beta$ , entre si. Estes sistemas são obtidos de duas formas, através da ligação Y bifásica e  $\Delta$  aberto, respectivamente.

Os sistemas de alimentação bifásicos com retorno utilizados para a alimentação de motores trifásicos sem uma de suas fases são caracterizados de acordo com a perda da fase do motor. Então, os sistemas bifásicos podem ser alimentados pela:

- fase “c” ou pelo neutro (Figuras 5.3a e 5.3b), respectivamente;
- fase “b” ou pelo neutro (Figuras 5.5a e 5.5b), respectivamente;
- fase “a” ou pelo neutro (Figuras 5.7a e 5.7b), respectivamente;

Nas Figuras 5.3a e 5.3b estão representados o motor bifásico com retorno pela fase “c” e pelo neutro. Nas Figuras 5.5a e 5.5b estão representados o motor bifásico com retorno pela fase “b” e pelo neutro; e nas Figuras 5.7a e 5.7b estão representados o motor bifásico com retorno pela fase “a” e pelo neutro.



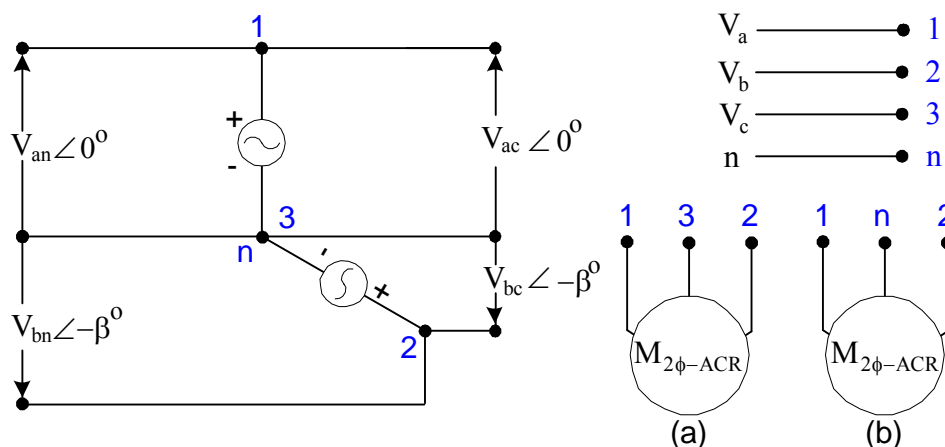


Figura 5.3 – Sistema de ligação do motor bifásico assimétrico com retorno, ligação Y bifásica e  $\Delta$  aberto, sem o enrolamento da fase “c”.

Na Figura 5.4 estão representadas as formas de onda da tensão bifásica com retorno pela fase “c” e pelo neutro.

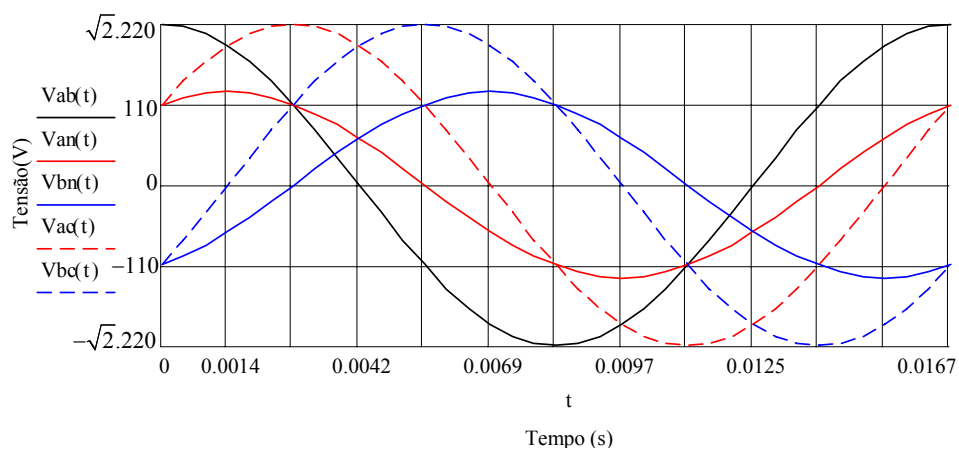


Figura 5.4 – Formas de onda de tensão do sistema bifásico ligação Y bifásica, com retorno pelo neutro e ligação  $\Delta$  aberto com retorno pela fase “c”.

Onde:

- $V_{an} = V_f \angle 0^\circ$ ;
- $V_{bn} = V_f \angle -120^\circ$ ;
- $V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_L \angle +30^\circ$ ;
- $V_{ac} = V_{an} - V_{cn} = V_L \angle -30^\circ$ ;
- $V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = V_L \angle -90^\circ$ .

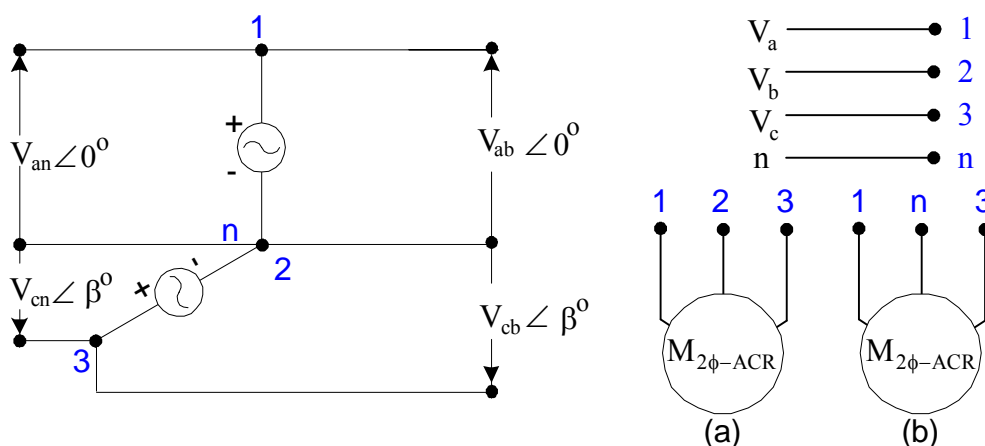


Figura 5.5 – Sistema de ligação do motor bifásico assimétrico com retorno, ligação Y bifásica e Δ aberto, sem o enrolamento da fase “b”.

Na Figura 5.6 estão representadas as formas de onda da tensão bifásica com retorno pela fase “b” e pelo neutro.

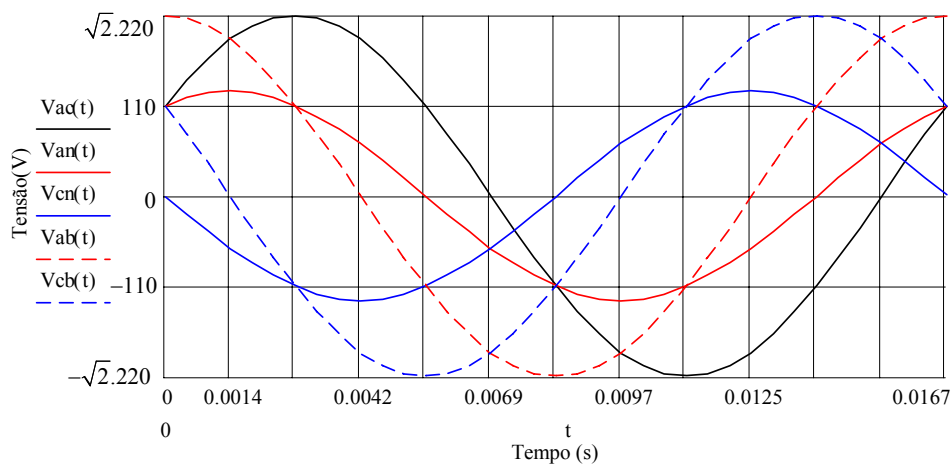


Figura 5.6 – Formas de onda de tensão do sistema bifásico ligação Y bifásica, com retorno pelo neutro e ligação Δ aberta com retorno pela fase “b”.

Onde:

- $V_{an} = V_f \angle 0^\circ$ ;
- $V_{bn} = V_f \angle +120^\circ$ ;
- $V_{cb} = V_{cn} - V_{bn} = V_L \angle +90^\circ$ .
- $V_{ac} = V_{an} - V_{bn} = V_L \angle -30^\circ$ ;
- $V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_L \angle +30^\circ$ ;

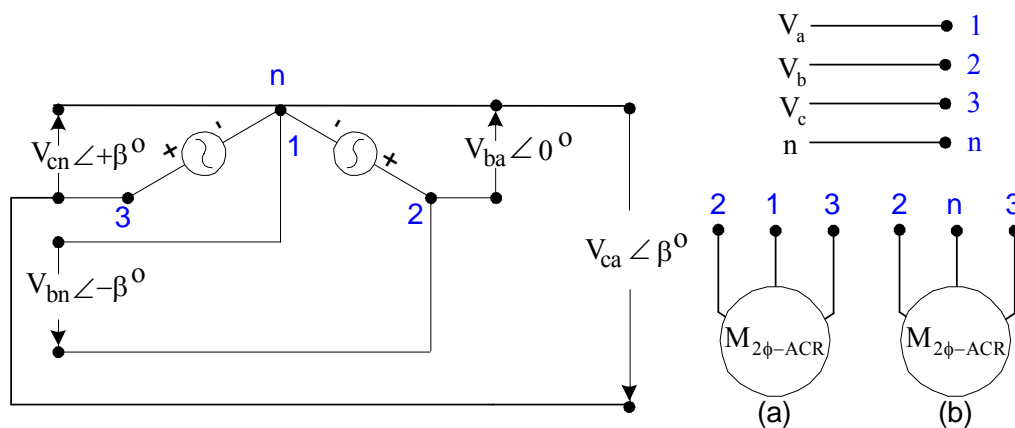


Figura 5.7 – Sistema de ligação do motor bifásico assimétrico com retorno, ligação Y bifásica e  $\Delta$  aberto, sem o enrolamento da fase “a”.

Na Figura 5.8 estão representadas as formas de onda da tensão bifásica com retorno pela fase “a” e pelo neutro.

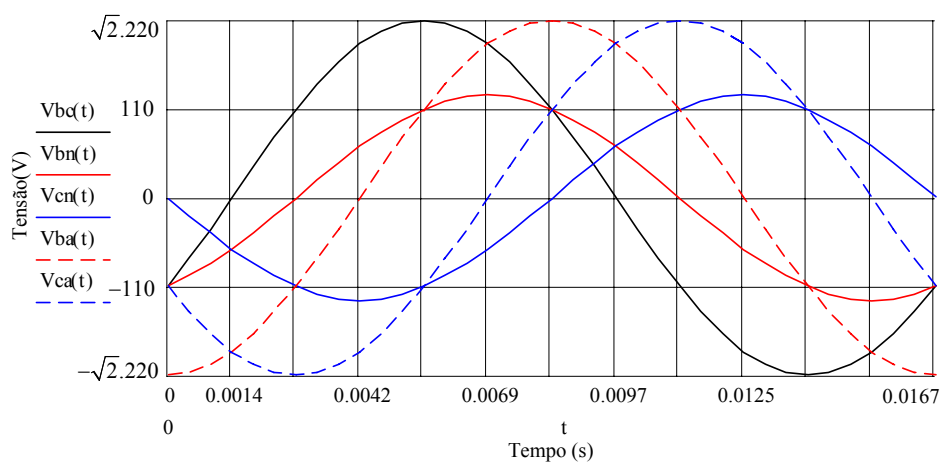


Figura 5.8 – Formas de onda de tensão do sistema bifásico ligação Y bifásica, com retorno pelo neutro e ligação  $\Delta$  aberto com retorno pela fase “a”.

Onde:

- $V_{bn} = V_f \angle -120^0$ ;
- $V_{cn} = V_f \angle +120^0$ ;
- $V_{ac} = V_{an} - V_{cn} = V_L \angle -90^0$ ;
- $V_{ba} = V_{bn} - V_{an} = V_L \angle -60^0$ ;
- $V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = V_L \angle +60^0$ .

A partir deste ponto serão mostradas as duas formas de ligação do motor bifásico assimétrico com retorno pela fase ou pelo neutro.

Nas Figuras 5.9 estão representados os passos de ligação para a obtenção do motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro (ligação estrela bifásica) ou pela fase (ligação delta aberto).

Para os motores trifásicos ligados em estrela com neutro: caso o motor trifásico estiver ligado em estrela com neutro (Figura 5.9a), perca a fase “c” da alimentação ou a mesma seja queimada (Figura 9b), o motor continuaria com dois enrolamentos energizados, ou seja, o motor estará funcionando como bifásico assimétrico com retorno pelo neutro (Figura 9c) com  $\beta = \varphi = 120^\circ$  ligação estrela bifásica.

Para os motores trifásicos ligados em delta: caso o motor trifásico estiver ligado em triângulo (Figura 9d), perca a fase “c” da alimentação, o mesmo funcionaria somente com um enrolamento energizado (Figura 9e), nesta situação o motor não está funcionando como bifásico assimétrico, mas, como motor monofásico. Por outro lado, se a bobina da fase “c” se queimar (Figura 9f), o motor funcionaria com dois enrolamentos energizados, nesta situação o motor ainda continua funcionando como monofásico. Entretanto, para que o motor funcione como bifásico assimétrico com retorno pela fase “c” com  $\beta = \varphi = 60^\circ$  ligação delta aberto, basta inverter a alimentação (2 e 3) do motor, de acordo com a Figura 9g.

Na Figura 5.9 está representado o caso onde ocorre perca da fase “c” de alimentação ou perca da bobina da fase “c” do motor trifásico. Entretanto, caso o motor perca a fase “b” ou a fase “a”, as análises seriam análogas às realizadas para o caso da perca da fase “c”.

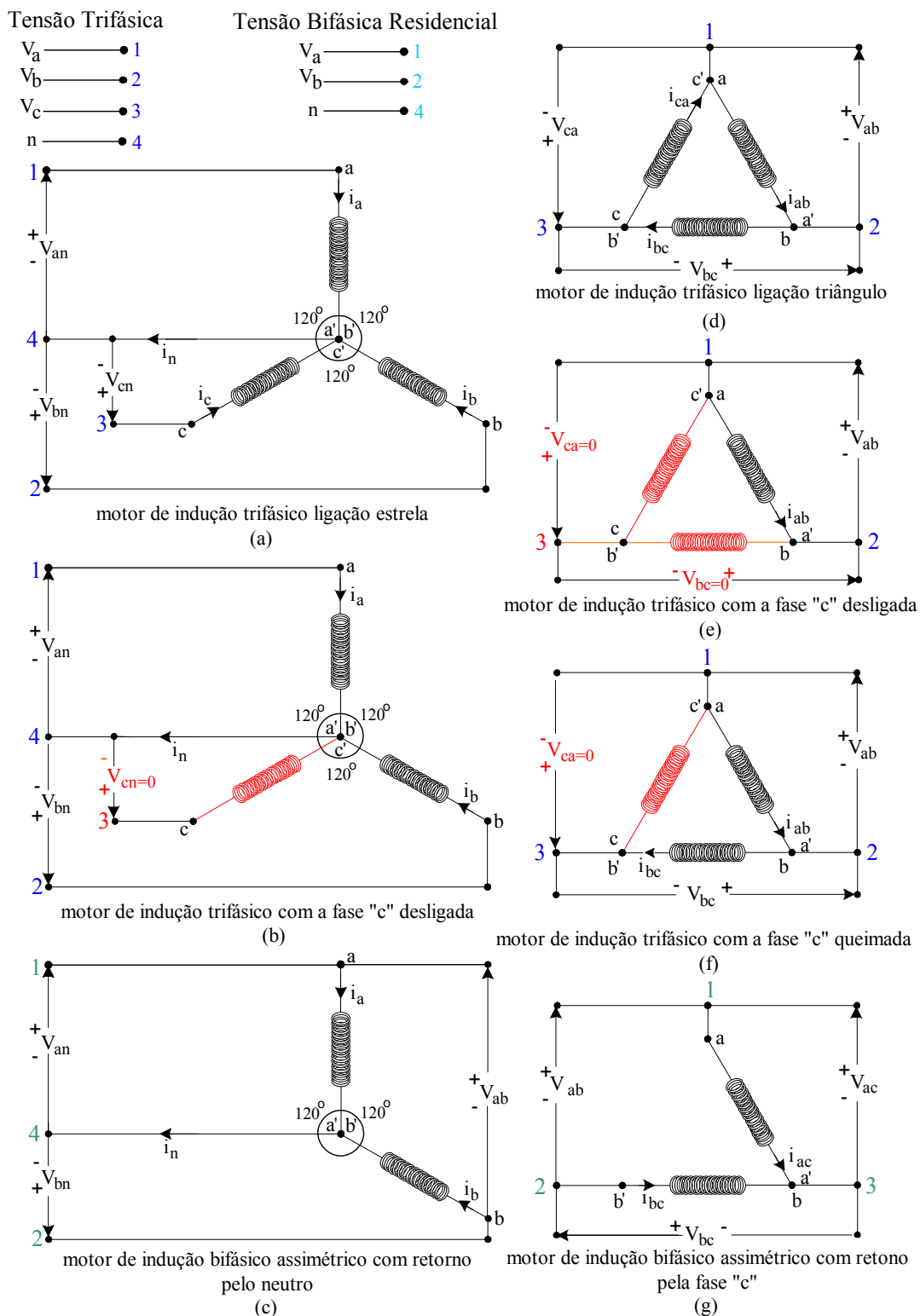


Figura 5.9 – Esquema de ligação estrela e triângulo aberto do motor indução bifásico assimétrico com retorno, com perda da fase “c” da rede e perda do enrolamento da fase “c” do motor.

### 5.3 – ENSAIO DO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO

Neste item, serão mostrados vários ensaios que foram feitos na máquina de indução bifásica assimétrica com retorno, tais como:

- ensaio a vazio e carga;
- ensaio de elevação da temperatura;
- ensaio de ruído.

Todos os ensaios foram realizados na fábrica da WEG em Jaraguá do Sul – SC. Para a realização dos testes foram construídos três motores de indução bifásicos assimétricos com retorno. Os motores construídos são os seguintes:

- $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  → motor de indução trifásico simétrico  $M_{3\varnothing - S}$ , utilizado para o ensaio do motor bifásico assimétrico 1 com retorno. Neste motor não ocorre a energização da fase “c”;
- $M_{2\varnothing 2 - ACR}$  → motor bifásico assimétrico 2 com retorno é um motor com as mesmas características do motor bifásico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ , mas, sem o enrolamento da fase “c”, ou seja, 1/3 das ranhuras do estator estão vazias;
- $M_{2\varnothing 3 - ACR}$  → motor bifásico assimétrico 3 com retorno é um motor com as mesmas características do motor bifásico  $M_{2\varnothing 2 - S}$ , mas, com uma diferença, as ranhuras que estavam vazias no motor  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$ , no motor  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$  estão preenchidas com material ferro magnético.

O motor trifásico utilizado nos testes é um motor de indução trifásico simétrico de 1,5 CV da linha IP55 W21, de linha Standard.

Na Tabela 5.1 estão representados os dados placa do motor trifásico  $M_{3\phi-s}$ .

Tabela 5.1 – Dados de placa do motor de indução trifásico.

Motor Trifásico Simétrico $M_{3\phi-s}$					
ITEM		EB 6991.3122		PG 6991.3122	
MODELO	80	CATEGORIA		N	
FS	1.15	ISOLAMENTO		B	
LIGAÇÃO/ TENSÃO		DELTA 220V		ESTRELA 380V	
CORRENTE NOMINAL		4,43A		2,56A	
VELOCIDADE	1720rpm	TORQUE NOMINAL		0,62Kgf <sub>m</sub>	
FREQÜÊNCIA	60HZ	COS FI	0,82	RENDIMENTO	79,5%

Na Figura 5.10 estão representados os detalhes do esquema dos enrolamentos de camada única, concêntricos e de passo 1:8:10:12 dos motores trifásicos  $M_{3\phi-s}$ .

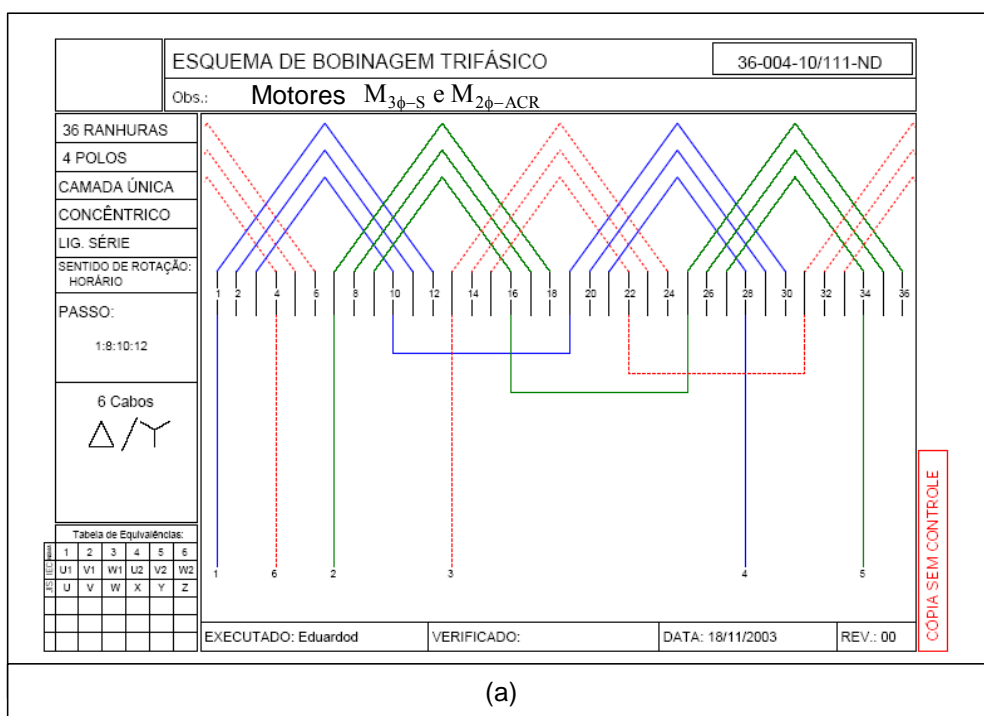


Figura 5.10 – Esquema de bobinagem motor indução trifásico.

O motor de indução trifásico pode ser utilizado na ligação estrela ou delta (Figura 5.11).

Nas Figuras 5.11a e 5.11b estão representados o esquema de ligação do motor ligado em estrela e delta, respectivamente.

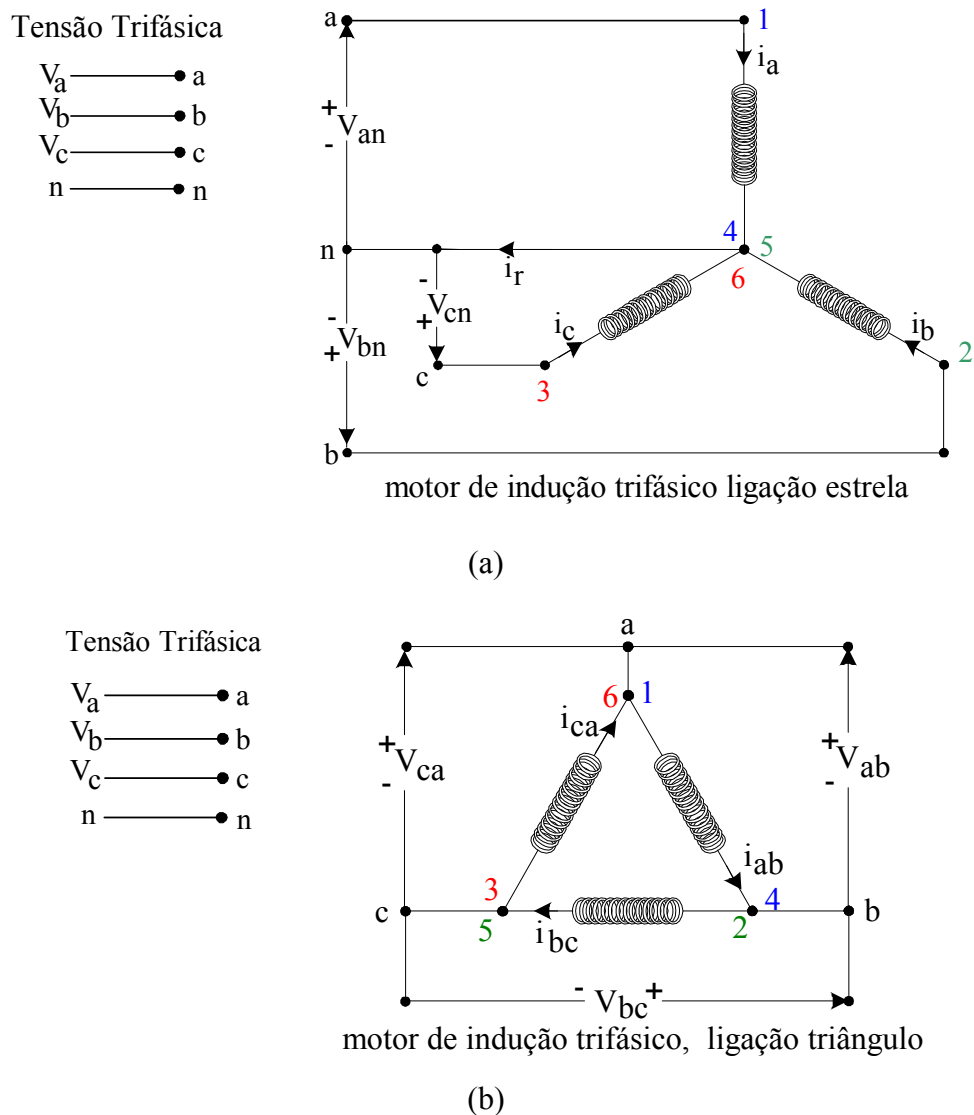


Figura 5.11 – Esquema de ligação em estrela e delta do motor indução trifásico.

Os ensaios dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno foram feitos com a máquina ligada em delta aberto, devido às condições da bancada de ensaios na WEG em Jaraguá do Sul.



### 5.4 – ENSAIOS DOS MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO

Neste item, serão mostrados os ensaios dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno. As máquinas bifásicas que serão utilizadas para os ensaios são os motores  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ ,  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$ , e  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$ , conforme Item 5.2.

■ Entrando fase "a"	■ Entrando fase "b"	■ Entrando fase "c"
■ Saindo fase "a"	■ Saindo fase "b"	■ Saindo fase "c"

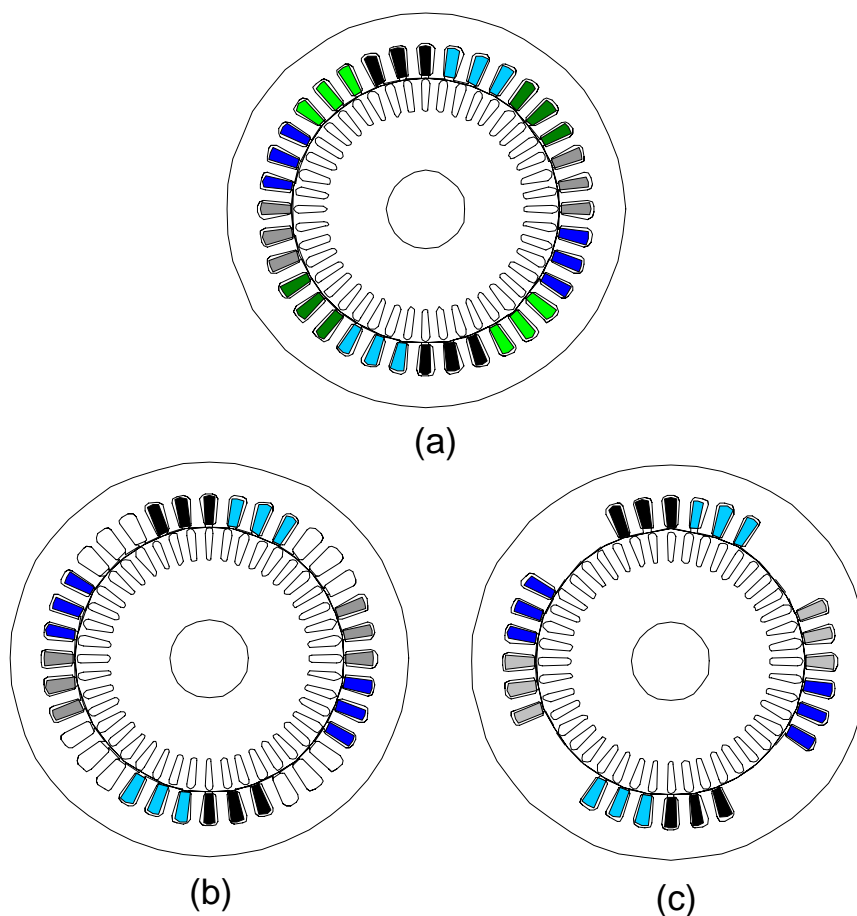


Figura 5.12 – Motor de indução trifásico e bifásicos com retorno.

Na Figura 5.12a estão representados o motor trifásico simétrico  $M_{3\varnothing - s}$  e o motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ ; na Figura 5.12b está representado o motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$  e na Figura 5.12c está representado o motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$ .

**5.4.1 – ENSAIO A VAZIO E COM CARGA DOS MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO**

Os ensaios a vazio e com carga dos motores de indução bifásicos assimétricos são executados conforme os esquemas de ligação mostrados na Figura 5.13.

Na Figura 13a está representado o esquema de ligação para o motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1-ACR}$  e na Figura 13b está representado o esquema de ligação para os motores bifásicos assimétricos  $M_{2\varnothing 2-ACR}$  e  $M_{2\varnothing 3-ACR}$ .

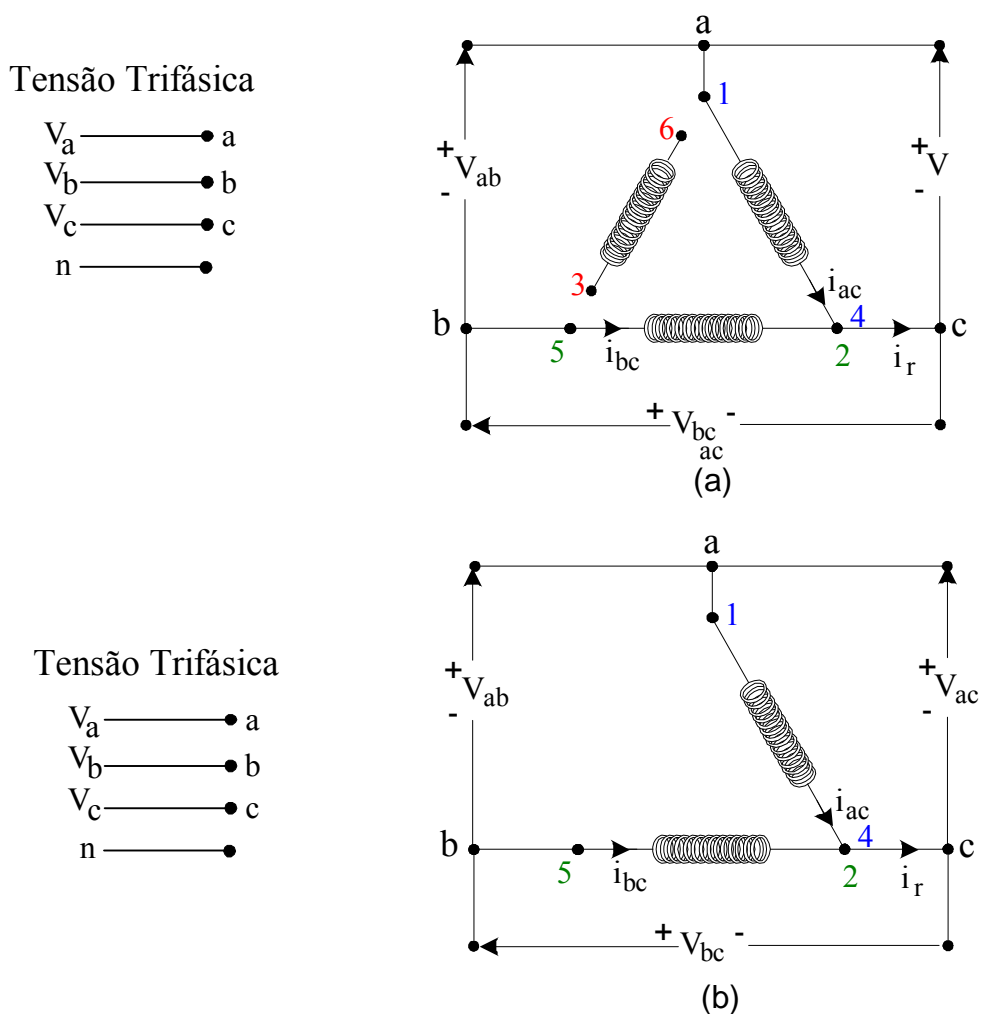


Figura 5.13 – Esquema de ligação em delta dos motores bifásicos assimétricos com retorno.

Para os ensaios a vazio dos motores bifásicos assimétricos com retorno foram aplicados diferentes valores de tensão.

Aplicou-se uma tensão reduzida de aproximadamente 44% da nominal (220V) até valores acima da nominal dos motores bifásicos assimétricos com retorno, que chegaram a aproximadamente 25% a mais do valor. E para os ensaios com carga, aplicou-se uma tensão nominal (220V) nos motores bifásicos assimétricos com retorno.

O motor trifásico possui uma potência de 1,5 CV, se admitido uma queda de 33,33% da potência do motor trifásico, devido a perda de uma de suas fases. O torque de carga do motor trifásico (0,617 Kgf.m) também ficaria reduzido de 33,33%. Então, as potências e os torques de cargas dos motores bifásicos assimétricos com retorno seriam iguais a:

$$P_{N-2\phi-ACR} = 66,66\%.P_{N-3\phi IP55 (Placa)} \quad (5.3)$$

$$T_{N-2\phi-ACR} = 66,66\%.T_{N-3\phi IP55 (Placa)} \quad (5.4)$$

Os ensaios a vazio e com carga dos motores bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\phi 1-ACR}$ ,  $M_{2\phi 2-ACR}$  e  $M_{2\phi 3-ACR}$  estão representados na Tabela 5.2 a 5.7.

Nas Tabela 5.2 e 5.3 estão representados os ensaios a vazio e com carga do motor bifásico assimétrico  $M_{2\phi 1-ACR}$ .

Tabela 5.2 – Ensaio a vazio do motor de indução bifásico  $M_{2\phi 1-ACR}$ .

MOTOR	$M_{2\phi 1-ACR}$			
	$V_{bc}$ (V)	$I_{0-ac}$ (A)	$I_{0-bc}$ (A)	$I_r$ (A)
274,3	266,4	4,079	4,161	6,355
253,3	247,2	3,164	3,201	4,939
220,2	216,1	2,135	2,138	3,366
176,3	173,5	1,458	1,459	2,317
143,6	141,6	1,130	1,158	1,806
114,6	113,1	0,875	0,915	1,395
97,80	96,86	0,737	0,177	1,177

Tabela 5.3 – Ensaio com carga do motor de indução bifásico  $M_{2\phi 1-ACR}$ .

MOTOR		$M_{2\phi 1-ACR}$					
$V_{ac}$ (V)	$V_{bc}$ (V)	$I_{n-ac}$ (A)	$I_{n-bc}$ (A)	$I_r$ (A)	$W_n$ (rpm)	$T_c$ (Kgf·m)	%
220,4	216,8	4,260	4,110	6,801	1702	0,617	150
220,9	217,3	3,649	3,524	5,826	1722	0,514	125
221,2	217,6	3,141	3,032	4,991	1741	0,411	100
221,5	217,8	2,731	2,632	4,317	1757	0,308	75
221,7	217,9	2,431	2,350	3,819	1772	0,206	50
221,9	218,0	2,243	2,191	3,508	1785	0,103	25
222,0	217,9	2,183	2,170	3,420	1796	0,012	0

Nas Tabela 5.4 e 5.5 estão representados os ensaios a vazio e com carga do motor bifásico assimétrico  $M_{2\phi 2-ACR}$ .

Tabela 5.4 – Ensaio a vazio do motor de indução bifásico  $M_{2\phi 2-ACR}$ .

MOTOR		$M_{2\phi 2-ACR}$		
$V_{ac}$ (V)	$V_{bc}$ (V)	$I_{o-ac}$ (A)	$I_{o-bc}$ (A)	$I_r$ (A)
279,1	270,2	4,397	4,540	7,001
255,1	248,4	3,362	3,454	5,383
223,2	218,6	2,339	2,414	3,793
178,6	175,4	1,608	1,665	2,619
145,5	143,2	1,245	1,323	2,043
116,6	114,9	0,969	1,054	1,586
97,55	96,50	0,801	0,887	1,312

Tabela 5.5 – Ensaio com carga do motor de indução bifásico.  $M_{2\phi 2-ACR}$

MOTOR		$M_{2\phi 2-ACR}$					
$V_{ac}$ (V)	$V_{bc}$ (V)	$I_{n-ac}$ (A)	$I_{n-bc}$ (A)	$I_r$ (A)	$W_n$ (rpm)	$T_c$ (Kgf·m)	%
224,6	220,7	4,260	4,185	6,882	1705	0,617	150
225,0	221,1	3,690	3,636	5,965	1725	0,514	125
225,4	221,3	3,225	3,183	5,205	1742	0,411	100
225,6	221,4	2,858	2,831	4,599	1758	0,308	75
225,8	221,5	2,594	2,597	4,172	1773	0,206	50
225,9	221,5	2,439	2,476	3,924	1785	0,103	25
226,0	221,4	2,403	2,469	3,882	1796	0,010	0

Nas Tabela 5.6 e 5.7 estão representados os ensaios a vazio e com carga do motor bifásico assimétrico  $M_{2\phi 3-ACR}$ .

Tabela 5.6 – Ensaio a vazio do motor de indução bifásico  $M_{2\phi 3-ACR}$ .

MOTOR		$M_{2\phi 3-ACR}$		
$V_{ac}(V)$	$V_{bc}(V)$	$I_{0-ac}(A)$	$I_{0-bc}(A)$	$I_r(A)$
274,7	262,0	3,854	3,815	5,493
253,1	243,1	3,074	2,948	4,330
220,3	212,1	2,208	2,039	3,070
176,2	169,6	1,580	1,427	2,185
143,1	137,3	1,207	1,147	1,681
114,4	109,9	0,896	0,946	1,290
101,1	97,90	0,747	0,869	1,137

Tabela 5.7 – Ensaio com carga do motor de indução bifásico  $M_{2\phi 3-ACR}$ .

MOTOR		$M_{2\phi 3-ACR}$					
$V_{ac}(V)$	$V_{bc}(V)$	$I_{n-ac}(A)$	$I_{n-bc}(A)$	$I_r(A)$	$W_n(rpm)$	$T_c(Kgfm)$	%
220,0	216,8	4,206	4,052	6,654	1702	0,617	150
220,1	217,0	3,597	3,487	5,691	1724	0,514	125
220,2	214,3	3,219	2,868	4,788	1740	0,411	100
220,0	214,4	2,909	2,404	4,086	1758	0,308	75
220,0	212,4	2,544	2,129	3,511	1772	0,206	50
219,9	215,8	2,109	2,183	3,320	1786	0,103	25
220,1	215,8	2,018	2,171	2,241	1797	0,010	0

Se o motor bifásico assimétrico for submetido a um torque nominal  $T_n$  igual ao do motor de indução trifásico simétrico, o mesmo atingirá uma velocidade nominal de aproximadamente 1700 rpm.

Entretanto, caso se aplique no motor bifásico um torque de carga igual a 2/3 do torque nominal do motor trifásico simétrico, o mesmo atingirá uma velocidade nominal de aproximadamente 1700 rpm.

Observa-se que, as correntes de linha absorvidas pelos motores bifásicos assimétricos com retorno estão praticamente equilibradas, e suas amplitudes são menores, se forem comparadas com as correntes de linha do motor de indução trifásico. Isto acontece, mesmo quando o motor bifásico assimétrico com retorno está trabalhando sobrecarregado (150% da carga), ou seja, com um torque de carga igual a 0,617 Kgf.m.

## 5.4.2 – ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DOS MOTORES BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO

Neste item, serão mostrados os ensaios de elevação da temperatura dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno.

Os motores ensaiados pertencem à Classe B, por isso a sua elevação de temperatura quando o mesmo opera na condição nominal, independente de qual seja a temperatura ambiente, é a 80°C. As elevações de temperatura que o motor atinge são proporcionais às quantidades de calor geradas pelas perdas.

Nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 estão representados os ensaios de elevação da temperatura dos motores de indução bifásicos assimétricos.

Para os ensaios de elevação da temperatura dos motores bifásicos foram utilizadas as condições de 100% de carga para os mesmos, ou seja, os motores estão funcionando com 0,411Kgfm de torque de carga e na velocidade de aproximadamente 1741rpm, com uma corrente nominal de aproximadamente 3,1A.

Na Tabela 5.8 está representado o ensaio de elevação da temperatura do motor de indução bifásico assimétrico  $M_{2\phi 1-ACR}$ .

Tabela 5.8 – Ensaio de elevação da temperatura do motor  $M_{2\phi 1-ACR}$ .

MOTOR		$M_{2\phi 1-ACR}$					
H(h)	$W_n$ (rpm)	$T_N$ (Kgfm)	$I_{n-ac}$ (A)	$I_{n-bc}$ (A)	$\theta_m$ (°C)	$\theta_a$ (°C)	$E_T$ (°C)
11:15	1741	0,411	3,163	3,048	55,8	30,7	25,1
11:30	1741	0,411	3,159	3,046	56,5	31,0	25,5
11:45	1742	0,411	3,157	3,042	57,0	31,3	25,7
12:00	1742	0,411	3,156	3,039	58,2	31,5	26,7
12:15	1742	0,411	3,154	3,036	59,0	31,6	27,4
12:30	1740	0,411	3,152	3,040	61,8	31,9	29,9
12:45	1741	0,411	3,156	3,041	59,8	32,1	27,7
13:00	1741	0,411	3,157	3,041	59,7	32,2	27,5
13:15	1741	0,411	3,152	3,036	59,6	32,4	27,2

Na Tabela 5.9 está representado o ensaio de elevação da temperatura do motor de indução bifásico assimétrico  $M_{2\phi 2-ACR}$ .

Tabela 5.9 – Ensaio de elevação da temperatura do motor  $M_{2\phi 2-ACR}$ .

MOTOR		$M_{2\phi 2-ACR}$					
H(h)	$W_n$ (rpm)	$T_N$ (Kgfm)	$I_{n-ac}$ (A)	$I_{n-bc}$ (A)	$\theta_m$ (°C)	$\theta_a$ (°C)	$E_T$ (°C)
9:15	1745	0,411	3,236	3,190	50,6	27,2	23,4
9:30	1744	0,411	3,235	3,189	51,7	27,5	24,2
9:45	1743	0,411	3,235	3,189	52,7	27,8	24,9
10:00	1743	0,411	3,238	3,188	52,8	27,8	25,0
10:15	1743	0,411	3,235	3,188	53,5	27,9	25,6
10:30	1743	0,411	3,235	3,188	53,9	28,0	25,9
10:45	1742	0,411	3,239	3,193	55,8	28,6	27,8
11:00	1742	0,411	3,248	3,201	57,6	29,2	28,4
11:15	1742	0,411	3,248	3,200	57,2	29,5	27,7
11:30	1742	0,411	3,257	3,206	57,8	29,9	27,9
11:45	1742	0,411	3,254	3,203	57,3	30,2	28,1

Na Tabela 5.10 está representado o ensaio de elevação da temperatura do motor de indução bifásico assimétrico  $M_{2\phi 3-ACR}$ .

Tabela 5.10 – Ensaio de elevação da temperatura do motor  $M_{2\phi 3-ACR}$ .

MOTOR		$M_{2\phi 3-ACR}$					
H(h)	$W_n$ (rpm)	$T_N$ (Kgfm)	$I_{n-ab}$ (A)	$I_{n-bc}$ (A)	$\theta_m$ (°C)	$\theta_a$ (°C)	$E_T$ (°C)
15:00	1745	0,411	3,049	2,979	53,2	33,1	20,1
15:15	1744	0,411	3,058	2,980	54,6	33,4	21,2
15:30	1744	0,411	3,055	2,982	55,5	33,6	21,9
15:45	1743	0,411	3,061	2,980	56,3	33,8	22,5
16:00	1743	0,411	3,056	2,975	55,9	33,8	22,1
16:15	1743	0,411	3,053	2,972	56,4	33,8	22,6
16:30	1743	0,411	3,081	2,940	56,2	33,7	22,5

Observa-se que o motor bifásico  $M_{2\phi 2-ACR}$  possui um gradiente de temperatura ( $E_T$  (°C)) maior, se comparado com os outros motores bifásicos.

### 5.5 – COMPARAÇÃO DOS MOTORES DE INDUÇÃO BIFÁSICOS ASSIMÉTRICOS COM RETORNO

Neste item, serão realizadas comparações entre os parâmetros dos motores trifásico, monofásico e motores bifásicos com retorno. Nas Tabelas 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 estão representadas as comparações entre os motores bifásicos com retorno e os motores trifásicos e monofásicos. Onde:

- $M_{3\varnothing - S}$  → motor trifásico simétrico;
- $M_{2\varnothing - ACR}$  → motor bifásico assimétrico com retorno;
- $M_{1\varnothing CP}$  → motor monofásico com capacitor partida;
- $M_{1\varnothing CCP}$  → motor monofásico com capacitor permanente;
- $I_{oL}$  (A) → a corrente a vazio;
- $I_{nL}$  (A) → a corrente a nominal;
- $W_n$  (rpm) → velocidade nominal;
- $T_n$  (Kgf.m) → Torque nominal;

Na Tabela 5.11 estão representadas os parâmetros dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$  de 1,5CV(0,617Kgf.m – Carcaça 80) e do motor de indução trifásico simétrico  $M_{3\varnothing - S}$  de 1,5CV(0,62Kgf.m - Carcaça 80).

Tabela 5.11 – Motores assíncronos (1,5CV) – Carcaça 80.

PARÂMETROS	$M_{3\varnothing - S}$	$M_{2\varnothing 1 - ACR}$	$M_{2\varnothing 2 - ACR}$	$M_{2\varnothing 3 - ACR}$
$I_{oL}$ (A)	2,80	2,1765	2,4360	2,0945
$I_{nL}$ (A)	4,44	4,1850	4,2225	4,1290
$W_n$ (rpm)	1720	1702	1705	1702
$T_n$ (Kgf.m)	0,620	0,617	0,617	0,617



Na Tabela 5.12 estão representadas os parâmetros dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$  de 1,5CV(0,617Kgf.m – Carcaça 80) e do motor de indução monofásico com capacitor de partida  $M_{1\varnothing CP}$  de 1,5CV(0,61Kgf.m - Carcaça 90L).

Tabela 5.12 – Motores assíncronos (1,5CV) – Carcaça 80 e 90L.

PARÂMETROS	$M_{1\varnothing CP}$	$M_{2\varnothing 1 - ACR}$	$M_{2\varnothing 2 - ACR}$	$M_{2\varnothing 3 - ACR}$
$I_{oL}$ (A)	4,0000	2,1765	2,4360	2,0945
$I_{nL}$ (A)	7,5000	4,1850	4,2225	4,1290
$W_n$ (rpm)	1760	1702	1705	1702
$T_n$ (Kgf.m)	0,610	0,617	0,617	0,617

Na Tabela 5.13 estão representadas os parâmetros dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$  de 1,0CV(0,411Kgf.m – Carcaça 80) e do motor de indução trifásico simétrico  $M_{3\varnothing - S}$  de 1,0CV(0,42Kgf.m - Carcaça 80).

Tabela 5.13 – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80.

PARÂMETROS	$M_{3\varnothing - S}$	$M_{2\varnothing 1 - ACR}$	$M_{2\varnothing 2 - ACR}$	$M_{2\varnothing 3 - ACR}$
$I_{oL}$ (A)	1,9100	2,1765	2,4360	2,0945
$I_{nL}$ (A)	3,0300	3,1055	3,2285	3,0105
$W_n$ (rpm)	1720	1741	1742	1740
$T_n$ (Kgf.m)	0,420	0,411	0,411	0,411

Na Tabela 5.14 estão representadas os parâmetros dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$  de 1,0CV(0,411Kgf.m – Carcaça 80) e do motor de indução monofásico com capacitor de partida  $M_{1\varnothing CP}$  de 1,0CV(0,415Kgf.m - Carcaça 90S). Na Tabela 5.15 estão representadas os parâmetros dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing -$

$M_{2\phi}$  de 1,0CV(0,411Kgf.m – Carcaça 80) e do motor monofásico com capacitor de partida  $M_{1\phi CP}$  de 1,0CV(0,425Kgf.m - Carcaça 80).

Tabela 5.14 – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80 e 90S.

PARÂMETROS	$M_{1\phi CP}$	$M_{2\phi 1 - ACR}$	$M_{2\phi 2 - ACR}$	$M_{2\phi 3 - ACR}$
$I_{oL}$ (A)	4,0000	2,1765	2,4360	2,0945
$I_{nL}$ (A)	5,9000	3,1055	3,2285	3,0105
$W_n$ (rpm)	1760	1741	1742	1740
$T_n$ (Kgf.m)	0,415	0,411	0,411	0,411

Na Tabela 5.16 estão representadas os parâmetros dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\phi - ACR}$  de 1,0CV(0,411Kgf.m – Carcaça 80) e do motor de indução monofásico com capacitor permanente  $M_{1\phi CCP}$  de 1,0CV(0,43Kgf.m - Carcaça 80).

Tabela 5.15 – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80.

PARÂMETROS	$M_{1\phi CP}$	$M_{2\phi 1 - ACR}$	$M_{2\phi 2 - ACR}$	$M_{2\phi 3 - ACR}$
$I_{oL}$ (A)	5,3000	2,1765	2,4360	2,0945
$I_{nL}$ (A)	6,8000	3,1055	3,2285	3,0105
$W_n$ (rpm)	1720	1741	1742	1740
$T_n$ (Kgf.m)	0,425	0,411	0,411	0,411

Tabela 5.16 – Motores assíncronos (1,0CV) – Carcaça 80.

PARÂMETROS	$M_{1\phi CCP}$	$M_{2\phi 1 - ACR}$	$M_{2\phi 2 - ACR}$	$M_{2\phi 3 - ACR}$
$I_{oL}$ (A)	3,0000	2,1765	2,4360	2,0945
$I_{nL}$ (A)	5,6000	3,1055	3,2285	3,0105
$W_n$ (rpm)	1700	1741	1742	1740
$T_n$ (Kgf.m)	0,430	0,411	0,411	0,411

## 5.6 – CONCLUSÃO

O motor de indução trifásico pode ser alimentado por um sistema bifásico simétrico com retorno, pela fase ou neutro; caso o mesmo vier a perder uma de suas fases. E de acordo com as Figuras 5.9a, 5.9b e 5.9c conclui-se que um motor de indução trifásico ligado em estrela com neutro não pararia de funcionar caso o mesmo viesse a perder uma de suas fases. Entretanto, o mesmo não acontece se o motor estiver ligado em delta (Figuras 5.9d, 5.9e, 5.9f e 5.9g), uma vez que, se faz necessário a mudança na polaridade da alimentação para que se tenha uma alimentação bifásica com retorno.

Devido às características de bancada da WEG utilizada para o ensaio do motor bifásico assimétrico com retorno, foram realizados somente o ensaio do motor bifásico com retorno pela fase, que neste caso foi à fase “c”. Com isto, não foi possível comprovar determinados conceitos realizados no capítulo 4, por exemplo, se o motor trifásico ligado em estrela bifásica (Item 4.4, onde  $\beta = \varphi = 120^0$ ) continuaria funcionando, caso o mesmo viesse a perder uma de suas fases de alimentação ou um enrolamento.

Mas, pode-se comprovar que um motor trifásico funcionaria como motor bifásico assimétrico com retorno pela fase (ligação delta aberto), na relação  $\beta = \varphi = 60^0$  (Item 4.3). Entretanto na ligação  $\beta = 60^0$  e  $\varphi = 120^0$  o motor não partiu. Contudo, se fosse realizado o ensaio do motor bifásico na ligação estrela bifásica, os resultados não seriam muito diferentes da ligação em delta aberto (Itens 4.3 e 4.4). Em uma máquina trifásica só é possível obter um ângulo  $\varphi$  igual a  $120^0$  ou  $60^0$ , por isso não se pode realizar o ensaio do motor bifásico com um ângulo  $\varphi$  igual a  $90^0$ .

Através dos ensaios realizados em Jaraguá do Sul – SC na fábrica da WEG mostrados neste capítulo, observou-se que:

- os motores bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$  de 1,5CV (Tabela 5.12), conseguem manter o mesmo torque nominal do motor trifásico  $M_{3\varnothing - S}$  de

1,5CV (Tabela 5.12), mas, com correntes nominais e a vazios menores. Os motores  $M_{2\varnothing - ACR}$  (Tabela 5.14) conseguem manter o mesmo torque nominal do motor trifásico  $M_{3\varnothing - S}$  de 1,0CV (Tabela 5.14), mas, com correntes nominais e a vazios maiores, exceto, o motor  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$  cujas correntes são menores.

- os motores bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$  (Tabela 5.13, Tabela 5.15, Tabela 5.16 e Tabela 5.17), conseguem manter o mesmo torque nominal dos motores monofásicos  $M_{1\varnothing CP}$  e  $M_{1\varnothing CCP}$ , mas, com correntes nominais e a vazios bem menor.

- os motores bifásicos assimétricos com retorno possuem temperaturas que estão dentro dos critérios estabelecidos por norma (Classe de Isolamento tipo B –  $130^{\circ}\text{C}$ ) e possui uma gradiente de temperatura ( $E_T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )) de temperatura de 27,2 ( $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ ), 28,1 ( $M_{2\varnothing 2 - ACR}$ ) e 22,5 ( $M_{2\varnothing 3 - ACR}$ ).

Deve ser observado que existem diferenças entre as correntes dos motores bifásicos  $M_{2\varnothing - ACR}$ , que são causadas por mudanças entre os parâmetros dos motores.

Observa-se que a partida do motor bifásico  $M_{2\varnothing - ACR}$  é prejudicada pela presença das harmônicas de seqüência  $3n$ , principalmente quando o mesmo é acionado com tensão reduzida, independentemente da relação entre  $\beta$  e  $\varphi$ .

Observa-se também que, apesar do motor bifásico  $M_{2\varnothing - ACR}$  na ligação  $\beta$  igual a  $60^{\circ}$  e  $\varphi$  igual a  $120^{\circ}$  não ter partido, isto não garante, que o mesmo não funcione, contudo se o motor bifásico com  $\beta$  igual a  $60^{\circ}$  e  $\varphi$  igual a  $120^{\circ}$  tivesse partido o mesmo teria uma força magnetomotriz e um torque eletromagnético bem maior que o motor bifásico assimétrico com  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^{\circ}$ . Estes são os assuntos que serão abordados no próximo capítulo.

# CAPÍTULO 6

## CALCULO DOS PARÂMETROS DO MOTOR BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO, ANÁLISE DA FMM, TORQUE E VELOCIDADE

### 6.1 – INTRODUÇÃO

Neste item serão realizados os cálculos dos parâmetros do motor de indução bifásico assimétrico com retorno por fase, bem como o do motor de indução trifásico simétrico. O método de calculo dos parâmetros do motor de indução bifásico envolve basicamente dos testes que são:

- teste a vazio;
- teste de rotor bloqueado;

A máquina trifásica utilizada é o motor de indução trifásico  $M_{3\phi} - IP55W21$  da linha Standard descrito no Capítulo 5 e que também é utilizado como motor de indução bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi} - ACR$ .

Posteriormente será realizada a análise da força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor trifásico simétrico e bifásico assimétrico com retorno. Será realizada a análise da fmm e torque do motor bifásico assimétrico com retorno com  $\beta$  igual a  $60^0$ , e  $\phi$  igual a  $60^0$  e  $120^0$ .

Será realizada também a análise da velocidade do motor de indução bifásico, com o intuito de se verificar os efeitos das harmônicas de seqüência  $3n$  na velocidade do motor bifásico assimétrico com retorno, uma vez que, o motor bifásico não consegue atingir a velocidade nominal com tensão reduzida.

## 6.2 – CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E BIFÁSICO ASSIMÉTRICO

De acordo com as análises anteriores o motor bifásico assimétrico com retorno é um motor de indução trifásico, mas com uma de suas fases desligada (Figura 5.9). Portanto o circuito equivalente por fase do motor trifásico não se modifica quando o mesmo passa a funcionar como bifásico assimétrico. Entretanto os valores dos parâmetros do circuito se modificam, uma vez que, as correntes e as potências originais do motor trifásico se alteram quando o mesmo passa a funcionar com bifásico assimétrico.

O circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico simétrico pode ser visto na Figura 6.1

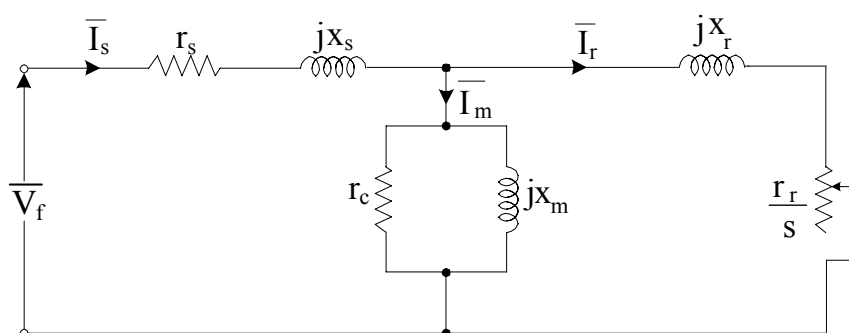


Figura 6.1 - Circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico simétrico.

Onde:

- $r_s$  → resistência do estator;
- $r_r$  → resistência do rotor;
- $x_s$  → reatância do estator;
- $x_r$  → reatância do rotor;
- $r_c$  → resistência de perdas no núcleo;
- $x_m$  → reatância de magnetização;
- $s$  → escorregamento.

Contudo, para o motor bifásico assimétrico com retorno o circuito equivalente possui uma componente de seqüência positiva e uma componente de seqüência negativa (Figura 6.2).

Na Figura 6.2a está representado o circuito equivalente por fase do motor bifásico assimétricos de seqüência positiva e na Figura 6.2b está representado o circuito equivalente por fase do motor bifásico assimétricos de seqüência negativa.

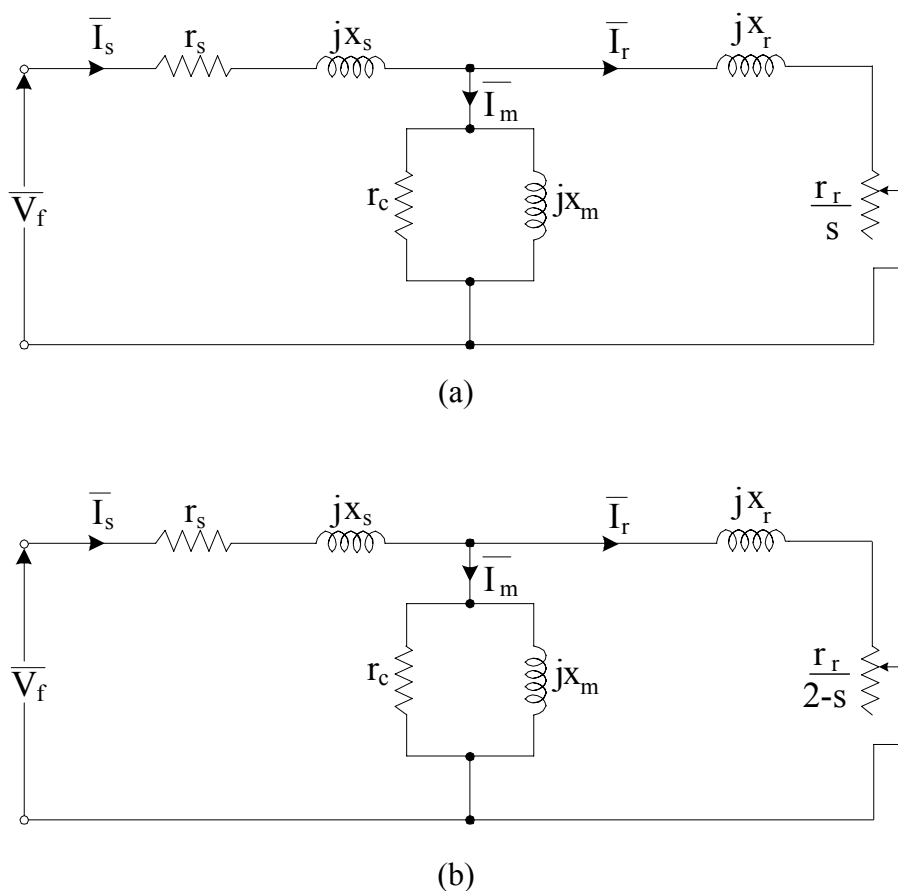


Figura 6.2 - Circuito equivalente por fase do motor bifásico assimétrico. (a) Circuito para seqüência positiva; (b) Circuito para seqüência negativa.

Pode ser observado nos circuitos equivalentes da Figura 6.2 o emprego de  $r_r/s$  (rotor gira no sentido do campo girante de seqüência positiva) e o emprego de  $r_r/2-s$  (rotor gira no sentido do campo de seqüência negativa).

### 6.2.1 – CALCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E BIFÁSICO ASSIMÉTRICO

A obtenção dos parâmetros do circuito equivalente envolve o teste em vazio e de rotor bloqueado (curto-circuito). O teste em vazio fornece os parâmetros do ramo de magnetização ( $r_c$  e  $x_m$ ) trifásico e bifásico assimétrico com retorno. O teste em vazio que é feito pela aplicação de uma tensão trifásica e bifásica equilibrada, respectivamente; e os motores giram sem nenhuma carga acoplada ao seu eixo, como mostrado nas Figuras 6.3a e 6.3b. O teste pode ser feito na ligação delta ou estrela (Figura 6.3a –  $M_{3\phi - s}$ ) e pode ser feito na ligação delta aberto ou estrela bifásica (Figura 6.3b –  $M_{2\phi - ACR}$ ).

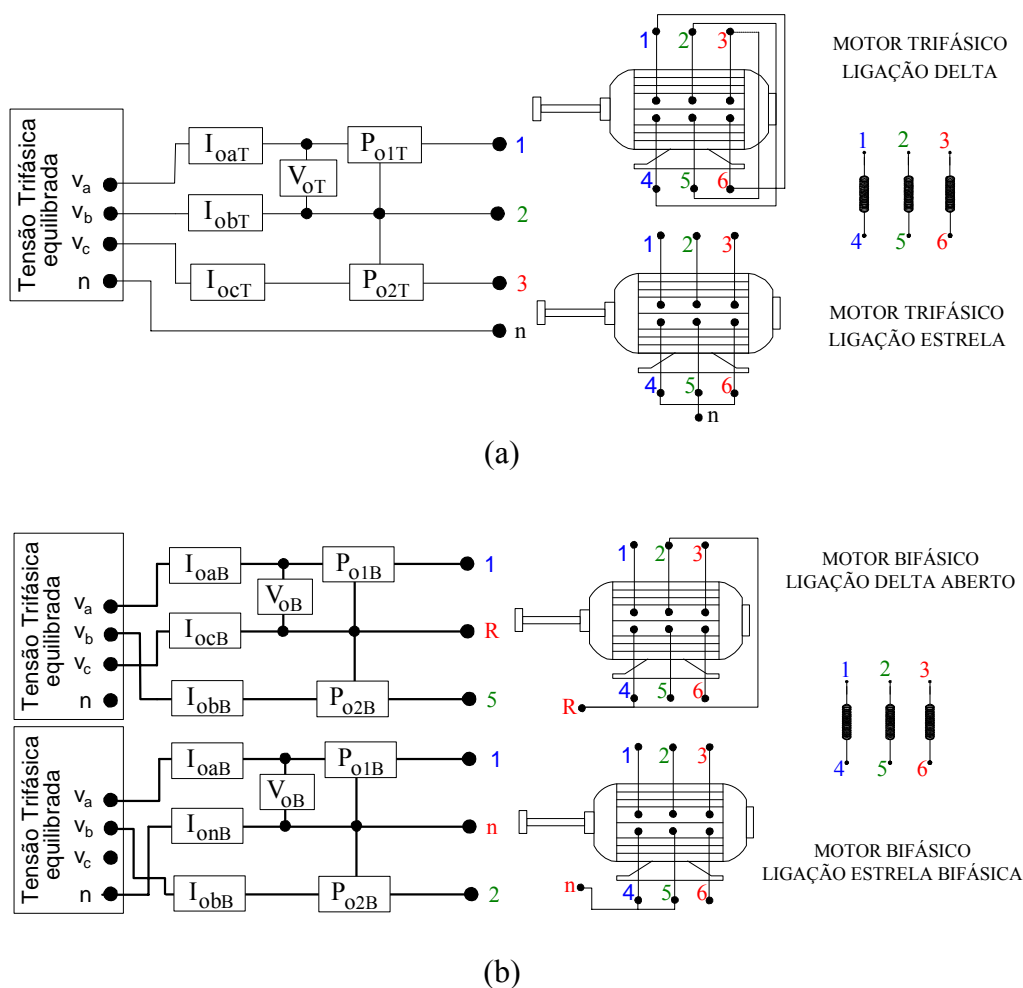


Figura 6.3 - Teste em vazio do motor trifásico e bifásico.



Assim, para o teste em vazio são medidas na tensão nominal e na frequência nominal as potências de entrada de cada fase e as correntes de cada fase da rede. O teste é realizado pelo método dos dois Wattímetros como mostrado nas Figuras 6.3a e 6.3b. O circuito equivalente neste teste toma a configuração indicada na Figura 6.4.

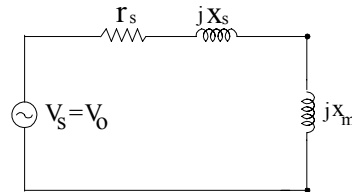


Figura 6.4 - Circuito equivalente para o teste em vazio.

O teste de curto circuito fornece os outros parâmetros do circuito, tais como, resistências dos enrolamentos e reatâncias de dispersão.

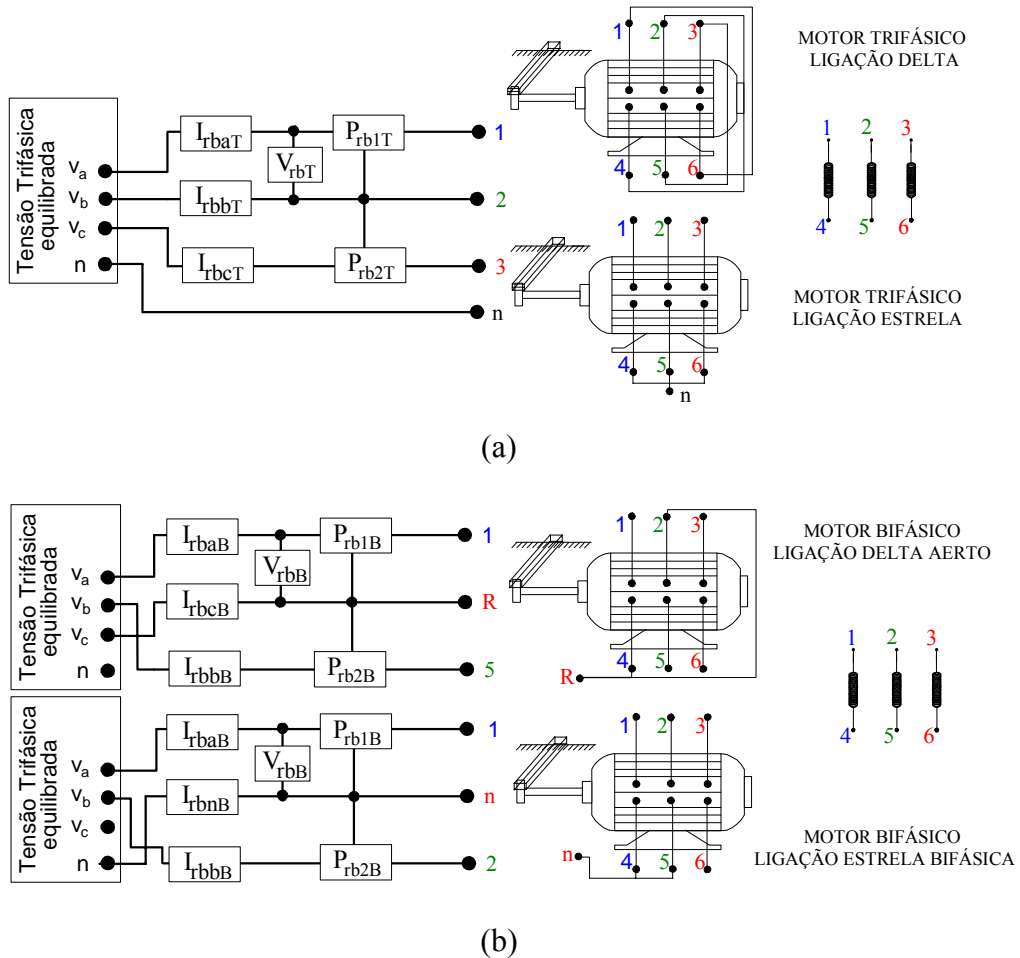


Figura 6.5 - Teste de rotor bloqueado do motor trifásico e bifásico.

Este teste é análogo ao teste de curto-circuito do transformador. O rotor tem que ser bloqueado como descrito nas Figuras 6.5a e 6.5b, para evitar a rotação e que o enrolamento do rotor seja curto-circuitado no modo usual. Outrossim, visto que o escorregamento é unitário, o resistor equivalente de carga mecânica ( $R_m$ ) é zero e desta forma, a impedância de entrada do circuito equivalente é baixa.

Portanto, de forma a limitar a corrente do rotor durante o teste a valores razoáveis uma tensão reduzida deve ser empregada. Além disso, a operação nestas tensões reduzidas faz com que as perdas no núcleo, assim como a corrente de magnetização, sejam desprezíveis. Conseqüentemente, o circuito equivalente neste teste toma a configuração indicada na Figura 6.6.

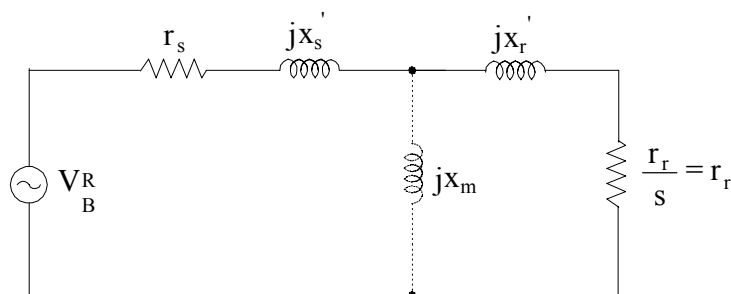


Figura 6.6 - Circuito equivalente do teste de rotor bloqueado.

Considere agora as leituras que foram obtidas dos instrumentos, durante os testes em vazio e de rotor bloqueado, no motor de indução trifásico e bifásico assimétrico com retorno:

- teste em vazio do motor trifásico:

$V_{oT}$  → leitura da tensão no motor trifásico [V];

$I_{oaT}$  → leitura da corrente na fase “a” do motor trifásico [A];

$I_{obT}$  → leitura da corrente na fase “b” do motor trifásico [A];

$I_{ocT}$  → leitura da corrente na fase “c” do motor trifásico [A];

$P_{o1T}$  → leitura da potência 1 no motor trifásico [W];

$P_{o2T}$  → leitura da potência 2 no motor trifásico [W];

- teste em vazio do motor bifásico:

$V_{oB}$  → leitura da tensão no motor bifásico [V];

$I_{oaB}$  → leitura da corrente na fase “a” do motor bifásico [A];

$I_{obB}$  → leitura da corrente na fase “b” do motor bifásico [A];

$I_{ocB}$  → corrente de retorno pela fase “c” no motor bifásico [A];

$I_{onB}$  → corrente de retorno pelo neutro no motor bifásico [A];

$P_{o1B}$  → leitura da potência 1 no motor bifásico [W];

$P_{o2B}$  → leitura da potência 2 no motor bifásico [W];

- teste em curto circuito do motor trifásico:

$V_{rbT}$  = leitura da tensão no motor trifásico [V];

$I_{rbaT}$  = leitura da corrente na fase “a” do motor trifásico [A];

$I_{rbbT}$  = leitura da corrente na fase “b” do motor trifásico [A];

$I_{rbcT}$  = leitura da corrente na fase “c” do motor trifásico [A];

$P_{rb1T}$  = leitura da potência 1 no motor trifásico [W];

$P_{rb2T}$  = leitura da potência 2 no motor trifásico [W];

- teste em curto circuito do motor bifásico:

$V_{rbB}$  = leitura da tensão no motor bifásico [V];

$I_{rbaB}$  = leitura da corrente na fase “a” do motor bifásico [A];

$I_{rbbB}$  = leitura da corrente na fase “b” do motor bifásico [A];

$I_{rbcB}$  = corrente de retorno pela fase “c” no motor bifásico [A];

$I_{rnbB}$  = corrente de retorno pelo neutro no motor bifásico [A];

$P_{rb1B}$  = leitura da potência 1 no motor bifásico [W];

$P_{rb2B}$  = leitura da potência 2 no motor bifásico [W];

Através das leituras realizadas nos teste a vazio e de rotor bloqueado dos motores de indução trifásico e bifásico assimétricos com retorno pela fase

“c”, pode-se realizar os cálculos para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente por fase.

Para o teste em vazio as potências a vazio totais para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$P_{oT} = P_{o1T} - P_{o2T} \text{ [W]} \quad (6.1)$$

$$P_{oB} = P_{o1B} + P_{o2B} \text{ [W]} \quad (6.2)$$

Para o teste em curto circuito as potências de curto circuito totais para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$P_{rbT} = P_{rb1T} + P_{rb2T} \text{ [W]} \quad (6.2)$$

$$P_{rbB} = P_{rb1B} + P_{rb2B} \text{ [W]} \quad (6.3)$$

Para o teste em vazio as correntes totais para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$i_{oT} = \frac{i_{oaT} + i_{obT} + i_{ocT}}{3} \text{ [A]} \quad (6.5)$$

$$i_{oB} = \frac{i_{oaB} + i_{abB}}{2} \text{ [A]} \quad (6.6)$$

Para o teste em curto circuito as correntes totais para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$i_{rbT} = \frac{i_{rbaT} + i_{rbbT} + i_{rbcT}}{3} \text{ [A]} \quad (6.7)$$

$$i_{rbB} = \frac{i_{rbaB} + i_{rbbB}}{2} \text{ [A]} \quad (6.8)$$

Para o teste em vazio as impedâncias para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$Z_{oT} = \frac{V_{oT}}{\sqrt{3} \cdot i_{oT}} \quad [\Omega] \quad (6.9)$$

$$Z_{oB} = \frac{V_{oB}}{\sqrt{3} \cdot i_{oB}} \quad [\Omega] \quad (6.10)$$

Para o teste em curto circuito as impedâncias para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$Z_{rbT} = \frac{V_{rbT}}{\sqrt{3} \cdot i_{rbT}} \quad [\Omega] \quad (6.11)$$

$$Z_{rbB} = \frac{V_{rbB}}{\sqrt{3} \cdot i_{rbB}} \quad [\Omega] \quad (6.12)$$

Para o teste em vazio as resistências para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$R_{oT} = \frac{P_{oT}}{3 \cdot (i_{oT})^2} \quad [\Omega] \quad (6.13)$$

$$R_{oB} = \frac{P_{oB}}{2 \cdot (i_{oB})^2} \quad [\Omega] \quad (6.14)$$

Para o teste em curto circuito as resistências para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$R_{rbT} = \frac{P_{rbT}}{3 \cdot (i_{rbT})^2} \quad [\Omega] \quad (6.15)$$

$$R_{rbB} = \frac{P_{rbB}}{2 \cdot (i_{rbB})^2} \quad [\Omega] \quad (6.16)$$

Para o teste em vazio as reatâncias para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$X_{oT} = \sqrt{Z_{oT} - R_{oT}} \quad [\Omega] \quad (6.17)$$

$$X_{oB} = \sqrt{Z_{oB} - R_{oB}} \quad [\Omega] \quad (6.18)$$

Para o teste em curto circuito as reatâncias para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$X_{rbT} = \sqrt{Z_{rbT} - R_{rbT}} \quad [\Omega] \quad (6.19)$$

$$X_{rbB} = \sqrt{Z_{rbB} - R_{rbB}} \quad [\Omega] \quad (6.20)$$

A resistência do estator por fase para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$r_{sT} = r_{mT} \quad [\Omega] \quad (6.21)$$

$$r_{sB} = r_{mB} \quad [\Omega] \quad (6.22)$$

Onde:

- $r_{mT}$  → medida da resistência do estator por fase do motor trifásico;
- $r_{mB}$  → medida da resistência do estator por fase do motor bifásico;

A resistência do rotor por fase para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$r_{rT} = R_{rbT} - r_{mT} \quad [\Omega] \quad (6.23)$$

$$r_{rB} = R_{rbB} - r_{mB} \quad [\Omega] \quad (6.24)$$

A reatância do estator e rotor por fase para o motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$X_{sT} = X_{rT} = \frac{X_{rbT}}{2} \quad [\Omega] \quad (6.25)$$

$$X_{sB} = X_{rB} = \frac{X_{rbB}}{2} \quad [\Omega] \quad (6.26)$$

As reatâncias de magnetização do motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$X_{mT} = X_{oT} - X_{sT} \quad [\Omega] \quad (6.27)$$

$$X_{mB} = X_{oB} - X_{sB} \quad [\Omega] \quad (6.28)$$

As resistências de perdas no núcleo do motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$r_{cT} = \frac{V_F}{I_{cT}} \quad [\Omega] \quad (6.29)$$

$$r_{cB} = \frac{V_F}{I_{cB}} \quad [\Omega] \quad (6.30)$$

$$I_{cT} = \frac{P_{cT}}{q_{fT} \cdot V_F} \quad [A] \quad (6.31)$$

$$I_{cB} = \frac{P_{cB}}{q_{fB} \cdot V_F} \quad [A] \quad (6.32)$$

$$P_{cT} = P_{oT} - q_{fT} \cdot I_{oT}^2 \cdot r_{sT} + P_{rotT} \quad [W] \quad (6.33)$$

$$P_{cB} = P_{oB} - q_{fB} \cdot I_{oB}^2 \cdot r_{sB} + P_{rotB} \quad [W] \quad (6.34)$$

Onde:

-  $V_F \rightarrow$  Tensão por fase [V];

- $I_{cT}$  → resistência de perda no núcleo no motor trifásico [A];
- $I_{cB}$  → resistência de perda no núcleo no motor bifásico [A];
- $q_{fT}$  → número de fases do motor trifásico;
- $q_{fB}$  → número de fases do motor bifásico;
- $P_{rotT}$  → perdas rotacionais do motor trifásico [W];
- $P_{rotB}$  → perdas rotacionais do motor bifásico [W];

As indutâncias de magnetização do motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$L_{mT} = \frac{X_{mT}}{2.\pi.f} \text{ [H]} \quad (6.35)$$

$$L_{mB} = \frac{X_{mB}}{2.\pi.f} \text{ [H]} \quad (6.36)$$

As indutâncias de dispersão do estator do motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$L_{sT} = \frac{X_{sT}}{2.\pi.f} \text{ [H]} \quad (6.37)$$

$$L_{sB} = \frac{X_{sB}}{2.\pi.f} \text{ [H]} \quad (6.38)$$

As indutâncias de dispersão do rotor do motor trifásico e bifásico assimétrico, respectivamente são iguais a:

$$L_{rT} = \frac{X_{rT}}{2.\pi.f} \text{ [H]} \quad (6.39)$$

$$L_{rB} = \frac{X_{rB}}{2.\pi.f} \text{ [H]} \quad (6.40)$$



**6.2.2 – RESULTADOS DOS TESTES EM VAZIO E ROTOR BLOQUEADO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E BIFÁSICO ASSIMÉTRICOS**

Neste item serão mostrados os testes a vazio e de rotor bloqueado realizados no motor de indução trifásico  $M_{3\phi - s}$  e nos motores de indução bifásicos assimétricos  $M_{2\phi - ACR}$  com retorno (Item 5.3.). O teste do motor trifásico foi realizado na ligação triângulo (Item 5.4 – Figura 5.12) e os testes dos motores bifásicos assimétricos foram realizados na ligação delta aberto (Item 5.2 – Figuras 5.9d a 5.9g), devido à disponibilidade da tensão. Na Tabela 6.1 estão representados os ensaios a vazio e rotor bloqueado dos motores de indução trifásico  $M_{3\phi - s}$ ,  $M_{2\phi 1 - ACR}$ ,  $M_{2\phi 2 - ACR}$  e  $M_{2\phi 3 - ACR}$ .

Tabela 6.1 – Ensaios a vazio e rotor bloqueado.

MOTOR TRIFÁSICO $M_{3\phi - s}$				MOTOR BIFÁSICO $M_{2\phi 1 - ACR}$			
$V_{oT}$	220V	$V_{RBT}$	37V	$V_{oB}$	220V	$V_{RBB}$	47V
$I_{oa}$	2,95A	$I_{RBa}$	4,40A	$I_{oa}$	2,20A	$I_{RBa}$	3,20A
$I_{ob}$	3,00A	$I_{RBb}$	4,40A	$I_{ob}$	2,40A	$I_{RBb}$	3,450A
$I_{oc}$	2,75A	$I_{RBc}$	4,40A	$I_{oc}$	0,00A	$I_{RBc}$	0,00A
$P_{o1}$	410W	$P_{RB1}$	150W	$P_{o1}$	130W	$P_{RB1}$	95,0W
$P_{o2}$	270W	$P_{RB2}$	30,0W	$P_{o2}$	30,0W	$P_{RB2}$	100W
MOTOR BIFÁSICO $M_{2\phi 2 - ACR}$				MOTOR BIFÁSICO $M_{2\phi 3 - ACR}$			
$V_{oB}$	220V	$V_{RBB}$	46V	$V_{oB}$	220V	$V_{RBB}$	45V
$I_{oa}$	2,40A	$I_{RBa}$	3,20A	$I_{oa}$	2,20A	$I_{RBa}$	3,20A
$I_{ob}$	2,60A	$I_{RBb}$	3,55A	$I_{ob}$	2,30A	$I_{RBb}$	3,70A
$I_{oc}$	0,00A	$I_{RBc}$	0,00A	$I_{oc}$	0,00A	$I_{RBc}$	0,00A
$P_{o1}$	130W	$P_{RB1}$	90,0W	$P_{o1}$	120W	$P_{RB1}$	9,00W
$P_{o2}$	40,0W	$P_{RB2}$	100W	$P_{o2}$	10,0W	$P_{RB2}$	100W

Os cálculos dos parâmetros foram realizados de acordo com as equações descritas no Item 6.21. Na Tabela 6.2 estão representados os parâmetros por fase do circuito equivalente do motor de indução trifásico  $M_{3\phi - s}$  e dos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\phi 1 - ACR}$ ,  $M_{2\phi 2 - ACR}$  e  $M_{2\phi 3 - ACR}$ .

Tabela 6.2 – Parâmetros do circuito equivalente por fase dos motores de indução trifásico e bifásicos assimétricos com retorno.

$\bar{r}_{s-M_{3\phi-S}}$	$\bar{r}_{r-M_{3\phi-S}}$	$X_{m-M_{3\phi-S}}$	$X_{s-M_{3\phi-S}}$	$X_{r-M_{3\phi-S}}$
5,300Ω	3,9975Ω	124,730Ω	5,6057Ω	5,6057Ω
$\bar{r}_{s-M_{2\phi1-ACR}}$	$\bar{r}_{r-M_{2\phi1-ACR}}$	$X_{m-M_{2\phi1-ACR}}$	$X_{s-M_{2\phi1-ACR}}$	$X_{r-M_{2\phi1-ACR}}$
5,300Ω	3,5019Ω	88,926Ω	5,5234Ω	5,5234Ω
$\bar{r}_{s-M_{2\phi2-ACR}}$	$\bar{r}_{r-M_{2\phi2-ACR}}$	$X_{m-M_{2\phi2-ACR}}$	$X_{s-M_{2\phi2-ACR}}$	$X_{r-M_{2\phi2-ACR}}$
5,300Ω	3,0402Ω	81,5530Ω	5,3900Ω	5,3900Ω
$\bar{r}_{s-M_{2\phi3-ACR}}$	$\bar{r}_{r-M_{2\phi3-ACR}}$	$X_{m-M_{2\phi3-ACR}}$	$X_{s-M_{2\phi3-ACR}}$	$X_{r-M_{2\phi3-ACR}}$
5,300Ω	2,6815 Ω	91,7730Ω	5, 1582Ω	5, 1582Ω

Na Figura 6.7 estão representados os circuitos equivalentes do motor bifásico com retorno. Na Figura 6.7(a) está representado o circuito de seqüência positiva e na Figura 6.7(b) está representado o circuito de seqüência negativa.

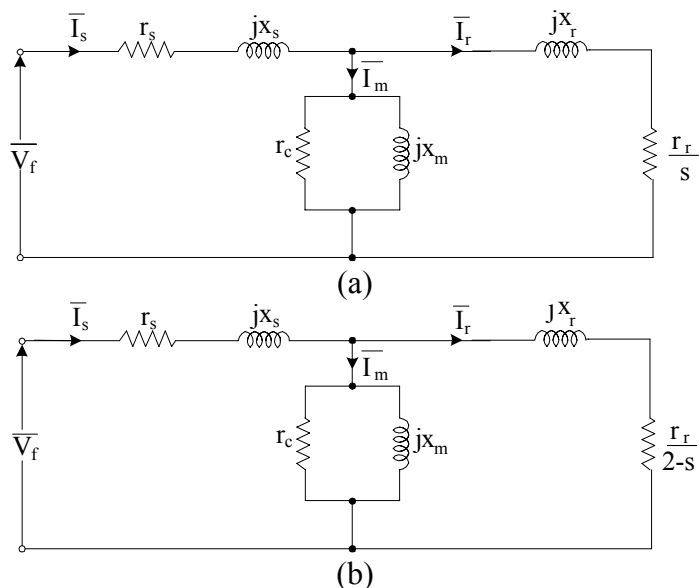


Figura 6.7 - Circuito equivalente por fase do motor bifásico assimétrico.

### 6.3 – ANÁLISE DA FORÇA MAGNETOMOTRIZ E DO TORQUE ELETROMAGNÉTICO DO MOTOR BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO

Neste item serão mostradas as formas de onda das forças magnetomotrizes e dos torques eletromagnéticos dos motores de indução trifásico e bifásico assimétrico com retorno.

O motor de indução trifásico é constituído de um enrolamento trifásico, cujos eixos das fases “a”, “b” e “c” estão defasados de  $120^0$  elétricos no espaço entre si. Quando os enrolamentos do motor trifásico são alimentados por uma tensão trifásica equilibrada, cujas tensões  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  (Figura 6.8a) estão defasadas uma da outra de  $120^0$  no tempo.

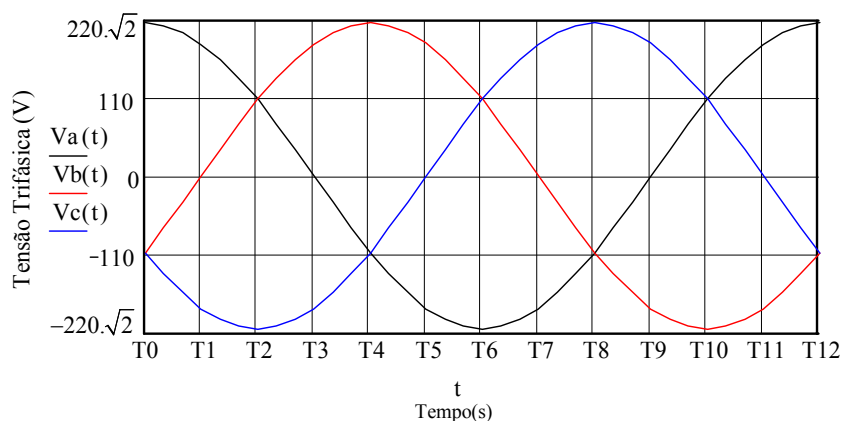


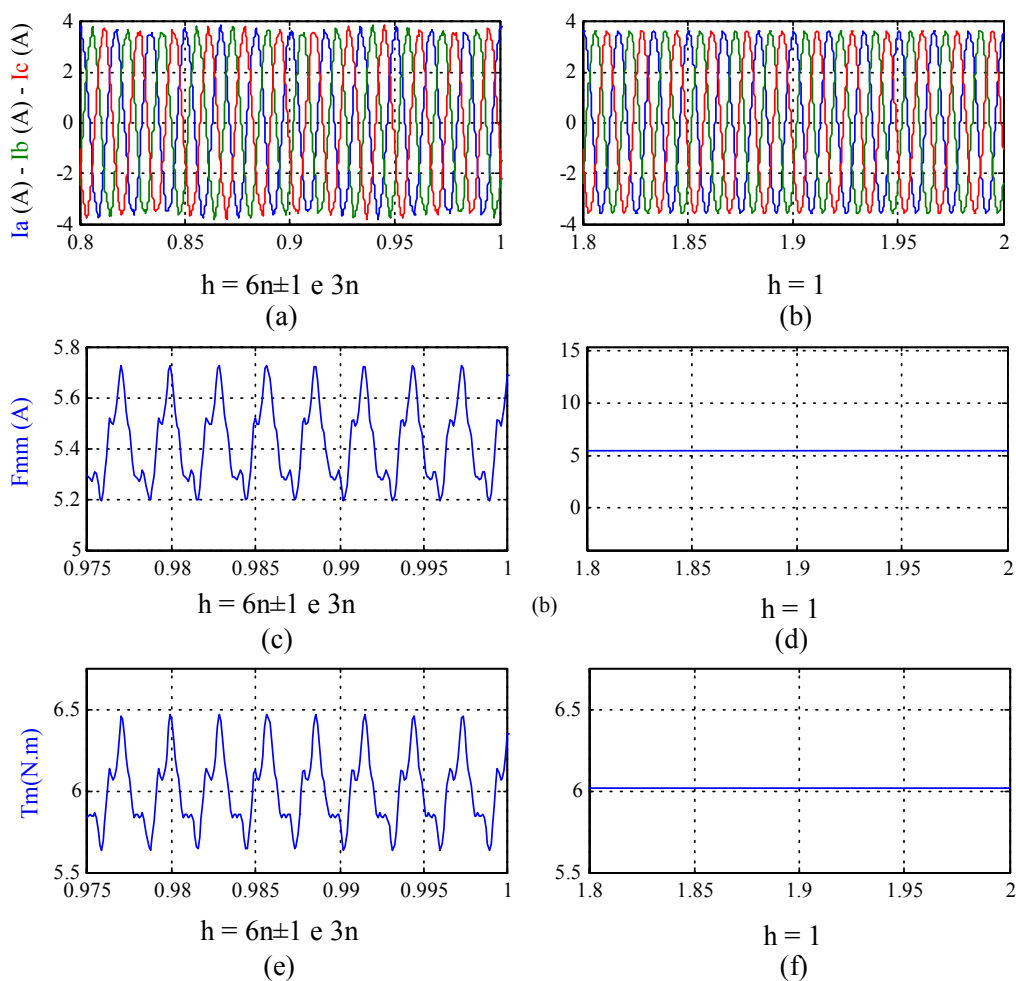
Figura 6.8 – Tensão trifásica equilibrada.

Surge nos enrolamentos uma corrente trifásica equilibrada cujas correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  (Figura 6.9b) estão defasadas uma da outra de  $120^0$  no tempo. Estas correntes são responsáveis pela distribuição do fluxo ao redor do entreferro<sup>1</sup>, que no caso do motor trifásico é constante. Esta distribuição de fluxo resulta em uma força magnetomotriz resultante constante (Figura 6.9d) que produz um torque eletromagnético uniforme. (Figura 6.9f), isto é verdade somente para a condição com  $h$  igual a 1, pois se a condição for com  $h$  igual a

<sup>1</sup> A distribuição de fluxo ao redor do entreferro do motor trifásico pode ser vista no anexo.

$3n$  e  $6n \pm 1$ , as correntes que alimentam o motor trifásico estarem desequilibradas (Figura 6.9a), isto conseqüentemente resultará em uma fmm não constante (Figura 6.9c) que produz um torque não uniforme (Figuras 6.9e)

Nas Figuras 6.9 estão representadas as formas de onda das correntes, das forças magnetomotrices e dos torques eletromagnéticos do motor trifásico simétrico ( $M_{3\varnothing-s} = 0,62\text{Kgf.m}$ ).



Figuras 6.9 – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor trifásico simétrico  $M_{3\varnothing-s}$ .

Nas Figuras 6.9a e 6.9b estão representadas as formas de onda das correntes do motor trifásico com as seqüências de harmônica  $6n \pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. Nas Figuras 6.9c e 6.9d estão representadas as

formas de onda das forças magnetomotrizes do motor trifásico com as seqüências harmônica  $6n \pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. E nas Figuras 6.9e e 6.9f estão representadas as formas do torque eletromagnético do motor trifásico com as seqüências de harmônica  $6n \pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente.

Entretanto, caso o motor trifásico estiver trabalhando sem uma de suas fase de alimentação ou sem um enrolamento, o mesmo passara a funcionar como bifásico assimétrico com retorno pela fase ou pelo neutro (Figura 5.9 – Capítulo 5).

O motor de indução bifásico assimétrico é constituído de um enrolamento bifásico, cujos eixos das fases “a” e “b” estão defasados de  $120^\circ$  elétricos no espaço entre si. Quando o motor bifásico assimétrico com retorno é alimentado com uma tensão bifásica equilibrada, cujas tensões ( $V_a - V_b$ ) estão defasadas uma da outra de  $120^\circ$  ou  $60^\circ$  no tempo (Figuras 6.10a e 6.10b).

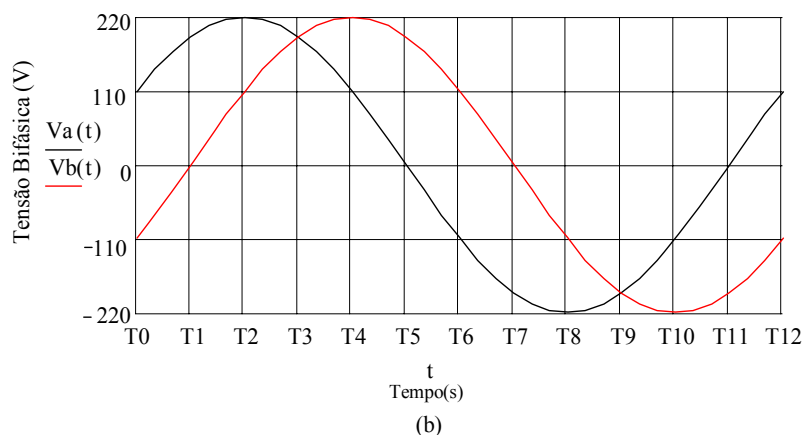
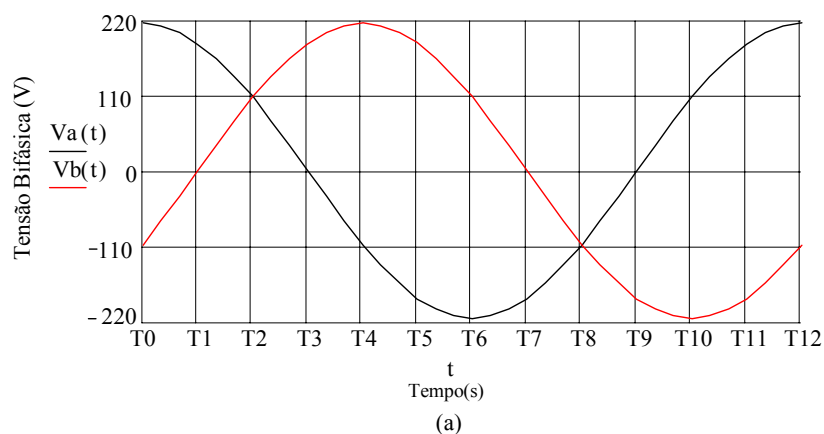


Figura 6.10 – Tensão bifásica equilibrada.

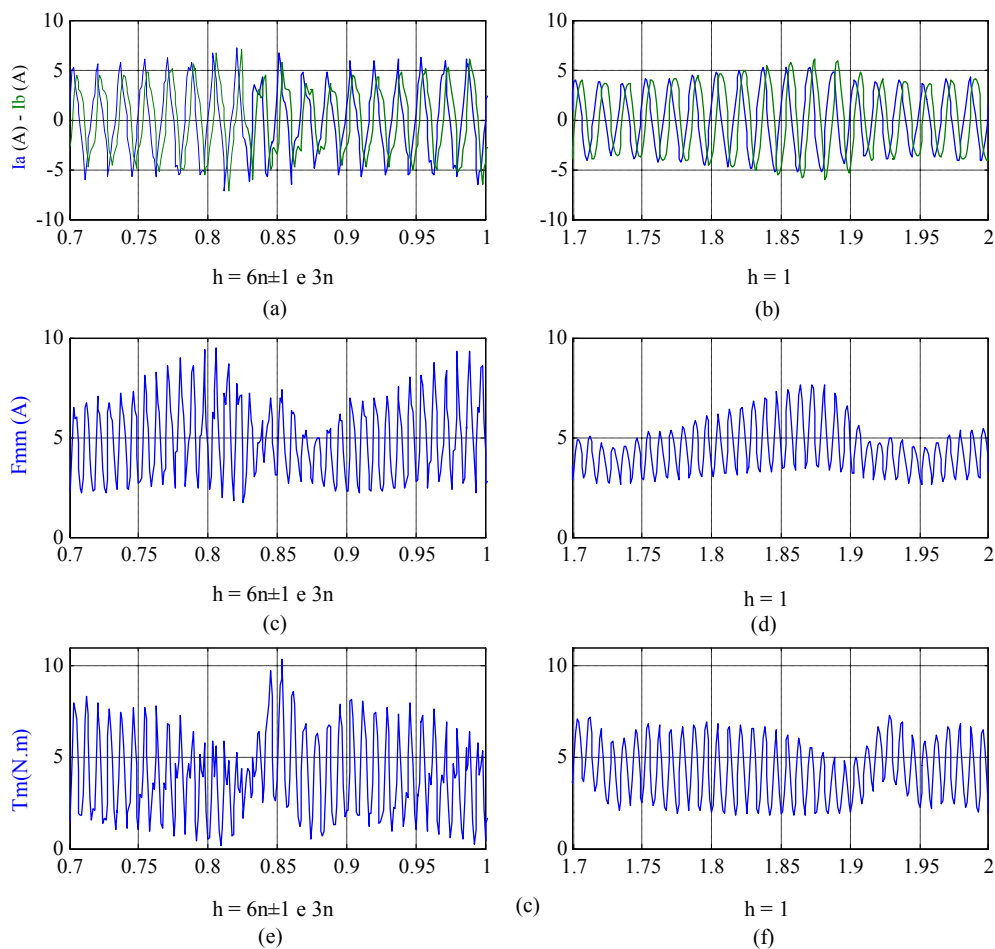
Surge nos enrolamentos uma corrente bifásica desequilibrada cujas correntes  $i_a$  e  $i_b$  (Figuras 6.11a, 6.12a, 6.13a, 6.11b, 6.12b e 6.13b) estão defasadas uma da outra de  $120^\circ$  ou  $60^\circ$  no tempo. Estas correntes são responsáveis pela distribuição do fluxo ao redor do entreferro<sup>2</sup>, que no caso do motor bifásico assimétrico não é constante.

Esta distribuição de fluxo resulta em uma força magnetomotriz resultante não constante (Figuras 6.11c, 6.12c, 6.13c, 6.11d, 6.12d e 6.13d) que produz um torque eletromagnético não uniforme (Figuras 6.11e, 6.12e, 6.13e, 6.11f, 6.12f e 6.13f), independentemente da condição de h.

Nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 estão representadas formas de onda das correntes do estator, das forças magnetomotrizes e dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing - ACR}$  (0,42Kgf.m) com  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^\circ$ . Na Figura 6.11 estão representadas formas de onda das correntes do estator, das forças magnetomotrizes e dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ . Na Figura 6.12 estão representadas formas de onda das correntes do estator, das forças magnetomotrizes e dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$ . E na Figura 6.11 estão representadas formas de onda das correntes do estator, das forças magnetomotrizes e dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$ . Nas Figuras 6.11a e 6.11b estão representadas as formas de onda das correntes do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. Nas Figuras 6.11c e 6.11d estão representadas as formas de onda das forças magnetomotrizes do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. E nas Figuras 6.11e e 6.11f estão representadas as formas de onda dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente.

---

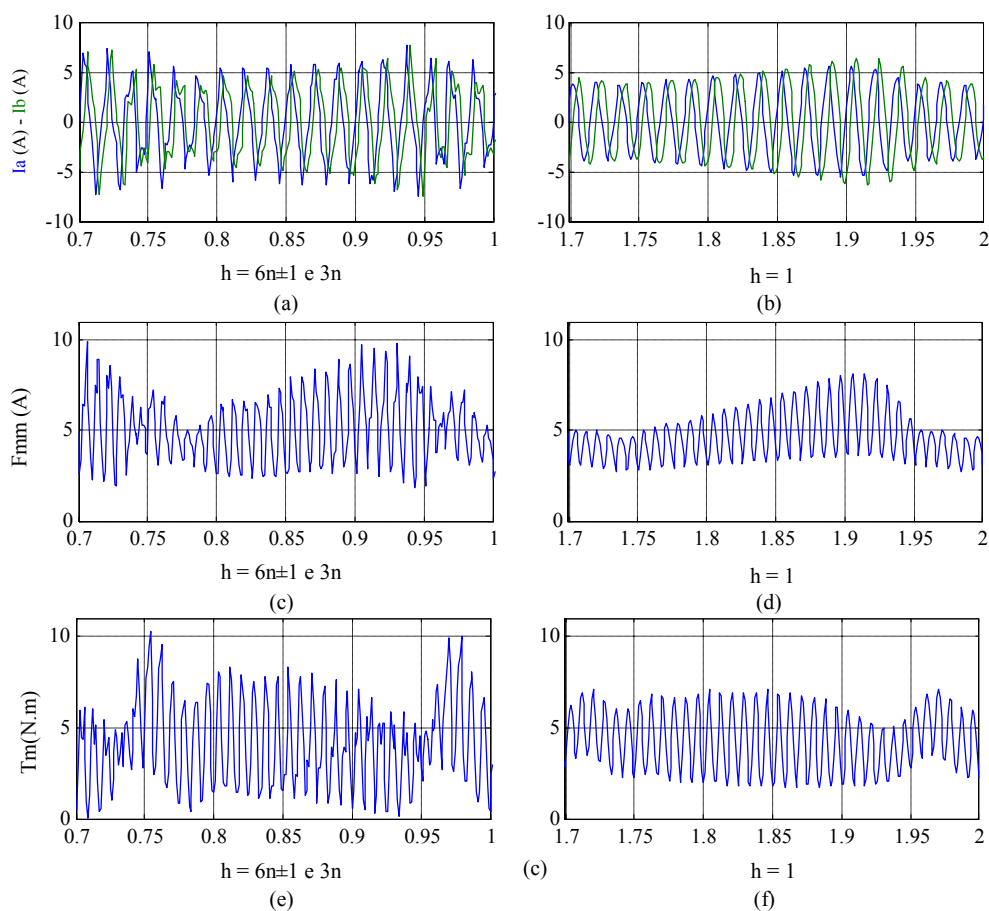
<sup>2</sup> A distribuição de fluxo ao redor do entreferro do motor bifásico assimétrico com retorno pode ser vista no anexo.



Figuras 6.11 – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico com retorno  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ .

Nas Figuras 6.12a e 6.12b estão representadas as formas de onda das correntes do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n \pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. Nas Figuras 6.12c e 6.12d estão representadas as formas de onda das forças magnetomotrizes do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n \pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. E nas Figuras 6.12e e 6.12f estão representadas as formas de onda dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n \pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente.

Nas Figuras 6.13a e 6.13b estão representadas as formas de onda das correntes do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n \pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente.



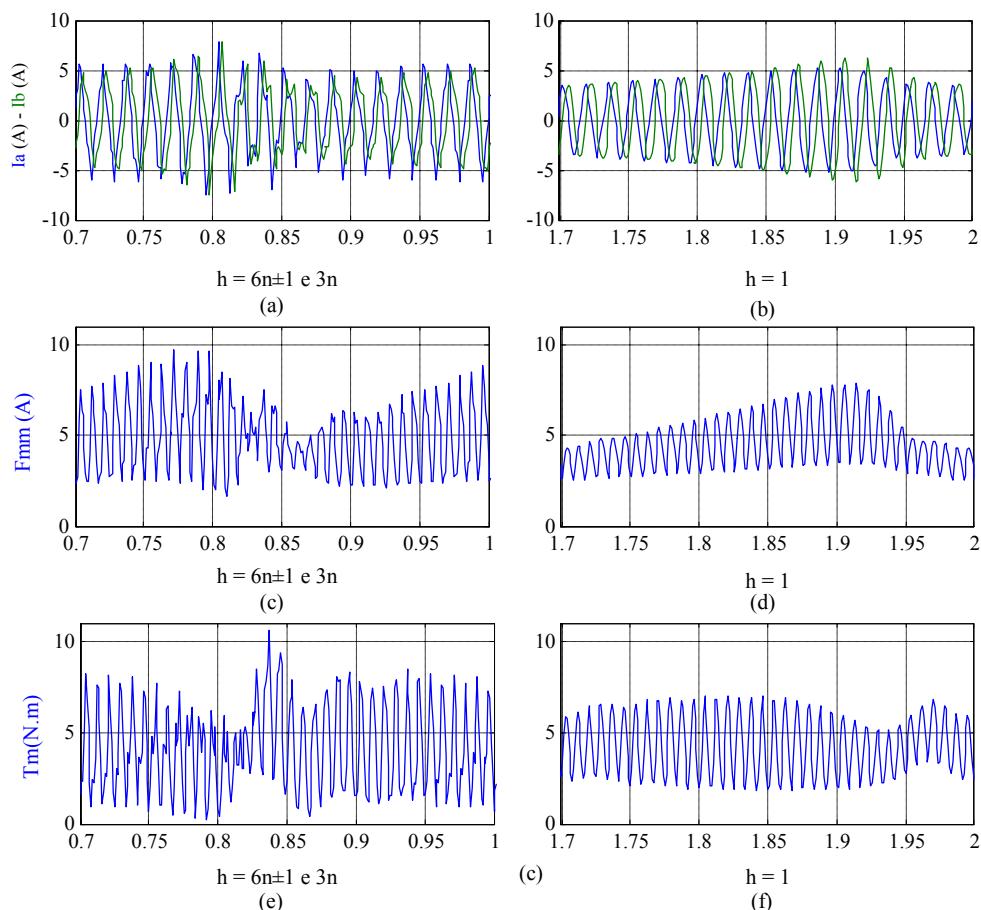
Figuras 6.12 – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico com retorno  $M_{2\varnothing 2-ACR}$ .

Nas Figuras 6.13c e 6.13d estão representadas as formas de onda das forças magnetomotrizes do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 3-ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. E nas Figuras 6.13e e 6.13f estão representadas as formas de onda dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 3-ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente.

Analisando as Figuras 6.9 observa-se no motor trifásico a presença das seqüências harmônicas  $6n\pm 1$  e  $3n$  causa mudanças na amplitude das correntes e com isto causam oscilações na força magnetomotriz e conseqüentemente produz um torque eletromagnético não uniforme. Entretanto, analisando as Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 observa-se que no motor bifásico assimétrico as variações na amplitude são muito maiores conseqüentemente as oscilações na



força magnetomotriz e torque não uniforme também. As harmônicas de seqüência  $6n \pm 1$  e  $3n$  provocam oscilações bem maiores, do que a harmônica fundamental.

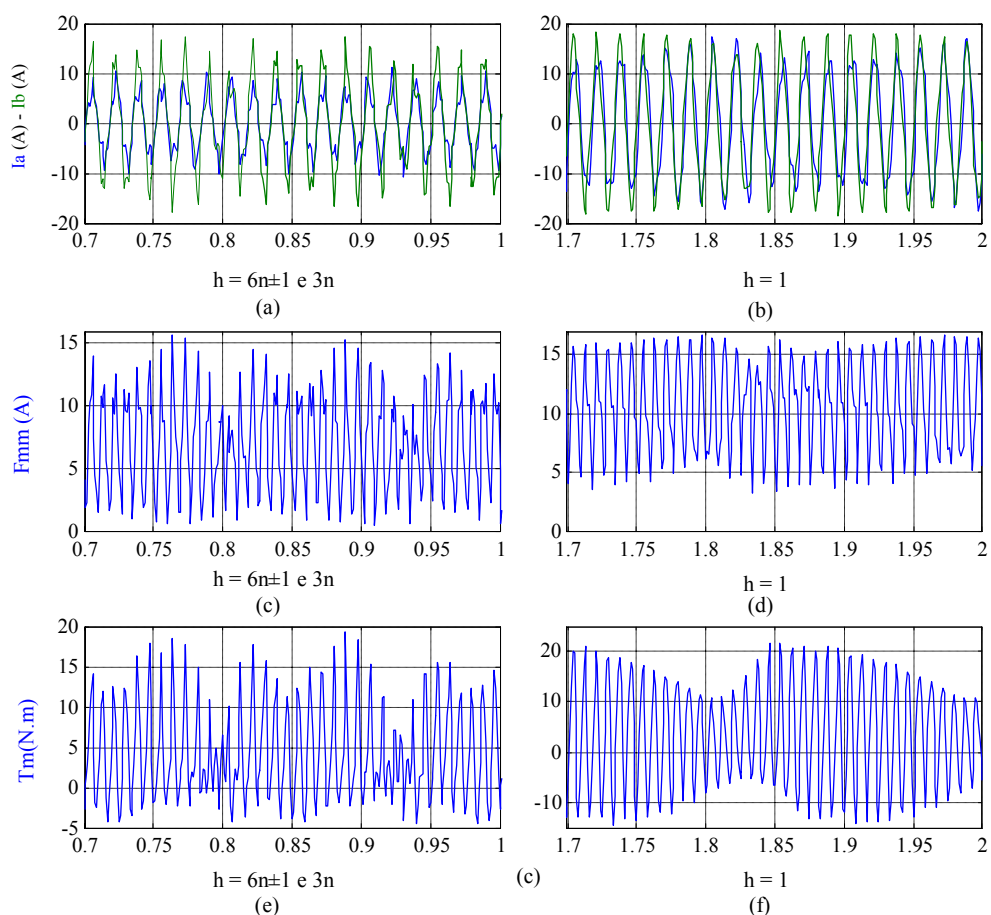


Figuras 6.13 – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico com retorno  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$ .

Observou-se através dos ensaios realizados na indústria da WEG em Jaraguá do Sul – SC (Capítulo 5) que o motor bifásico assimétrico com retorno com  $\beta$  igual a  $60^\circ$  e  $\varphi$  igual a  $120^\circ$  não partiu, entretanto se o motor tivesse partido o mesmo teria uma sobrecorrente no estator, que resultaria em uma força magnetomotriz e um torque eletromagnético bastante oscilante.

Nas Figuras 6.14 estão representadas as formas de onda das correntes, das forças magnetomotrizes e dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  igual a  $60^\circ$  e  $\varphi$  igual a  $120^\circ$ . Nas Figuras 6.14a e 6.14b estão representadas as formas de onda das correntes do

motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. Nas Figuras 6.14c e 6.14d estão representadas as formas de onda das forças magnetotrizas do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente. E nas Figuras 6.14e e 6.14f estão representadas as formas de onda dos torques eletromagnéticos do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing - ACR}$  com as seqüências de harmônica  $6n\pm 1$  e  $3n$ , e fundamental, respectivamente.

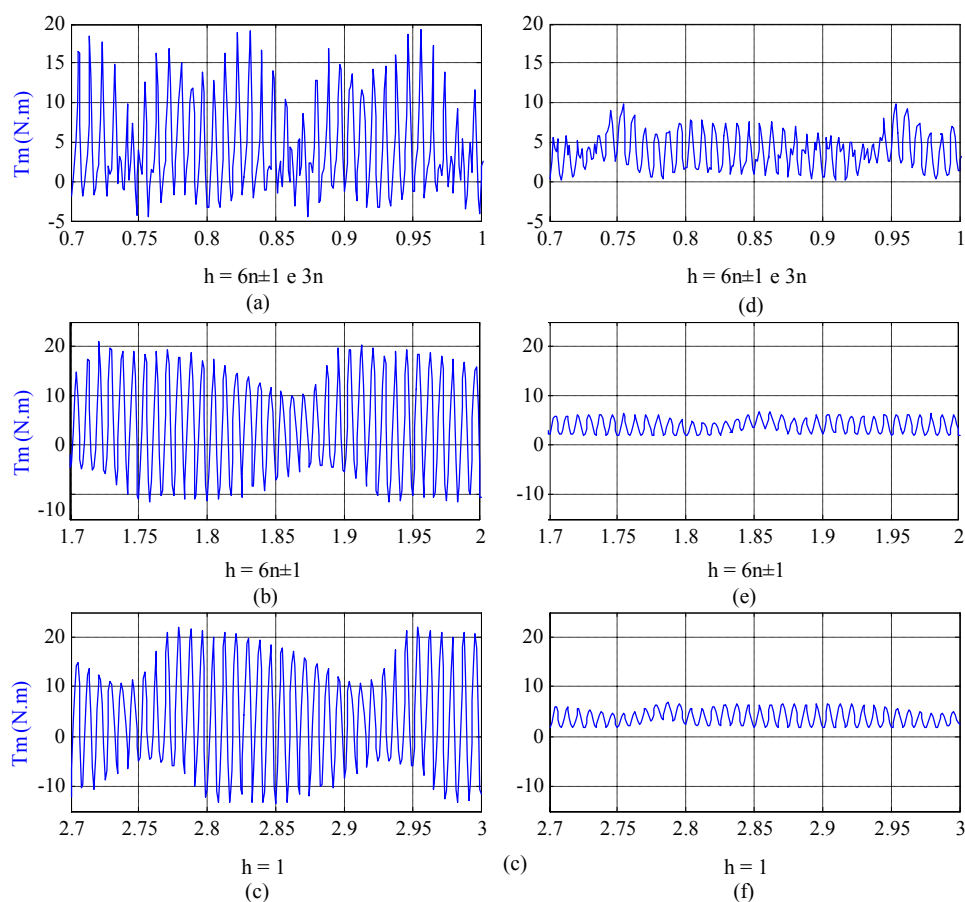


Figuras 6.14 – Correntes do estator, força magnetomotriz e torque eletromagnético do motor bifásico com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$ .

Observa-se que as correntes no do motor  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  igual a  $60^\circ$  e  $\varphi$  igual a  $120^\circ$  são mais elevadas que no motor  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^\circ$ . E que a força magnetomotriz e o torque eletromagnético do motor bifásico

$M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  igual a  $60^0$  e  $\varphi$  igual a  $120^0$  é muito mais oscilante que no motor  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^0$ . As grandes oscilações presentes nas forças magnetomotrizes e nos torques eletromagnéticos são oriundas da presença das harmônicas de seqüência  $3n$  e não das de seqüência  $6n\pm 1$ .

Na Figura 6.15 estão representados as formas de onda dos torques eletromagnéticos dos motores  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  igual a  $60^0$  e  $\varphi$  igual a  $120^0$  e dos com  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^0$ . Nas Figuras 6.15a, 6.15b e 6.15c estão representados as formas de onda dos torques eletromagnéticos dos motores  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  igual a  $60^0$  e  $\varphi$  igual a  $120^0$ , com as seqüências de harmônica  $3n$ ,  $6n\pm 1$  e fundamental, respectivamente. E nas Figuras 6.15d, 6.15e e 6.15f estão representados as formas de onda dos torques eletromagnéticos dos motores  $M_{2\varnothing - ACR}$  com  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^0$ , com as seqüências de harmônica  $3n$ ,  $6n\pm 1$  e fundamental, respectivamente.



Figuras 6.15 – Torques eletromagnéticos do motor bifásico com retorno  $M_{2\varnothing - ACR}$ .

## 6.4 – ANÁLISE DA VELOCIDADE NO MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM RETORNO

Com os parâmetros dos motores mostrados na Tabela 6.2 (Item 6.2.2) pode-se fazer a análise da velocidade do motor bifásico assimétrico com retorno através do modelo dinâmico desenvolvido no Capítulo 3.

A análise da velocidade consiste em demonstrar os efeitos das harmônicas de seqüência fundamental,  $6n \pm 1$  e  $3n$  no motor de indução bifásico assimétrico com retorno. A presença das harmônicas de seqüência  $3n$  provoca um travamento no motor, fazendo com que o motor em baixa tensão não consiga alcançar a velocidade nominal, mesmo em vazio. O motor, entretanto, consegue partir com tensões próximas da nominal (220V).

Nas Figuras 6.16, 6.17 e 6.18 estão representados os gráficos das velocidades dos motores trifásico e bifásico assimétrico com retorno. Na Figura 6.16 está representado o gráfico da velocidade do motor trifásico  $M_{3\phi-s}$  e bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi1-ACR}$ , com tensão nominal de alimentação de 220V e com seqüência de harmônica fundamental.

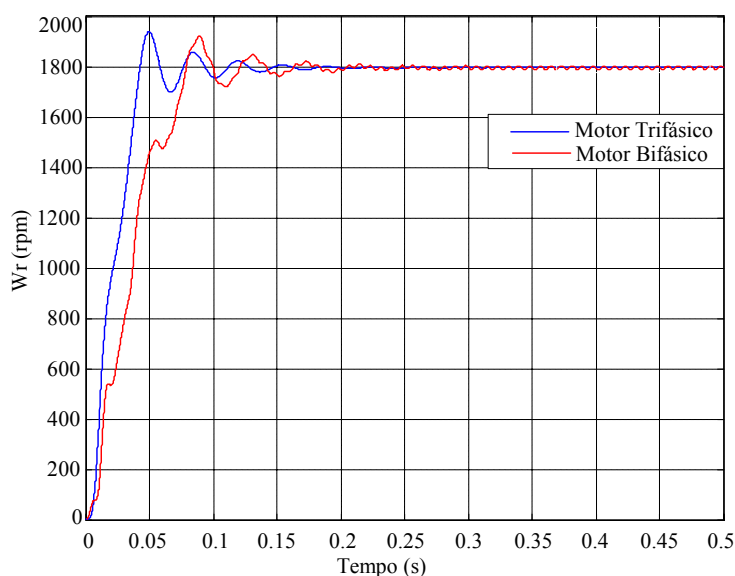


Figura 6.16 – Forma de onda da velocidade do motor trifásico  $M_{3\phi-s}$  e bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\phi1-ACR}$ , com  $h = 1$ .

Na Figura 6.17 está representado o gráfico da velocidade do motor trifásico  $M_{3\varnothing - s}$  e bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  com seqüência de harmônica  $6n \pm 1$ . E na Figura 6.18 está representado o gráfico da velocidade do motor trifásico  $M_{3\varnothing - s}$  e bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  com seqüência de harmônica  $3n$  e  $6n \pm 1$ .

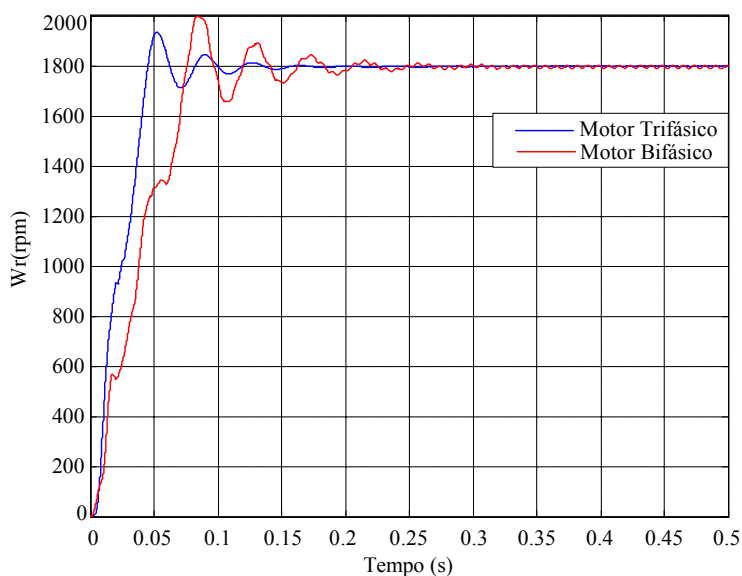


Figura 6.17 – Forma de onda da velocidade do motor trifásico  $M_{3\varnothing - s}$  e bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ , com  $h = 6n \pm 1$ .

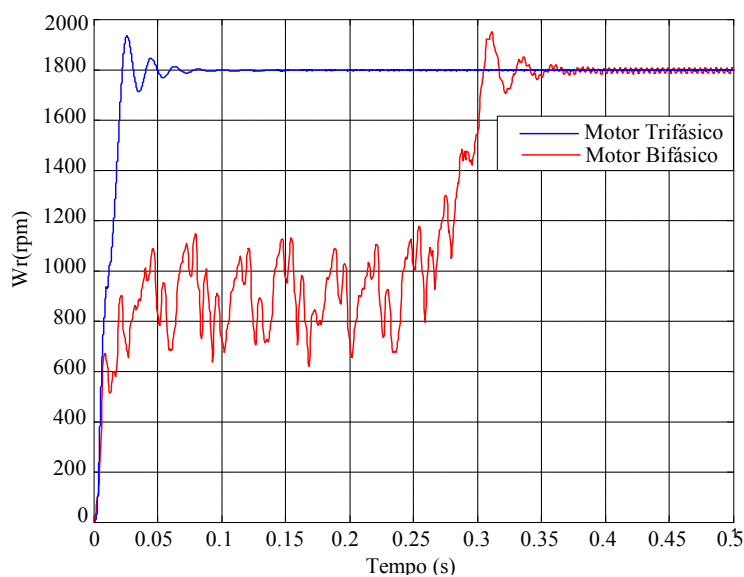


Figura 6.18 – Forma de onda da velocidade do motor trifásico  $M_{3\varnothing - s}$  e bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$ , com  $h = 3n$  e  $6n \pm 1$ .

## 6.5 – CONCLUSÃO

A mudança dos parâmetros por fase do motor de indução trifásico para o motor bifásico assimétrico é devido à ausência de uma de suas fases.

As diferenças entre os parâmetros dos motores bifásicos assimétricos com retorno são devidas às diferentes características físicas de cada máquina. Estas diferenças foram notadas nos ensaios a vazio e rotor bloqueado e também através da análise de elementos finitos.

A diferença é mais evidente quando se compara a trajetória do fluxo ao redor do entreferro do motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 3-ACR}$  com os outros dois motores bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing 1-ACR}$  e  $M_{2\varnothing 2-ACR}$ .

Observa-se, que devido à não uniformidade do fluxo ao longo do entreferro os motores bifásicos assimétricos possuem uma força magneto motriz e um torque eletromagnético bastante oscilante, se comparado com a fmm e o torque do motor trifásico.

Nota-se que a amplitude da oscilação é maior quando existe a presença das seqüências harmônicas de ordem  $3n$  e  $6n \pm 1$ .

Observa-se que a seqüência que causa problemas na partida do motor é a seqüência de ordem harmônica  $3n$  (Figura 6.17).

Observa-se também que o motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing-ACR}$  com  $\beta$  igual a  $60^\circ$  e  $\varphi$  igual a  $120^\circ$  produz um torque eletromagnético mais oscilante que o motor bifásico assimétrico com retorno  $M_{2\varnothing-ACR}$  com  $\beta$  e  $\varphi$  iguais a  $60^\circ$ .

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES FINAIS

#### 7 – CONCLUSÕES FINAIS

As análises das forças magnetomotriz resultante realizado por intermédio do equacionamento matemático do campo magnético girante (JORDÃO [1] e CASTRO NETO [2]) são insuficientes para determinar as melhores condições de funcionamento do motor bifásico assimétrico com retorno, uma vez que, os modelos matemáticos não abrangem as equações elétricas e mecânicas das máquinas.

Então, foi desenvolvido um modelo dinâmico genérico no domínio do tempo para máquinas de indução bifásicas simétricas e assimétricas com alimentação bifásica (Tensão bifásica simétrica com retorno, cujas tensões estão defasadas de certo ângulo  $\beta$  entre si, no tempo.). Por intermédio do modelo desenvolvido foram realizadas as análises das forças magnetomotrizes em máquinas bifásicas assimétricas com retorno.

Com as análises das forças magnetomotrizes foram dadas as seguintes contribuições a respeito das correntes que alimentam os enrolamentos dos motores bifásicos assimétricos com retorno, as contribuições são:

- as correntes nos motores bifásicos com retorno pelo neutro, não estão iguais as sugeridas por JORDÃO [1], onde o mesmo relata que quando o motor bifásico é alimentado por uma fonte bifásica simétrica com retorno pelo neutro, cujas tensões estão defasadas de  $120^\circ$  entre si, no tempo; as correntes que surgiriam

nos enrolamentos teriam um ângulo  $\alpha$  entre elas de  $60^0$ , mas, na verdade o ângulo é de  $120^0$  (Item 4.4).

- o ângulo  $\varphi$  entre os enrolamentos do motor bifásico assimétrico não é de  $60^0$ , como mostrado por CASTRO NETO [2], e sim de  $120^0$ . Pois, as correstes mostradas no teste experimental do motor bifásico com retorno pelo neutro, possuem um ângulo de  $120^0$  elétricos entre si, no tempo, e um valor de amplitude próximo do nominal do motor trifásico original. Entretanto, se o motor estivesse com  $\varphi$  igual a  $60^0$  apareceria uma sobrecorrente (Item 4.4), que é mais elevada, quanto maior for à diferença entre  $\beta$  e  $\varphi$ .

Com a análise da força magnetomotriz resultante através do modelo dinâmico pode-se também, dar as seguintes contribuições com relação as harmônicos espaciais de campo, as contribuições são:

- a existência das harmônicas de campo de seqüência  $3n$  e  $6n\pm 1$  causam maiores problemas de oscilação na força magnetomotriz em máquinas de indução bifásicas simétricas, do que em máquinas de indução bifásicas assimétricas, principalmente nos motores bifásicos assimétricos com retorno;
- as harmônicas de campo de seqüência  $3n$  causam mais distorções na força magnetomotriz do que as harmônicas de campo de seqüência  $6n\pm 1$  nos motores bifásicos assimétricos com retorno.

Através das análises das correntes e das forças magnetomotrizes resultante pode-se também, dar as seguintes contribuições com relação as melhores condições para o funcionamento do motor bifásico assimétrico com retorno. As melhores condições estão relacionadas com o valor de  $\beta$  (defasamento angular entre as tensões das fases “a” e “b”) e  $\varphi$  (defasamento angular entre os eixos das fases “a” e “b”).



As contribuições são:

- piores condições de funcionamento dos motores bifásicos assimétricos com retorno são:

$$- \beta = 60^{\circ} \text{ e } \varphi = 120^{\circ} \text{ ou } \beta = 120^{\circ} \text{ e } \varphi = 60^{\circ};$$

- melhores condições de funcionamento dos motores bifásicos assimétricos com retorno são:

$$- \beta = 60^{\circ} \text{ e } \varphi = 60^{\circ} \text{ ou } \beta = 120^{\circ} \text{ e } \varphi = 120^{\circ}.$$

O motor trifásico simétrico pode funcionar como bifásico assimétrico com retorno pela fase “a” ou “b” ou “c”( ligação delta aberto) ou pelo neutro (ligação estrela bifásica), de acordo com o Item 5.2.

O motor bifásico assimétrico com retorno possui uma força magnetomotriz e um torque eletromagnético não uniforme, entretanto, o mesmo absorve correntes menores que os motores trifásicos e muito menores que os motores monofásicos.

O motor monofásico absorve corrente maiores que os motores bifásicos assimétricos com retorno. Dependendo do motor monofásico, o mesmo absorve correntes de alimentação que são o dobro das absorvidas pelos motores bifásicos com retorno. Os motores bifásicos assimétricos com retorno  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  e  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$  possuem perdas a vazio maiores que o motor trifásico simétrico  $M_{3\varnothing - S}$ , entretanto o motor  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$  possui perdas a vazio menores que o motor trifásico  $M_{3\varnothing - S}$ . As perdas a vazio no motor  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$  diminuirão devido ao preenchimento das ranhuras que estavam vazias no motor  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$ .

O motor bifásico assimétrico com retorno pode ter a mesma potência do motor trifásico original, para isto, basta aumentar o fluxo no entreferro através do aumento da capacidade de corrente dos enrolamentos.

Nos motores de indução bifásicos assimétricos com retorno as harmônicas  $3n$  causam grandes problemas de oscilação na força magnetomotriz e no torque eletromagnético, e causam também problemas na partida com tensão reduzida.

Através das experiências feitas em laboratório observa-se que o problema na partida dos motores não é uma regra geral, devido à existência de vários tipos de motores com diferentes tipos de parâmetros do circuito equivalente e que possuem também diferentes fatores de distribuição e de passo dos enrolamentos. Para a construção de um protótipo específico do motor bifásico assimétrico com retorno pode-se fazer uma nova configuração para os enrolamentos, ou seja, pode-se modificar os fatores de distribuição e de passo dos enrolamentos para que ocorra a diminuição na intensidade das harmônicas de seqüência  $3n$ , com isso ocorrerá diminuições nas oscilações da força magnetomotriz e do torque eletromagnético..

Então, o trabalho realizado resultou em um modelo dinâmico que contribuiu com informações importantes a respeito do funcionamento do motor bifásico assimétrico com retorno e também contribuiu com a quebra de um paradigma há tempos existente, relacionado a existência de somente motores de indução trifásicos e monofásicos. Na verdade é possível existir no mercado, três tipos de motores, que são: os motores de indução trifásicos, monofásicos (bifásicos assimétricos), bifásicos assimétricos com retorno pela fase (Motores para fins acadêmicos e não práticos (mercado)) e bifásicos assimétricos com retorno pelo neutro (Motores para fins acadêmicos e práticos).

Relembrado, que na prática os motores bifásicos assimétricos com retorno são os únicos motores de indução que não possuem chaves centrifugas e nem capacitores para o seu funcionamento.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item são definidas algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Análise dos vários tipos de motores de indução trifásicos funcionando como bifásicos assimétricos com retorno: objetivo principal é verificar se acontece os mesmo problemas na partida em tensão reduzida entre as varias categorias de motores trifásicos, quando os mesmos estiverem trabalhando como bifásico assimétrico com retorno.
- Análise dos fatores de enrolamento de ordem harmônica das seqüências  $3n$  e  $6n \pm 1$ , para diferentes fatores de passo e distribuição: objetivo principal é verificar as melhores configurações dos enrolamentos para a redução das harmônicas espaciais de campo.
- Execução de um projeto específico para o motor de indução bifásico assimétrico com retorno: objetivo principal é realizar a construção de um protótipo específico para o motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro.
- Análise dinâmica em elementos finitos do motor bifásico assimétrico com condutor de retorno: objetivo principal é realizar o calculo do fluxo no entreferro do motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro, para fins de projeto.
- Análise de custo do motor bifásico assimétrico com retorno: objetivo principal é realizar uma comparação de custo entre os motores monofásicos e os motores bifásicos assimétricos com retorno pelo neutro.
- Controle de Velocidade do Motor Bifásico Assimétrico com Retorno: objetivo principal é realizar a construção de um inversor para o controle de velocidade do motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rubens Guedes Jordão – Motor Difásico Assimétrico, Tese, concurso para provimento efetivo da Cátedra “Maquinas Elétricas”, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 1967.
- [2] Lindolfo Marra de Castro Neto – O Motor De Indução Bifásico Com Os Enrolamentos Conectados Em V – Dissertação De Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Minas Gerais, MG, 2002.
- [3] Bernardo Pinheiro de Alvarenga – Modelo para o Cálculo do Conjugado de uma Máquina de Indução Incluindo os Efeitos de Enrolamento e Saturação Magnética, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Minas Gerais, MG, 1993.
- [4] Azevedo, Haroldo Rodrigues de, CAMACHO, Jose Roberto; Castro Neto, Lindolfo Marra De ; SALERNO, Carlos Henrique. Uniform Rotating Magnetic Field Produced by Double-Phase Voltages - A Generic Approach. In: JEE- Journal of Electrical Engineering - Vol. 3 - 2003 - pp:41-47 - ISSN: 1582-4594 Politehnica Publishing House, University of Timisoara, Romania.
- [5] Castro Neto, Lindolfo Marra de; CAMACHO, José Roberto; AZEVEDO, Haroldo Rodrigues de; SALERNO, Carlos Henrique. ISEF 2005 – Two-Phase Induction Motor In a Two-Phase Symmetrical Network With Return Conductor - XII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering. Baiona, Spain, September 15 – 17, 2005.

- [6] Veinott, C. Theory And Design Of Small Induction Motors, New York, McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [7] M. Kostenko and L. Piotrovski, Maquinas Electricas, Lopes da Silva, Porto, Portugal, 1979.
- [8] A.S. Langsdorf, Theory of Alternating Current Machinery, Tata McGraw-Hill, Second Edition, New Delhi, India, 1981.
- [9] C.M. Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR, New York, USA, 1998.
- [10] Electric Machinery, IEEE Standards Collection, New York, USA, 1997 Edition.
- [11] N.T. Muñoz, Cálculo de Enrolamentos de Máquinas Elétricas e Sistemas de Alarme, Biblioteca Técnica Freitas Bastos, 4ª Edição - 1987, São Paulo, SP.
- [12] A. Martignoni, Máquinas de Corrente Alternada, Editora Globo, 3ª Edição - 1978, Rio de Janeiro, RJ.
- [13] J. H. Kuhlmann, Diseño de Aparatos Electricos, Cia. Editorial Continental, 1ª Edição -1959, Cidade do México, México.
- [14] V. Del Toro, Fundamentos de Máquinas Elétricas, Editora Prentice-Hall do Brasil Ltda., 1994, Rio de Janeiro, RJ.

- [15] Fitzgerald, A, E, Kingsley Jr., C., Umans, S.D. – Electric Machinery, 6<sup>th</sup> Edition, Macgraw Hill, New York, 2003.
- [16] G. McPherson & R. Laramore, An Introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons, Second Edition - 1990, New York, USA.
- [17] A.M.B. da Silva, Motor de Indução Bifásico Alimentado por Inversor Bifásico, Dissertação de Mestrado, UFU, Engenharia Elétrica, 1993, Uberlândia, MG.
- [18] M. P. Kostenko, L. M. Piotrovski, Máquinas Elétricas Volume I e II, Editorial Mir , 2<sup>a</sup> edição, 1973.
- [19] Jordão, Rubens G., *Máquinas Síncronas*, Livros Técnicos e Científicos SA e Editora da Universidade de São Paulo, 1980.
- [20] Say, M. G., Performance and design of alternating current Machines, transformers, three-phase induction motors and synchronous machines, 3th edition, 1968.
- [21] Alger, P.L., The Nature of Polyphase Induction Machines, Gordon and Breach, 1965.
- [22] Reis, Lineu Belico dos, Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

## ANEXO (CDROM)

# DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO AO REDOR DO ENTREFERRO NOS MOTORES DE INDUÇÃO ASSÍNCRONOS

Neste item são apresentados os conteúdos presentes no anexo em CDROM. São mostradas as distribuições de fluxo ao redor do entreferro realizadas pelo software FEMM (Finite Element Method Magnetics) nos tempos de  $T_0$  até  $T_{12}$  de 30 em 30 graus (Figuras 6.8 e 6.10), caracterizando um ciclo ou meia volta nos seguintes motores:

- Motor trifásico simétrico  $M_{3\varnothing - S}$ ;
- Motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 1 - ACR}$  ( $\beta = \varphi = 60^0$ ) sem a fase “c”;
- Motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 2 - ACR}$  ( $\beta = \varphi = 60^0$ ) sem a fase “c”;
- Motor bifásico assimétrico  $M_{2\varnothing 3 - ACR}$  ( $\beta = \varphi = 60^0$ ) sem a fase “c”;
- Motor trifásico simétrico ligado em estrela com neutro com a fase “a” desligada ou motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro  $M_{2\varnothing - ACR}$  ( $\beta = \varphi = 120^0$ ), fase “b” e fase “c” ligadas.
- Motor trifásico simétrico ligado em estrela com neutro com a fase “b” desligada ou motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro  $M_{2\varnothing - ACR}$  ( $\beta = \varphi = 120^0$ ), fase “a” e fase “c” ligadas.
- Motor trifásico simétrico ligado em estrela com neutro com a fase “c” desligada ou motor bifásico assimétrico com retorno pelo neutro  $M_{2\varnothing - ACR}$  ( $\beta = \varphi = 120^0$ ), fase “a” e fase “b” ligadas.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)