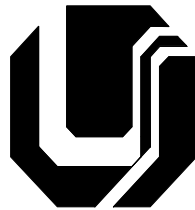


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



MODELAGEM PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO
DE ELETRODOMÉSTICOS À FORÇA-MOTRIZ
DIANTE DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DA
ENERGIA

IVANDRO ANTONIO BACCA

Uberlândia
2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

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

MODELAGEM PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
ELETRODOMÉSTICOS À FORÇA-MOTRIZ
DIANTE DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA

IVANDRO ANTONIO BACCA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a Banca Examinadora abaixo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

José Carlos de Oliveira, PhD – UFU (Orientador)

Nelson Kagan, PhD – USP

José Wilson Resende, PhD – UFU

Aloisio de Oliveira, Dr – UFU

Uberlândia, Setembro de 2008.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B116m Bacca, Ivandro Antonio, 1983-
Modelagem para a análise de desempenho de eletrodomésticos à
força-motriz diante de distúrbios de qualidade da energia /
Ivandro Antonio Bacca. - 2008.
172 f. : il.

Orientador: José Carlos de Oliveira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de.
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ELETRODOMÉSTICOS À FORÇA-MOTRIZ DIANTE DE DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA

IVANDRO ANTONIO BACCA

Texto da Dissertação apresentada por Ivandro Antonio Bacca à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD.
Orientador

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Lidenor e Graciema, pelo apoio, compreensão, amor, dedicação e incentivo, essenciais para a realização desta dissertação, bem como para todos os obstáculos e desafios superados em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por mais um objetivo alcançado. Pela concessão da graça da vida, pela constante companhia nos momentos mais difíceis e por me conduzir com seus maravilhosos dons.

De maneira muito especial, apresento meus sinceros agradecimentos ao Professor **José Carlos de Oliveira** pela orientação, apoio, incentivo e colaboração a mim dispensada, fundamental para a realização de todas as etapas desta dissertação. Agradeço também, pela confiança e a amizade consolidada que, com toda certeza, vão além desses horizontes.

Aos professores **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Kleiber David Rodrigues, Antônio Carlos Delaiba, Carlos Augusto Bissochi Júnior, José Wilson Resende e Aloisio de Oliveira** pela amizade, auxílio e prontidão nos esclarecimentos.

Aos amigos **Carlos Eduardo Tavares, Angélica Pereira Marsicano Tavares, Gabriel Sansevero Dias, Isaque Nogueira Gondim, João Areis Júnior e Marcus Vinicius Borges Mendonça**, pelos apoios que tornam esta conquista, em nossa promissora trajetória, ainda mais significativa.

Aos colegas e amigos da Pós Graduação, **Ivan, Fernanda, Elise, Cassiano, Fabrício e William** pelo companheirismo e importante apoio que me deram desde o início deste trabalho.

Aos demais colegas e professores de pós-graduação, pelo incentivo e apoio que em muito contribuíram para a conclusão desta dissertação.

À **Marli, Joana e Valéria** pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da Pós Graduação.

A **Carlos Henrique de Oliveira e Rubens Aparecido Assunção**, pela amizade e presteza no auxílio dos trabalhos laboratoriais.

À CAPES pelo suporte financeiro.

RESUMO

Atualmente, os problemas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica têm motivado grandes esforços por parte de pesquisadores de todo o mundo. Entre as diversas áreas de interesse, encontram-se as investigações relacionadas com a operação de dispositivos eletroeletrônicos, freqüentemente encontrados nas instalações industriais, comerciais e residenciais. Somado às questões de análise de desempenho destes produtos, encontram-se intimamente atrelados, os aspectos relacionados com os níveis de sensibilidade e suportabilidade dos equipamentos face aos distúrbios de qualidade de energia.

Estas preocupações encontram forte sustentação junto aos processos decisórios sobre os ressarcimentos de consumidores.

Reconhecendo, pois, a importância destes fatos, esta dissertação de mestrado dedica-se a investigar a relação que existe entre a Qualidade da Energia Elétrica de suprimento e o desempenho de equipamentos que compõem a chamada “Linha Branca”: refrigeradores, freezers, condicionadores de ar, máquinas de lavar roupas e lava louças.

Distúrbios típicos: harmônicas, elevações e afundamentos de tensão, flutuações e interrupções do suprimento de energia são utilizados para avaliar o desempenho dos dispositivos. Os estudos são realizados pelos métodos experimental e computacional.

ABSTRACT

Nowadays, the problems related to Power Quality have motivated great efforts from researchers worldwide. Among the areas of interest, emerge the researchs associated to the operation of electro-electronic devices, wich are frequently found in industrial, commercial and residential installations. Considering the performance analysis, the sensibility and supportability of such equipments have become a matter of major concern in this context. These issues is quite relevant specially when considering the equipment dependence with the supply conditions as well as consumers refunding problem related to damaged equipments.

Recognizing the importance of such matter, this work goes towards the investigation of the relationship between the power quality and the performance of equipments of the so called “White Line”: refrigerators, freezers, air conditioners, washing machines and dishwashers.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Estratégia Geral Estabelecida para os Estudos	3
1.3 Estado da Arte Sobre Sensibilidade/Suportabilidade de Equipamentos Eletroeletrônicos.....	4
1.4 Justificativa para o Presente Trabalho.....	9
1.5 As contribuições desta Dissertação.....	10
1.6 Estrutura desta Dissertação.....	11
 CAPÍTULO II.....	 15
MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS	15
2.1 Introdução.....	15
2.2 Identificação, Características Físicas e Modelagem do Refrigerador	17
2.2.1 Identificação do Equipamento.....	17
2.2.2 Características Físicas do Equipamento.....	19
2.2.3 Modelagem e Circuito Equivalente do Motor Monofásico PTCSIR.....	21
2.3 Estratégia para os Estudos	35
2.3.1 Estudos Computacionais	35
2.3.2 Estudos Experimentais	36
2.4 Casos Estudados	38
2.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais	39
2.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração	41
2.4.3 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração	43
2.4.4 Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica	45
2.4.5 Caso 5: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão	47
2.4.6 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão.....	49
2.5 Considerações Finais	52

CAPÍTULO III.....	55
MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FREEZERS DOMÉSTICOS	55
3.1 Introdução.....	55
3.2 Identificação, Características Físicas e Modelagem do Freezer	56
3.2.1 Identificação do Equipamento.....	56
3.2.2 Características Físicas do Equipamento.....	57
3.2.3 Circuito Equivalente e Modelagem do Motor Monofásico RSIR.....	59
3.3 Estratégia para os Estudos	59
3.3.1 Estudos Computacionais	59
3.3.2 Estudos Experimentais	60
3.4 Casos Estudados	61
3.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais	62
3.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração	64
3.4.3 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração	66
3.4.4 Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica	67
3.4.5 Caso 5: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão	69
3.4.6 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão.....	71
3.5 Considerações Finais	74
 CAPÍTULO IV	 77
MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR	77
4.1 Introdução.....	77
4.2 Identificação, Características Físicas e Modelagem do Condicionador de Ar	78
4.2.1 Identificação do Equipamento.....	78
4.2.2 Características Físicas do Equipamento.....	80
4.2.3 Circuito Equivalente e Modelagem do Motor Monofásico CSR.....	81
4.3 Estratégia para os Estudos	83
4.3.1 Estudos Computacionais	83
4.3.2 Estudos Experimentais	83
4.4 Casos Estudados	84
4.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais	85
4.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração	86

4.4.3	Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração	.88
4.4.4	Caso 5: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão	89
4.4.5	Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão	90
4.5	Considerações Finais	93
CAPÍTULO V		96
MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS DE LAVAR ROUPAS		96
5.1	Introdução	96
5.2	Identificação, Características Físicas e Modelagem da Máquina de Lavar Roupas	97
5.2.1	Identificação do Equipamento	98
5.2.2	Características Físicas do Equipamento	100
5.2.3	Circuito Equivalente e Modelagem do Motor Monofásico PSC	102
5.3	Estratégia para os Estudos	103
5.3.1	Estudos Computacionais	103
5.3.2	Estudos Experimentais	104
5.4	Casos Estudados	105
5.4.1	Processo de Lavagem	105
5.4.2	Caso 1: Suprimento com Características Ideais	106
5.4.3	Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração	108
5.4.4	Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração	110
5.4.5	Caso 5: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão	111
5.4.6	Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão	113
5.4.7	Processo de Centrifugação	114
5.4.8	Caso 1: Suprimento com Características Ideais	114
5.4.9	Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração	116
5.4.10	Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração	117
5.4.11	Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica	118
5.4.12	Caso 5: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão	120
5.4.13	Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão	121
5.5	Considerações Finais	124

CAPÍTULO VI	129
MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LAVA LOUÇAS	129
6.1 Introdução.....	129
6.2 Identificação, Características Físicas e Modelagem da Máquina Lava Louças	130
6.2.1 Identificação do Equipamento.....	130
6.2.2 Características Físicas do Equipamento.....	132
6.2.3 Análise Matemática e Circuito Equivalente do Motor Monofásico Shaded Pole.....	134
6.3 Estratégia para os Estudos	135
6.3.1 Estudos Computacionais	135
6.3.2 Estudos Experimentais	136
6.4 Casos Estudados	137
6.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais	138
6.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração	139
6.4.3 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração.....	141
6.4.4 Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica	142
6.4.5 Caso 5: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão	144
6.4.6 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão.....	145
6.5 Considerações Finais	148
CAPÍTULO VII	153
CONCLUSÕES GERAIS	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
ANEXOS.....	166
ANEXO A	166
ANEXO B	171
ANEXO C.....	180
ANEXO D	189
ANEXO E.....	199

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aparelho refrigerador doméstico sob ensaio.....	18
Figura 2.2 - Detalhe do compressor hermético do refrigerador doméstico sob estudo...	18
Figura 2.3 - Detalhe interno dos compressores herméticos alternativos.	19
Figura 2.4 - Representação do diagrama elétrico do motor PTCSIR.	20
Figura 2.5 - Representação do motor de indução bifásico assimétrico.	23
Figura 2.6 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor.....	23
Figura 2.7 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos no refrigerador.	36
Figura 2.8 - Módulos constituintes da Fonte HP6834A.....	37
Figura 2.9 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho do refrigerador doméstico.	38
Figura 2.10 – Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 1 - Experimental.	40
Figura 2.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 1 - Computacional.	40
Figura 2.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 2 - Experimental.	42
Figura 2.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 2 - Computacional.	42
Figura 2.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 3 - Experimental.	44
Figura 2.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 3 - Computacional.	44
Figura 2.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 4 - Experimental.	46
Figura 2.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 4 - Computacional.	46
Figura 2.18 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 5 - Experimental.	48

Figura 2.19 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 5 - Computacional.	48
Figura 2.20 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Experimental.	50
Figura 2.21 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Computacional.	50
Figura 2.22 - Espectro harmônico da corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Experimental.	51
Figura 2.23 - Espectro harmônico da corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Computacional.	51
Figura 3.1 – Freezer doméstico sob ensaio.....	56
Figura 3.2 – Detalhe do compressor hermético do freezer sob estudo.	57
Figura 3.3 - Representação do diagrama elétrico do motor RSIR.	58
Figura 3.4 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos do freezer.	60
Figura 3.5 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho do freezer.	61
Figura 3.6 – Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 1 - Experimental.	63
Figura 3.7 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 1 - Computacional.	63
Figura 3.8 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 2 - Experimental.	65
Figura 3.9 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 2 - Computacional.	65
Figura 3.10 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 3 - Experimental.	66
Figura 3.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 3 - Computacional.	66
Figura 3.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 4 - Experimental.	68
Figura 3.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 4 - Computacional.	68
Figura 3.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 5 - Experimental.	70

Figura 3.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 5 - Computacional.	70
Figura 3.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 6 - Experimental.	72
Figura 3.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 6 - Computacional.	72
Figura 3.18 - Espectro harmônico da corrente de entrada do freezer. Caso 6 - Experimental.	73
Figura 3.19 - Espectro harmônico da corrente de entrada do freezer. Caso 6 - Computacional.	73
Figura 4.1 – Condicionador de ar sob ensaio.	79
Figura 4.2 – Detalhe do sistema motriz do condicionador de ar sob estudo.	79
Figura 4.3 - Representação do diagrama elétrico do motor CSR.	81
Figura 4.4 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor CSR.	82
Figura 4.5 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos do condicionador de ar.	83
Figura 4.6 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho do condicionador de ar.	84
Figura 4.7 – Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	85
Figura 4.8 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	85
Figura 4.9 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	87
Figura 4.10 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	87
Figura 4.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	88
Figura 4.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	88
Figura 4.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	89
Figura 4.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	89
Figura 4.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	91
Figura 4.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar.	91
Figura 4.17 - Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar.	92
Figura 4.18 - Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar.	92
Figura 5.1 – Máquina de lavar roupas sob ensaio.	98
Figura 5.2 – Detalhe do sistema motriz da máquina de lavar roupas sob estudo.	99
Figura 5.3 – Detalhe do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas sob estudo.	99

Figura 5.4 – Motor de Indução Monofásico PSC usado na máquina de lavar roupas sob estudo.	100
Figura 5.5 – Diagrama elétrico simplificado do Motor de Indução Monofásico.....	101
Figura 5.6 – Equivalente do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas.....	102
Figura 5.7 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor PSC.	102
Figura 5.8 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos na máquina de lavar roupas.	104
Figura 5.9 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho da máquina de lavar roupas.....	105
Figura 5.10 – Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 1 - Experimental.....	107
Figura 5.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 1 - Computacional.....	107
Figura 5.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 2 - Experimental.....	109
Figura 5.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 2 - Computacional.....	109
Figura 5.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 3 - Experimental.....	110
Figura 5.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 3 - Computacional.....	110
Figura 5.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 5 - Experimental.....	112
Figura 5.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 5 - Computacional.....	112
Figura 5.18 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 6 - Experimental.....	113
Figura 5.19 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 6 - Computacional.....	113
Figura 5.20 – Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 1 - Experimental.....	115
Figura 5.21 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 1 - Computacional.....	115

Figura 5.22 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 2 - Experimental.....	116
Figura 5.23 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 2 - Computacional.....	116
Figura 5.24 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 3 - Experimental.....	117
Figura 5.25 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 3 - Computacional.....	117
Figura 5.26 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 4 - Experimental.....	119
Figura 5.27 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 4 - Computacional.....	119
Figura 5.28 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação, Caso 5 - Experimental.....	120
Figura 5.29 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação, Caso 5 - Computacional.....	120
Figura 5.30 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Experimental.....	122
Figura 5.31 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Computacional.....	122
Figura 5.32 - Espectro harmônico da corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Experimental.....	123
Figura 5.33 - Espectro harmônico da corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Computacional.....	123
Figura 6.1 – Lava louças sob ensaio.	130
Figura 6.2 – Detalhe do sistema de aquecimento e bombeamento da lava louças.....	131
Figura 6.3 - Circuito eletrônico da lava louças.....	131
Figura 6.4 – Circuito equivalente do motor Shaded Pole.....	133
Figura 6.5 – Equivalente do circuito eletrônico da lava louças.	134
Figura 6.6 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor Shaded Pole.	135
Figura 6.7 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos na lava louças.....	136

Figura 6.8 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho da lava louças.	137
Figura 6.9 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	138
Figura 6.10 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	138
Figura 6.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	140
Figura 6.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	140
Figura 6.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	141
Figura 6.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	141
Figura 6.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	143
Figura 6.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	143
Figura 6.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	144
Figura 6.18 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	144
Figura 6.19 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	146
Figura 6.20 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças.	146
Figura 6.21 - Espectro harmônico da corrente de entrada do equipamento.	147
Figura 6.22 - Espectro harmônico da corrente de entrada do equipamento.	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Quadro resumo de trabalhos realizados na área de sensibilidade e/ou suportabilidade de equipamentos.	5
Tabela 2.1 - Características do refrigerador disponibilizado para estudos.	19
Tabela 2.2 - Principais características do compressor do refrigerador analisado.....	21
Tabela 2.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.....	39
Tabela 2.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.	41
Tabela 2.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.....	43
Tabela 2.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.	44
Tabela 2.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 4 – Interrupção da Energia.	46
Tabela 2.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.....	48
Tabela 2.9 - Distorções harmônicas individuais aplicadas ao refrigerador doméstico....	49
Tabela 2.10 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.....	52
Tabela 3.1 - Características do freezer disponibilizado para estudos.....	57
Tabela 3.2 - Principais características do compressor hermético do freezer estudado. .	59
Tabela 3.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.....	62
Tabela 3.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.	63
Tabela 3.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.....	65
Tabela 3.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.	67
Tabela 3.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 4 – Interrupção da Energia.	69
Tabela 3.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.....	70

Tabela 3.9 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.....	74
Tabela 4.1 - Características do condicionador de ar utilizado nos estudos.....	80
Tabela 4.2 - Principais características do compressor do condicionador de ar.....	81
Tabela 4.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.....	84
Tabela 4.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.....	86
Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.....	87
Tabela 4.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.....	89
Tabela 4.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.....	90
Tabela 4.8 - Distorções harmônicas individuais aplicadas ao condicionador de ar.....	90
Tabela 4.9 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.....	93
Tabela 5.1 - Características da máquina de lavar roupas, utilizada nos estudos.....	99
Tabela 5.2 - Características da máquina de lavar roupas, utilizada nos estudos.....	101
Tabela 5.3 - Quadro resumo dos casos analisados no processo de lavagem.....	106
Tabela 5.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 1 – Condição Nominal.....	107
Tabela 5.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 2 – Elevação de Tensão.....	109
Tabela 5.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 3 – Afundamento de Tensão.....	111
Tabela 5.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 5 – Flutuação de Tensão.....	112
Tabela 5.8 - Quadro resumo dos casos analisados no processo de centrifugação.....	114
Tabela 5.9 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 1 – Condição Nominal.....	115
Tabela 5.10 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 2 – Elevação de Tensão.....	117
Tabela 5.11 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 3 – Afundamento de Tensão.....	118

Tabela 5.12 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 4 – Afundamento de Tensão.....	120
Tabela 5.13 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 5 – Flutuação de Tensão.	121
Tabela 5.14 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.....	124
Tabela 6.1 – Características da lava louças analisada.....	132
Tabela 6.2 - Principais características do motor Shaded Pole.	133
Tabela 6.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.....	137
Tabela 6.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.	139
Tabela 6.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.....	140
Tabela 6.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.	142
Tabela 6.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 4 – Interrupção da Energia.	143
Tabela 6.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.....	145
Tabela 6.9 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.....	148

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para assegurar a operação adequada de qualquer equipamento eletroeletrônico é imperativo que a energia elétrica fornecida pelo sistema supridor tenha um bom nível de qualidade em seu fornecimento. Contudo, devido a uma série de fatores, a qualidade da energia, pode se apresentar com apreciáveis desvios em relação ao padrão almejado.

Destas preocupações aparece o termo “Qualidade da Energia”, que é dirigido a uma extensa variedade de fenômenos ocorridos em um sistema de energia elétrica. Entende-se por variações de itens de qualidade: “Qualquer desvio que possa ocorrer na forma de onda, na magnitude, desequilíbrio entre fases ou mesmo da frequência da tensão” [1], caracterizando desta forma uma rede elétrica com qualidade fora dos padrões considerados ideais. Estas podem originar e/ou manifestar-se em vários pontos da rede elétrica, as quais podem ser de natureza local, ou seja, um distúrbio ocorrendo dentro da instalação consumidora, ou de natureza externa ou remota.

Equipamentos e dispositivos conectados aos sistemas elétricos, que em décadas passadas eram predominantemente eletromecânicos, foram ou estão sendo substituídos por outros dotados de tecnologia eletrônica e digital e estes, como é amplamente conhecido, se apresentam com uma maior sensibilidade ao suprimento elétrico imposto.

Dentro de um contexto mais específico surge a questão do ressarcimento dos consumidores por danos em seus equipamentos e, supostamente, atribuídos à questão da Qualidade de Energia, reconhece-se, na atualidade, uma maior conscientização por parte dos consumidores, sobre seus direitos quanto aos serviços recebidos de empresas do setor.

Devido às questões inseridas no tema de ressarcimento, diversas linhas de trabalhos têm sido conduzidas pelos órgãos reguladores e de controle do setor energia elétrica brasileiro, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema (ONS), focando, sobretudo, o estabelecimento de diretrizes para a normatização dos padrões da Qualidade da Energia Elétrica no Brasil. Ainda dentro do cenário da busca da regulamentação, a ANEEL produziu, embora que ainda de forma muito incipiente [2], documentos voltados para a definição das diretrizes às questões de ressarcimento.

Nestas perspectivas se inserem as metas e objetivos da presente dissertação, voltadas para o estudo da modelagem de equipamentos elétricos da chamada “linha branca”, frente aos aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica fornecida, este assunto, acredita-se, ser de grande atualidade e importância no cenário econômico nacional e mundial.

Embora cada equipamento elétrico tenha a sua particularidade construtiva e operacional, uma parcela considerável destes aparelhos está atrelada a dispositivos motrizes, mais especificamente por motores de indução monofásicos. Estes são os dispositivos selecionados para fins desta pesquisa de mestrado.

Neste contexto, o escopo dos trabalhos a serem desenvolvidos nesta dissertação contempla a modelagem para análise do desempenho dos equipamentos supramencionados, frente aos mais diversos distúrbios de qualidade da energia, como harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, flutuações e interrupções.

1.2 ESTRATÉGIA GERAL ESTABELECIDADA PARA OS ESTUDOS

Do exposto seguem que o escopo dos trabalhos a serem desenvolvidos nesta dissertação contempla a modelagem para análise de desempenho dos seguintes equipamentos da linha branca:

- Refrigerador Doméstico;
- Freezer Doméstico;
- Condicionador de Ar;
- Máquina de Lavar Roupas;
- Lava louças.

Para se obter as informações requeridas para a modelagem dos equipamentos supracitados, torna-se necessário o estabelecimento de uma metodologia de estudos de modo a contemplar os aspectos teóricos e experimentais que o assunto exige. Desta forma, para os equipamentos enfocados nesta dissertação, adotar-se-ão procedimentos conforme descrito na seqüência:

- Identificação das estruturas físicas dos equipamentos da linha branca contemplados neste trabalho;
- Obtenção de circuitos elétricos equivalentes e representativos dos mesmos;
- Modelagem e estudos computacionais e experimentais;
- Validação de modelos;
- Análise da operação sob diferentes condições não ideais de suprimento.

1.3 ESTADO DA ARTE SOBRE SENSIBILIDADE/SUORTABILIDADE DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Após exaustivos estudos da bibliografia atual obteve-se um expressivo conjunto de informações que sintetizam distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no contexto específico desta dissertação. Por questões didáticas, apresenta-se, abaixo, um resumo das principais bibliografias encontradas, dividindo-as em áreas afins.

- ***Conceitos Gerais associados com a Qualidade de Energia***

Na referência [1] podem-se encontrar conceitos, definições e uma extensa descrição dos distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica. Complementarmente, [3] apresenta formas para categorizar problemas relativos à qualidade de energia.

- ***Sensibilidade e Suortabilidade de Equipamentos***

Reconhecendo que os dois primeiros tópicos acima têm sido contemplados em diversas dissertações anteriores à presente, muito embora a citação das bibliografias consideradas mais expressivas, optou-se, neste trabalho, por concentrar as discussões nos assuntos diretamente afeitos à pesquisa aqui considerada.

Sintetizando, na Tabela 1.1 encontram-se descritos, de forma resumida, trabalhos de pesquisa realizados por diversas instituições nacionais e internacionais a respeito da sensibilidade e suportabilidade de equipamentos, quando submetidos a suprimento de energia com qualidade comprometida. São explicitados os efeitos sobre o desempenho dos mesmos e, dependendo do caso, traçadas as respectivas curvas de sensibilidade e/ou suportabilidade. Observa-se

que, grande parte dos estudos realizados avalia os desempenhos de equipamentos de tecnologia mais recente e, aplicando-se apenas um dos itens utilizados na avaliação da qualidade do suprimento de energia, no caso, afundamentos de tensão. Outros estão relacionados com dois ou três indicadores de qualidade e, somente as referências [11], [14], [15], [16] e [17], consideram o desempenho do equipamento abordando praticamente todos os tipos de distúrbios da qualidade do suprimento.

Tabela 1.1 – Quadro resumo de trabalhos realizados na área de sensibilidade e/ou suportabilidade de equipamentos.

Instituições e/ou Autores	Equipamento	Tipo de Estudo	Resultados
EPRI [3]	Controladores de resfriamento	Afundamentos de tensão	Afundamentos de tensão acima de 20%, independentes da duração, afetam o funcionamento normal (0.8Vn)
	Testadores de Chips eletrônicos	Afundamentos de tensão	Afundamentos acima de 80% ficam fora de operação (0.2Vn)
	Acionadores CC	Afundamentos de tensão	Interferência no funcionamento a partir de 12% de afundamento (0.88Vn)
	CLP's antigos	Afundamentos de tensão	Por serem mais robustos suportam, por até 15 ciclos, afundamentos de 100% de tensão.
	Robôs	Afundamentos de tensão	Saem de operação a partir de 10% de afundamento (0.9Vn).
	Computadores pessoais	Afundamentos de tensão e interrupções	Este tipo de equipamento, devido aos cuidados tomados na fase de projeto, possui características de operação dadas por curvas de tolerância, função do valor do afundamento x o tempo de duração do mesmo.

Continuação da Tabela 1.1 - Quadro resumo de trabalhos realizados na área de sensibilidade e/ou suportabilidade de equipamentos.

Instituições e/ou Autores	Equipamento	Tipo de Estudo	Resultados
W. Eduard Reid (IEEE Transactions on Industry Applications) [4]	Lâmpada de descarga de alta intensidade	Afundamento de tensão	Apaga para afundamentos de tensão a partir de 10 a 15%, demorando vários minutos para re-acender (0.90 a 0.85 Vn).
	CLP's utilizados em acionadores CC e CA	Afundamentos de tensão	Operação comprometida a partir de 15% de afundamento (0.85Vn)
	Controladores de velocidade	Afundamentos de tensão	Possuem faixa de operação estreita ($\pm 10\%$), fora desta faixa começam a apresentar problemas.
	Bobina de contactores	Afundamentos de tensão	Apresentam sensibilidade para afundamentos entre 25 a 50%, com duração de 1 a 5 ciclos (0.75 a 0.5Vn)
PQTN [5]	CLP's	Afundamentos de tensão	Suportabilidade diferente para cada equipamento testado, variando de 15 a 65% de afundamento (0.85 a 0.35Vn)
Smith, Lamoree, Vinett, Duffy e Klein [6]	Controladores de processos	Afundamentos de tensão	Sensibilidade variável para os equipamentos testados, desde muito sensíveis até totalmente imunes a afundamentos de tensão, por um determinado tempo. Depende do projeto do equipamento.
CBEMA [7]	Computadores e equipamentos eletroeletrônicos	Afundamentos de tensão	Este tipo de equipamento, devido aos cuidados tomados na fase de projeto, possui características de operação dadas por curvas de tolerância (CBEMA), função do valor do afundamento x tempo de duração do mesmo.

Continuação da Tabela 1.1 - Quadro resumo de trabalhos realizados na área de sensibilidade e/ou suportabilidade de equipamentos.

Instituições e/ou Autores	Equipamento	Tipo de Estudo	Resultados
ITIC [8]	Computadores		Modificação das Curvas CBEMA, possuindo tolerâncias menos rígidas.
Sekine, Yamamoto, Mori, Saito e Kurokawa [9]	Computadores	Afundamentos e interrupções	Comparativamente aos estudos feitos pela EPRI, os resultados apresentam curvas com maior sensibilidade às interrupções e divergências quanto aos afundamentos.
Anderson & Bowes [10]	Vídeo cassetes, fornos de microondas e relógios digitais.	Afundamentos e elevações de tensão, interrupções e sobre tensões transitórias	Tensões de suprimento com variação de amplitude, forma e duração, dentro dos limites impostos, demonstraram pouca influência na operação dos equipamentos testados.
Smith e Standler [11]	Relógios digitais, televisores, forno de micro ondas, fontes lineares e fontes chaveadas.	Elevações de tensão de 0.5 a 6 kv	Televisores e fontes chaveadas apresentam danos a partir de 4 kv. Fontes lineares e forno de micro ondas, não sofreram danos. Relógios digitais apresentam danos a partir de 1,5 kv.
Arseneau e Ouellette [12]	Lâmpadas fluorescentes compactas: reator eletromagnético com e sem correção de fator de potência e reator eletrônico	Distorção harmônica	Apresentam sensibilidade tanto da qualidade de imagem, como no aquecimento de componentes internos como capacitores, indutores, transformadores, etc.
Fuchs, Roesler e Kovacs [13]	Aparelhos de tv	Distorção harmônica e interharmônicos	Apresentam sensibilidade tanto da qualidade de imagem, como no aquecimento de componentes internos como capacitores, indutores, transformadores, etc.

Continuação da Tabela 1.1 - Quadro resumo de trabalhos realizados na área de sensibilidade e/ou suportabilidade de equipamentos.

Instituições e/ou Autores	Equipamento	Tipo de Estudo	Resultados
Santos, Ana Claudia Daroz [14]	Fontes lineares e fontes chaveadas	Afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções e flutuações de tensão, distorção harmônica.	Ambas as fontes apresentam boa suportabilidade aos distúrbios aplicados.
Carvalho, Bismarck Castillo [15]	Aparelhos condicionadores de ar	Afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções e flutuações de tensão, distorção harmônica.	Apresenta sensibilidade para afundamentos abaixo de 70% da tensão nominal
Azevedo, Ana Cláudia. [16]	Refrigeradores domésticos	Afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções e flutuações de tensão, distorção harmônica.	Apresenta sensibilidade para afundamentos abaixo de 70% da tensão nominal
Magalhães, Ricardo Nogueira. [17]	clp's	Afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções e flutuações de tensão, distorção.	Apresenta sensibilidade para afundamentos abaixo de 20% da tensão nominal
Tavares, Carlos Eduardo [18]	Televisores, Vídeo Cassetes e Aparelhos de Som	Afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções e flutuações de tensão, distorção.	Apresenta sensibilidade para afundamentos abaixo de 40% da tensão nominal com duração superior a 5 ciclos;

A referência [4] consolida trabalhos realizados pelo EPRI, ITIC e CBEMA, descrevendo alguns dos resultados obtidos por estes organismos. Mais importante, contudo, é a conclusão dos pesquisadores quando colocam que, a questão da sensibilidade de equipamentos constitui-se em assunto cuja solução depende das três partes envolvidas: concessionárias de energia elétrica, fabricantes de equipamentos e consumidores. Os primeiros, através de ações que objetivem o fornecimento de energia com níveis adequados de qualidade, dentro de limites pré-estabelecidos, passando inclusive pela fiscalização e controle de

cargas poluidoras e; os segundos e terceiros, projetando e produzindo equipamentos com a necessária robustez, de maneira a suportar níveis de deterioração, em amplitude e duração, também dentro dos limites definidos conjuntamente com as concessionárias. É, portanto, através da definição de padrões, mutuamente aceitos, por concessionárias, fabricantes e consumidores, e estabelecendo-se limites para ambos, que os problemas serão resolvidos ou minimizados.

Dentro deste cenário, a investigação do comportamento de equipamentos elétricos sob o enfoque de redes elétricas com qualidade comprometida é uma tarefa extremamente importante, que deve resultar em estratégias de forma que, mesmo submetidos a tais condições adversas, o desempenho e a vida útil destes dispositivos sejam preservados. Se isto não ocorrer, a correlação entre tipos, intensidades de distúrbios e seus impactos sobre os equipamentos devem ser plenamente conhecidos para que os pedidos de ressarcimentos possam ser analisados à luz de informações técnicas seguras.

1.4 JUSTIFICATIVA PARA O PRESENTE TRABALHO

Apresenta-se, a seguir, os principais pontos que ratificam a importância deste trabalho de mestrado:

- **Quanto à área do tema:** A área de qualidade de energia/sensibilidade/suportabilidade de equipamentos, além de atual, trata-se de linha de pesquisa consolidada da Universidade Federal de Uberlândia e de grande interesse para concessionárias de energia, consumidores e fabricantes;
- **Quanto aos equipamentos selecionados para análise:** A escolha dos equipamentos foi direcionada para aparelhos elétricos da linha branca por serem amplamente utilizados nas instalações elétricas típicas. Além disso, conforme mencionado anteriormente, estes dispositivos são

constituídos por um sistema motriz, mais especificamente por motores de indução monofásicos. Isto permite que a metodologia, bem como algumas considerações acerca dos resultados obtidos, possa ser estendida a outros equipamentos que utilizem tais princípios, tornando este trabalho mais abrangente e passível de consultas para futuras investigações sobre o tema;

Portanto, as investigações objeto do presente trabalho, contemplando: modelagem computacional, validação experimental, análise dos níveis de sensibilidade e suportabilidade operacional de equipamentos e, ao final, o estabelecimento de diretrizes destinadas a melhor subsidiar os trabalhos de ressarcimento de dispositivos motrizes monofásicos, frente aos aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica fornecida, constituem-se em tema atual e incontestável na área da Engenharia Elétrica.

1.5 AS CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

As principais contribuições desta dissertação residem na modelagem, no domínio do tempo, dos principais equipamentos que compõem a chamada linha branca. A modelagem de alguns destes, como o freezer, as máquinas de lavar roupas e a lava louças, não foram encontradas em qualquer documento divulgado na literatura consultada. Outros, a exemplo dos refrigeradores domésticos e os condicionadores de ar, indicaram a necessidade de aprimoramentos nos modelos pré-existentes. Além disso, a grande maioria dos trabalhos verificados foi desenvolvida somente à luz dos ensaios experimentais. Com a utilização dos modelos computacionais desenvolvidos nesta pesquisa, muitas limitações de ordem técnica laboratorial puderam ser superadas, tornando as investigações mais detalhadas e abrangentes podendo aplicá-los isoladamente ou simultaneamente.

1.6 ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 apresenta conceitos gerais sobre “*Qualidade de Energia Elétrica*”, as justificativas para a escolha do tema, esclarecimentos sobre as contribuições e as definições sobre os objetivos do estudo. Além deste, o documento final encontra-se composto, ainda, pelas seguintes unidades:

CAPÍTULO 2 – MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

O presente capítulo encontra-se voltado para os estudos de refrigeradores domésticos quando submetidos a distúrbios de qualidade da energia como, elevações e afundamentos de tensão e interrupções de curta duração de energia, flutuações e harmônicas no sistema supridor. São apresentadas as principais características do dispositivo em foco, a saber: modelo utilizado, modelagem matemática, características operativas, etc. A partir do circuito equivalente, o correspondente modelo é implementado na plataforma computacional ATP. Para fins do processo de validação da proposta, simulações computacionais são realizadas com vistas à obtenção de respostas equivalentes às aquelas encontradas nas situações experimentais. Posteriormente, é estabelecida uma estratégia de procedimentos experimentais e computacionais, no intuito de analisar o equipamento enfocado ante aos possíveis distúrbios presentes na rede elétrica.

CAPÍTULO 3 – MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FREEZERS DOMÉSTICOS

Esta unidade da dissertação encontra-se voltada para a investigação do desempenho de um freezer doméstico quando submetido a condições não ideais de fornecimento. Trata-se de mais um equipamento que possui um sistema

motriz. Toda a descrição do equipamento, circuito equivalente, modelo computacional, ensaios experimentais e demais itens que compreendem a metodologia implementada no capítulo anterior, são também aplicados para o equipamento supramencionado.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR

Este capítulo refere-se aos estudos de mais um equipamento da linha branca, qual seja, o condicionador de ar. Toda a descrição do equipamento, circuito equivalente, modelo computacional, ensaios experimentais e demais itens que compreendem, novamente, a metodologia implementada no capítulo anterior, são também aplicados para o equipamento supramencionado.

CAPÍTULO 5 – MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS DE LAVAR ROUPAS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos dos estudos de uma máquina de lavar roupas quando submetida a condições não ideais de fornecimento. Assim como verificado nos capítulos precedentes, uma descrição do modelo experimental e computacional desse equipamento é realizada.

CAPÍTULO 6 – MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LAVA LOUÇAS

Este capítulo contempla os estudos realizados com o último equipamento abordado nesta dissertação, qual seja, o eletrodoméstico comercialmente conhecido por lava louças. Novamente, as mesmas estratégias empregadas para os estudos dos outros equipamentos, foram aqui utilizadas.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES GERAIS

Neste capítulo são consolidadas as principais discussões e conclusões finais dos capítulos precedentes, apontando os aspectos mais relevantes encontrados na realização dos trabalhos.

Finalmente, são ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas do trabalho e também alguns tópicos correlatos e que, certamente, poderão constituir-se em temas para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

2.1 INTRODUÇÃO

A primeira máquina refrigeradora foi construída em 1856, usando o princípio da compressão de vapor, pelo australiano James Harrison, que tinha sido contratado por uma fábrica de cerveja para produzir uma máquina que viabilizasse o resfriamento daquele produto.

O primeiro refrigerador doméstico só apareceu em 1913 e foi denominado por DOMELRE (*Domestic Electric Refrigerator*), mas este nome não teve sucesso e foi “*Kelvinator*” o nome que popularizou este utensílio nos EUA. Tal como a maioria dos seus descendentes modernos, este refrigerador era arrefecido por meio de uma bomba de calor de duas fases. Outro que se tornou muito popular foi o General Electric “*Monitor-Top*”, que apareceu em 1927.

O refrigerador doméstico, também conhecido como geladeira, tornou-se um bem indispensável e de fundamental importância em uma residência e em vários outros seguimentos da sociedade, proporcionando melhoria na qualidade de vida das pessoas através da conservação dos alimentos que em uma temperatura maior degradar-se-iam com facilidade. Os estudos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) revelaram que 88% dos domicílios

particulares no Brasil (biênio 2004/2005) possuíam, no mínimo, um refrigerador [19].

O funcionamento de um refrigerador baseia-se em três princípios:

- O calor transfere-se das zonas quentes para as zonas frias (ou menos quentes);
- A pressão é proporcional à temperatura, ou seja, aumentando a pressão, aumenta-se a temperatura e vice-versa;
- A evaporação de um líquido retira o calor local, fenômeno análogo à sensação de frescor sentida pela evaporação de álcool sobre a pele, ou pela transpiração.

No interior de cada frigorífico existe uma serpentina oculta (evaporizador) onde circula um gás muito frio ($-37\text{ }^{\circ}\text{C}$). O calor dos alimentos é transferido para este gás que vai aquecendo à medida que percorre a serpentina. Para transferir esse calor para o exterior usa-se um compressor que, ao aumentar a pressão do gás, aumenta-lhe a temperatura. Este gás aquecido segue para o condensador (a serpentina visível na parte traseira do refrigerador), onde troca calor com o ar exterior, arrefecendo o gás e condensando-o. O líquido refrigerador passa então por uma válvula de expansão ou garganta, que provoca um abaixamento brusco na pressão e conseqüente evaporação instantânea e auto-arrefecimento. Este gás frio entra no frigorífico e completa-se o ciclo termodinâmico [20].

Objetivando, pois, analisar o desempenho dos refrigeradores domésticos quando submetidos a desvios na qualidade da energia suprida, os trabalhos contemplados neste capítulo estão direcionados à descrição das principais características do refrigerador. Estas compreendem:

- Modelagem do dispositivo;
- Circuito elétrico equivalente;
- Características operativas.

Na seqüência, fundamentado no circuito equivalente proposto, o modelo digital é implementado na plataforma computacional, no domínio do tempo, ATP.

Para fins de validação do modelo desenvolvido são feitas simulações computacionais do equipamento contemplado, com vistas à obtenção de respostas similares àquelas encontradas nas situações experimentais. Num primeiro momento, é empregado um suprimento elétrico sob condições consideradas ideais e definidas segundo as características nominais do refrigerador. Posteriormente, são realizados trabalhos destinados a analisar o desempenho do equipamento, quando da conexão do mesmo às redes elétricas com padrões distintos do ideal.

2.2 IDENTIFICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MODELAGEM DO REFRIGERADOR

A seguir são apresentadas algumas informações acerca do equipamento analisado de maneira a permitir o entendimento dos trabalhos aqui descritos.

2.2.1 Identificação do Equipamento

O refrigerador doméstico sob análise possui uma única porta e capacidade de 320 litros, conforme ilustra a Figura 2.1.



Figura 2.1 - Aparelho refrigerador doméstico sob ensaio.

A Figura 2.2 mostra, complementarmente, uma vista posterior do dispositivo, no qual se pode observar o principal componente do equipamento, o compressor hermético.

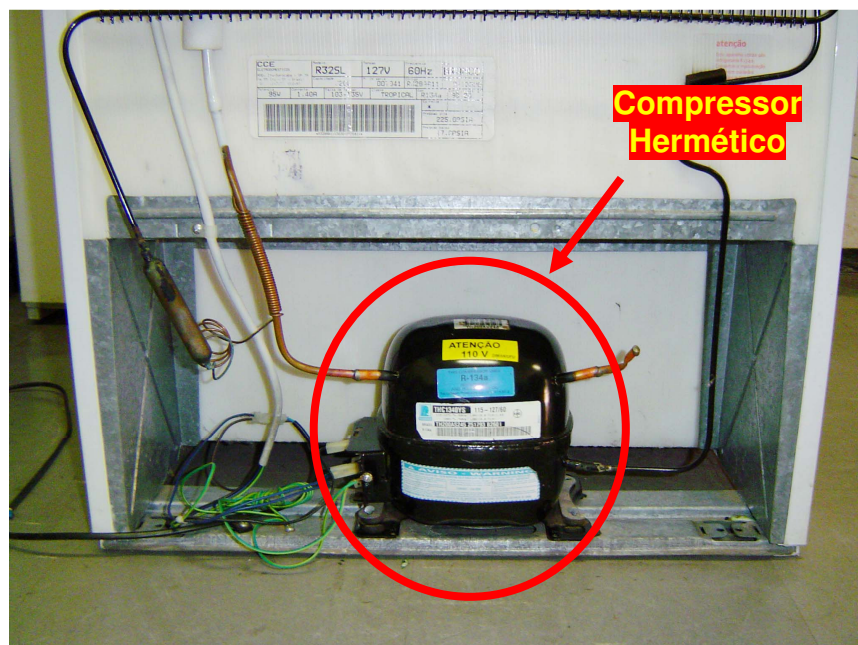


Figura 2.2 – Detalhe do compressor hermético do refrigerador doméstico sob estudo.

A Tabela 2.1 descreve as principais características do refrigerador utilizado nas investigações. Lembrando que este equipamento, assim como os demais analisados nessa dissertação não são equipamentos novos, contudo são equipamentos pouco usados.

Tabela 2.1 - Características do refrigerador disponibilizado para estudos.

Fabricante	CCE
Modelo	R32BAA11
Serie	007041
Capacidade	320 Litros
Tensão	127 V
Potência	95 W

2.2.2 Características Físicas do Equipamento

O principal componente do refrigerador é o seu compressor hermético, cuja função é agir como bomba no ciclo de refrigeração para fornecer a energia necessária ao transporte do gás refrigerante por todo o sistema e realizar a separação entre os lados de alta e baixa pressão neste ciclo [21].

O elemento hermético possui no mesmo invólucro metálico (carcaça) um compressor e um motor de acionamento, conforme ilustra a Figura 2.3.



Figura 2.3 - Detalhe interno dos compressores herméticos alternativos.

O compressor hermético, do refrigerador analisado, utiliza um motor de indução monofásico PTCSIR, que se caracteriza por apresentar um torque de partida adequado para aplicações em sistemas de refrigeração com dispositivo de controle de fluxo por tubo capilar, onde há a equalização prévia das pressões para a partida.

Nesse modelo de motor, o enrolamento auxiliar é retirado de operação através de um relé PTC (*Positive Temperature Coefficient*), que é ligado em série com o enrolamento auxiliar. Quando a corrente do enrolamento auxiliar percorre o material semicondutor do relé PTC, uma elevação de temperatura é provocada nesse semicondutor. Tal elevação de temperatura provoca um aumento da sua resistência que, em um determinado instante, reduz a corrente a um valor praticamente nulo. É importante ressaltar que, assim como ocorre com outros equipamentos, refrigeradores de diferentes fabricantes ou modelos, podem utilizar outros métodos de partida.

A Figura 2.4 ilustra o diagrama elétrico do motor em pauta e seus dispositivos de proteção. Maiores detalhes podem ser encontrados através de documentos do fabricante [32].

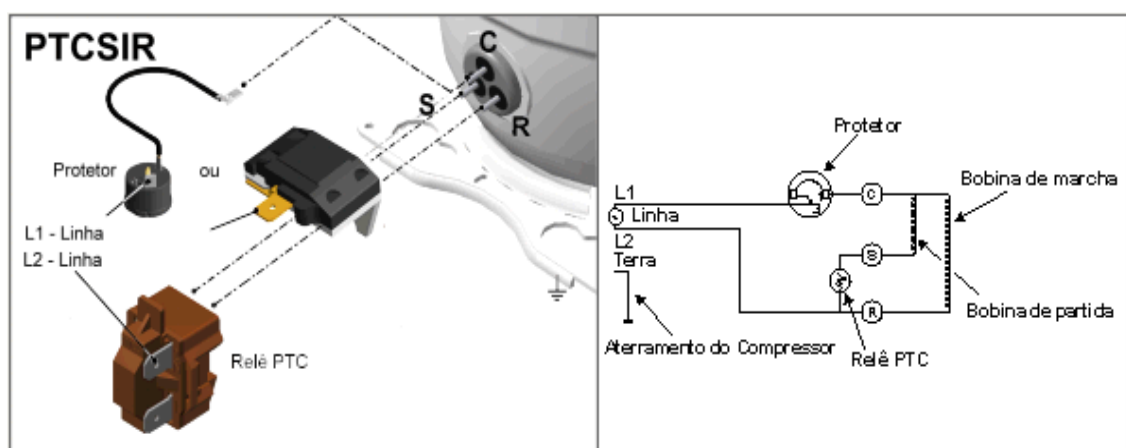


Figura 2.4 - Representação do diagrama elétrico do motor PTCSIR.

A Tabela 2.2 resume as principais características do compressor hermético usado no refrigerador em questão.

Tabela 2.2 - Principais características do compressor do refrigerador analisado.

Fabricante	TECUMSEH
Modelo	THC1340YS
Tipo de Motor	PTCSIR
Potência	100 W
Tensão de Operação	127 V
Corrente	1,45 A

2.2.3 Modelagem e Circuito Equivalente do Motor Monofásico PTCSIR

O modelo matemático foi desenvolvido com base nas equações dos enlaces de fluxo e da equação de equilíbrio dos conjugados [16]. As equações são escritas para uma máquina monofásica, resultando num conjunto de equações diferenciais, não lineares, que representam a operação da máquina. Para tal, foi utilizado o modelo elementar de uma máquina de indução ideal, bifásica, assimétrica, 2 pólos, [22], constituído por dois enrolamentos estatóricos, defasados de 90° no espaço, com características diferentes. O rotor em gaiola é representado por dois enrolamentos idênticos, também defasados de 90° no espaço. Na Figura 2.5 encontra-se ilustrada esquematicamente a representação do dispositivo, com seus respectivos enrolamentos e defasagens.

Um dispositivo como o acima descrito, é considerado como uma máquina de indução bifásica assimétrica, cuja teoria de operação é aplicável a uma ampla variedade de máquinas de indução monofásicas [23], [24], [24]. No desenvolvimento da modelagem matemática do motor bifásico são consideradas as simplificações adotadas em [22], quais sejam:

- Os enrolamentos do estator são distribuídos de maneira a produzir uma onda de força magnetomotriz (fmm) senoidal no espaço;
- Os enrolamentos do rotor ou barras são dispostos de maneira que, para qualquer tempo fixado, as ondas de fmm do rotor possam ser consideradas como senoidais no espaço, tendo o mesmo número de pólos que suas correspondentes ondas de fmm no estator;
- O entreferro é uniforme;
- O circuito magnético é linear.

As equações que descrevem o comportamento transitório e de regime permanente de uma máquina bifásica assimétrica, podem ser estabelecidas considerando-se a máquina elementar de dois pólos mostrada na Figura 2.5. Nesta figura, a fase **a** representa o enrolamento principal ou de regime (marcha) e a fase **b** o enrolamento auxiliar ou de partida. O rotor, em gaiola de esquilo, é representado por dois enrolamentos idênticos, conforme mencionado, defasados de 90° , representados pelas letras **A** e **B**, para os enrolamentos **A** e **B**, respectivamente. Os enrolamentos **a** do estator e **A** do rotor estão defasados de θ_e graus elétricos. A posição mecânica do rotor e a sua velocidade são representadas por θ_e e ω_r , respectivamente. A direção positiva do ângulo θ_e gira em direção oposta a rotação do rotor.

Na Figura 2.5 o símbolo (•) representa a corrente saindo do plano da figura, e o símbolo (x) representa a corrente penetrando no plano da figura.

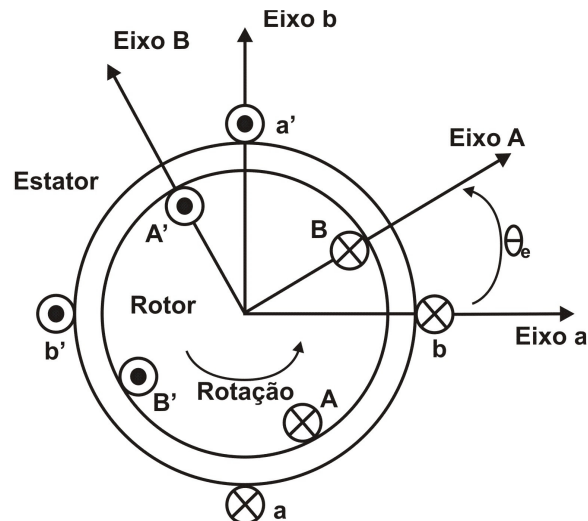


Figura 2.5 - Representação do motor de indução bifásico assimétrico.

Tendo sido assumido que, cada enrolamento é distribuído de maneira a produzir uma onda de fmm senoidal, é conveniente representar, para fins do desenvolvimento do modelo, cada bobina, por um enrolamento monofásico equivalente, conforme mostrado na Figura 2.6.

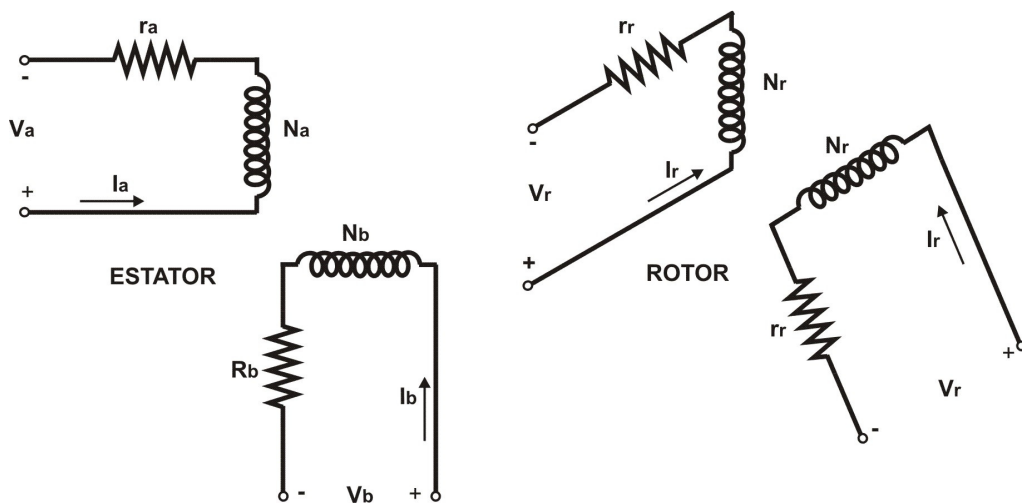


Figura 2.6 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor.

A seguir é apresentada a simbologia utilizada no presente trabalho para fins da modelagem em foco:

r_a - resistência do enrolamento principal do estator, fase **a**;

r_b - resistência do enrolamento auxiliar do estator, fase **b**;

r_A - resistência rotórica, fase **A**;

r_B - resistência rotórica, fase **B**;

θ_e - ângulo elétrico entre os enrolamentos do estator e rotor;

N_a - número de espiras do enrolamento principal;

N_b - número de espiras do enrolamento auxiliar;

p - número de pólos do motor;

l_{aa} - indutância própria do enrolamento principal do estator;

l_{bb} - indutância própria do enrolamento auxiliar do estator;

l_{AA} - indutância própria do enrolamento do rotor;

l_{BB} - indutância própria do enrolamento do rotor;

l_{AB} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor;

l_{BA} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor;

l_{ab} - indutância mútua dos enrolamentos principal e auxiliar do estator;

l_{ba} - indutância mútua dos enrolamentos principal e auxiliar do estator;

l_{aA} - indutância mútua dos enrolamentos principal e rotor;

l_{aB} - indutância mútua dos enrolamentos principal e rotor;

l_{bA} - indutância mútua dos enrolamentos auxiliar e rotor;

l_{bB} - indutância mútua dos enrolamentos auxiliar e rotor;

l_{Aa} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e principal;

l_{Ab} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e auxiliar;

l_{Ba} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e principal;

l_{Bb} - indutância mútua dos enrolamentos do rotor e principal;

v_a - valor instantâneo de tensão na fase a , do enrolamento principal;

v_b - valor instantâneo de tensão na fase b , do enrolamento auxiliar;

v_A - valor instantâneo de tensão na fase **A**, do rotor;

v_B - valor instantâneo de tensão na fase **B**, do rotor;

i_a - valor instantâneo da corrente na fase a , do enrolamento principal;

i_b - valor instantâneo da corrente na fase b , do enrolamento auxiliar;

i_A - valor instantâneo da corrente na fase A , do rotor;

i_B - valor instantâneo da corrente na fase B , do rotor;

λ_a - fluxo concatenado na fase a , do enrolamento principal;

λ_b - fluxo concatenado na fase b , do enrolamento auxiliar;

λ_A - fluxo concatenado na fase A , do rotor;

λ_B - fluxo concatenado na fase B , do rotor;

$\theta_{mec} = \theta$ - deslocamento mecânico;

T - conjugado eletromagnético;

T_c - conjugado da carga;

J - momento de inércia da carga + inércia do motor;

J_c - momento de inércia da carga;

J_m - momento de inércia do motor;

B - Coeficiente de atrito viscoso;

ω_r - velocidade angular.

➤ Equações Elétricas

Do ponto de vista magnético, todas as máquinas elétricas têm como princípio de funcionamento a tendência de alinhamento entre dois campos magnéticos, produzidos pelo estator e rotor, e que permite a contínua conversão eletromecânica de energia. Desta forma, a seguir, são apresentados e equacionados os fenômenos que fornecem o conjugado entre esses dois campos magnéticos, mostrando as condições básicas necessárias ao funcionamento do dispositivo.

➤ Tensões no Estator

Do circuito ilustrado na Figura 2.6 podem ser obtidas as equações de tensão para o estator e rotor, utilizadas para determinar as equações que descrevem o comportamento da máquina [15], [22]. Desta forma, para os enrolamentos do estator obtém-se:

$$v_a = r_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$v_b = r_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (2.2)$$

Onde:

v_i - valores instantâneos da tensão na fase i .

λ_i - fluxo concatenado na fase i .

i - assume índices a e b .

➤ Tensões no Rotor

Para o caso dos enrolamentos do rotor, visto que os mesmos se encontram curto-circuitados, as expressões são do tipo:

$$v_A = 0 = r_A i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad (2.3)$$

$$v_B = 0 = r_B i_B + \frac{d\lambda_B}{dt} \quad (2.4)$$

Onde o subscritos A e B, referem-se aos enrolamentos monofásicos equivalentes do rotor, A e B, respectivamente.

➤ 3.2.3 - Equação Mecânica

O valor instantâneo do conjugado eletromagnético, T , pode ser obtido de duas maneiras. A primeira através da variação da energia no sistema em relação aos deslocamentos angulares do rotor, supondo os fluxos concatenados

constantes, e outra, utilizando-se da variação da co-energia magnética em relação aos deslocamentos angulares do rotor, supondo as correntes constantes. A segunda alternativa é mais atrativa, uma vez que o seu desenvolvimento é menos complexo. Desta forma, determinando-se a equação da co-energia do circuito e utilizando a Equação (2.5), obter-se-á a expressão do conjugado eletromagnético, dada pela Equação (2.6):

$$T = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta_{\text{mec}}} \quad (2.5)$$

$$T = \frac{p}{2} \sum_i \sum_j i_i i_j \frac{dl_{ij}}{d\theta} \quad (2.6)$$

Onde:

p - é o número de pólos da máquina;

i_i e i_j - são as correntes nos enrolamentos i_i e i_j , respectivamente, com i e j assumindo os índices a, b, A, B ;

l_{ij} - é a indutância entre os enrolamentos i e j ;

θ - é o deslocamento angular elétrico.

A seguir procede-se ao equacionamento dos fluxos concatenados do estator e rotor, observando-se que o fluxo total que enlaça cada um deles é obtido através do somatório das parcelas de fluxo magnético produzido pela corrente no próprio enrolamento e pelos acoplamentos mútuos com os outros enrolamentos do rotor e estator.

➤ Determinação dos Fluxos

As equações dos fluxos concatenados podem ser determinadas pelos efeitos atrelados aos conceitos das indutâncias mútuas e próprias. Isto resulta na expressão genérica a seguir:

$$\lambda_i = l_{ii}i_i + \sum l_{ij}i_j \quad (2.6)$$

Assim, para o dispositivo em estudo, fazendo os subscritos i e j assumirem a e b do estator e A e B do rotor, obtêm-se, para as equações dos fluxos, as seguintes relações:

$$\lambda_a = l_{aa}i_a + l_{aA}i_A + l_{aB}i_B \quad (2.7)$$

$$\lambda_b = l_{bb}i_b + l_{bA}i_A + l_{bB}i_B \quad (2.8)$$

$$\lambda_A = l_{AA}i_A + l_{Aa}i_a + l_{Ab}i_b \quad (2.9)$$

$$\lambda_B = l_{BB}i_B + l_{Ba}i_a + l_{Bb}i_b \quad (2.10)$$

Onde, os termos l_{ii} e l_{ij} referem-se às indutâncias própria da fase i e mútua da fase j referida a fase i , respectivamente.

➤ Determinação das Indutâncias

As indutâncias próprias e mútuas entre dois enrolamentos i e j , genéricos, são dadas pela expressão:

$$l_{ij} = L_{ij} \cos \theta_e = l_{ji} \quad (2.11)$$

Onde o termo L_{ij} representa o valor de indutância máxima entre os enrolamentos i e j .

➤ Indutâncias Próprias:

Para o dispositivo em estudo, as Equações 2.12 a 2.15 representam as indutâncias próprias dos enrolamentos rotóricos e estatóricos. Como os enrolamentos do rotor foram assumidos idênticos, ambos têm as mesmas indutâncias próprias.

$$l_{aa} = L_{aa} \cos 0^\circ = L_{aa} \quad (2.12)$$

$$l_{bb} = L_{bb} \cos 0^\circ = L_{bb} \quad (2.13)$$

$$l_{AA} = L_{AA} \cos 0^\circ = L_{AA} \quad (2.14)$$

$$l_{BB} = L_{BB} \cos 0^\circ = L_{BB} \quad (2.15)$$

➤ Indutâncias Mútuas

De forma análoga, as Equações de 2.16 a 2.21 permitem a obtenção das indutâncias mútuas, sendo, portanto, iguais a:

$$l_{aA} = L_{aA} \cos \theta_e = l_{Aa} \quad (2.16)$$

$$l_{aB} = L_{aB} \cos(\theta_e - 90^\circ) = L_{aB} \sin \theta_e = l_{Ba} \quad (2.17)$$

$$l_{bA} = L_{bA} \cos(\theta_e + 90^\circ) = -L_{bA} \sin \theta_e = l_{Ab} \quad (2.18)$$

$$l_{bB} = L_{bB} \cos(\theta_e) = l_{Bb} \quad (2.19)$$

$$l_{ab} = L_{ab} \cos 90^\circ = l_{ba} = 0 \quad (2.20)$$

$$l_{AB} = L_{AB} \cos 90^\circ = l_{BA} = 0 \quad (2.21)$$

Substituindo as expressões das indutâncias das Equações 2.12 a 2.21, nas Expressões 2.7 a 2.10, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa}i_a + L_{aA} \cos \theta_e i_A + L_{aB} \sin(\theta_e) i_B \quad (2.22)$$

$$\lambda_b = L_{bb}i_b - L_{bA} \sin \theta_e i_A + L_{bB} \cos \theta_e i_B \quad (2.23)$$

$$\lambda_A = L_{AA}i_A + L_{aA} \cos \theta_e i_a - L_{bA} \sin \theta_e i_b \quad (2.24)$$

$$\lambda_B = L_{BB}i_B + L_{aB} \sin \theta_e i_a + L_{bB} \cos \theta_e i_b \quad (2.25)$$

Devido à natureza funcional do motor, os acoplamentos mútuos entre enrolamentos com defasagem diferente de 90° elétricos, são dependentes do ângulo entre os respectivos enrolamentos. Isto implica que, com o rotor em movimento, as indutâncias entre os enrolamentos variam com o tempo, fato este representado nas equações pelo ângulo elétrico (θ_e). Desta forma, a relação entre o ângulo elétrico (θ_e) e o ângulo mecânico (θ_{mec}) é dada pela seguinte expressão:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_{mec} = \frac{p}{2} \theta \quad (2.26)$$

Onde p é o número de pólos.

Substituindo-se a Expressão 2.26 nas Equações 2.22 a 2.25, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa}i_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B \quad (2.27)$$

$$\lambda_b = L_{bb}i_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B \quad (2.28)$$

$$\lambda_A = L_{AA}i_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_a - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_b \quad (2.29)$$

$$\lambda_B = L_{BB}i_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_a + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_b \quad (2.30)$$

Partindo das Expressões 2.27 a 2.30, que permitem a determinação dos fluxos existentes no dispositivo, obtêm-se as equações dinâmicas da máquina, conforme a seguir. Salienta-se que o símbolo “•” existente sobre alguma variável, representa o operador d/dt .

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{L} \\ \dot{L} \end{bmatrix} [I] \quad (2.31)$$

Para o enlace de fluxo λ_a no enrolamento principal do estator, a partir da Expressão 2.27, obtém-se:

$$\dot{\lambda}_a = L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \dot{\theta} \quad (2.32)$$

Analogamente obtém-se para λ_b , λ_A , λ_B , a partir das Expressões 2.28 a 2.30, as Expressões 2.33 a 2.35, respectivamente.

$$\dot{\lambda}_b = L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \dot{\theta} \quad (2.33)$$

$$\dot{\lambda}_A = L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} \dot{i}_b \dot{\theta} \quad (2.34)$$

$$\dot{\lambda}_B = L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b \dot{\theta} \quad (2.35)$$

Fazendo uso das expressões que fornecem as derivadas dos fluxos concatenados (Equações 2.32 a 2.35) e, reescrevendo-se as expressões para as tensões nos enrolamentos (Equações 2.1 a 2.4) na forma matricial, obtém-se um conjunto de expressões da forma a seguir.

$$[V] = [R][I] + \left[\dot{\lambda} \right] \quad (2.36)$$

Deste modo, as expressões de tensões para os enrolamentos do estator e do rotor da máquina ficam:

$$v = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \dot{\theta} \quad (2.37)$$

$$v = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \dot{\theta} \quad (2.38)$$

$$v_A = 0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} \dot{i}_b \dot{\theta} \quad (2.39)$$

$$v_B = 0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b \dot{\theta} \quad (2.40)$$

➤ Equação da Co-energia

Conforme já mencionado, a co-energia magnética do sistema será utilizada na determinação da expressão para o cálculo do conjugado eletromagnético. Assim, a co-energia do sistema é obtida pela somatória das contribuições das co-energias de cada enrolamento, ou seja:

$$W^{\wedge} = W'_a + W'_b + W'_A + W'_B$$

Onde:

$$W'_a = \int_0^{i_a} \lambda_a di_a ; W'_b = \int_0^{i_b} \lambda_b di_b ; W'_A = \int_0^{i_A} \lambda_A di_A \text{ E } W'_B = \int_0^{i_B} \lambda_B di_B$$

Ou considerando todas as contribuições:

$$W^{\wedge} = \int_0^{i_a} \lambda_a di_a + \int_0^{i_b} \lambda_b di_b + \int_0^{i_A} \lambda_A di_A + \int_0^{i_B} \lambda_B di_B$$

Substituindo-se os fluxos da relação anterior, pelas expressões em função das correntes, e resolvendo-se as integrais, a expressão final da co-energia fica na forma seguinte:

$$\begin{aligned} W' = & L_{aa} \frac{i_a^2}{2} + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_a + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_a + \\ & + L_{bb} \frac{i_b^2}{2} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_b + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_b + L_{AA} \frac{i_A^2}{2} + L_{BB} \frac{i_B^2}{2} \end{aligned} \quad (2.41)$$

➤ Determinação do Conjuguado Eletromagnético

O conjuguado eletromagnético é dado pela derivada da co-energia em relação ao deslocamento angular. Assim, partindo da Equação 2.41, e encontrando sua derivada em relação ao deslocamento angular, obtém-se a expressão do conjuguado eletromagnético, (T), que assume a seguinte forma:

$$T = -\left(\frac{p}{2}\right)\left[L_{aA} \operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + L_{aB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_a + \left(\frac{p}{2}\right)\left[L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A - L_{bB} \operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_b \quad (2.42)$$

➤ Determinação do Conjuguado da Carga

Adicionalmente às equações elétricas e de conjuguado é necessário obter as demais expressões matemáticas que definem o comportamento dinâmico do motor.

A partir do conjuguado eletromagnético e considerando-se as perdas do modelo real, é obtido o conjuguado de carga pela expressão:

$$T = T_C + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (2.43)$$

Onde: $J = J_m + J_c$

J_m - Momento de inércia do motor – [kg.m²];

J_c - Momento de inércia da carga – [kg.m²];

ω_r - Velocidade angular do rotor em relação ao estator– [rad/s];

B - Coeficiente de atrito viscoso da carga.

A velocidade angular e a aceleração angular do rotor da máquina são dadas pela Expressão 2.44 e 2.45, respectivamente:

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.44)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.45)$$

Substituindo as Expressões 2.44 e 2.45 na Equação 2.43, obtêm-se:

$$T = T_C + J \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + B \frac{d\theta}{dt} \quad \text{ou} \quad T = T_C + J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (2.46)$$

Reescrevendo a Expressão 2.46, de maneira a explicitar o conjugado da carga, chega-se a seguinte equação:

$$T_C = T - J \dot{\omega} + B \omega \quad (2.47)$$

O resultado do equacionamento matemático acima, é o conjunto de Equações, 2.48 a 2.52, que determinam o comportamento do motor de indução monofásico em pauta:

$$v = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega \quad (2.48)$$

$$v = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega \quad (2.49)$$

$$0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} i_b \omega \quad (2.50)$$

$$0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_b \omega \quad (2.51)$$

$$T_C = -\left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{aA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A + L_{aB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \right] \dot{i}_a + \left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A - L_{bB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \right] \dot{i}_b - J \dot{\omega} - B \omega \quad (2.52)$$

Acrescentando um relé PTC, ligado em série com o enrolamento auxiliar, ao equacionamento matemático descrito acima, chega-se à representação do motor de indução monofásico do tipo PTCSIR. A modelagem da variação da condutância desse relé foi feita com base em uma função polinomial decrescente.

2.3 ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS

Os estudos realizados neste trabalho, conforme já mencionado, abrangem a parte experimental e computacional, focados nos aspectos da qualidade do suprimento aplicado ao equipamento. Dentro deste enfoque, o equipamento é submetido, tanto teórica como laboratorialmente, a diversos itens de qualidade da energia elétrica, os quais estão em consonância com os tipos de distúrbios próprios à qualidade da energia elétrica e, comparando-se os correspondentes resultados, verificados os desempenhos e exatidão da proposta computacional desta dissertação. Estas duas vertentes para os estudos são discutidas na seqüência.

2.3.1 Estudos Computacionais

De posse do circuito equivalente do equipamento analisado, aliado a toda descrição feita, procede-se, na seqüência, os trabalhos de implementação do dispositivo sob análise no simulador ATP, pacote este escolhido por ser uma ferramenta consagrada e de domínio público.

Outra característica importante deste software é sua relativa facilidade no uso de equações para concepção de dispositivos. Este processo é realizado através da rotina *MODELS*. Esta rotina constituiu o cerne de todos os equipamentos apresentados neste trabalho, uma vez que, as principais partes desses dispositivos foram desenvolvidas através de modelos matemáticos.

No que tange à base computacional selecionada, a saber, o software ATP e os procedimentos empregados para a inserção do equipamento, estes correspondem a estratégias amplamente conhecidas e não serão, por tal motivo, aqui detalhadas. Por tal motivo entende-se que apenas os resultados obtidos via este mecanismo serão mostrados e discutidos neste trabalho.

2.3.2 Estudos Experimentais

A Figura 2.7 mostra o diagrama esquemático da montagem para os trabalhos experimentais, identificando as conexões e os diferentes dispositivos utilizados.

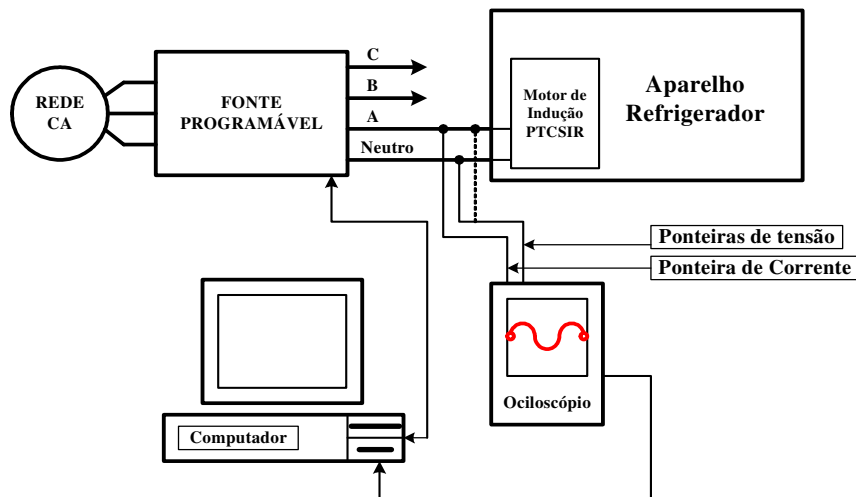


Figura 2.7 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos no refrigerador.

A seguir, de forma simplificada, são descritas as principais características dos diversos dispositivos utilizados nos trabalhos.

- **Fonte programável:** trifásica, marca HP, modelo HP 6834 A, com potência nominal de 4,5kVA. Esta tem a função de fonte de suprimento para o refrigerador, permitindo reproduzir em laboratório sinais de tensão puramente senoidal e quando for o caso, a aplicação dos diversos itens de qualidade, de forma controlada, à tensão de alimentação. Dada sua importância, na Figura 2.8, estão mostrados os módulos internos componentes da fonte, que possibilitaram a aplicação dos distúrbios;

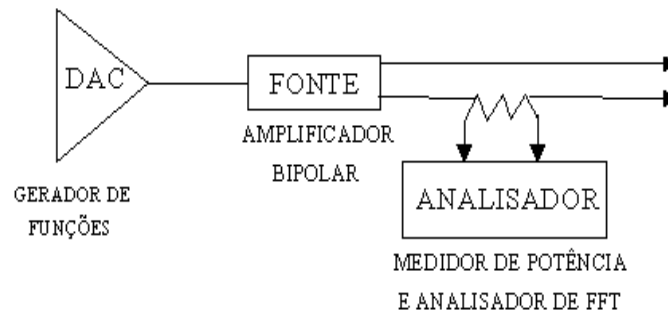


Figura 2.8 - Módulos constituintes da Fonte HP6834A

- **Osciloscópio de 4 canais:** modelo TDS744A, da marca TEKTRONIX, tendo por finalidade a aquisição dos sinais de tensão e corrente solicitados pelo aparelho sob teste. Estes sinais são armazenados em discos flexíveis de 1.44 Mb. O registro das informações é feito no formato *wfm*, por possibilitar tratamento posterior, com o auxílio de um micro computador. O tratamento é feito no programa *WaveStar*, software aplicativo do osciloscópio utilizado, que permite dentre outros recursos a decomposição harmônica das formas de onda das grandezas registradas;
- **Micro-computador:** o qual tem a função de controlar a fonte programável, além de armazenar e processar o tratamento dos sinais capturados pelo osciloscópio.

A Figura 2.9 ilustra a montagem laboratorial para a análise do refrigerador doméstico utilizado nos testes. Nesta, é possível observar as partes constituintes do arranjo experimental empregado, as quais se encontram devidamente destacadas.

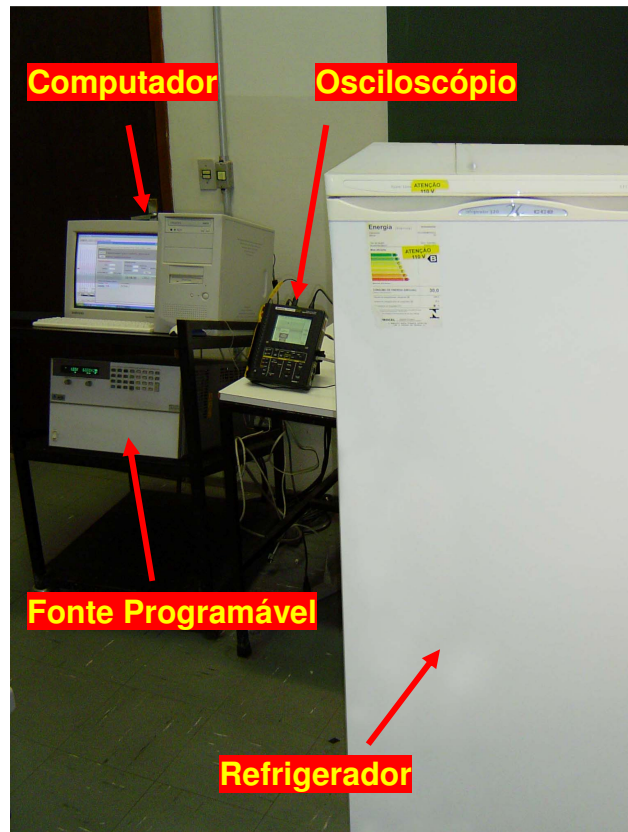


Figura 2.9 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho do refrigerador doméstico.

2.4 CASOS ESTUDADOS

Os estudos selecionados para apresentação e discussão visam atender as análises de desempenho do equipamento enfocando a condição nominal e distúrbios do tipo:

- Elevação de tensão de curta duração (voltage sag);
- Afundamento de tensão de curta duração (voltage swell);
- Interrupções de curta duração do fornecimento de energia elétrica;
- Distorções Harmônicas de tensão;
- Flutuações de tensão.

A Tabela 2.3 consolida os casos estudados, com uma breve descrição das condições de operação do aparelho para cada situação.

Tabela 2.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.

CASO	CARACTERÍSTICAS
1 – Condição Ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz;
2 – Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Elevação para 120% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
3 – Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Afundamento para 60% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
4 – Interrupção de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Interrupção de tensão; • Duração do evento de 7 ciclos.
5 – Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Pst (<i>Probability short-term</i>) de 5 pu.
6 – Distorção Harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Distorção harmônica com DHT = 20%.

Para cada situação considerada, as seguintes grandezas são consideradas para as análises comparativas entre os desempenhos computacional e experimental:

- Tensão de alimentação do equipamento;
- Corrente de entrada.

Os resultados experimentais são primeiramente apresentados e, na seqüência, aqueles obtidos por via computacional. Padronizou-se também a cor azul para a forma de onda tensão e a cor vermelha para a forma de onda da corrente.

2.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais

Com o auxílio da fonte de suprimento anteriormente descrita, ao refrigerador foi aplicada uma tensão de alimentação com característica muito próxima da ideal, de valor eficaz 127 V, fase-neutro, 60 Hz, cujos oscilogramas

encontram-se ilustrados na Figura 2.10. Destaca-se que a distorção harmônica total (DHT) da onda de tensão é inferior a 0,5%, ou seja, praticamente senoidal pura. Esta mesma figura evidencia a forma de onda da corrente solicitada pelo equipamento, a qual, no entanto, apresenta-se distorcida. Esta distorção é devido aos efeitos da saturação magnética do motor, fato este não previsto na modelagem computacional proposta.

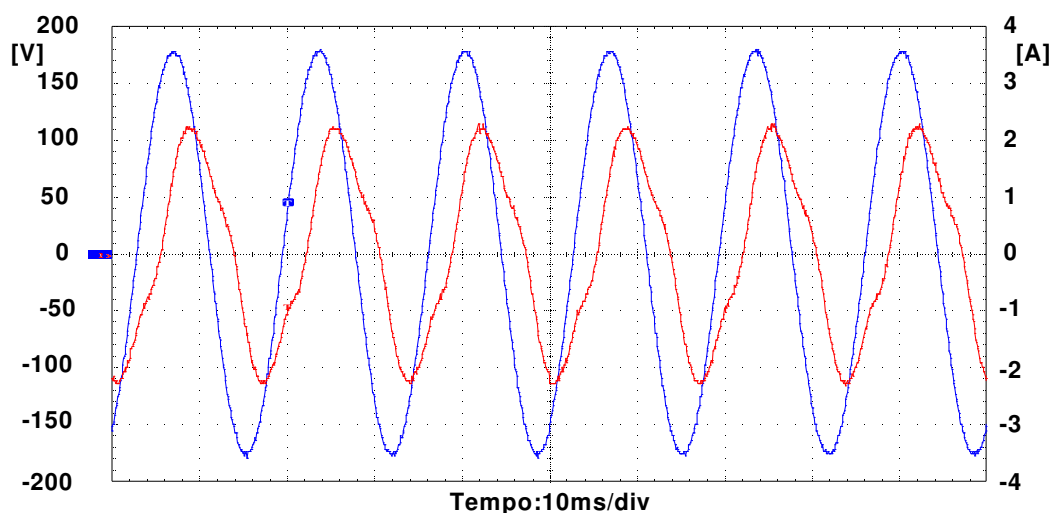


Figura 2.10 – Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 1 - Experimental.

A Figura 2.11 mostra os correspondentes oscilogramas de tensão e corrente obtidas por meio computacional.

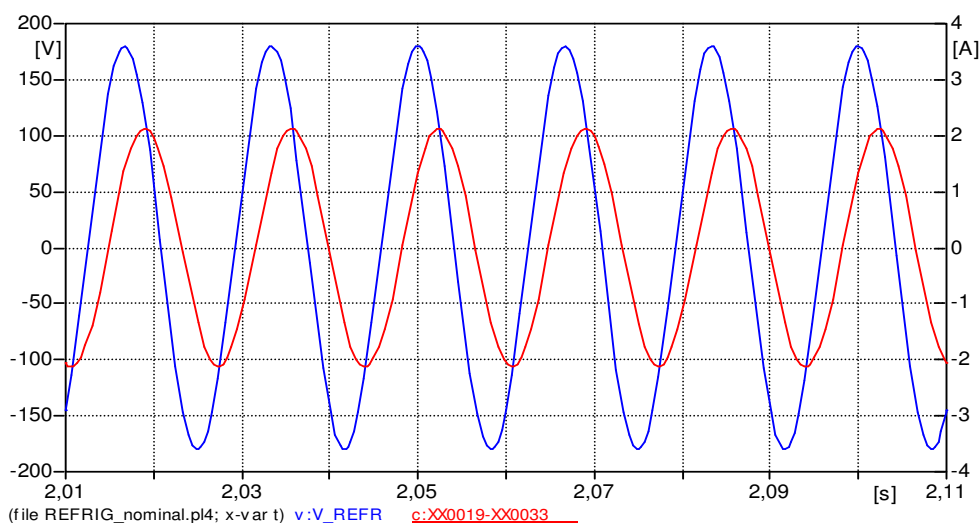


Figura 2.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 1 - Computacional.

Verifica-se que há uma boa semelhança entre as respostas obtidas por ambos os métodos. Deve-se salientar que as simplificações adotadas por ocasião do desenvolvimento do modelo e do programa computacional, têm como consequência, a obtenção de resultados, para ambos os métodos, com alguma diferença, porém plenamente válidos para os objetivos aqui postos.

A Tabela 2.4 apresenta os valores de pico e eficaz da corrente de entrada do equipamento sob teste, bem como o seu fator de potência, onde podem ser comparados os resultados numéricos extraídos da simulação computacional e experimental.

Tabela 2.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	2,28 A	2,13 A	6,58 %
Corrente Eficaz	1,50 A	1,51 A	0,66 %
Fator de Potência	0,635	0,631	0,63 %

Os resultados da tabela anterior permitem constatar uma boa correlação entre os resultados experimentais e aqueles obtidos através do modelo computacional. Deste modo, verifica-se que o modelo computacional se mostra, novamente, adequado aos propósitos deste trabalho.

2.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração

Este item tem por objetivo verificar o desempenho do refrigerador quando o dispositivo experimenta uma elevação momentânea de tensão. As Figuras 2.12 e 2.13 ilustram os oscilogramas experimental e computacional, respectivamente, contendo uma elevação temporária de tensão para 120 % da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental.

Verifica-se que, no início do distúrbio aplicado, um incremento, com duração de meio ciclo, aconteceu na corrente do equipamento. Observa-se também uma alteração na forma de onda da corrente quando do término do distúrbio. Os resultados mostram-se semelhantes para ambos os métodos utilizados.

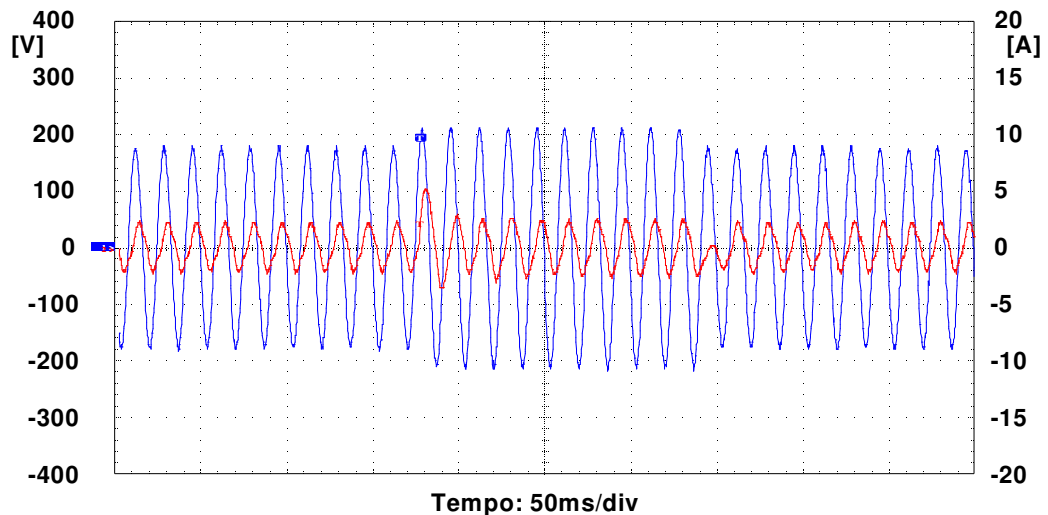


Figura 2.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 2 - Experimental.

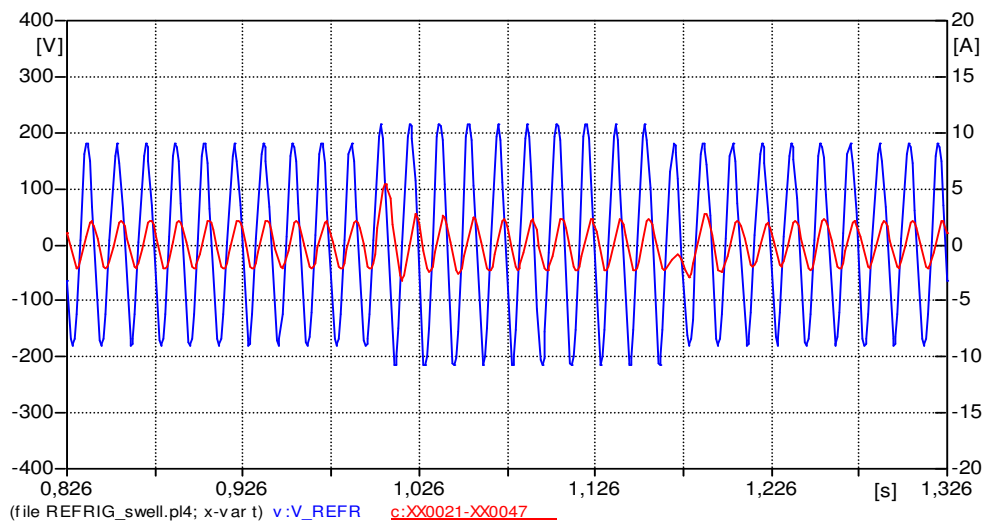


Figura 2.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 2 - Computacional.

A Tabela 2.5 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, experimental e computacionalmente.

Tabela 2.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	5,20 A	5,42 A	4,06 %

2.4.3 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração

As Figuras 2.14 e 2.15 ilustram o comportamento experimental e computacional do refrigerador quando da aplicação de um afundamento para 60% da tensão nominal com duração de 10 ciclos.

Observa-se que, como resposta ao afundamento aplicado, ocorre um acréscimo da corrente solicitada pela carga, permanecendo neste novo valor, enquanto persistir o fenômeno. Uma vez restabelecida a tensão, a corrente retorna ao seu valor pré-afundamento, levando para isto alguns ciclos. Verifica-se dos oscilogramas, que os instantes críticos ocorrem no início e término da perturbação, quando ocorre um acréscimo transitório de maior magnitude.

A Tabela 2.6 descreve um resumo do desempenho obtido, referente aos estudos experimental e computacional, como resposta do refrigerador ao afundamento aplicado.

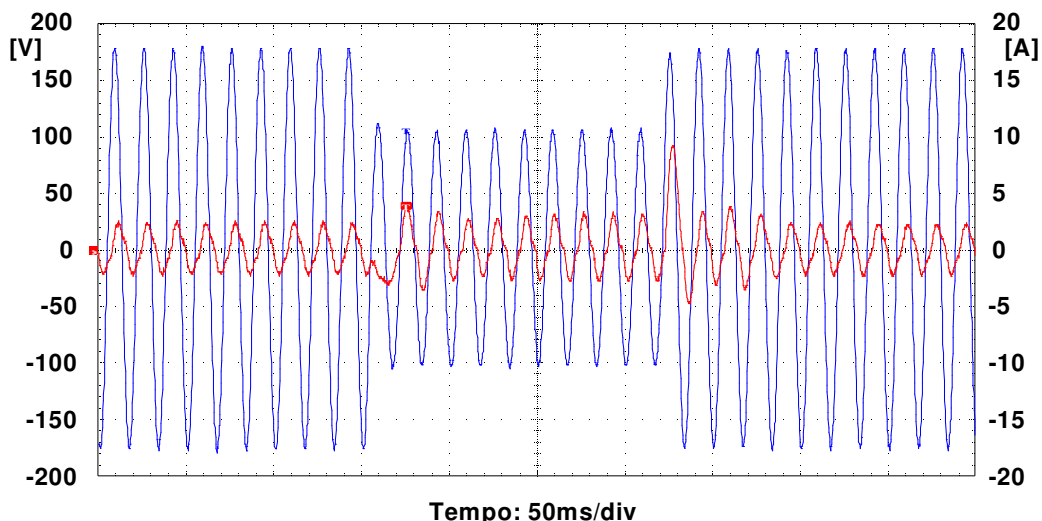


Figura 2.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 3 - Experimental.

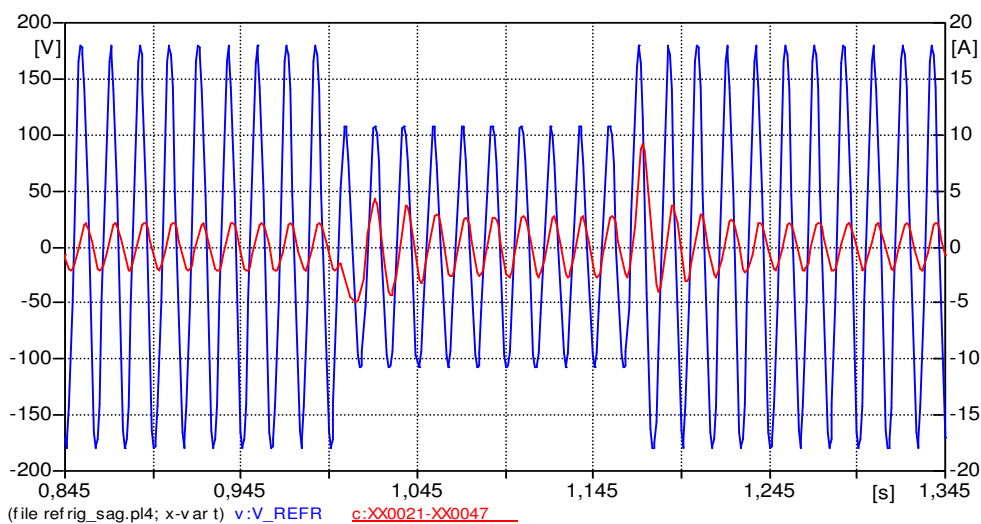


Figura 2.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 3 - Computacional.

Tabela 2.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	9,20 A	9,20 A	0,00 %

2.4.4 Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica

As Figuras 2.16 e 2.17 ilustram os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente solicitada pelo dispositivo, obtidas pelo método experimental e computacional, respectivamente, quando aplicada uma interrupção plena, como duração de 7 ciclos.

Como verificado, no instante da aplicação da interrupção, a corrente no dispositivo anula-se após um período de oscilação. Esta situação permanece enquanto perdurar o distúrbio. Observa-se ainda que, passada à perturbação, com a tensão retornando ao seu valor pré-distúrbio, a corrente, na tentativa de retomada do funcionamento atinge valores elevados que decaem até o valor nominal devido ao restabelecimento normal de operação do sistema. Situação semelhante não foi verificada para interrupções maiores do que 7 ciclos. Nestes casos, o motor não consegue reacelerar. O motivo para tal ocorrência está no desempenho termodinâmico do sistema de refrigeração, o qual, durante o funcionamento comprime o gás refrigerante, oferecendo um conjugado resistente ao dispositivo elétrico, o motor do compressor. Como o tempo de duração da interrupção é suficiente para que ocorra a equalização das pressões nos lados de alta e baixa pressão no circuito de refrigeração, um conjugado resistente acima do nominal é aplicado ao motor. Passado certo tempo, em torno de 18 segundos, e como consequência do elevado valor das correntes durante esse período, o protetor térmico geral do equipamento atua desenergizando o circuito. Esta situação permanece até que ocorra o “re-arme” desse dispositivo.

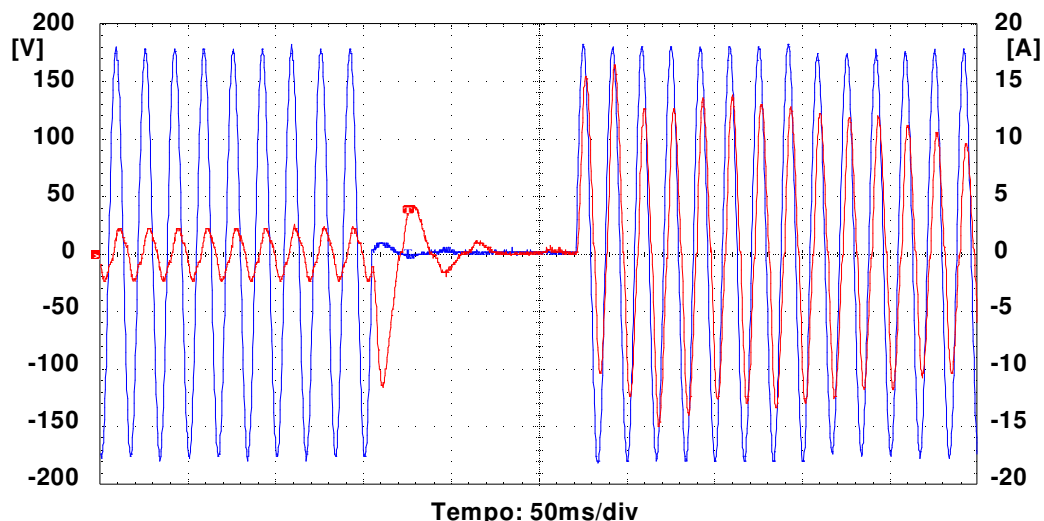


Figura 2.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 4 - Experimental.

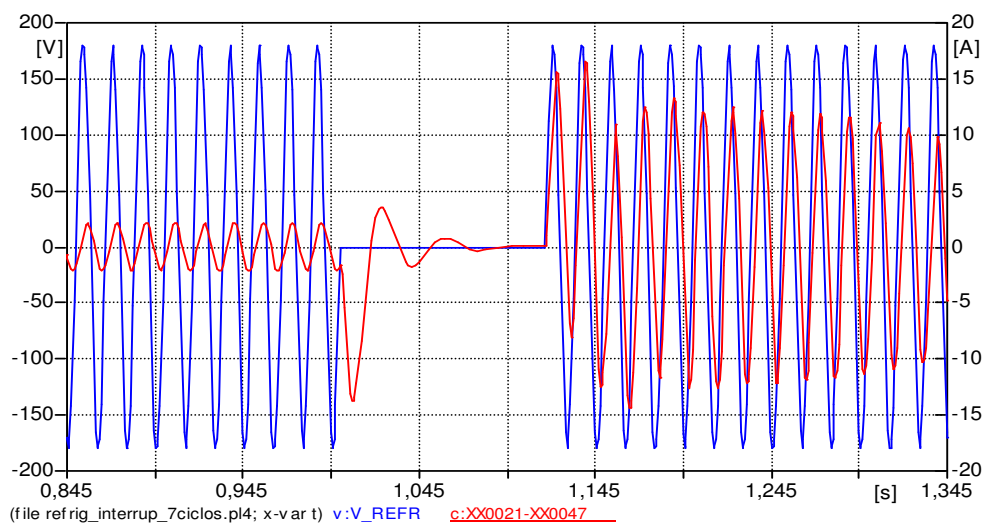


Figura 2.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 4 - Computacional.

A Tabela 2.7 informa os máximos valores obtidos da corrente do equipamento.

Tabela 2.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 4 – Interrupção da Energia.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	16,40 A	16,51 A	0,67 %

2.4.5 Caso 5: Suprimento Contendo Flutuação de Tensão

Complementarmente aos estudos anteriores, outra análise refere-se à resposta do equipamento em pauta diante de um suprimento contendo flutuações de tensão. Ressalta-se que o caso selecionado corresponde a uma condição mais severa do que aquelas freqüentemente encontradas nos sistemas elétricos. Esta escolha, no entanto, tem por finalidade intensificar e melhor ilustrar a resposta do equipamento quando operando com suprimento contendo oscilações de tensão, visto que, para índices menores, a influência seria ainda menos perceptível.

As Figuras 2.18 e 2.19 evidenciam os oscilogramas da tensão e da corrente total, obtidos experimentalmente e computacionalmente, respectivamente, para suprimento contendo flutuação de tensão com PST=5 pu e freqüência moduladora de 20 Hz. Percebe-se que a oscilação da tensão tem efeito direto na corrente, cuja freqüência de modulação é igual à da tensão com seus valores de máximos e mínimos em fase.

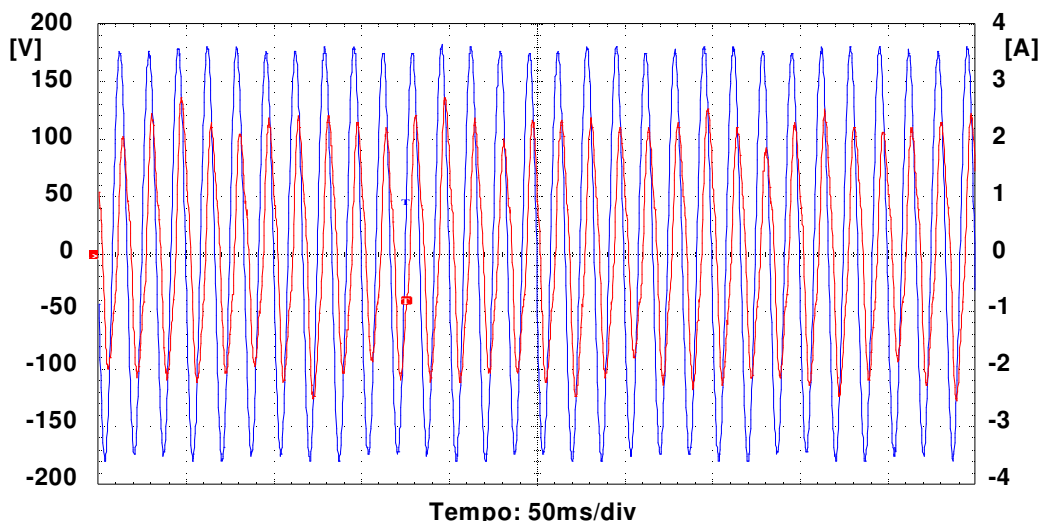


Figura 2.18 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 5 - Experimental.

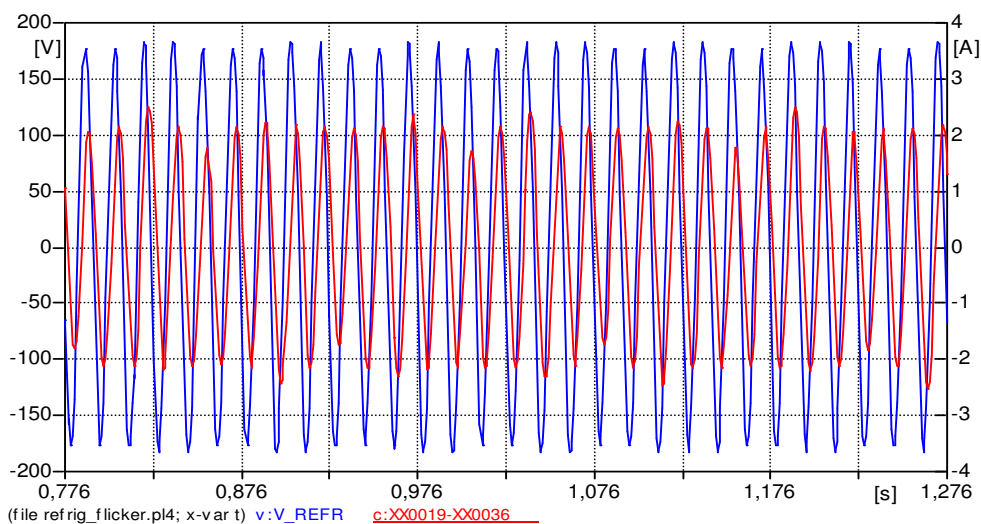


Figura 2.19 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 5 - Computacional.

A Tabela 2.8 resume os picos de corrente constatados.

Tabela 2.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	2,72 A	2,51 A	7,72 %

2.4.6 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão

Esta seção contempla os resultados de estudos voltados à análise de desempenho do refrigerador submetido a um suprimento de energia elétrica contendo distorções harmônicas. O estudo compreendeu a aplicação de uma tensão distorcida com um DHT = 20%.

A Tabela 2.9 detalha os percentuais harmônicos individuais ao qual o equipamento foi submetido.

Tabela 2.9 - Distorções harmônicas individuais aplicadas ao refrigerador doméstico.

Harmônicas	Valor
2ª Ordem	4 %
3ª Ordem	10 %
5ª Ordem	10 %
7ª Ordem	10 %
11ª Ordem	6 %
13ª Ordem	6 %

As Figuras 2.20 e 2.21 ilustram os oscilogramas da tensão aplicada e da corrente total consumida pela carga, para DHT considerado. Percebe-se que o oscilograma de corrente apresenta forte distorção, comparativamente a uma onda senoidal. No que tange à questão de alterações físicas perceptíveis quanto ao funcionamento do equipamento, para os níveis de distorções utilizados nos ensaios, não foram observados ruídos audíveis ou vibrações diferentes daqueles constados sob alimentação puramente senoidal.

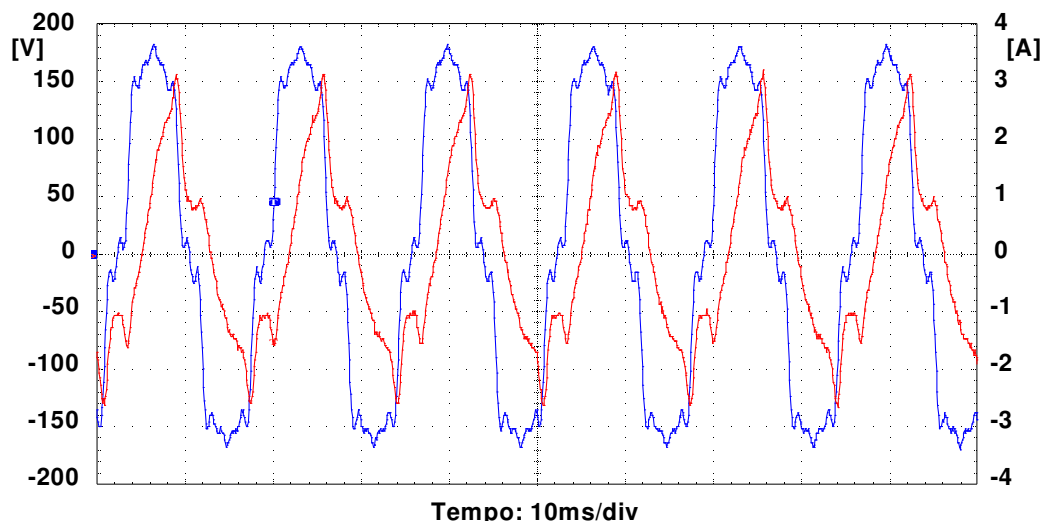


Figura 2.20 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Experimental.

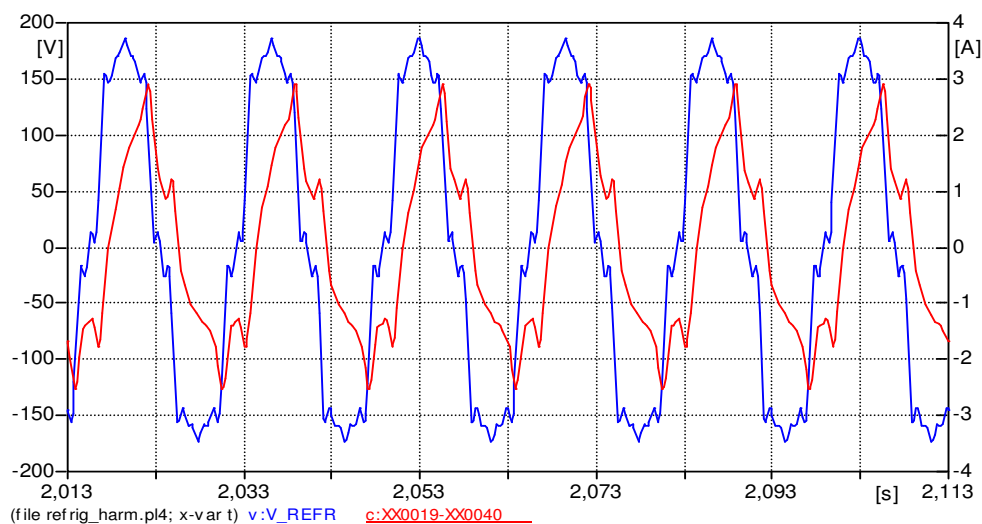


Figura 2.21 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Computacional.

Verifica-se que a concordância entre as respostas obtidas pelos dois métodos é bastante acentuada.

As Figuras 2.22 e 2.23 ilustram os espectros harmônicos para o caso experimental e computacional, respectivamente. No espectro experimental, a componente de 3^a harmônica apresenta uma magnitude bem mais elevada do que a verificada no espectro computacional. Essa diferença de magnitudes deve-se, basicamente, aos efeitos da saturação magnética (não contemplada na modelagem) que não são verificados no caso computacional. Contudo, as

demais harmônicas apresentam boa correlação, o que permite afirmar que o modelo computacional possui, mais uma vez, uma boa resposta, quando comparado com o modelo experimental.

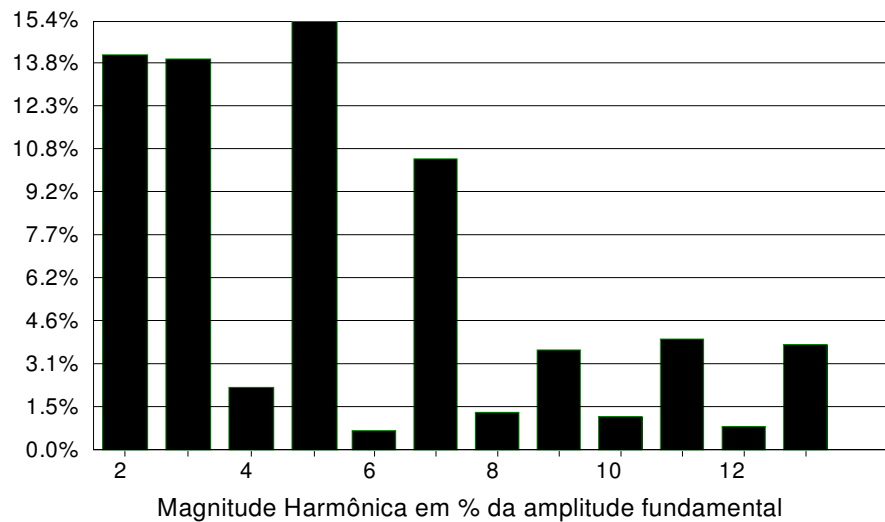


Figura 2.22 - Espectro harmônico da corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Experimental.

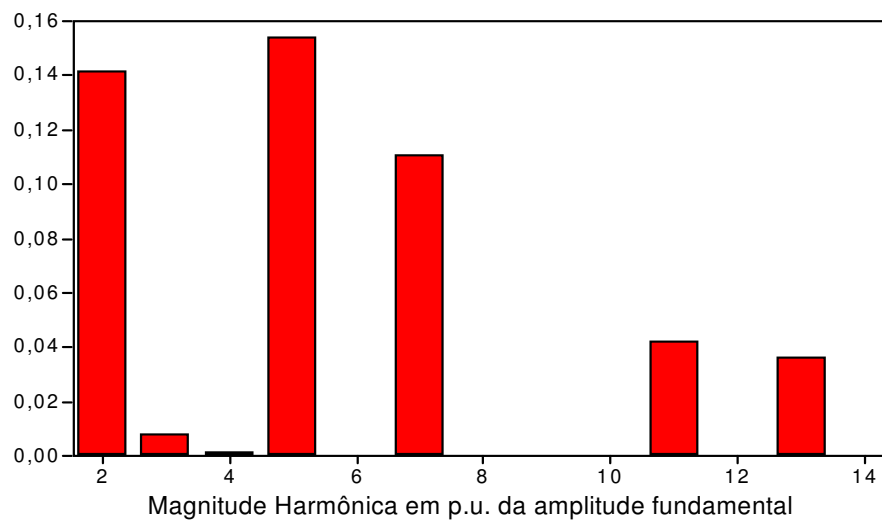


Figura 2.23 - Espectro harmônico da corrente de entrada do refrigerador. Caso 6 - Computacional.

A Tabela 2.10 destaca os valores de pico, eficaz e da distorção harmônica total de corrente apresentado pelo equipamento, além dos valores individuais das harmônicas.

Tabela 2.10 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	3,20 A	2,91 A	9,06 %
DHTi	28,35 %	24,25 %	14,46 %
I_h fundamental	1,45 A	1,51 A	3,97 %
I_h 2 ^a	0,206 A	0,213 A	3,29 %
I_h 3 ^a	0,204 A	0,011 A	--
I_h 4 ^a	0,034 A	0,001 A	--
I_h 5 ^a	0,223 A	0,232 A	3,88 %
I_h 7 ^a	0,153 A	0,166 A	7,83 %
I_h 9 ^a	0,054 A	0,000 A	--
I_h 11 ^a	0,059 A	0,063 A	6,35 %
I_h 13 ^a	0,056 A	0,054 A	3,57 %

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo, inicialmente, abordou os aspectos associados com as características gerais do equipamento em estudo, o refrigerador doméstico. A seguir foram traçadas as estratégias necessárias para atingir as metas e objetivos propostos, pautadas na realização de estudos experimentais e computacionais.

De um modo geral, as investigações realizadas permitem constatar que:

- Submetido à elevação temporária de tensão, o dispositivo não apresentou nenhum efeito significativo sobre no seu desempenho. Foi observado, apenas, um pequeno acréscimo no valor eficaz da corrente. Ressalta-se a não realização de estudos com elevações maiores, por motivos de segurança quanto à preservação da integridade do aparelho;
- Afundamentos temporários de tensão e interrupções foram caracterizados como as perturbações mais prejudiciais ao desempenho do equipamento. De uma forma geral, o dispositivo estudado demonstrou

possuir baixa sensibilidade a estes itens de qualidade, não apresentando, entretanto, anormalidade que pudesse ser percebida fisicamente, mas somente através da variação dos valores eficazes da corrente;

- O refrigerador apresentou suportabilidade à interrupção do fornecimento de até 7 ciclos. Interrupções com duração superior ao período mencionado provocaram o desligamento do refrigerador;
- Flutuações de tensão nos níveis aplicados ao dispositivo em estudo não produziram anormalidades que pudessem ser percebidas fisicamente. Este tipo de perturbação teve reflexo direto nas correntes do equipamento, causando também flutuação da corrente, sem que isto influenciasse a operação do dispositivo analisado;
- Distorções harmônicas de tensão nos níveis e ordens aplicadas, não tiveram reflexos perceptíveis no aparelho, entretanto, observou-se forte deformação das formas de onda;

Em todos os casos estudados verificou-se boa semelhança entre os resultados obtidos pelo método experimental e o computacional, validando, assim, o modelo do refrigerador implementado computacionalmente.

CAPÍTULO III

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FREEZERS DOMÉSTICOS

3.1 INTRODUÇÃO

O freezer, conhecido também por congelador, possui o mesmo princípio de funcionamento que os refrigeradores. Sua função, assim como nos refrigeradores, é aumentar a preservação dos alimentos. Os freezers são equipamentos que trabalham com temperatura de -18°C ou menos, sendo por isso, ideais na conservação de alimentos por longos períodos de tempo.

Diante do fato que este produto possui princípios operacionais similares ao refrigerador, segue que a estratégia para as investigações realizadas neste capítulo é extremamente próxima daquela realizada no capítulo precedente. Assim, torna-se desnecessário tecer considerações adicionais de âmbito metodológico e funcional, ficando este capítulo restrito à apresentação e discussão dos resultados obtidos e das constatações mais relevantes sobre o processo de validação e desempenho físico do equipamento sob consideração.

3.2 IDENTIFICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MODELAGEM DO FREEZER

Dentro da mesma estrutura obedecida para o capítulo anterior ressaltam-se, abaixo, os correspondentes desenvolvimentos até a obtenção do modelo representativo do freezer.

3.2.1 Identificação do Equipamento

O equipamento analisado consiste de um freezer doméstico, vertical e com capacidade de 195 litros, conforme ilustra a Figura 3.1.



Figura 3.1 – Freezer doméstico sob ensaio.

A Figura 3.2 corresponde a uma vista posterior do dispositivo, no qual se pode verificar o principal componente do equipamento, o compressor hermético.



Figura 3.2 – Detalhe do compressor hermético do freezer sob estudo.

A Tabela 3.1 descreve as principais características do freezer utilizado nos estudos.

Tabela 3.1 - Características do freezer disponibilizado para estudos.

Fabricante	CONSUL
Modelo	CVU20D88NA
Serie	JC5587053
Capacidade	195 Litros
Tensão	220 V
Potência	115 W

3.2.2 Características Físicas do Equipamento

Assim como refrigeradores domésticos, o principal componente do freezer é o seu compressor hermético. Este, para o freezer estudado, utiliza um motor de indução monofásico RSIR, que possui a mesma aplicabilidade do motor de indução monofásico PTCSIR, descrito no Capítulo II. Contudo, diferentemente do PTCSIR, que utiliza um relé PTC, no modelo RSIR o enrolamento auxiliar é

retirado de operação por um relé amperométrico, que é ligado em série com o enrolamento auxiliar. Nesse sistema, quando a corrente do enrolamento auxiliar alcança certo valor, conhecido como corrente de *pick-up*, o relé fecha seu contato, conectando o enrolamento auxiliar ao sistema. Posteriormente, quando o motor atinge determinada velocidade, a corrente total do sistema diminui até atingir um valor de referência mínimo, conhecido como corrente de *drop-out*. Nesse instante, o relé abre seu contato desconectando o enrolamento auxiliar. É importante salientar que, diferentemente do refrigerador, o enrolamento auxiliar pode voltar a funcionar em outra situação que não seja a partida do equipamento, como exemplo, diante de uma interrupção da energia.

A Figura 3.3 ilustra o diagrama elétrico do motor utilizado no freezer e seus dispositivos de proteção. Maiores detalhes podem ser encontrados em documentos do fabricante [33].

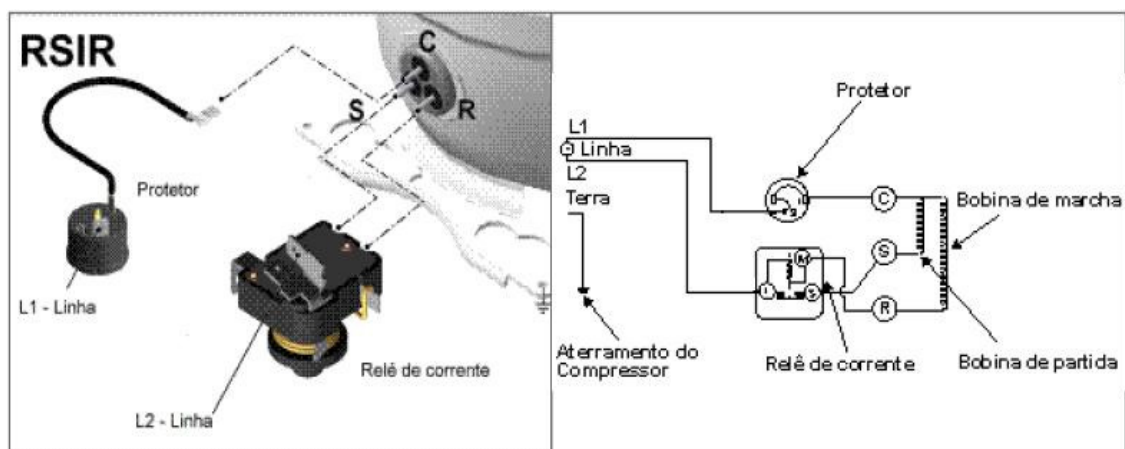


Figura 3.3 - Representação do diagrama elétrico do motor RSIR.

A Tabela 3.2 fornece as principais características do compressor hermético usado no freezer analisado.

Tabela 3.2 - Principais características do compressor hermético do freezer estudado.

Fabricante	EMBRACO
Modelo	FFI6HAK - 513200161
Tipo de Motor	RSIR
Potência	1/5 HP
Tensão de Operação	220 V

3.2.3 Circuito Equivalente e Modelagem do Motor Monofásico RSIR

O modelo matemático do motor de indução monofásico RSIR é idêntico ao modelo PTCSIR, descrito no Capítulo II, exceto pela substituição do relé PTC por um relé Amperométrico. Dessa forma, as descrições detalhadamente feitas anteriormente não serão aqui repetidas.

3.3 ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS

As investigações conduzidas, da mesma forma que no Capítulo II, envolvem procedimentos computacionais e experimentais, como abaixo.

3.3.1 Estudos Computacionais

Os procedimentos para esta etapa da pesquisa também são similares ao já estabelecido, motivo pelo qual se consideram desnecessários maiores discussões e detalhamentos nesta fase.

3.3.2 Estudos Experimentais

A Figura 3.4 mostra o diagrama esquemático da montagem para os trabalhos experimentais, identificando as conexões e os diferentes dispositivos utilizados.

O arranjo experimental ilustrado compõe-se, fundamentalmente, das mesmas unidades descritas para o refrigerador, motivo pelo quais os diversos equipamentos não são aqui detalhados. A única diferença está na substituição do refrigerador pelo freezer.

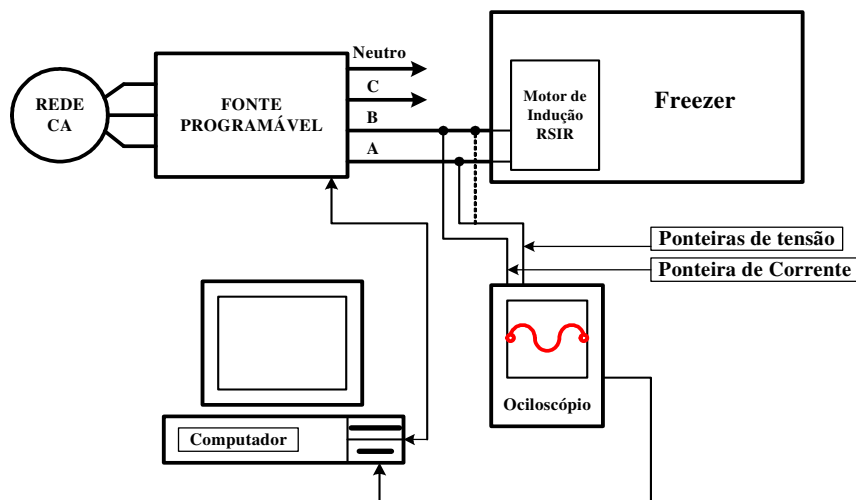


Figura 3.4 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos do freezer.

A Figura 3.5 ilustra a montagem laboratorial para a análise do freezer utilizado para os testes. Nesta, é possível observar as partes constituintes do arranjo experimental empregado, as quais se encontram destacadas.

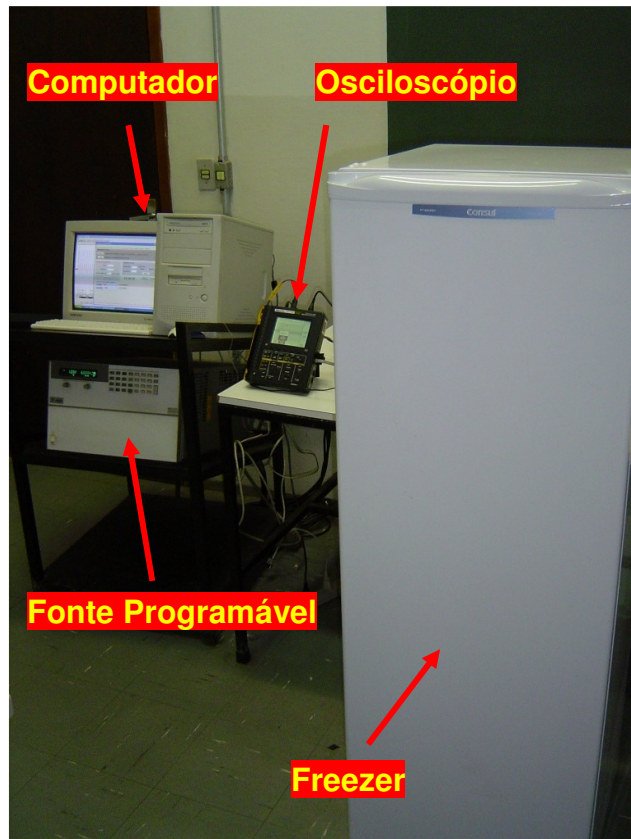


Figura 3.5 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho do freezer.

3.4 CASOS ESTUDADOS

Os estudos realizados no freezer obedecem aos mesmos ensaios adotados para o refrigerador, exceto quanto a algumas magnitudes dos distúrbios. A Tabela 3.3 consolida todos os casos estudados, com uma breve descrição das condições de operação do aparelho para cada situação.

Tabela 3.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.

CASO	CARACTERÍSTICAS
1 – Condição Ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz;
2 – Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Elevação para 115% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
3 – Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Afundamento para 60% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
4 – Interrupção de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Interrupção de tensão; • Duração do evento de 15 ciclos.
5 – Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Pst (<i>Probability short-term</i>) de 5 pu.
6 – Distorção Harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Distorção harmônica com DHT = 20%.

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na seqüência, onde se observa a mesma estratégia definida para o refrigerador.

3.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais

As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam, respectivamente, os oscilogramas das tensões e correntes, obtidas pelos métodos experimental e computacional.

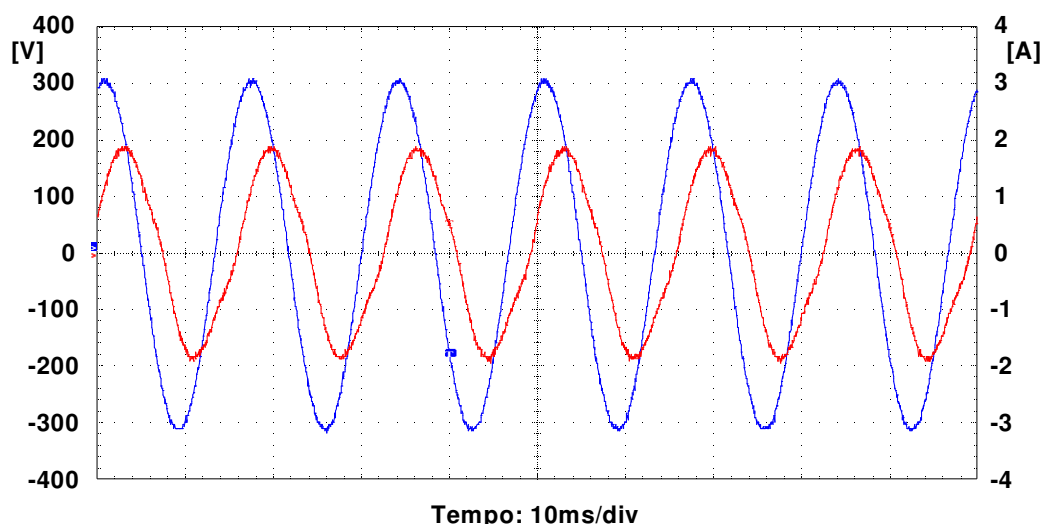


Figura 3.6 – Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 1 - Experimental.

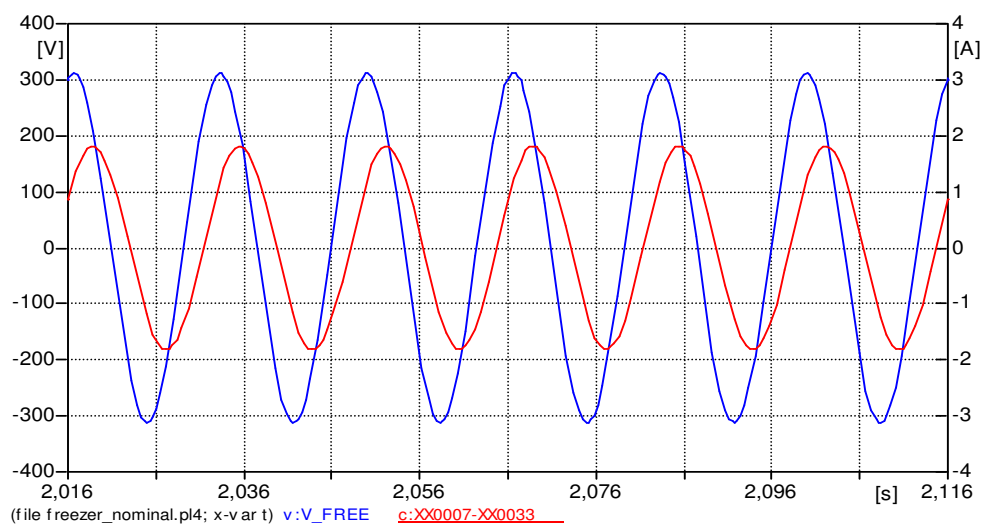


Figura 3.7 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 1 - Computacional.

A Tabela 3.4 apresenta os valores de pico e eficaz da corrente de entrada do equipamento sob teste, bem como o seu fator de potência.

Tabela 3.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	1,92 A	1,81 A	5,73 %
Corrente Eficaz	1,27 A	1,29 A	1,55 %
Fator de Potência	0,67	0,67	0,00 %

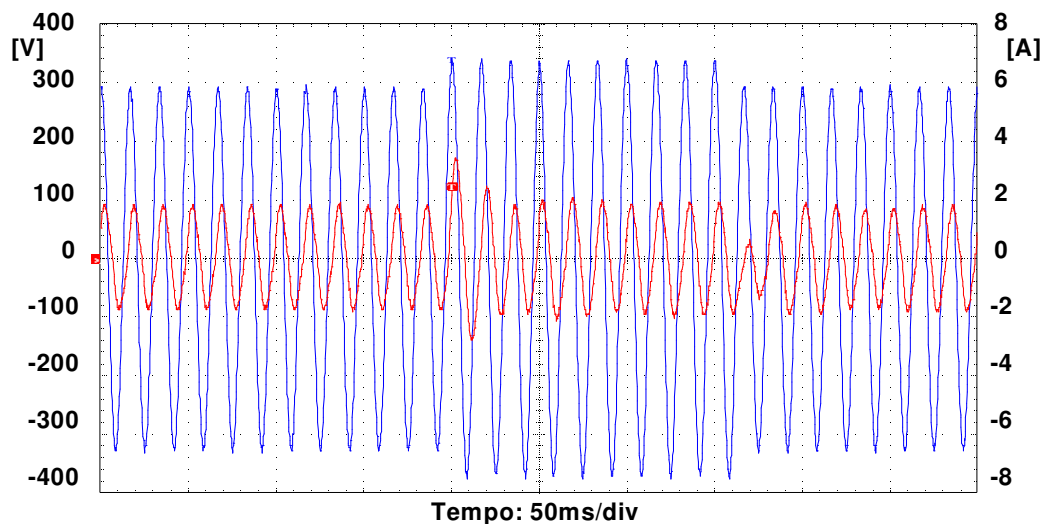
Os resultados comprovam a boa correlação entre os resultados experimentais e os resultados computacionais permitindo afirmar que o modelo computacional apresenta um bom desempenho quando comparado com o modelo experimental.

3.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração

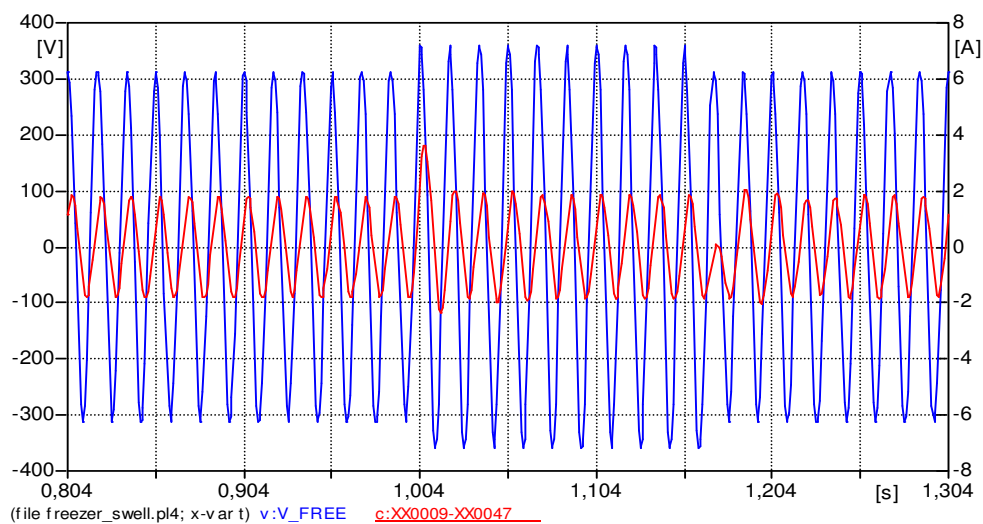
As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram as formas de onda da tensão de suprimento e corrente experimental e computacional, respectivamente, contendo uma elevação temporária de tensão para 115% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental.

Observa-se uma pequena influência do distúrbio na corrente do freezer, exceto nos instantes inicial e final do fenômeno, quando ocorre um transitório mais expressivo. Os resultados se mostraram semelhantes para ambos os métodos.

A Tabela 3.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos, experimental e computacionalmente, com a finalidade de oferecer dados que lhe permitam uma melhor clareza a respeito do desempenho do equipamento quanto aos indicativos numéricos.



**Figura 3.8 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer.
Caso 2 - Experimental.**



**Figura 3.9 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer.
Caso 2 - Computacional.**

Tabela 3.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	3,44 A	3,63 A	5,23 %

3.4.3 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração

As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram o comportamento experimental e computacional do freezer, respectivamente, ilustrando as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente de entrada, quando da aplicação de um afundamento para 60% da tensão nominal com duração de 10 ciclos.

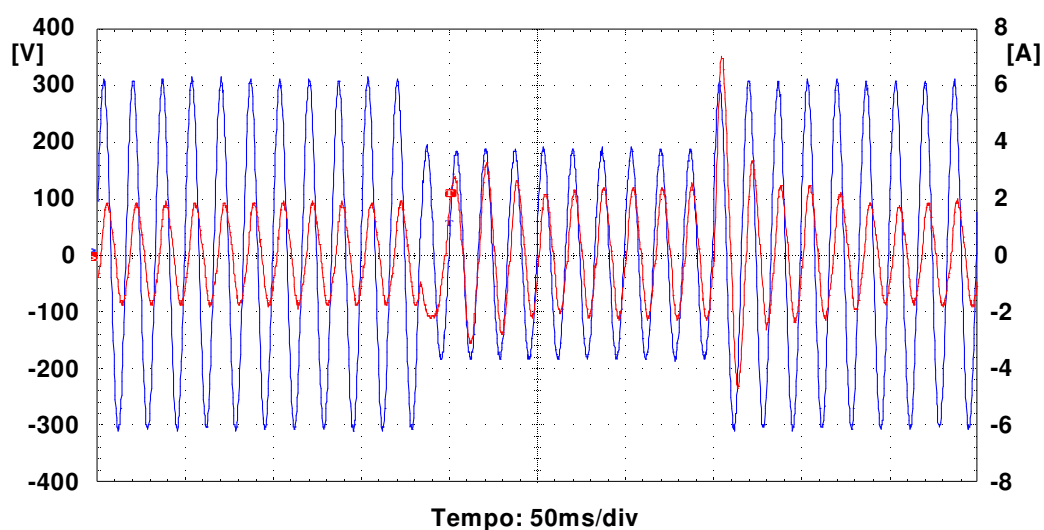


Figura 3.10 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 3 - Experimental.

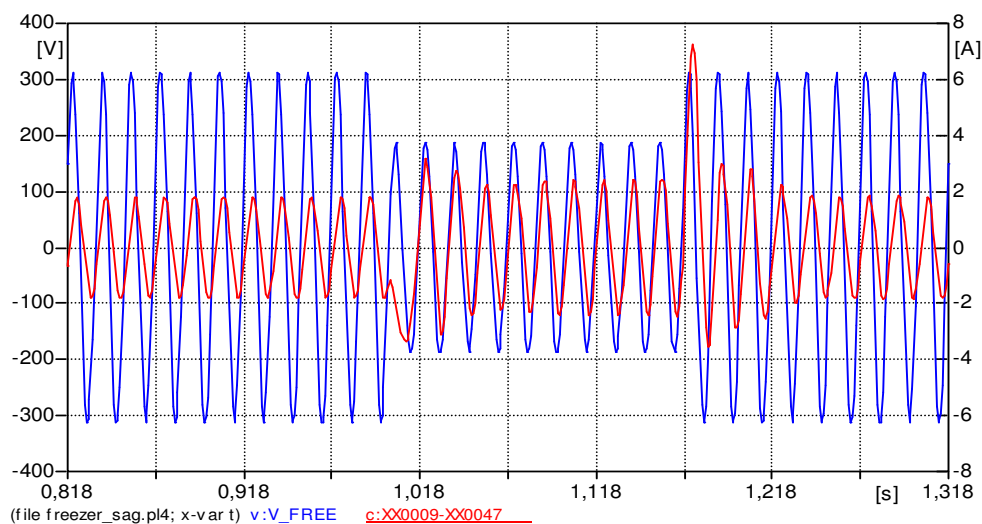


Figura 3.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 3 - Computacional.

Para este caso, percebe-se que, como resposta ao afundamento aplicado, ocorreu um aumento da corrente solicitada pelo equipamento, permanecendo neste novo valor, enquanto continuar o fenômeno. Uma vez restabelecida a tensão, a corrente retorna ao seu valor pré-afundamento, levando para isto alguns ciclos. Verifica-se também, que os instantes críticos ocorrem no início e término do distúrbio, quando ocorre um acréscimo de maior magnitude.

A Tabela 3.6 mostra o resultado obtido, referente aos estudos experimental e computacional, como resposta do freezer ao distúrbio aplicado. Como já mencionado, os resultados obtidos através das duas estratégias de estudo estão em concordância bastante apropriada aos objetivos desta pesquisa.

Tabela 3.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	7,04 A	7,23 A	2,63 %

3.4.4 Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica

As Figuras 3.12 e 3.13 ilustram as formas de ondas da tensão de suprimento e da corrente solicitada pelo equipamento, obtidas pelo método experimental, quando aplicada uma interrupção plena, como duração de 15 ciclos. Verifica-se que, no instante da aplicação da interrupção, a corrente no dispositivo oscila até se anular, permanecendo nesta situação enquanto persistir o distúrbio.

Observa-se ainda que, finalizada à perturbação, com a tensão retornando ao seu valor normal, a corrente, na tentativa de retomada do funcionamento, atinge valores elevados devido à desaceleração do motor ocorrida durante a interrupção da energia. Contudo, percebe-se que o produto consegue restabelecer seu funcionamento normal. Situação semelhante não foi constatada

para interrupções maiores do que 25 ciclos. Nestes casos o motor não consegue mais reacelerar. O motivo para tal fenômeno é o mesmo ocorrido para o refrigerador. Passado um intervalo de cerca de 5 segundos, e como consequência do elevado valor das correntes durante esse período, o protetor térmico geral do equipamento atua desenergizando o circuito. Esta situação permanece até que ocorra o “re-arme” desse protetor.

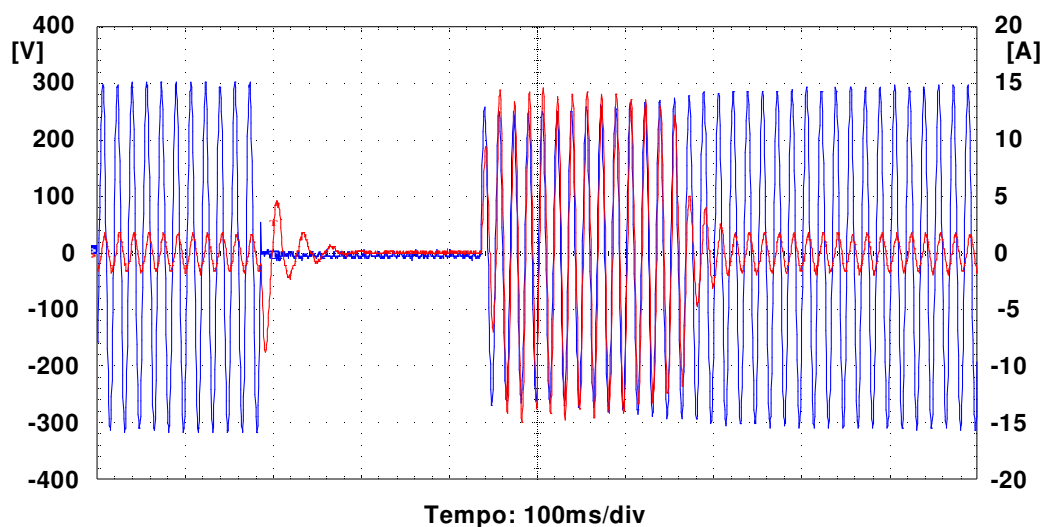


Figura 3.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 4 - Experimental.

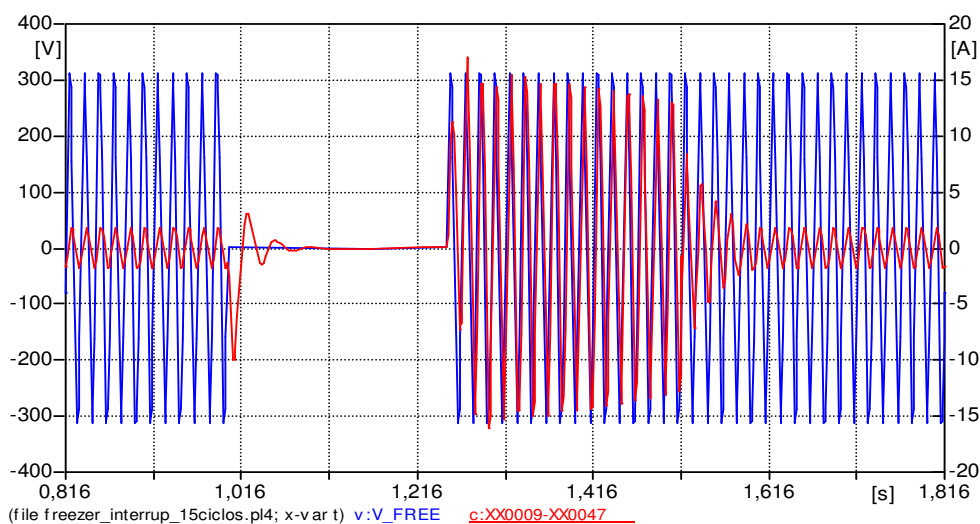


Figura 3.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 4 - Computacional.

A Tabela 3.7 informa os máximos valores obtidos para a corrente do equipamento.

Tabela 3.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 4 – Interrupção da Energia.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	15,00 A	17,03 A	11,92 %

A diferença percentual entre o modelo computacional e experimental verificada é justificada pela queda de tensão provocada no sistema real devido aos elevados valores da corrente de partida do motor, situação esta não verificada no caso computacional, onde a tensão permanece sempre com a mesma magnitude.

3.4.5 Caso 5: Suprimento Contendo Flutuação de Tensão

As Figuras 3.14 e 3.15 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente total, obtidos experimentalmente e computacionalmente, respectivamente, para o fornecimento contendo oscilação de tensão com PST=5 pu e frequência moduladora de 20 Hz. Percebe-se que a oscilação da tensão tem efeito direto na corrente, cuja frequência de modulação é igual à da tensão com seus valores de máximos e mínimos em fase. A Tabela 3.8 fornece os valores de pico para as correntes.

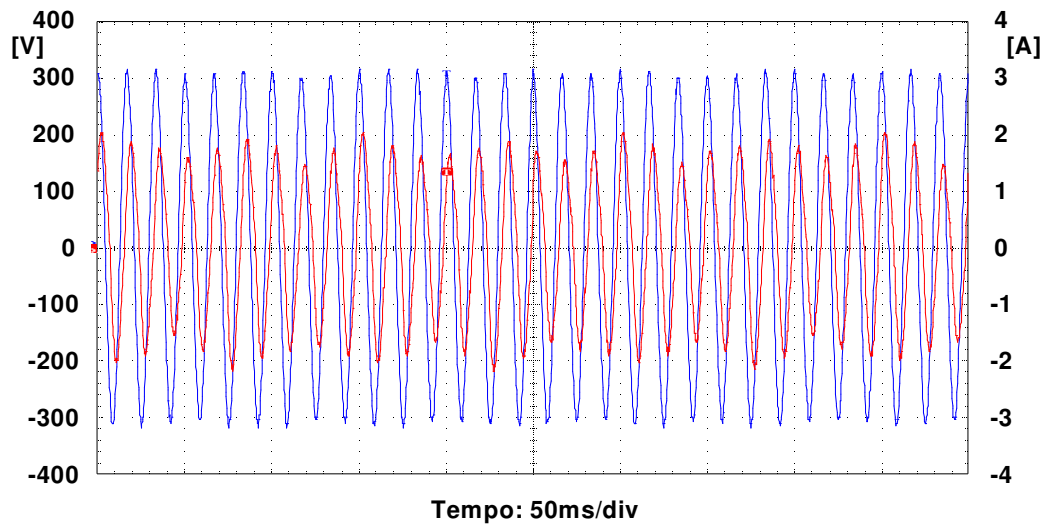


Figura 3.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 5 - Experimental.

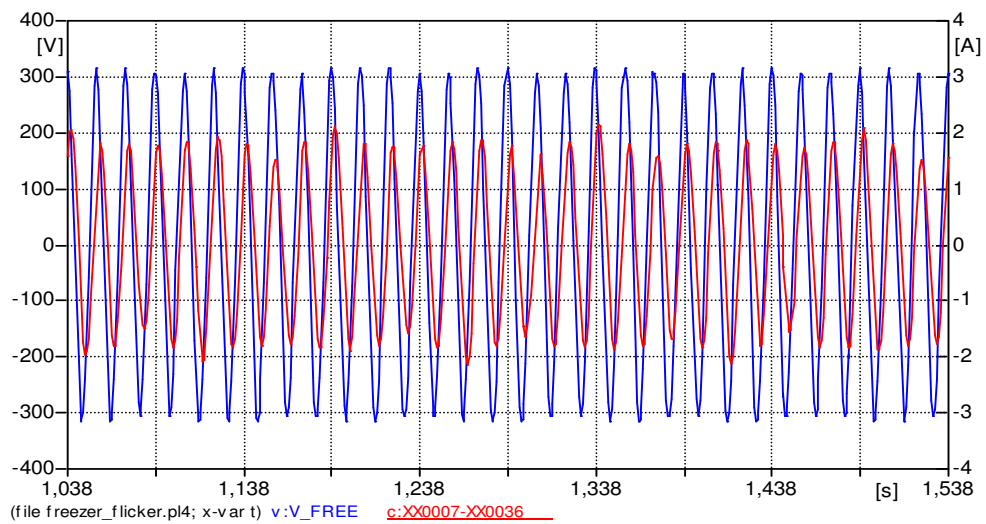


Figura 3.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer. Caso 5 - Computacional.

Tabela 3.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	2,10 A	2,12 A	0,94 %

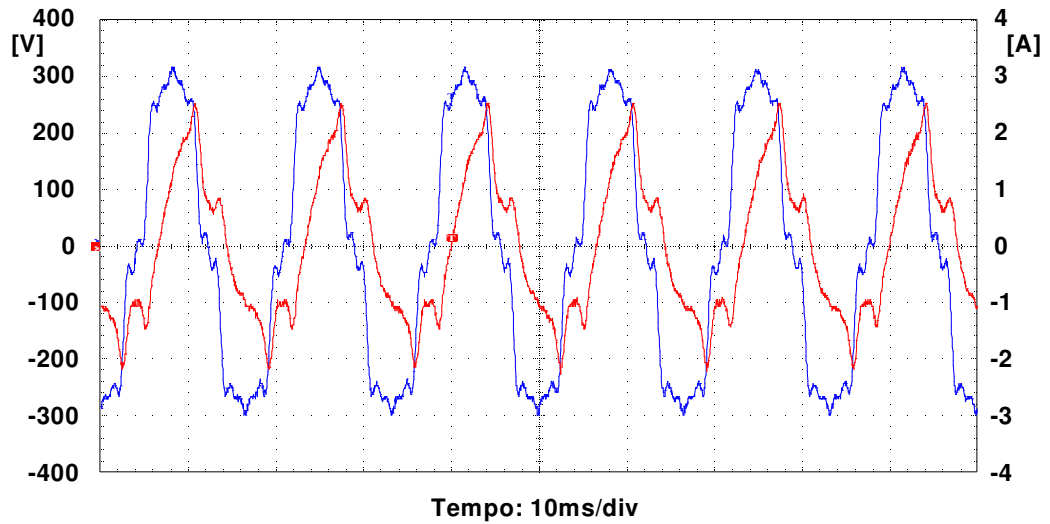
3.4.6 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão

Este tópico contempla os resultados de estudos voltados à análise do desempenho do equipamento quando submetido a um fornecimento de energia elétrica contendo distorções harmônicas. O estudo em questão está associado com a aplicação de uma tensão distorcida com um DHT = 20%. As harmônicas individuais e suas porcentagens são as mesmas aplicadas no refrigerador.

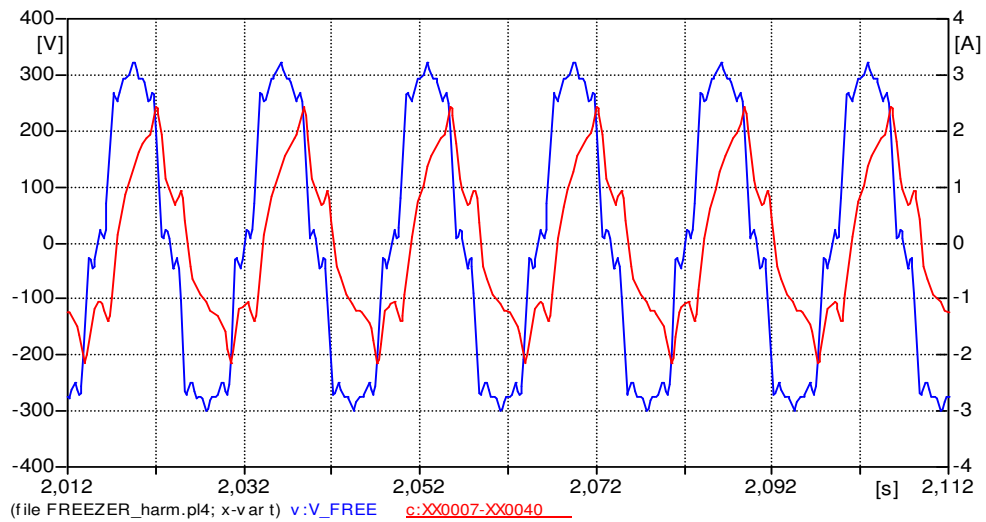
As Figuras 3.16 e 3.17 mostram as formas de onda da tensão aplicada e da corrente total absorvida pelo freezer. Como verificado para o refrigerador, esse índice de DHT de tensão causa uma forte distorção na corrente do equipamento. Porém, novamente, como aconteceu com o refrigerador, não foram verificadas alterações físicas perceptíveis no funcionamento do freezer.

Como se pode verificar é grande a semelhança verificada entre as respostas obtidas pelos dois métodos.

As Figuras 3.18 e 3.19 ilustram os espectros harmônicos para o caso experimental e computacional, respectivamente. Mais uma vez se verifica no espectro experimental que as harmônicas de 3ª e 9ª ordem apresentam-se com uma magnitude bem mais elevada do que a verificada no espectro computacional. Essa diferença deve-se, basicamente, aos efeitos da saturação magnética que não são contempladas para o caso computacional. Contudo, as demais componentes apresentam boa correlação, o que nos permite afirmar que o modelo computacional possui uma boa resposta, comparado com o modelo experimental, no que se refere a um suprimento contendo distorções harmônicas.



**Figura 3.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer.
Caso 6 - Experimental.**



**Figura 3.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do freezer.
Caso 6 - Computacional.**

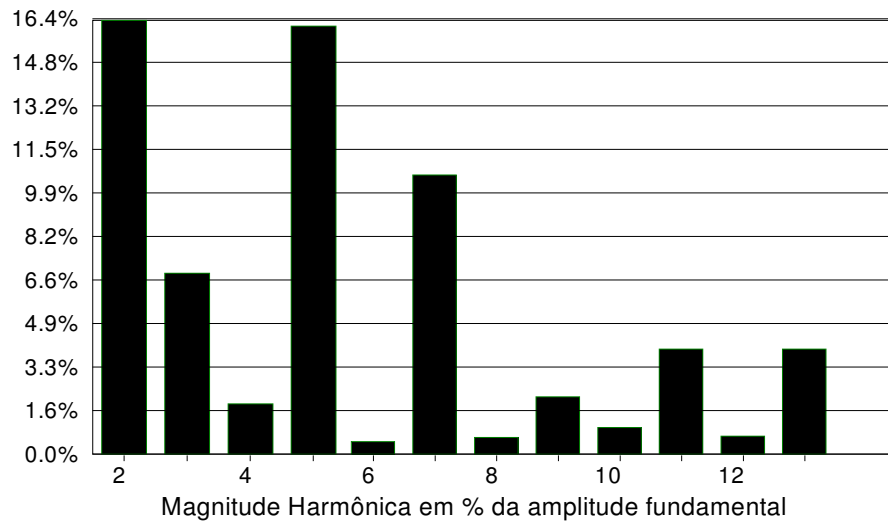


Figura 3.18 - Espectro harmônico da corrente de entrada do freezer. Caso 6 - Experimental.

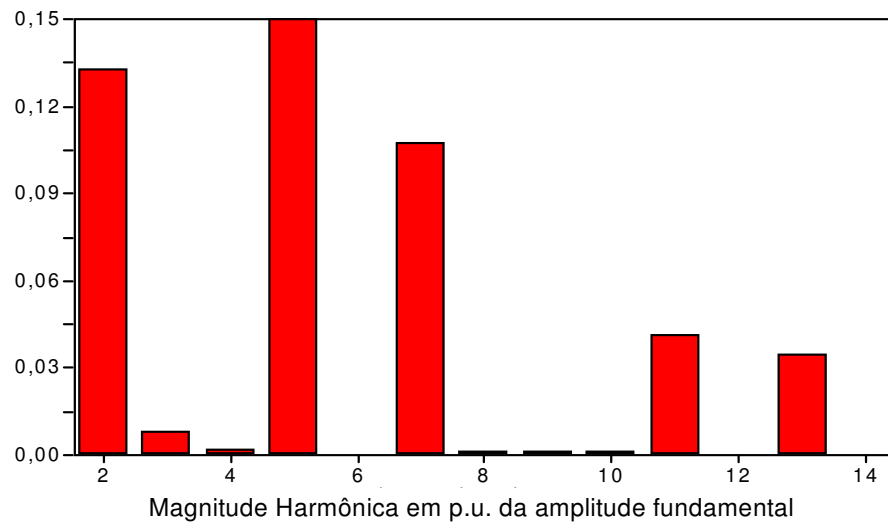


Figura 3.19 - Espectro harmônico da corrente de entrada do freezer. Caso 6 - Computacional.

A Tabela 3.9 destaca os valores de pico, eficaz e da distorção harmônica total de corrente apresentados pelo equipamento, além dos valores individuais das harmônicas.

Tabela 3.9 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	2,52 A	2,42 A	3,97 %
DHTi	27,21 %	23,29 %	14,41 %
I _h fundamental	1,23 A	1,28 A	3,91 %
I _h 2 ^a	0,202 A	0,170 A	15,84 %
I _h 3 ^a	0,085 A	0,010 A	--
I _h 4 ^a	0,024 A	0,002 A	--
I _h 5 ^a	0,200 A	0,192 A	4,00 %
I _h 7 ^a	0,130 A	0,137 A	5,80 %
I _h 9 ^a	0,028 A	0,001 A	--
I _h 11 ^a	0,051 A	0,053 A	3,77 %
I _h 13 ^a	0,050 A	0,044 A	12,00 %

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados inicialmente, os aspectos relativos às características gerais do freezer doméstico empregado para os estudos.

Os resultados dos trabalhos realizados permitem constatar que:

- Quando submetido a uma elevação temporária de tensão, o dispositivo não apresentou nenhuma mudança significativa no seu funcionamento. Foi verificado, somente, um pequeno incremento do valor de pico da corrente;
- Afundamentos temporários de tensão não causaram, no equipamento estudado, anormalidades que pudessem ser percebidas fisicamente. Contudo, foi observada uma forte variação do pico de corrente, com duração de meio ciclo, principalmente no retorno da tensão de suprimento;
- Quando aplicado uma interrupção com duração de até 25 ciclos, o freezer retornou ao funcionamento normal. Interrupções com duração

superior ao período mencionado, provocaram o desligamento do equipamento;

- Flutuações de tensão nos níveis aplicados ao equipamento em estudo, não produziram anormalidades que pudessem ser percebidas fisicamente. Este tipo de distúrbio teve conseqüência direta na corrente do equipamento, causando certa flutuação dessa corrente, sem que isto influenciasse significativamente a operação do freezer;
- Distorções harmônicas de tensão nos níveis e ordens aplicadas, não causaram danos perceptíveis ao aparelho, todavia, verificou-se uma forte deformação na formas de onda da corrente;

Em resumo, observou-se uma grande semelhança entre o modelo computacional e experimental, tanto nos formatos dos oscilogramas como nos valores medidos. Dessa forma, o modelo do freezer computacional pode ser considerado, para os propósitos aqui almejados, como validado.

CAPÍTULO IV

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR

4.1 INTRODUÇÃO

Durante muito tempo, na tentativa da obtenção de condições ambientais que oferecessem maior conforto, a redução do calor era obtida via ventiladores, gelo e vários outros métodos [27]. Em 1902, o engenheiro Willis Carrier da Universidade de Cornell inventou um processo mecânico para condicionar o ar, tornando realidade o almejado controle climático de ambientes fechados.

Nos anos 20, o condicionador de ar tomou-se acessível ao público em muitos prédios públicos. O aparelho teve seu "debut" público em 1922, no Grauman's Metropolitan Theatre em Los Angeles. Nos anos 30, Willis Carrier desenvolveu um sistema que viabilizou o ar condicionado em arranha-céus. Nos anos 50, os modelos residenciais de ar condicionado começaram a ser produzidos em massa [36].

Na atualidade, os condicionadores de ar de uso residencial são fabricados, basicamente, em dois modelos, tipo janela ou tipo *split* [37].

O tipo janela é o mais utilizado e também o mais barato. São facilmente encontrados no varejo e promovem uma renovação contínua do ar fresco. Os dispositivos devem ser instalados de forma embutida na parede. Os modelos mais recentes têm baixo nível de ruído e controle remoto de operação.

O tipo *split* pode ser fixo ou móvel e possui duas partes físicas distintas, uma instalada no interior e outra do lado externo. Além de manter o ar agradável e com a temperatura controlada, os *splits* ainda reduzem o ruído de operação, pois o condensador, como dito, é externo ao ambiente. O tipo móvel pode ser utilizado em mais de um ambiente da residência ou escritório. Os modelos mais recentes têm baixo nível de ruído e possuem controle remoto de operação.

No presente capítulo, diante da grande difusão da primeira família de equipamentos, será considerado o condicionador de ar do tipo janela e, semelhantemente aos procedimentos empregados anteriormente, os trabalhos contemplam:

- Modelagem do dispositivo;
- Circuito elétrico equivalente;
- Implementação computacional na plataforma ATP;
- Estudos de casos;
- Validação da proposta de modelagem.

4.2 IDENTIFICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MODELAGEM DO CONDICIONADOR DE AR

Mais uma vez, seguindo a mesma estratégia empregada para os demais produtos, os trabalhos feitos compreendem:

4.2.1 Identificação do Equipamento

O equipamento estudado consiste de um condicionador de ar, do tipo janela e capacidade de refrigeração de 7500 BTU/h, conforme ilustra a Figura 4.1.



Figura 4.1 – Condicionador de ar sob ensaio.

A Figura 4.2 ilustra a parte interna do equipamento analisado, onde está localizado o seu sistema motriz. Esse sistema é composto basicamente por um compressor hermético e um pequeno motor destinado ao processo de ventilação do equipamento.

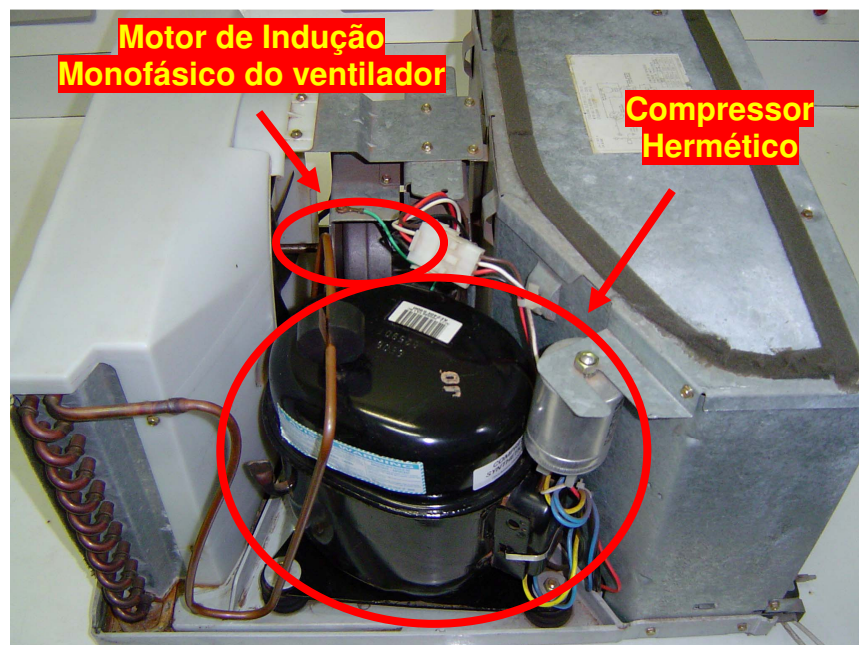


Figura 4.2 – Detalhe do sistema motriz do condicionador de ar sob estudo.

A Tabela 4.1 fornece as principais características do condicionador de ar utilizado nos estudos.

Tabela 4.1 - Características do condicionador de ar utilizado nos estudos.

Fabricante	CONSUL
Modelo	CC07BBBNA
Serie	MJ0310072
Tensão	220 V
Potência	1100 W

4.2.2 Características Físicas do Equipamento

O principal componente elétrico do condicionador de ar é o seu compressor hermético. Contudo, diferentemente do refrigerador e do freezer, o condicionador de ar possui também um motor de indução monofásico destinado à realização do processo de ventilação do sistema. Vale ressaltar que o motor de ventilação possui uma potência muito pequena perante o compressor e, por tal motivo, será desconsiderado neste trabalho. Todavia, objetivando maior coerência, sua potência é adicionada ao modelo do compressor.

O compressor hermético do condicionador de ar estudado utiliza um motor de indução monofásico CSR. Tais motores possuem um alto torque de partida e aplicam-se a sistemas com tubo capilar ou válvula de expansão. Nesse motor, o enrolamento auxiliar permanece sempre energizado e ligado em série com um capacitor permanente. Além do capacitor permanente, o motor em questão possui um capacitor eletrolítico, cuja função é auxiliar o processo de partida. Sendo eletrolítico, sua permanência no sistema é curta e sua presença é controlada por um relé voltimétrico.

A Figura 4.3 ilustra o diagrama elétrico do motor utilizado no condicionador de ar e seus dispositivos de proteção. Maiores detalhes podem ser encontrados nas informações do fabricante [32].

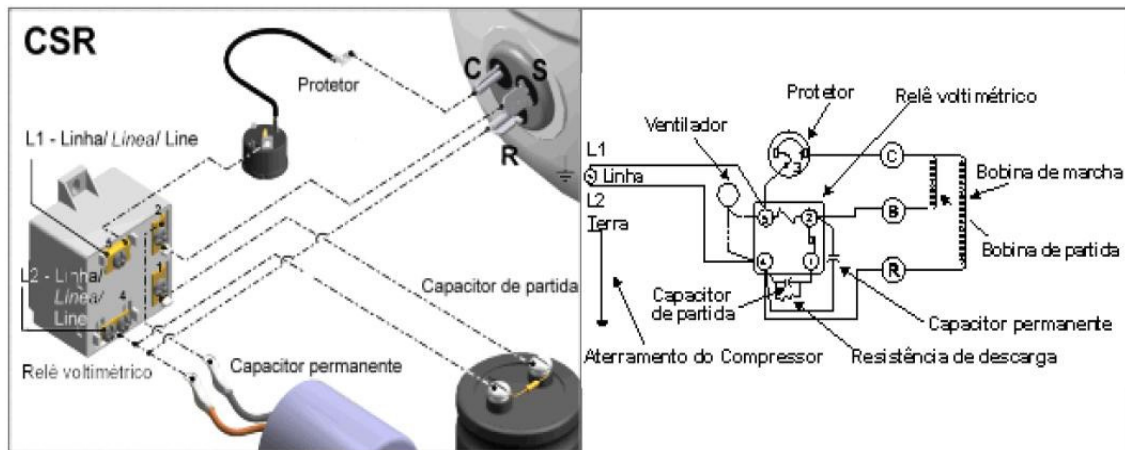


Figura 4.3 - Representação do diagrama elétrico do motor CSR.

A Tabela 4.2 descreve as principais características do compressor hermético usado no equipamento analisado.

Tabela 4.2 - Principais características do compressor do condicionador de ar.

Fabricante	TECUMSEH
Modelo	AE470ES
Tipo de Motor	CSR
Potência	903 W
Tensão de Operação	220 V
Corrente	4,24 A

4.2.3 Circuito Equivalente e Modelagem do Motor Monofásico CSR

A análise matemática do motor CSR é semelhante à realizada para o motor PTC, descrita no Capítulo II. A Figura 4.4, semelhante à Figura 2.6, esclarece sobre as alterações realizadas no motor PTC para a obtenção do motor CSR. Essas mudanças, basicamente, foram feitas para levar em consideração a presença dos dois capacitores no circuito do enrolamento auxiliar.

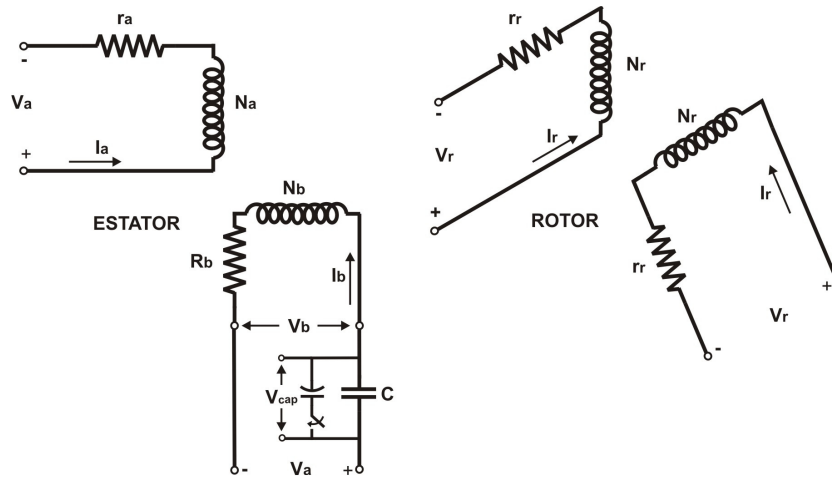


Figura 4.4 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor CSR.

Considerando o sistema em regime permanente, isto é, com o capacitor eletrolítico desligado do sistema, a corrente através do capacitor permanente é dada pela equação:

$$i_b = C \frac{dv_{cap}}{dt} \quad (2.53)$$

Que pode ser reescrita na forma:

$$\frac{dv_{cap}}{dt} - \frac{1}{C} i_b = 0 \quad (2.54)$$

Desta forma, reportando-se à Figura 4.4, a Equação 2.2, do ramo do enrolamento auxiliar, é reescrita, considerando-se um capacitor permanente, em série com o enrolamento auxiliar. Isto resulta na seguinte equação:

$$v = v_{cap} + v_b = v_a \quad (2.55)$$

Essa alteração, aplicada ao desenvolvimento matemático do Capítulo II e sabendo que durante a partida do motor o capacitor eletrolítico é conectado ao sistema, transforma o equacionamento do motor PTC no mesmo do motor CSR. Esse procedimento, por constituir-se, basicamente, do mesmo já feito, não será repetido aqui.

4.3 ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS

Mais uma vez, a lógica das investigações compreende as seguintes etapas:

4.3.1 Estudos Computacionais

Os procedimentos para esta etapa são similares aos já estabelecidos e, em face disto, não serão repetidos.

4.3.2 Estudos Experimentais

A Figura 4.5 ilustra o diagrama esquemático da montagem para os trabalhos experimentais, identificando as conexões e os diferentes dispositivos utilizados.

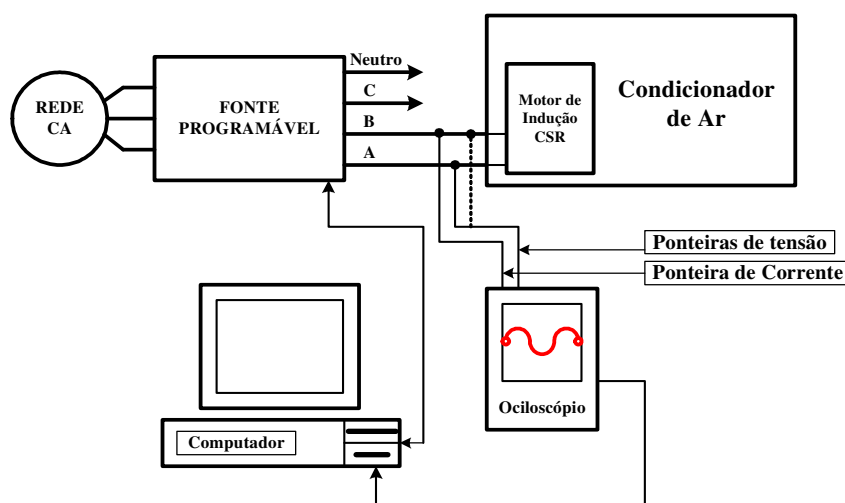


Figura 4.5 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos do condicionador de ar.

A Figura 4.6 ilustra a montagem laboratorial para a análise do condicionador de ar utilizado nos testes. Nesta, é possível observar as partes constituintes do arranjo experimental empregado, as quais se encontram devidamente destacadas.

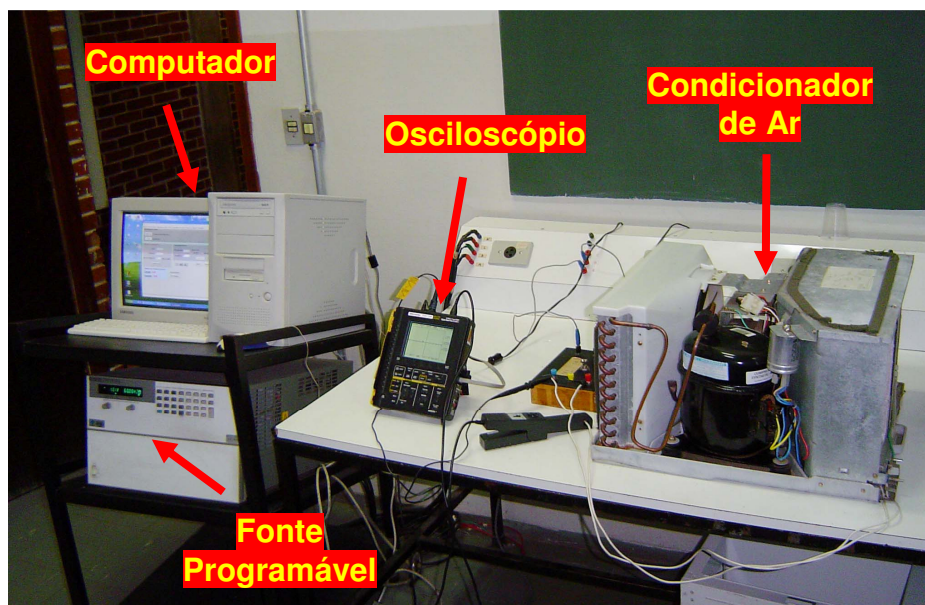


Figura 4.6 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho do condicionador de ar.

4.4 CASOS ESTUDADOS

Os estudos realizados no condicionador de ar são basicamente iguais aos realizados no refrigerador, exceto pelo fato que interrupções de tensão não puderam ser realizadas, pois, extrapolaram os limites de potência da fonte programável.

A Tabela 4.3 apresenta uma síntese dos casos investigados.

Tabela 4.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.

CASO	CARACTERÍSTICAS
1 – Condição Ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz.
2 – Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Elevação para 115 % da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
3 – Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Afundamento para 70% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
4 – Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Pst (Probability short-term) de 5 pu.
5 – Distorção Harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Distorção harmônica com DHT = 8,60 %.

4.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam, respectivamente, os oscilogramas das tensões e correntes experimentais e computacionais.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de pico e eficaz da corrente de entrada do equipamento sob teste, bem como o seu fator de potência, onde podem ser comparados os resultados computacionais com os experimentais.

Os resultados comprovam a boa semelhança entre os modelos experimental e computacional.

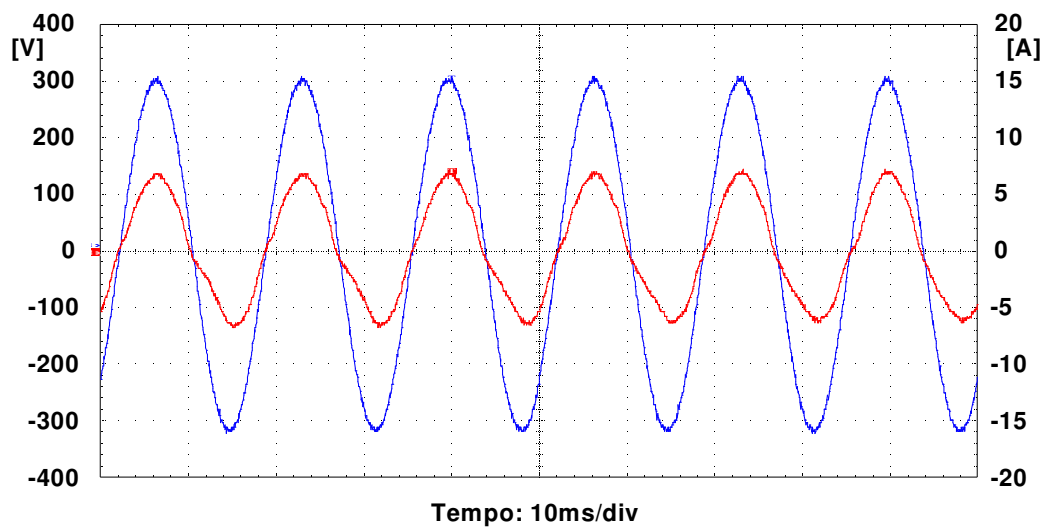


Figura 4.7 – Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 1 - Experimental.

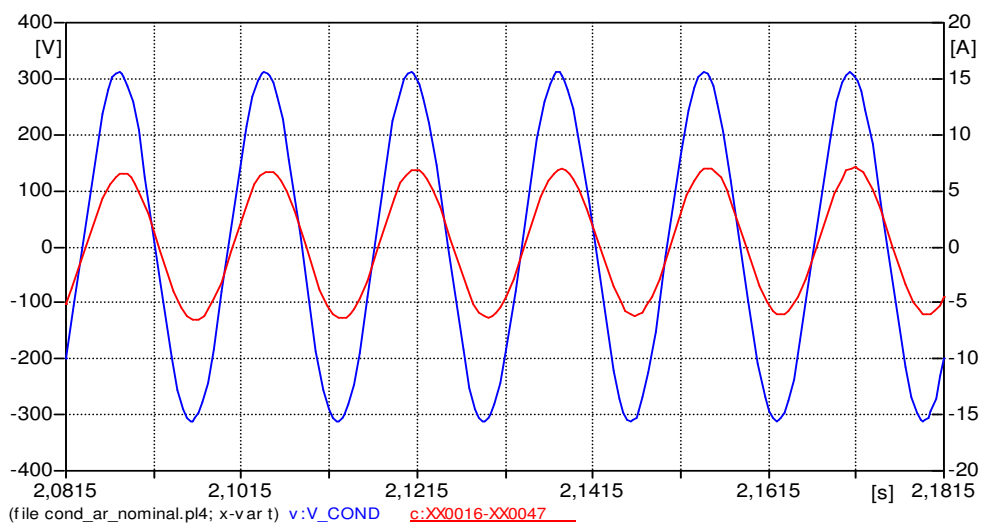


Figura 4.8 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 1 - Computacional.

Tabela 4.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	6,55 A	6,53 A	0,31 %
Corrente Eficaz	4,63 A	4,62 A	0,22 %
Fator de Potência	0,986	0,983	0,30 %

4.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração

As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente experimental e computacional, respectivamente, contendo uma elevação temporária de tensão para 115 % da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental.

Pode-se perceber que este distúrbio, a exemplo dos demais estudos similares, causa um incremento transitório no instante inicial e final do evento. Os resultados se mostraram semelhantes para ambos os métodos utilizados, fato este que, mais uma vez, comprova a eficácia do modelo proposto.

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

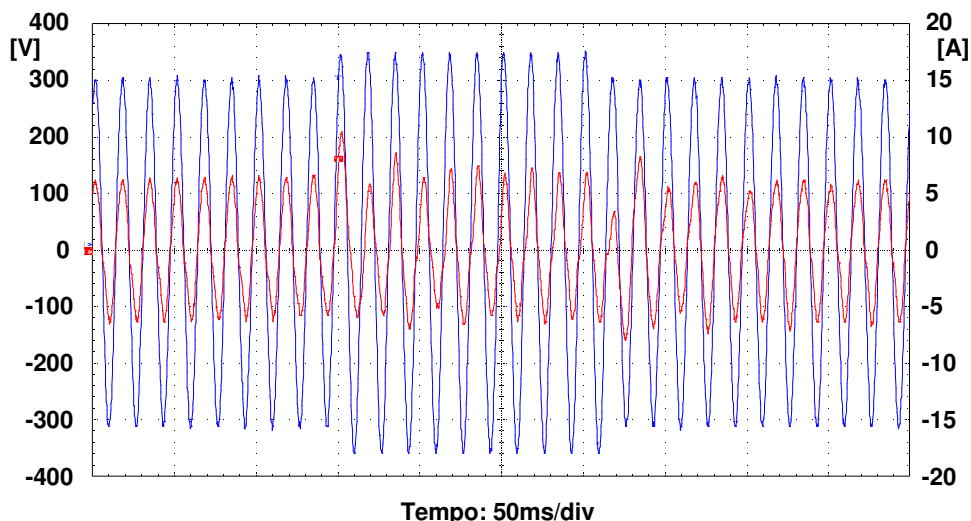


Figura 4.9 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 2 - Experimental.

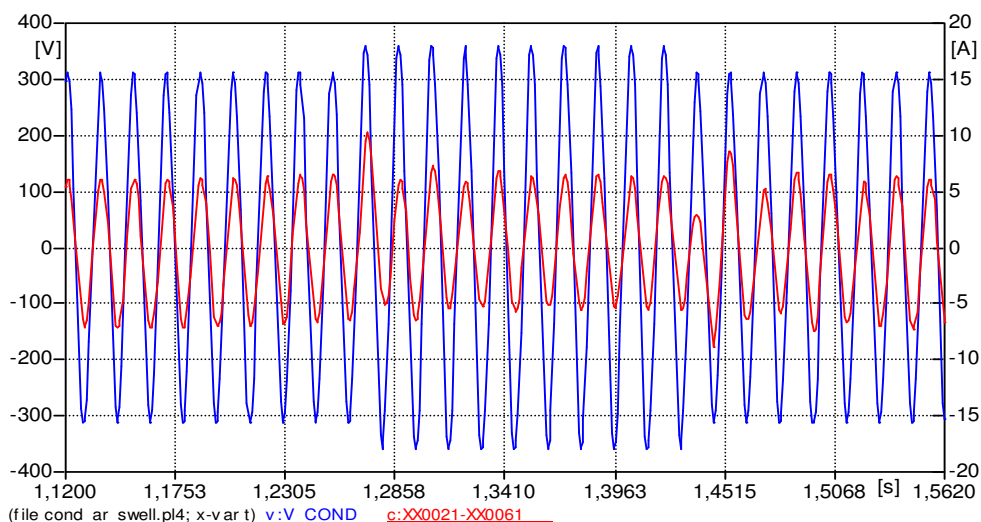


Figura 4.10 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 2 - Computacional.

Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	10,40 A	10,23 A	1,63 %

4.4.3 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração

As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram o comportamento experimental e computacional do condicionador de ar, respectivamente, mostrando as formas de onda da tensão e da corrente de entrada, quando da aplicação de um afundamento para 70 % da tensão nominal com duração de 10 ciclos.

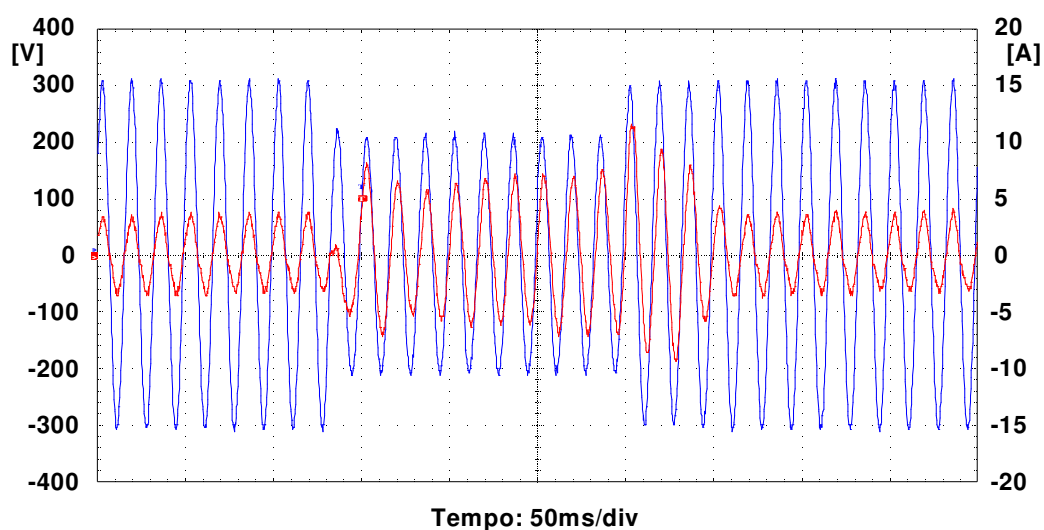


Figura 4.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 3 - Experimental.

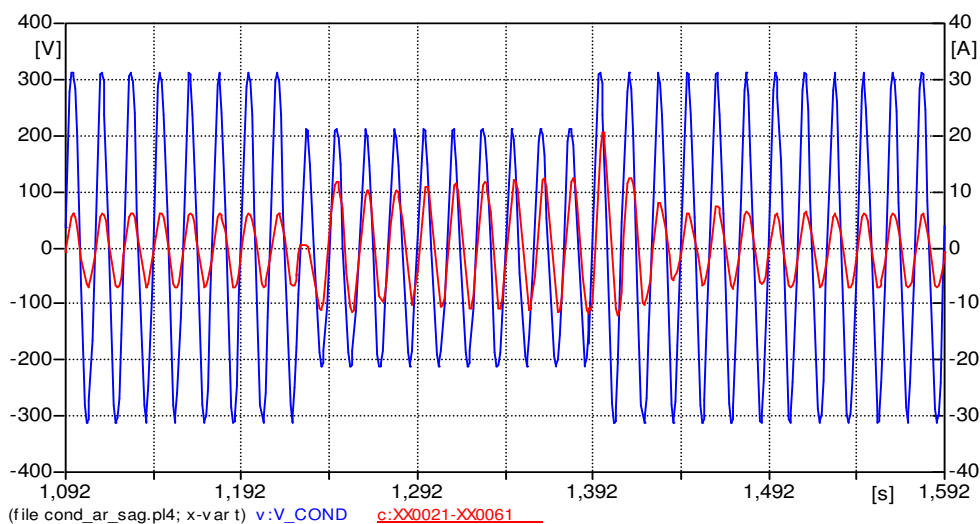


Figura 4.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 3 - Computacional.

A Tabela 4.6 mostra os valores máximos da corrente obtidos.

Tabela 4.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	22,20 A	20,57 A	7,34 %

4.4.4 Caso 5: Suprimento Contendo Flutuação de Tensão

As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente total, obtidas em laboratório e através da simulação computacional para uma tensão de alimentação contendo um nível de PST=5 pu e frequência moduladora de 20 Hz.

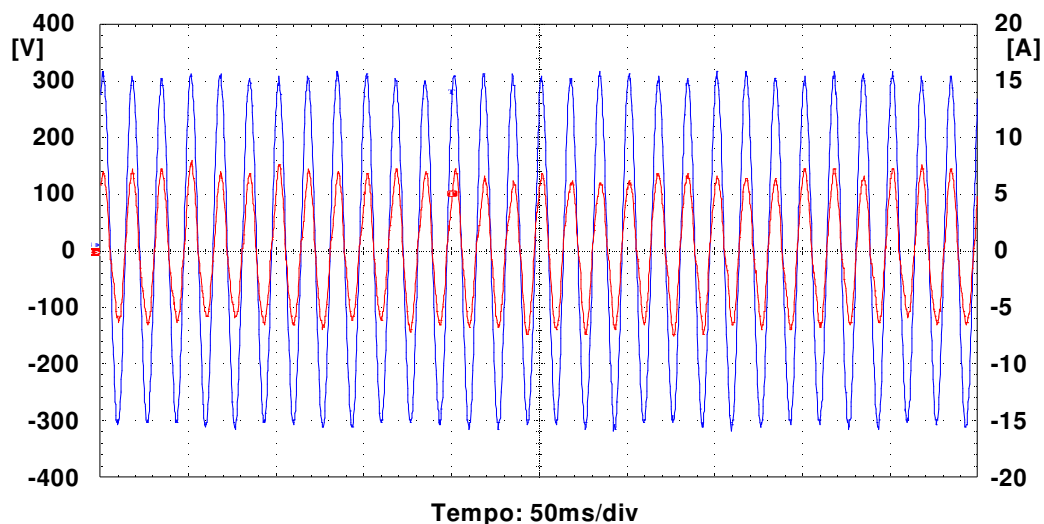


Figura 4.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 5 - Experimental.

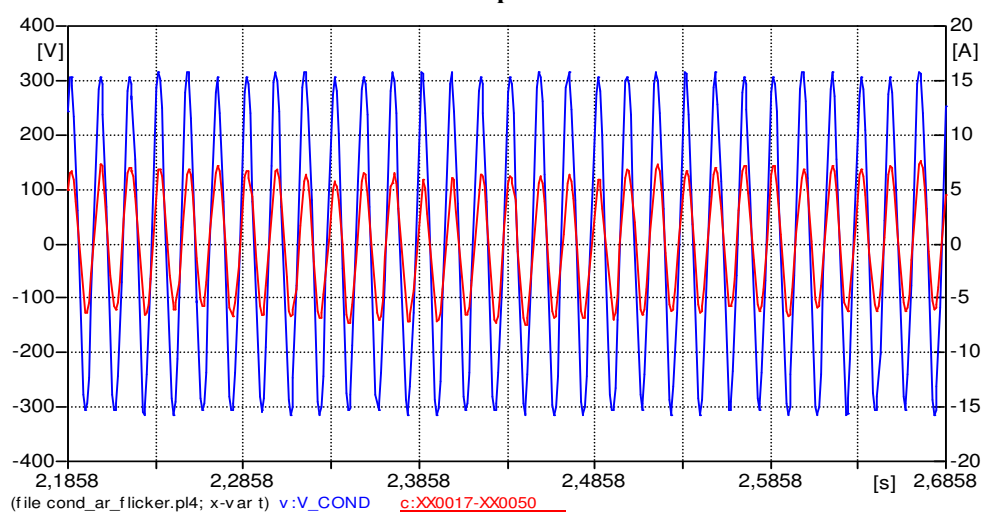


Figura 4.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 5 - Computacional.

A Tabela 4.7 sintetiza os resultados obtidos para os picos de corrente sob a ação do distúrbio em foco.

Tabela 4.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	8,00 A	7,42 A	7,25 %

4.4.5 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão

Esta seção está relacionada com um suprimento de tensão contendo uma distorção harmônica total de 8,6%. Tal valor, diferentemente dos casos anteriores, quando se aplicou um DHT de 20%, ocorreu por questões atreladas com limitações de potência impostas pela fonte programável.

A Tabela 4.8 detalha os percentuais harmônicos individuais que perfazem a distorção total escolhida.

Tabela 4.8 - Distorções harmônicas individuais aplicadas ao condicionador de ar.

Harmônicas	Valor
3ª Ordem	1 %
5ª Ordem	7 %
7ª Ordem	4 %
11ª Ordem	2 %
13ª Ordem	2 %

As Figuras 4.15 e 4.16 ilustram as formas de onda da tensão aplicada e da corrente total absorvida pelo equipamento.

Novamente, para este equipamento, não se percebeu alterações operacionais perceptíveis no seu funcionamento.

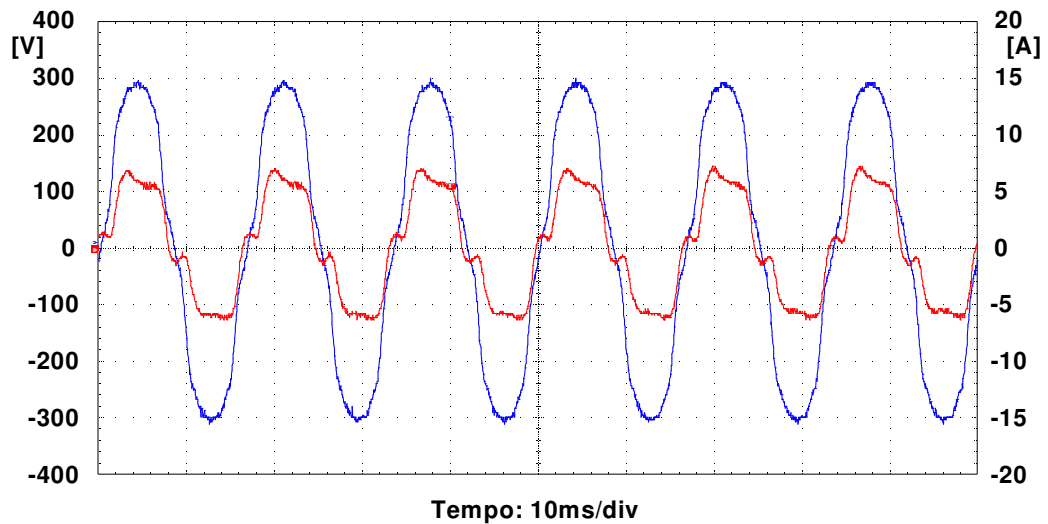


Figura 4.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 6 - Experimental.

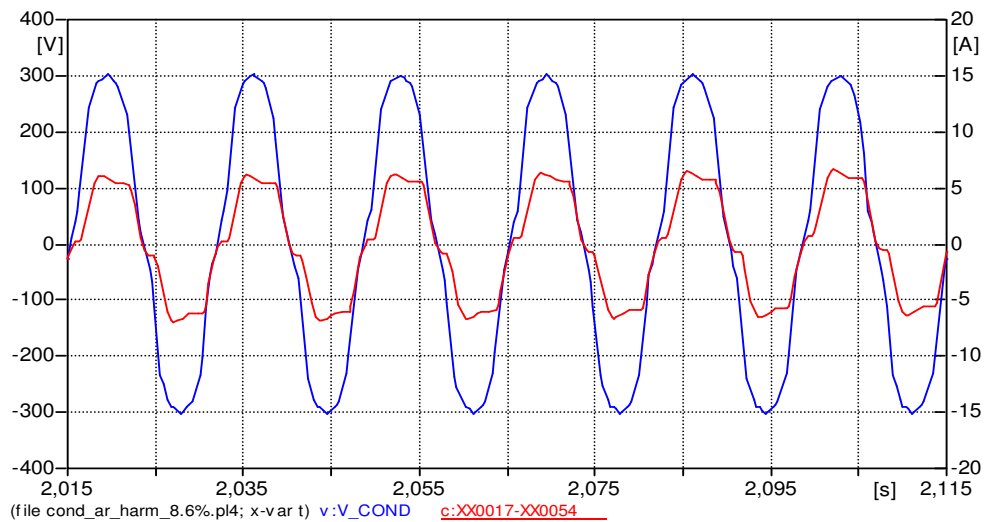


Figura 4.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 6 - Computacional.

As formas de onda experimental e computacional apresentam uma boa similaridade.

Nas Figura 4.17 e 4.18 estão ilustrados os espectros harmônicos para as correntes.

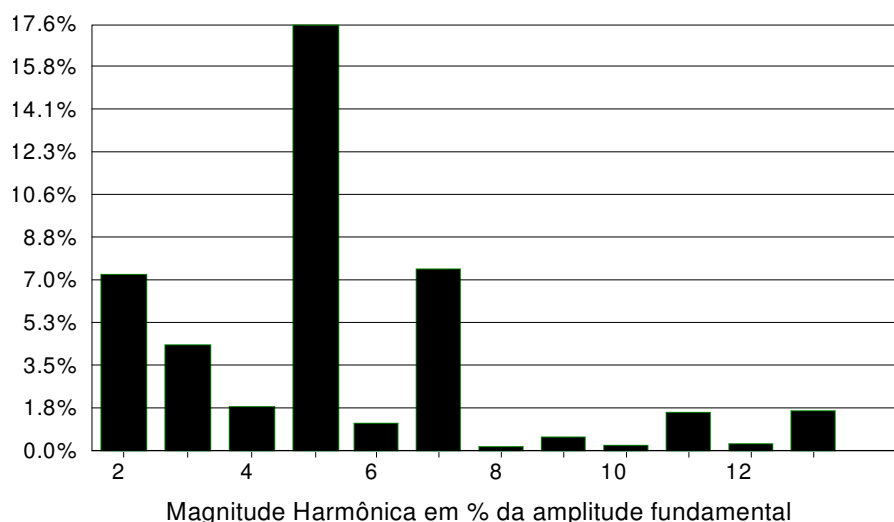


Figura 4.17 - Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 6 - Experimental.

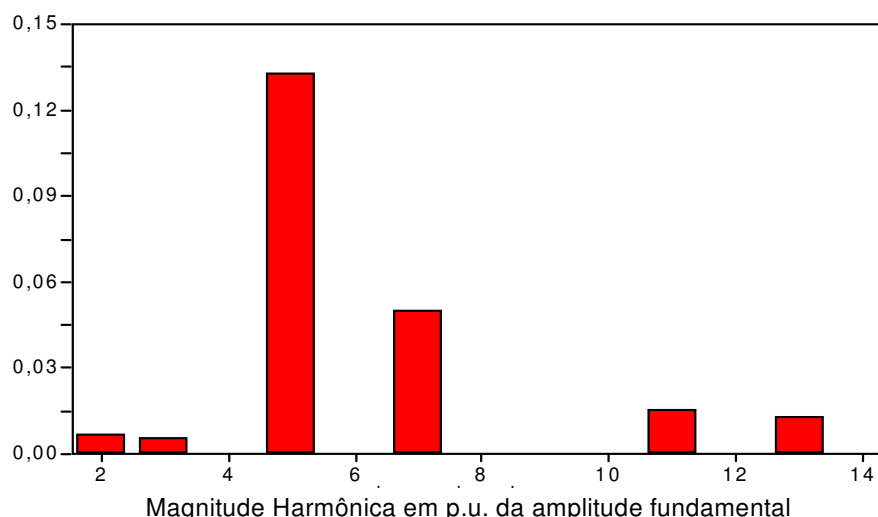


Figura 4.18 - Espectro harmônico da corrente de entrada do condicionador de ar. Caso 6 - Computacional.

Muito embora o surgimento de discrepâncias no que tange as harmônicas de 2^a, 3^a e 4^a ordem, as mais significativas, 5^a e 7^a, foram semelhantes para os estudos experimentais e computacionais. O motivo das diferenças consiste na divergência entre as formas de onda de corrente durante os seus semi-ciclos negativos. Esta questão, isoladamente, evidencia uma fragilidade do modelo que necessita maiores investigações.

A Tabela 4.9 destaca os valores de pico, eficaz e da distorção harmônica total de corrente, além dos valores individuais das harmônicas.

Tabela 4.9 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	7,20 A	7,04 A	2,22 %
DHTi	21,25 %	14,29 %	32,75 %
I _h fundamental	4,58 A	4,68 A	2,14 %
I _h 2 ^a	0,336 A	0,030 A	--
I _h 3 ^a	0,204 A	0,025 A	--
I _h 4 ^a	0,087 A	0,001 A	--
I _h 5 ^a	0,805 A	0,619 A	23,11 %
I _h 7 ^a	0,346 A	0,232 A	32,95 %
I _h 11 ^a	0,076 A	0,070 A	7,89 %
I _h 13 ^a	0,079 A	0,060 A	24,01 %

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os principais pontos detectados durante esta etapa dos trabalhos pode-se ressaltar que:

- A elevação de tensão causou incrementos na corrente, tanto no início como no término do evento. Com relação ao comportamento do equipamento, não foram verificadas mudanças acentuadas no seu funcionamento;
- Os afundamentos temporários de tensão não causaram efeitos perceptíveis no funcionamento do equipamento. Com relação à forma de onda da corrente, verificou-se que ocorreu um incremento no instante inicial e final do evento;
- Flutuações de tensão nos níveis aplicados ao dispositivo em estudo não produziram anormalidades que pudessem ser percebidas fisicamente. Os valores de pico destas correntes não foram muito significativos;

- Distorções harmônicas de tensão também não causaram alterações visíveis no equipamento. Essas distorções causaram deformação acentuada da forma de onda da corrente e, dentro do exposto, houve uma certa divergência entre os resultados computacionais e experimentais quando à questão de algumas componentes harmônicas.

Pode-se constatar, não obstante a ressalta anterior que, para praticamente todos os casos estudados, constatou-se uma boa semelhança entre os resultados obtidos pelo método experimental e o computacional, fato este que determina que o modelo do condicionador de ar proposto se mostra apropriado aos fins almejados.

CAPÍTULO V

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS DE LAVAR ROUPAS

5.1 INTRODUÇÃO

Várias tentativas para a obtenção de uma máquina de lavar roupas eficiente, a partir da revolução industrial, encontram-se documentadas na literatura. A exemplo disto cita-se os exemplos históricos de um pedido de patente protocolado em 1691, um anúncio, em janeiro de 1752 na *Gentlemen's Magazine*, e outro pedido de patente de uma máquina rotativa em 1782, todas na Inglaterra [28]. Todavia, somente com a invenção e popularização do motor elétrico, no começo do século 20, é que se conseguiu uma lavadora com características próprias de um produto comercial e, a partir desta marca, constata-se na literatura o registro do início da produção em grande escala deste equipamento. Isto ocorreu a partir de 1906, através do norte-americano A.J.Fischer, que detinha a patente da máquina em questão, muito embora não se possa afirmar que seja ele o real inventor [29].

As máquinas contemporâneas são fabricadas em dois modelos básicos, com abertura frontal ou abertura superior. As com abertura superior, mais populares nos Estados Unidos, Austrália, Brasil e parte da Europa, recebem a roupa em um cilindro montado verticalmente, com um agitador central e tem a tampa por cima.

As máquinas com abertura frontal, mais populares na Europa e no Oriente Médio, possuem um cilindro montado horizontalmente, sem agitador central, mas com a porta estanque e com visor de vidro.

Ambos os modelos tem a capacidade de lavar automaticamente, propelidos por motor elétrico, executando ciclos de lavagem, enxágüe e centrifugação pré-programados de acordo com o tipo de roupa. O uso de componentes eletrônicos digitais, atualmente, substitui complexos sistemas mecânicos usados anteriormente para controlar a lavagem. Algumas máquinas mais modernas também secam a roupa com ar quente após a lavagem.

Objetivando, pois, analisar o desempenho das máquinas de lavar roupas quando submetidos a desvios na qualidade da energia suprida, os trabalhos considerados neste capítulo, em consonância com os procedimentos anteriores contemplam:

- Identificação do produto;
- Obtenção do circuito equivalente e modelagem do dispositivo;
- Implementação computacional e montagem da estrutura experimental;
- Realização de testes de desempenho;
- Validação do modelo proposto.

Um ponto de destaque está no fato que os testes realizados consideram o funcionamento do equipamento em seus dois processos básicos, isto é, lavagem e centrifugação.

5.2 IDENTIFICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MODELAGEM DA MÁQUINA DE LAVAR ROUPAS

As seções a seguir descrevem os procedimentos utilizados até a obtenção do modelo matemático utilizado para as simulações computacionais.

5.2.1 Identificação do Equipamento

O equipamento em foco consiste de uma máquina de lavar roupas, com abertura superior e capacidade de 6 quilos de roupa, conforme ilustra a Figura 5.1.



Figura 5.1 – Máquina de lavar roupas sob ensaio.

A Figura 5.2 ilustra a parte inferior do equipamento analisado, onde está localizado o seu sistema motriz.

A Figura 5.3 ilustra a parte eletrônica da máquina sob consideração e que é responsável pela programação das funções realizadas pelo equipamento. Este circuito eletrônico, basicamente, é composto pelas chaves semicondutoras, um sistema de retificação e os demais componentes responsáveis pelo funcionamento do produto.

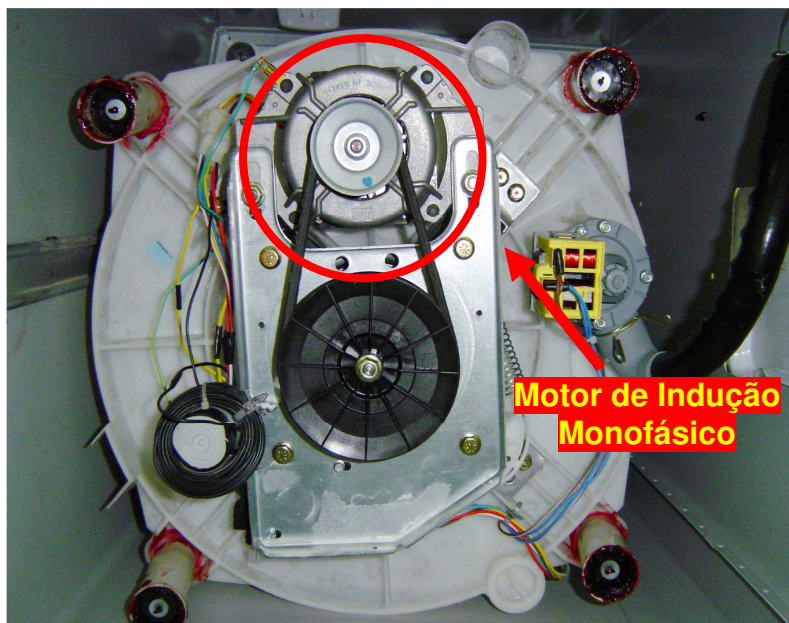


Figura 5.2 – Detalhe do sistema motriz da máquina de lavar roupas sob estudo.



Figura 5.3 – Detalhe do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas sob estudo.

A Tabela 5.1 fornece as principais características da máquina de lavar roupas.

Tabela 5.1 - Características da máquina de lavar roupas, utilizada nos estudos.

Fabricante	BRASTEMP
Modelo	BWM06ABANA10
Serie	CG5437644
Capacidade	6 kg Roupas – 55 litros Água
Tensão	127 V
Potência	530 W

5.2.2 Características Físicas do Equipamento

Os principais componentes elétricos da máquina de lavar roupa, como mencionado acima, é o motor de indução monofásico e o circuito eletrônico.

O motor de indução utilizado corresponde ao tipo PSC. Este tipo utiliza um capacitor permanente em série com a bobina de partida, que permanece energizada. Esse tipo de construção faz com que estes motores possuam um torque normal de partida, um desempenho suave e silencioso, confiabilidade de operação (devido à ausência da chave de interrupção) e sejam aplicados em operações de inversão, visto que, basicamente, o acionamento é feito via um motor bifásico [24].

As Figuras 5.4 e 5.5 ilustram, respectivamente, o motor de indução PSC e o seu correspondente diagrama elétrico simplificado. Como pode ser percebido, a máquina motriz possui dois enrolamentos, aqui denominados por enrolamentos 1 e 2 e um capacitor permanente. Como se vê, o arranjo se apresenta com três terminais, configuração esta que permite, durante o processo de lavagem, que a alimentação seja realizada ora pelos terminais branco e amarelo, ora pelos terminais branco e vermelho. Esta mudança de alimentação permite a inversão do sentido de rotação do motor.

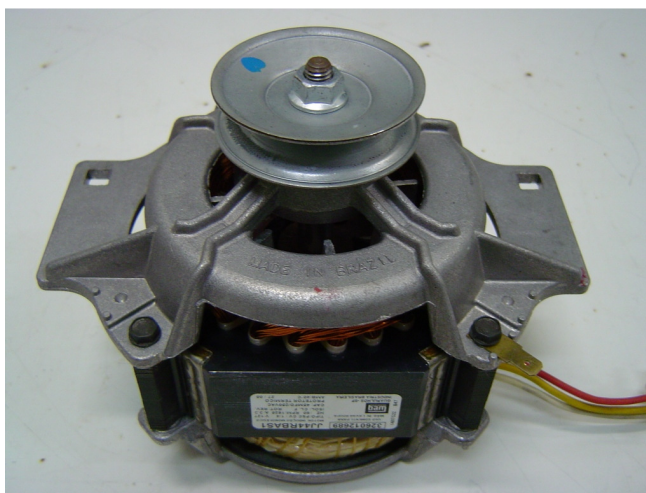


Figura 5.4 – Motor de Indução Monofásico PSC usado na máquina de lavar roupas sob estudo.

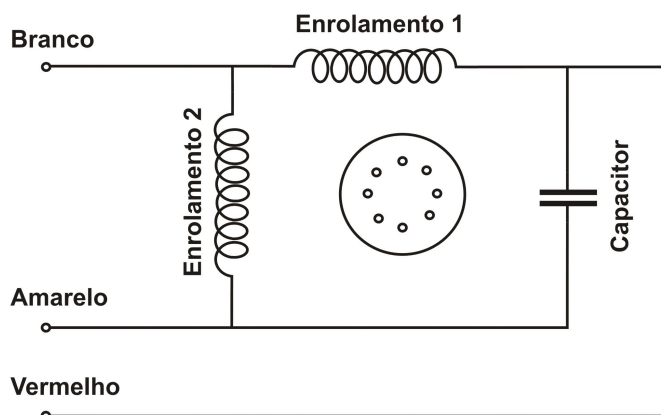


Figura 5.5 – Diagrama elétrico simplificado do Motor de Indução Monofásico.

A Tabela 5.2 informa os principais dados de placa do motor, que, segundo o seu fabricante [34], deve ser usado somente em máquinas de lavar roupas.

Tabela 5.2 - Características da máquina de lavar roupas, utilizada nos estudos.

Fabricante	WEG
Tipo	PSC
Modelo	JJ44RBAS1
Serie	326012689
Potência	1/4 cv
Tensão	127 V
Rotação	1625 rpm - Reversível

Quanto ao circuito eletrônico, como já destacado, este permite que sejam selecionados os processos de funcionamento do equipamento. Devido à complexidade do circuito e a falta de maiores informações, adotou-se, para fins desta pesquisa, um circuito equivalente que absorvesse uma corrente com características semelhantes a corrente medida experimentalmente no controle. O resultado encontra-se ilustrado na Figura 5.6.

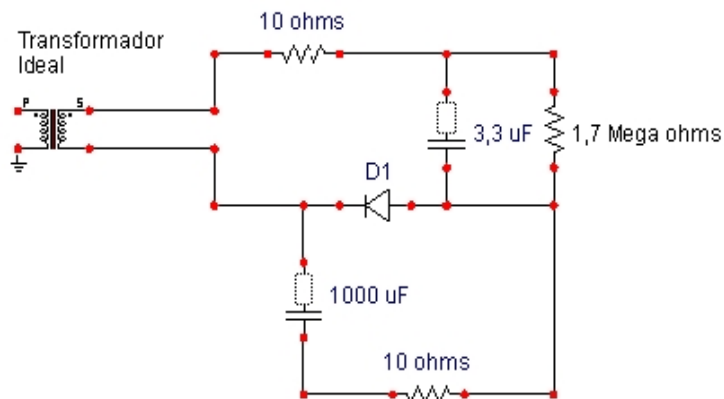


Figura 5.6 – Equivalente do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas.

5.2.3 Circuito Equivalente e Modelagem do Motor Monofásico PSC

A análise matemática do motor PSC é semelhante à realizada para o motor PTC, descrita no Capítulo II. A Figura 5.7 apresenta as mudanças feitas no motor PTC para a obtenção do motor PSC. Essa alteração, basicamente, destina-se à inserção do capacitor permanente.

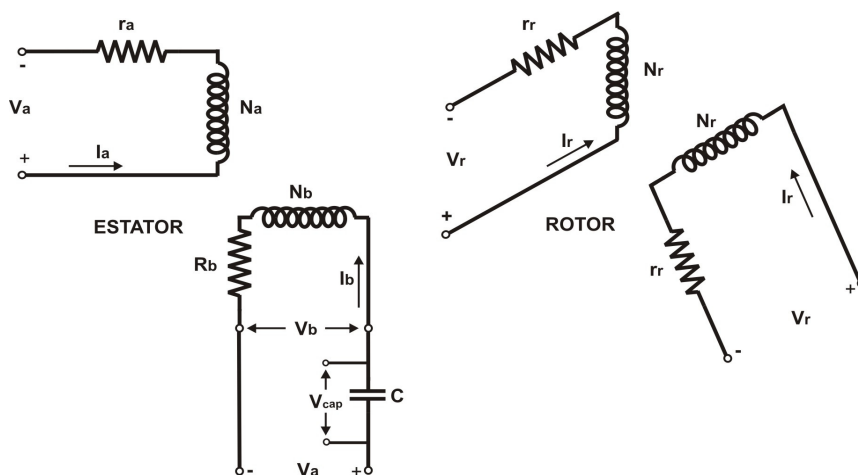


Figura 5.7 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor PSC.

Mais uma vez, como verificado no motor do condicionador de ar, a corrente através do capacitor permanente é dada pelas equações 2.53, 2.54 e 2.55, as quais são dadas abaixo:

$$i_b = C \frac{dv_{cap}}{dt} \quad (2.53)$$

Que pode ser reescrita na forma:

$$\frac{dv_{cap}}{dt} - \frac{1}{C} i_b = 0 \quad (2.54)$$

Desta forma, reportando-se à Figura 5.7, a Equação 2.2, do ramo do enrolamento auxiliar, é reescrita considerando-se um capacitor permanente em série com o enrolamento auxiliar. Isto resulta em:

$$v = v_{cap} + v_b = v_a \quad (2.55)$$

Essa alteração aplicada ao desenvolvimento matemático do Capítulo II transforma o equacionamento do motor PTC no equacionamento do motor PSC. Esse equacionamento, por consistir basicamente, como já mencionado, no equacionamento do motor PTC não será descrito nesse capítulo.

5.3 ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS

Os resultados a seguir apresentados e discutidos obedecem, novamente, à seqüência dos trabalhos conduzidos para os demais produtos considerados nesta dissertação.

5.3.1 Estudos Computacionais

Os procedimentos para esta etapa da pesquisa também foram similares ao já estabelecido, motivo pelo qual se consideram desnecessários maiores detalhamentos nesta etapa.

5.3.2 Estudos Experimentais

A Figura 5.8 ilustra o diagrama esquemático da montagem para os trabalhos experimentais, identificando as conexões e os diferentes dispositivos utilizados. O arranjo experimental ilustrado compõe-se, fundamentalmente, das mesmas unidades anteriormente utilizadas, a não ser pela presença da máquina de lavar roupas.

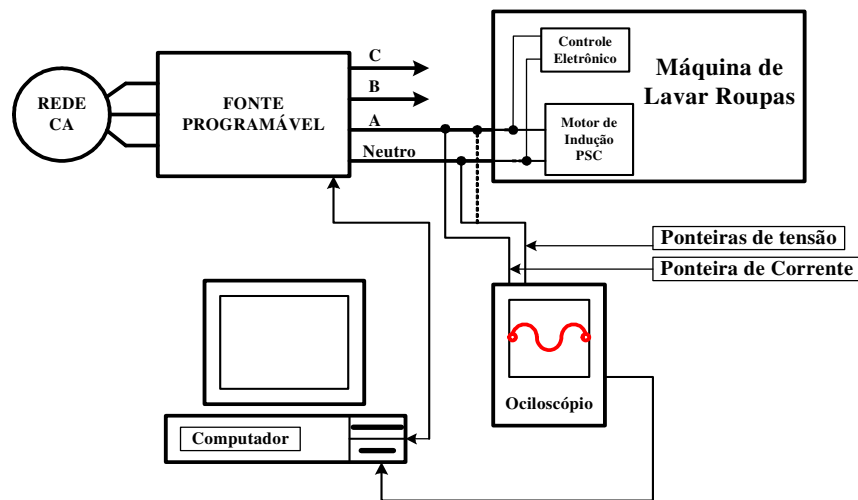


Figura 5.8 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos na máquina de lavar roupas.

A Figura 5.9 ilustra a montagem laboratorial empregada.

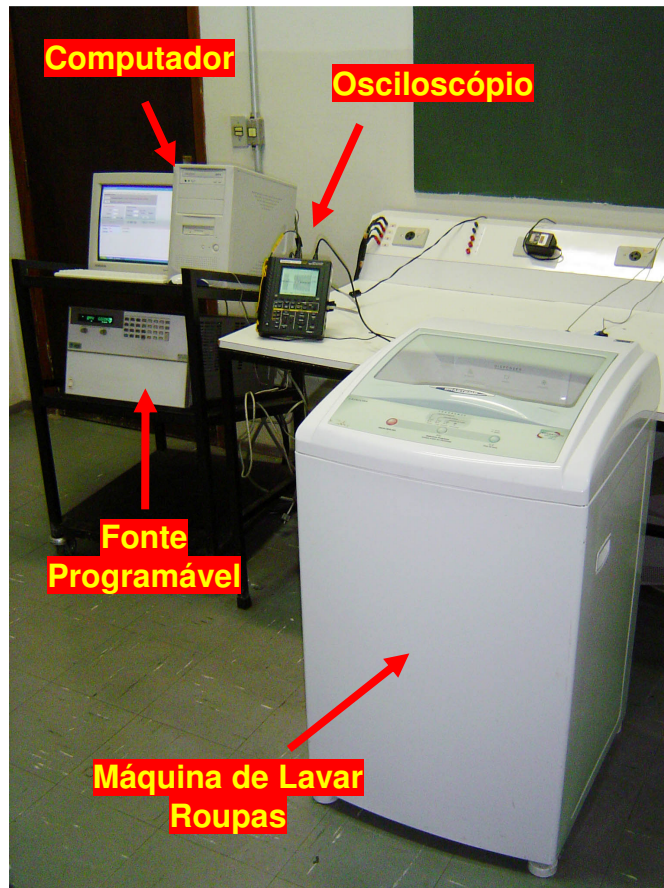


Figura 5.9 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho da máquina de lavar roupas.

5.4 CASOS ESTUDADOS

Os estudos realizados na máquina de lavar roupas são similares aos empregados anteriormente, exceto pelo fato de agora se considerar dois regimes para o funcionamento do produto.

5.4.1 Processo de Lavagem

A Tabela 5.3 apresenta um quadro resumido dos casos aplicados à máquina de lavar roupas durante o processo de lavagem. Ressalta-se aqui que, apesar de realizado, a interrupção de tensão se mostrou um evento de difícil verificação experimental, pois, nas inúmeras tentativas realizadas, o instante de ocorrência de tal distúrbio coincidiu com o instante em que o motor se

encontrava em processo de reversão da rotação, isto é, quando o motor estava desligado, não permitindo dessa forma a verificação das conseqüências que tal distúrbio provoca na corrente de entrada do equipamento. Contudo, acredita-se que interrupções curtas, como as aplicadas, não causem maiores danos ao sistema motriz do equipamento, uma vez que este, durante o processo de lavagem, encontra-se em um constante processo de partida.

Tabela 5.3 - Quadro resumo dos casos analisados no processo de lavagem.

CASO	CARACTERÍSTICAS
1 – Condição Ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz.
2 – Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Elevação para 120% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
3 – Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Afundamento para 60% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
4 – Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Pst (Probability short-term) de 5 pu.
5 – Distorção Harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Distorção harmônica com DHT = 20%.

5.4.2 Caso 1: Suprimento com Características Ideais

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam, respectivamente, as tensões e correntes experimentais e computacionais para um suprimento ideal.

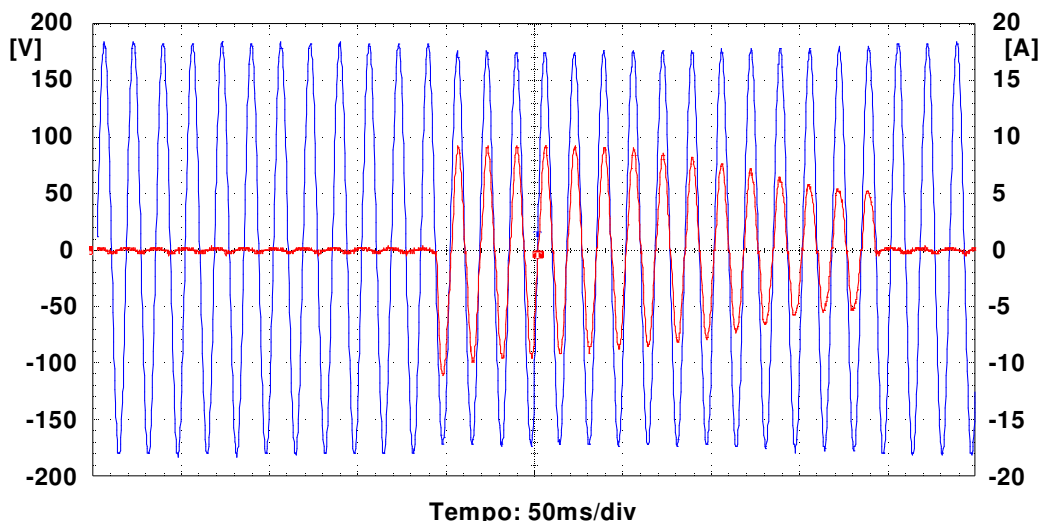


Figura 5.10 – Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 1 - Experimental.

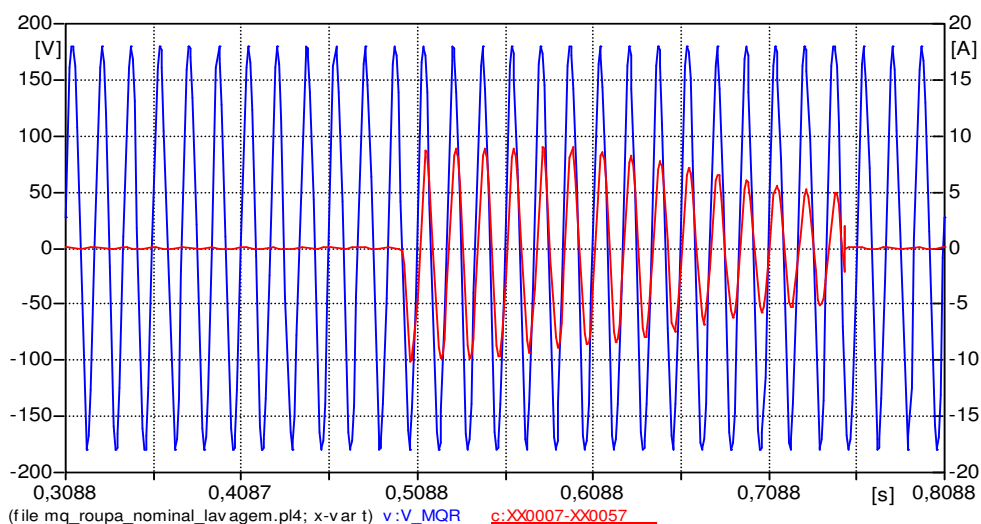


Figura 5.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 1 - Computacional.

A Tabela 5.4 apresenta os maiores valores de pico das correntes experimental e computacional na entrada do equipamento.

Tabela 5.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 1 – Condição Nominal.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	-11,20 A	-10,11 A	9,73 %

5.4.3 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração

As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente experimental e computacional, respectivamente, contendo uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental.

Pode-se perceber que este distúrbio, dependendo do momento de ocorrência, causa um incremento transitório inicial da corrente. Os resultados se mostraram semelhantes para ambos os métodos utilizados.

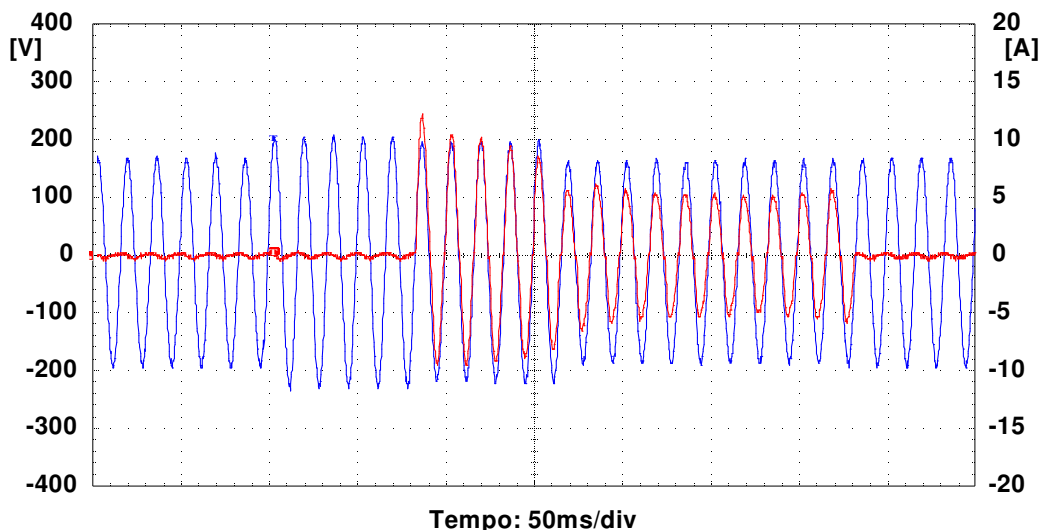


Figura 5.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 2 - Experimental.

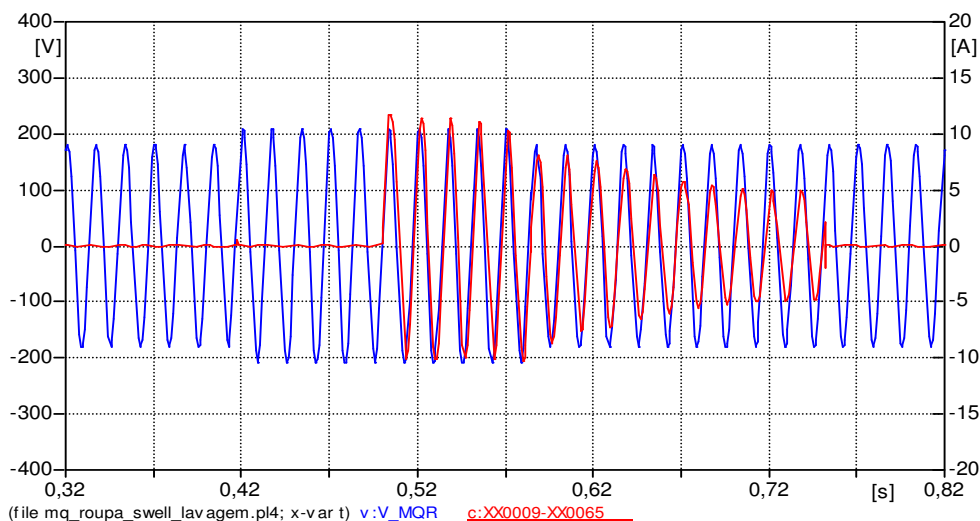


Figura 5.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 2 - Computacional.

A Tabela 5.5 resume os resultados para os picos de corrente obtidos.

Tabela 5.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 2 – Elevação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	12,20 A	11,78 A	-3,44 %

5.4.4 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração

As Figuras 5.14 e 5.15 ilustram o desempenho experimental e computacional da máquina de lavar roupas, respectivamente, mostrando as formas de onda da tensão e da corrente de entrada, quando da aplicação de um afundamento para 60% da tensão nominal com duração de 10 ciclos.

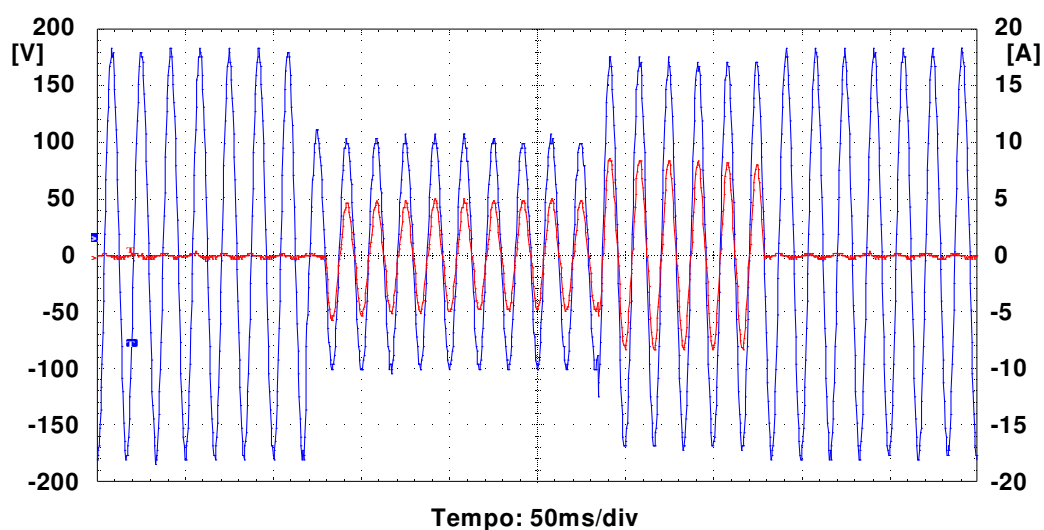


Figura 5.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 3 - Experimental.

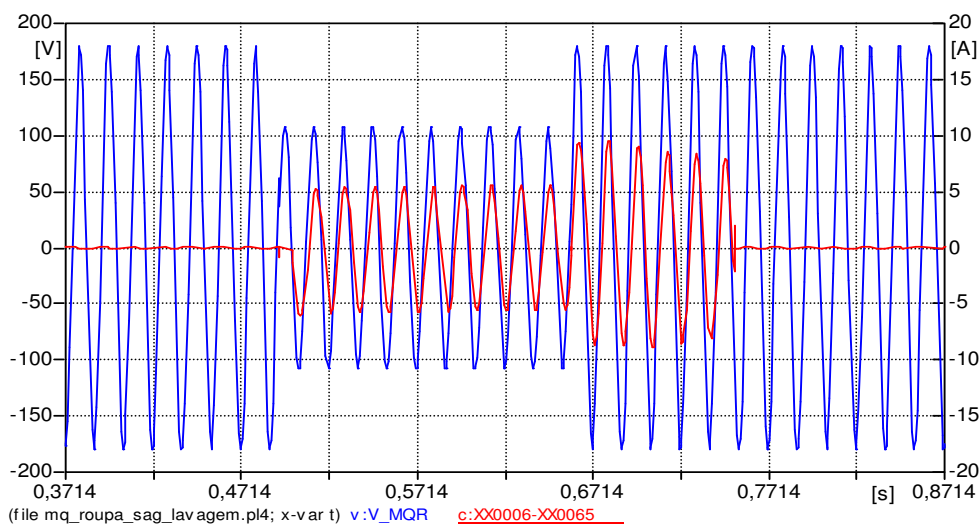


Figura 5.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 3 - Computacional.

Neste caso verifica-se que a corrente diminui de magnitude enquanto a tensão se apresenta com valor reduzido. Como pode ser observado, em nenhum momento ocorreu picos acentuados de corrente. Uma vez restabelecida a tensão, a corrente retorna ao seu padrão normal de funcionamento.

A Tabela 5.6 mostra os valores máximos da corrente, referente ao primeiro pico de corrente.

Tabela 5.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 3 – Afundamento de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	-5,78 A	-6,04 A	4,30 %

5.4.5 Caso 5: Suprimento Contendo Flutuação de Tensão

As Figuras 5.16 e 5.17 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente total para um suprimento contendo uma oscilação de tensão associada com um PST=5 pu e frequência moduladora de 20 Hz. Verificam-se, na figura, que a oscilação da tensão não trouxe para o caso ilustrado, maiores conseqüências sobre a corrente.

A Tabela 5.7 sintetiza os resultados obtidos quanto aos picos de corrente.

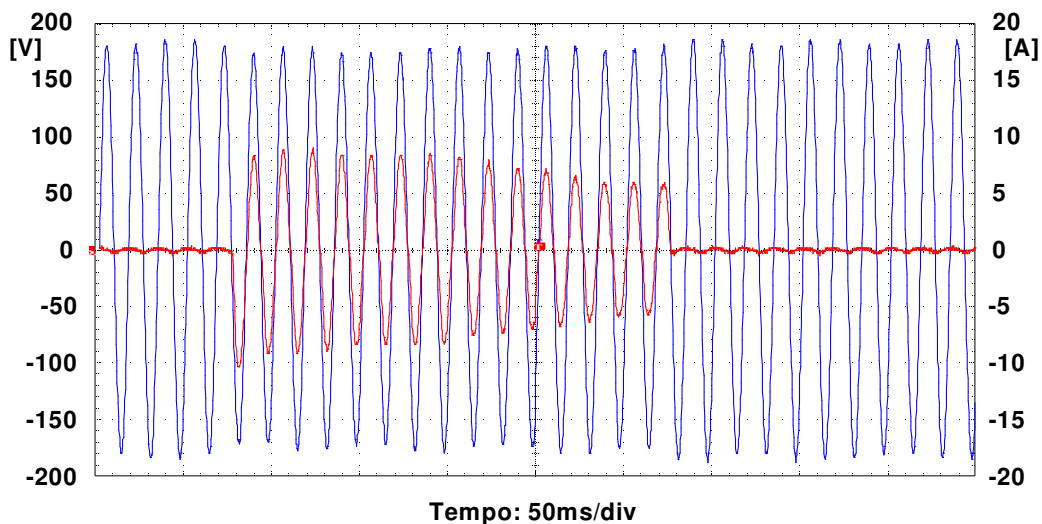


Figura 5.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 5 - Experimental.

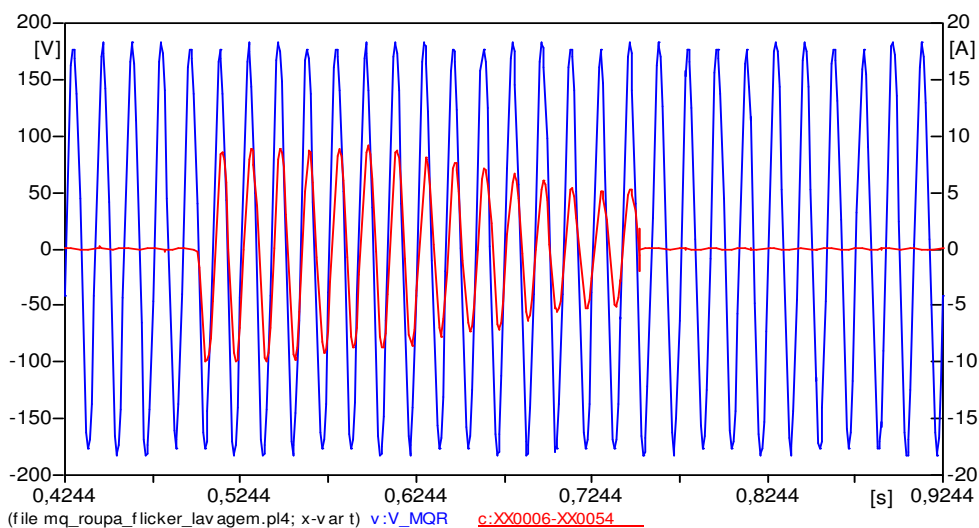


Figura 5.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 5 - Computacional.

Tabela 5.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de lavagem. Caso 5 – Flutuação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	-10,40 A	-9,96 A	4,23 %

5.4.6 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão

As Figuras 5.18 e 5.19 ilustram as formas de onda da tensão aplicada e da corrente total absorvida pelo equipamento para um DHT de 20%.

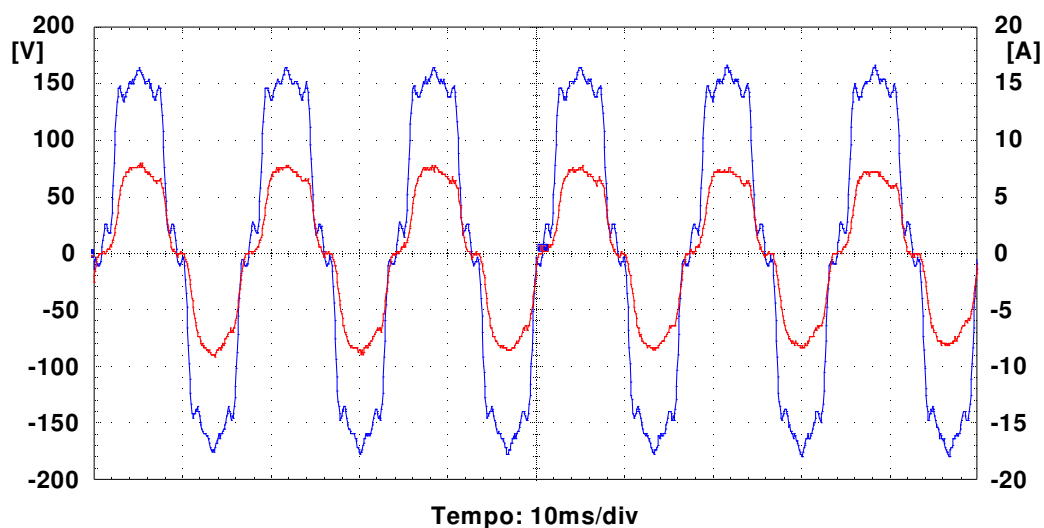


Figura 5.18 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 6 - Experimental.

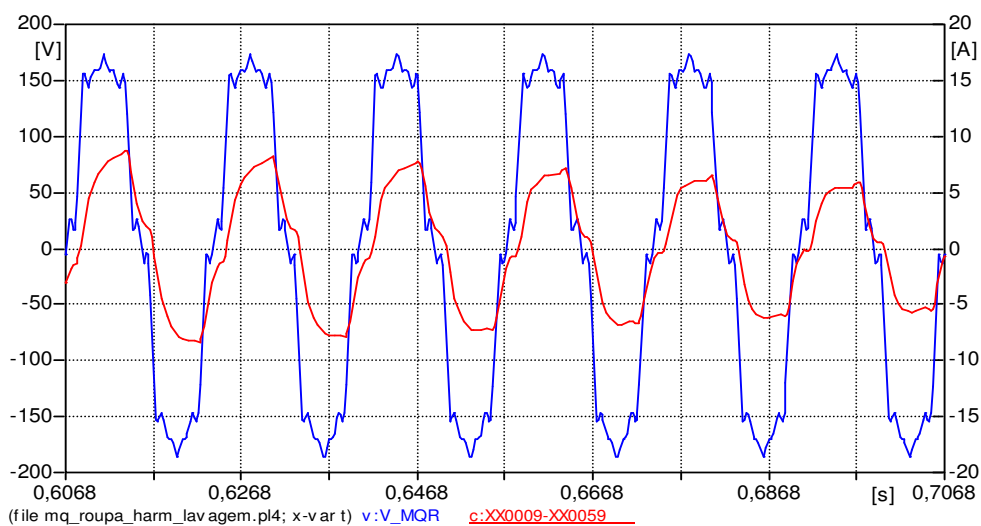


Figura 5.19 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de lavagem. Caso 6 - Computacional.

Como verificado, a corrente desse equipamento, para o processo de lavagem, está em um ininterrupto sistema de partida, isto é, o motor da máquina de lavar roupas está sempre partindo e a cada nova partida seu sentido de

rotação é invertido. Dessa forma, não são mostrados, para o caso ora estudado, o espectro harmônico nem os demais valores que caracterizam tal distúrbio.

5.4.7 Processo de Centrifugação

A Tabela 5.8 apresenta os casos aplicados à máquina de lavar roupas durante o processo de centrifugação.

Tabela 5.8 - Quadro resumo dos casos analisados no processo de centrifugação.

CASO	CARACTERÍSTICAS
1 – Condição Ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz.
2 – Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Elevação para 120% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
3 – Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Afundamento para 60% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
4 – Interrupção de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Interrupção de tensão; • Duração do evento de 10 ciclos.
5 – Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Pst (Probability short-term) de 5 pu.
6 – Distorção Harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 127 V, fase-neutro, eficaz; • Distorção harmônica com DHT = 20%.

5.4.8 Caso 1: Suprimento com Características Ideais

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam, respectivamente, as tensões e correntes experimentais e computacionais.

A Tabela 5.9 apresenta o valor eficaz e de pico da corrente na entrada do equipamento analisado, onde podem ser comparados os resultados computacionais com os experimentais.

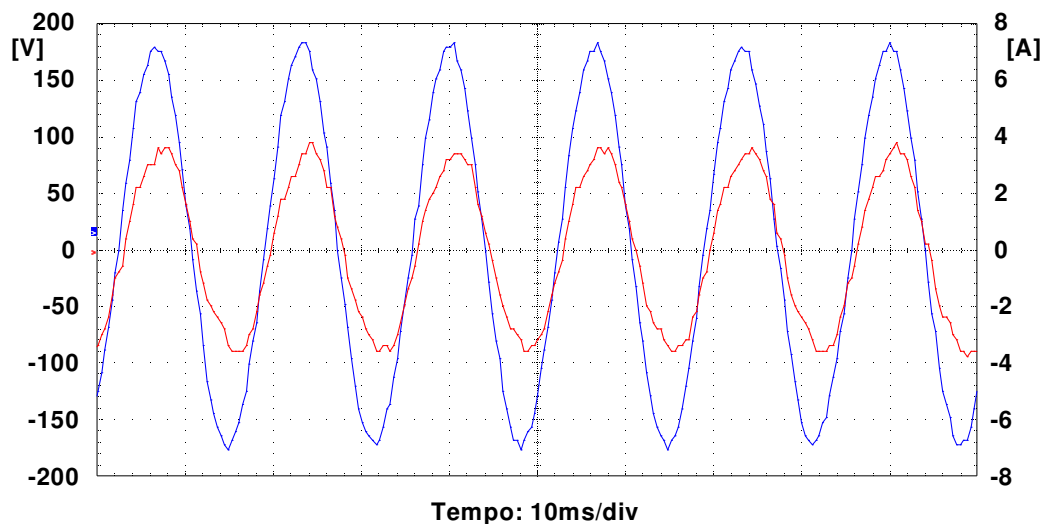


Figura 5.20 – Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 1 - Experimental.

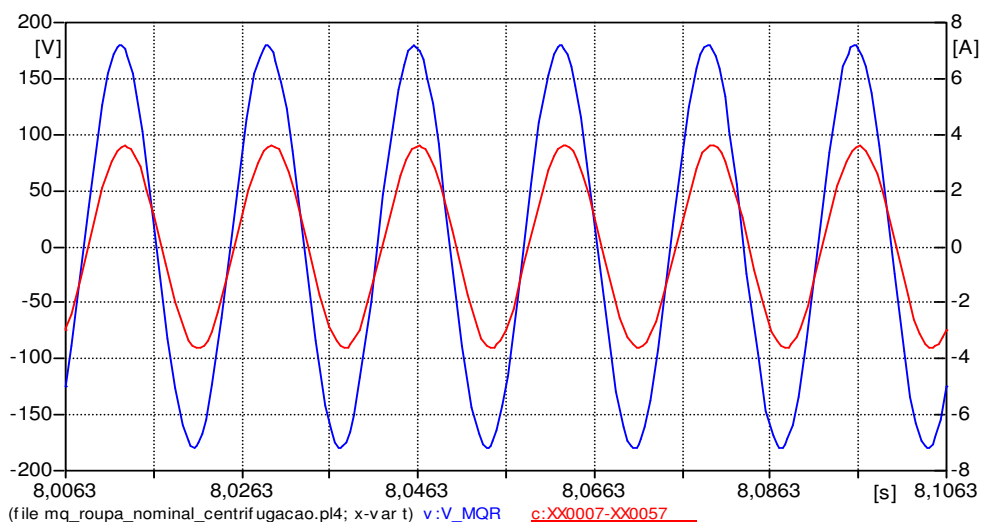


Figura 5.21 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 1 - Computacional.

Tabela 5.9 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 1 – Condição Nominal.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	3,80 A	3,61 A	5,00 %
Corrente Eficaz	2,56 A	2,55 A	0,40 %
Fator de Potência	0,977	0,981	0,41 %

5.4.9 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração

As Figuras 5.22 e 5.23 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente para uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental.

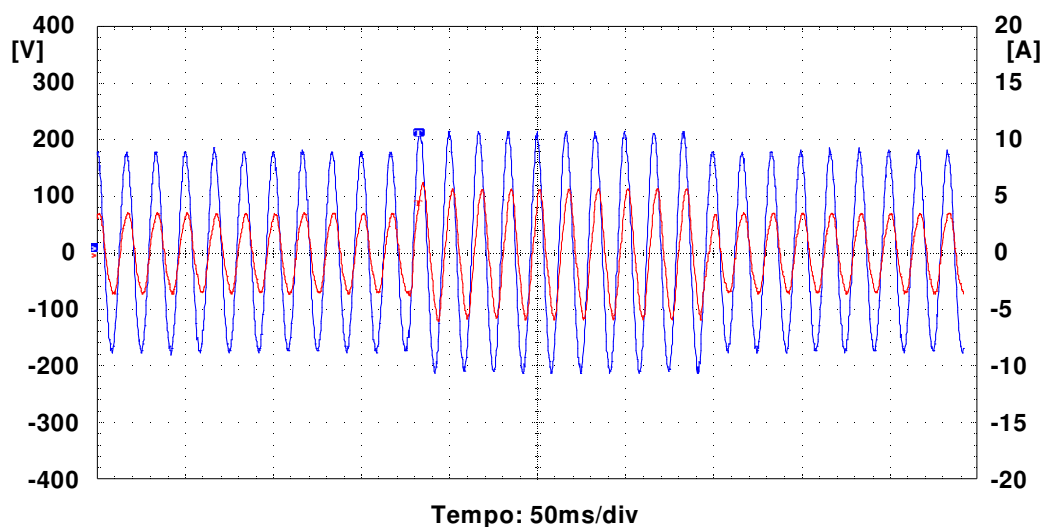


Figura 5.22 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 2 - Experimental.

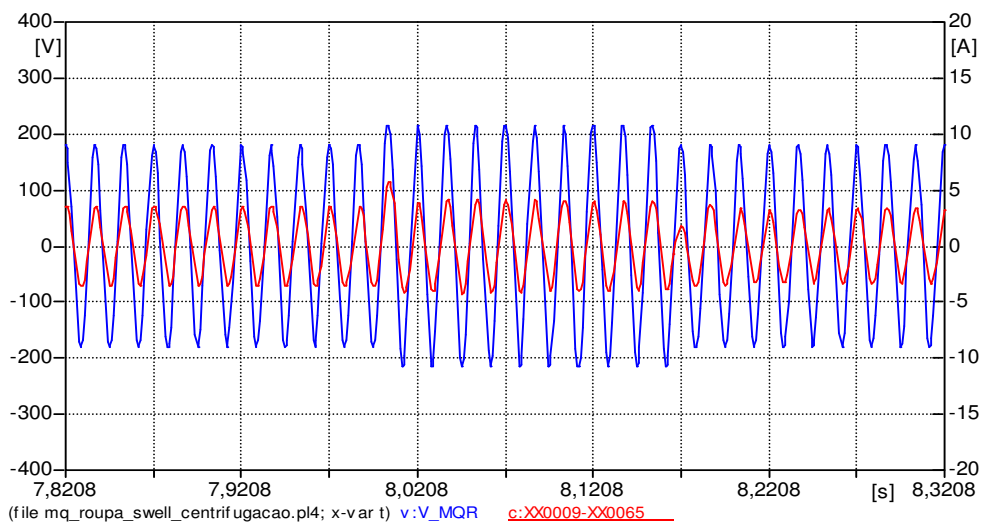


Figura 5.23 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 2 - Computacional.

A Tabela 5.10 mostra os picos das correntes obtidas pelos dois métodos.

Tabela 5.10 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 2 – Elevação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	6,20 A	5,74 A	7,42 %

5.4.10 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração

As Figuras 5.24 e 5.25 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente de entrada, quando da aplicação de um afundamento para 60% da tensão nominal com duração de 10 ciclos.

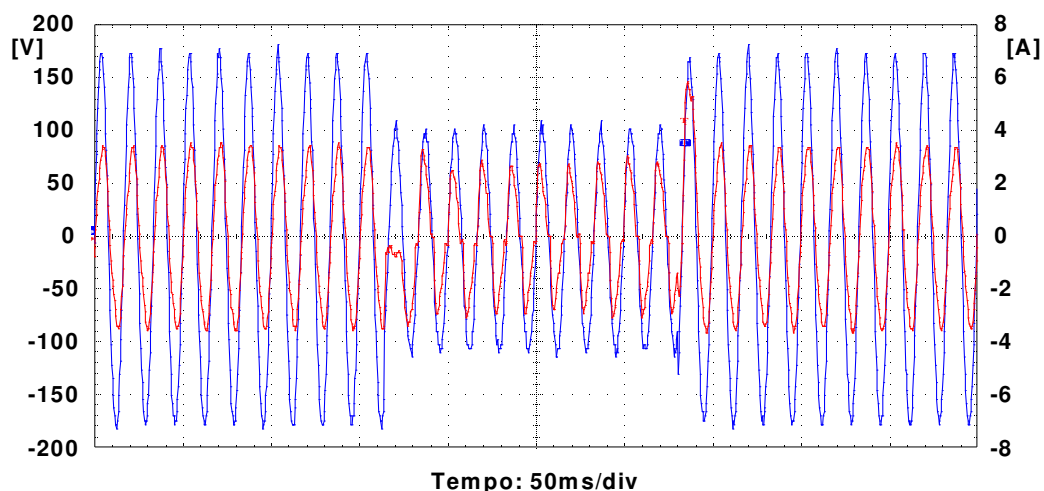


Figura 5.24 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 3 - Experimental.

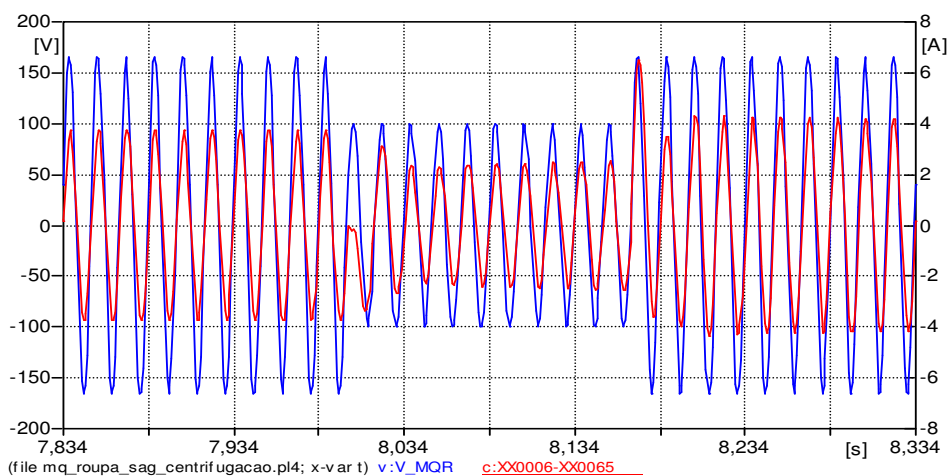


Figura 5.25 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 3 - Computacional.

A Tabela 5.11 mostra os valores máximos atingidos pela corrente de pico.

Tabela 5.11 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 3 – Afundamento de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	5,85 A	6,47 A	9,58 %

5.4.11 Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica

As Figuras 5.26 e 5.27 ilustram os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente solicitada pelo dispositivo quando aplicada uma interrupção plena, como duração de 10 ciclos. Observa-se que, no instante da aplicação da interrupção, a corrente no dispositivo tende a diminuir, sem apresentar oscilações, até o valor da corrente absorvida pelo seu controle eletrônico. Esta característica se deve ao tipo de controle imposto pelas chaves semicondutoras.

Observa-se ainda que, quando do restabelecimento da tensão, o mesmo não ocorre para a corrente. Esta corrente permanece reduzida por um longo intervalo de tempo, aproximadamente 11 segundos. Após esse período, o sistema de centrifugação recomeça, como pode ser verificado pelo alto valor da corrente. Passados 14 segundos a corrente novamente atinge o regime permanente.

Como se percebe, os tempos envolvidos no processo de centrifugação são elevados. A aplicação de tais tempos para o processo computacional demandaria um esforço muito grande de processamento, motivo este que levou a não representação fiel desses tempos. Sendo assim, os 11 segundos de interrupção plena da corrente do motor na situação real foram representados na situação computacional por 5 segundos. Já o tempo de partida do motor, que no caso experimental foi de aproximadamente 14 segundos, no modelo

computacional foi de apenas 5,5 segundos. Apesar dessa redução dos tempos, a magnitude das grandezas, especialmente a corrente de entrada, quando comparada com os dados experimentais, ficou dentro de valores totalmente satisfatórios.

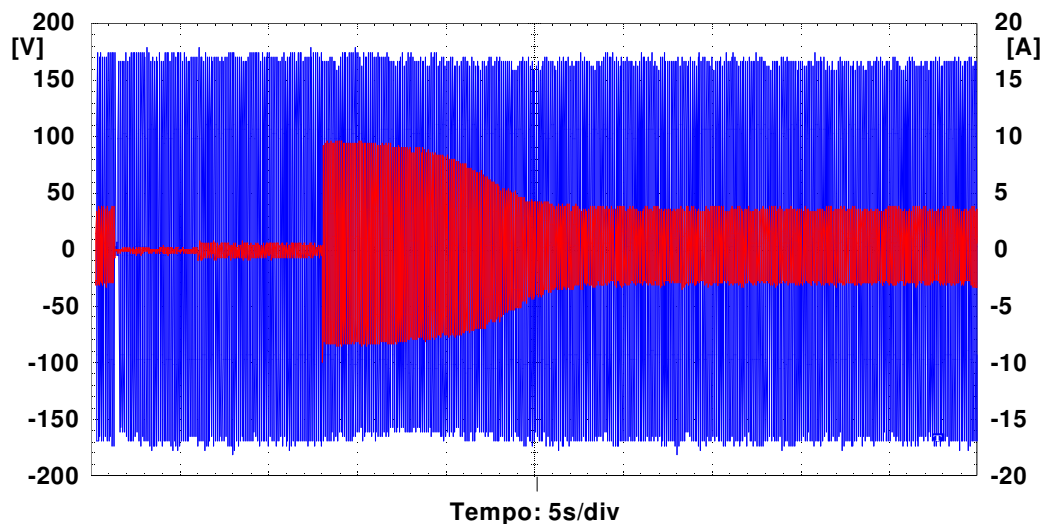


Figura 5.26 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 4 - Experimental.

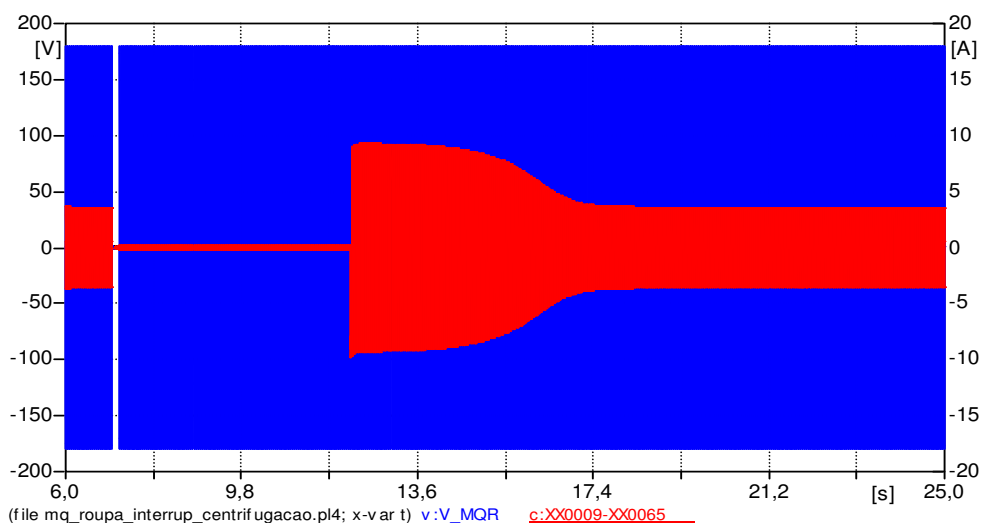


Figura 5.27 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 4 - Computacional.

A Tabela 5,12 informa os maiores valores obtidos para a corrente do motor.

Tabela 5.12 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 4 – Afundamento de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	-10,00 A	-9,80 A	2,00 %

5.4.12 Caso 5: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão

As Figuras 5.28 e 5.29 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente total para o caso do suprimento contendo uma oscilação de tensão correspondente a um PST=5 pu, com frequência moduladora de 20 Hz.

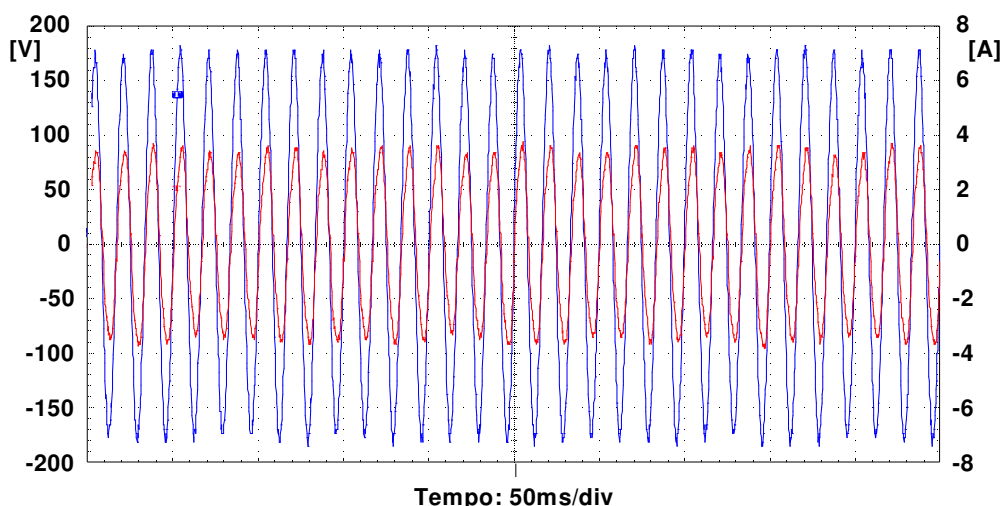


Figura 5.28 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação, Caso 5 - Experimental.

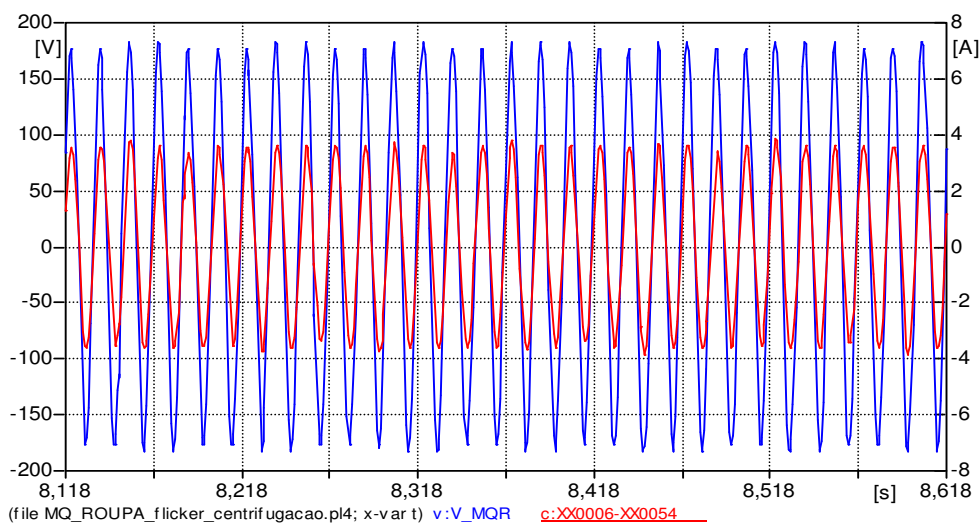


Figura 5.29 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação, Caso 5 - Computacional.

A Tabela 5.7 sintetiza os resultados obtidos nesta análise.

Tabela 5.13 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o processo de centrifugação. Caso 5 – Flutuação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	3,84 A	3,89 A	1,29 %

5.4.13 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão

As Figuras 5.30 e 5.31 ilustram as formas de onda da tensão aplicada e da corrente total absorvida pela máquina de lavar roupa, para o DHT de 20%.

Nas Figura 5.32 e 5.33 estão ilustrados os espectros harmônicos para o caso experimental e computacional, respectivamente.

No espectro experimental a componente de 3^a harmônica apresenta-se com uma magnitude bem mais elevada do que a verificada no resultado computacional. Essa diferença se deve, basicamente, aos efeitos da saturação magnética que não foram inseridos no modelo computacional. Contudo, as demais harmônicas apresentam boa correlação entre os desempenhos obtidos no laboratório e nos estudos computacionais.

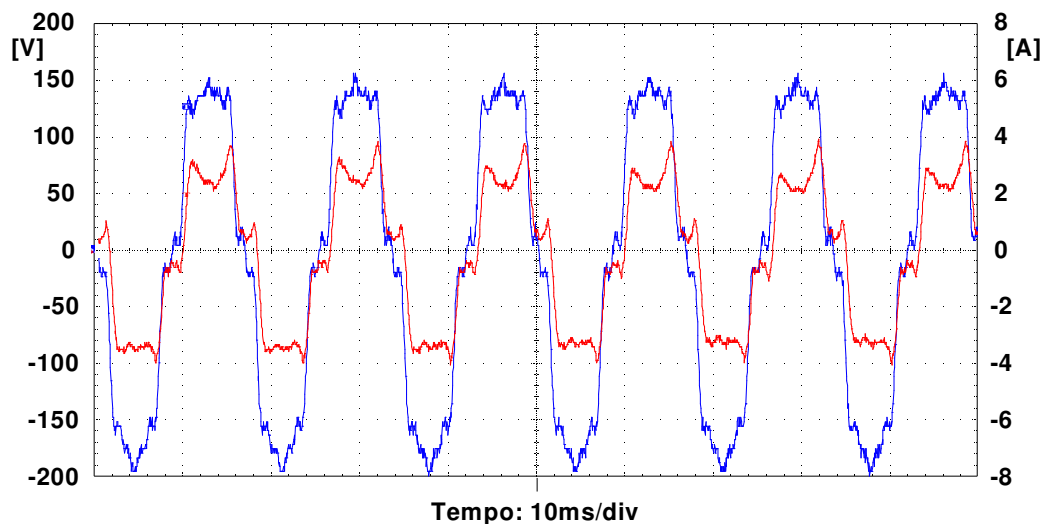


Figura 5.30 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Experimental.

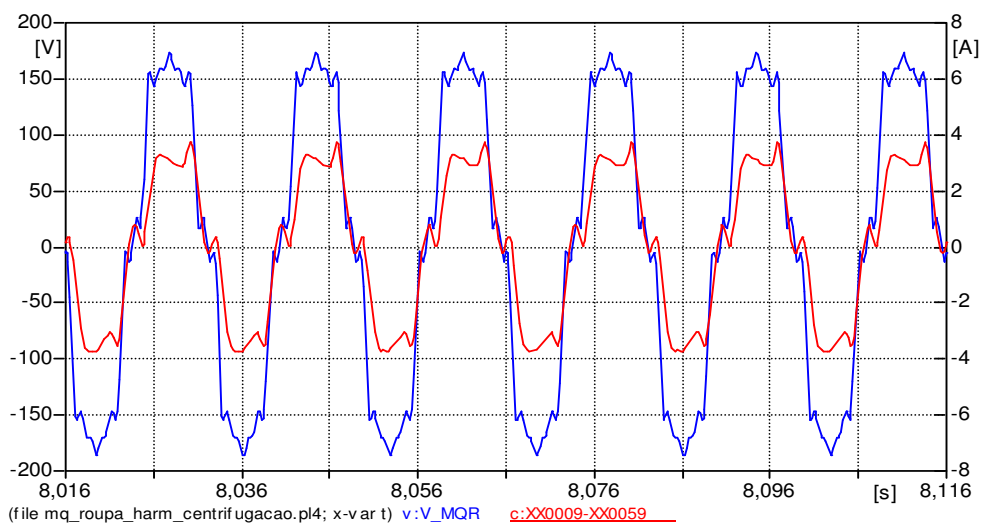


Figura 5.31 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Computacional.

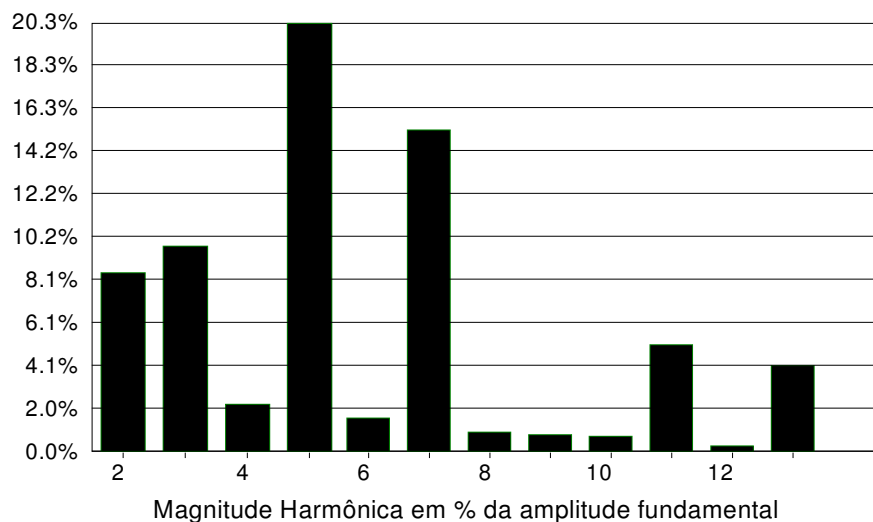


Figura 5.32 - Espectro harmônico da corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Experimental.

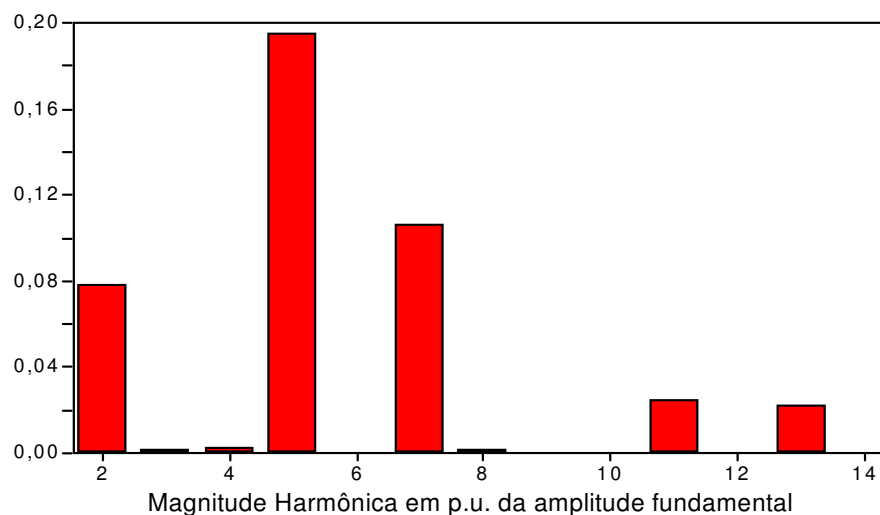


Figura 5.33 - Espectro harmônico da corrente de entrada da máquina de lavar roupas no processo de centrifugação. Caso 6 - Computacional.

A Tabela 5.14 destaca os valores de pico, eficaz e da distorção harmônica total de corrente, além dos valores individuais das componentes harmônicas.

Tabela 5.14 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	3,98 A	3,71 A	6,78 %
DHTi	29,50 %	23,71 %	19,63 %
I_h fundamental	2,41 A	2,54 A	5,12 %
I_h 2 ^a	0,206 A	0,196 A	4,85 %
I_h 3 ^a	0,235 A	0,004 A	--
I_h 4 ^a	0,056 A	0,005 A	--
I_h 5 ^a	0,490 A	0,494 A	0,81 %
I_h 7 ^a	0,368 A	0,269 A	26,90 %
I_h 11 ^a	0,124 A	0,062 A	50,00 %
I_h 13 ^a	0,100 A	0,058 A	42,00 %

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

À luz dos resultados obtidos e apresentados ao longo do presente capítulo podem ser extraídas as seguintes constatações:

- Quando do processo de lavagem, uma elevação temporária de tensão não apresentou nenhum efeito significativo sobre no seu desempenho do equipamento, contudo, verificou-se um acréscimo, durante meio ciclo, no valor inicial da corrente. No processo de centrifugação, novamente, o equipamento não apresentou nenhum impacto significativo sobre seu funcionamento a não ser por um acréscimo de corrente verificado no valor inicial da corrente;
- Afundamentos temporários de tensão não causaram efeitos perceptíveis no funcionamento do equipamento, tanto no processo de lavagem como de centrifugação. Com relação à forma de onda da corrente, verificou-se que, para o processo de centrifugação, ocorreu um incremento da mesma no instante do restabelecimento da tensão ao seu valor normal. Para o

processo de lavagem não foi verificada alterações significativas na corrente, exceto pela sua redução quando da presença do evento;

- Interrupções de tensão se mostraram bastante impactantes para o processo de centrifugação, uma vez que este foi interrompido para qualquer tempo de duração do fenômeno. O comportamento da corrente quando tal evento foi aplicado foi semelhante ao verificado no início do processo de centrifugação. Para o caso da lavagem, não foi possível obter os oscilogramas. Contudo, devido ao fato de que o equipamento, durante tal processo, estar sempre “partindo”, acredita-se que uma interrupção não afetaria significativamente o funcionamento do equipamento;
- Flutuações de tensão nos níveis aplicados ao dispositivo em estudo não produziram anormalidades que pudessem ser percebidas. No processo de lavagem, a flutuação da corrente mostrou-se ainda menos significativa que durante o processo de centrifugação. Contudo, em ambos os casos, os valores de pico destas correntes não foram muito significativos;
- Distorções harmônicas de tensão durante a lavagem se mostraram de pequena relevância em relação aos resultados associados com a centrifugação. Esse fato decorre essencialmente do valor mais elevado dessa corrente durante o processo de lavagem do que no processo de centrifugação;
- A seleção das funções de programação do equipamento, como esclarecido anteriormente, é controlada por um circuito eletrônico. Esse circuito, conforme pesquisa realizada nas assistências técnicas autorizadas é o principal dispositivo que se danifica nas máquinas de lavar roupa. Tendo em vista a simplificação utilizada para esta unidade, destaca-se, aqui, a necessidade de maiores estudos até a obtenção de um circuito eletrônico mais próximo do real.

De um modo geral pôde-se constatar que, em praticamente todos os casos estudados, tanto no processo de lavagem como de centrifugação, verificou-se uma boa semelhança entre os resultados obtidos pelos métodos experimental e o computacional. Este fato, a exemplo dos estudos anteriores, evidencia que o modelo proposto para a máquina de lavar roupas possui uma boa correlação com o funcionamento físico do produto.

CAPÍTULO VI

MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LAVA LOUÇAS

6.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros relatos de um dispositivo mecânico de lavar louças datam de 1850 e correspondem a uma patente de Joel Houghton. As máquinas modernas de lavar louça são descendentes de uma invenção, em 1886, de Josephine Cochrane, também motorizada a mão, a qual foi apresentada na Feira mundial de Chicago em 1893. Os modelos instalados com encanamento permanente chegaram por volta de 1920 e, em 1937, Willian Howard desenvolveu uma pequena lavadora de louça que possuía todas as características de uma lavadora de louças moderna, inclusive uma porta na frente, uma prateleira de arame para segurar louça e um pulverizador giratório [30]. Elementos secantes elétricos foram introduzidos em 1940. Inicialmente, as máquinas de lavar louças eram usadas em ambientes comerciais, mas a partir de 1970 esse equipamento passou a ser comum em residências de países, como os Estados Unidos.

A lava louças limpa borrifando água quente (55 a 65 °C) nas louças. Algumas lavadoras realizam lavagem múltipla e enxágüe dentro de um ciclo completo definido pelo usuário. Em ambos os processos, isto é, o de lavagem e de enxágüe, utiliza-se água quente. Dessa forma, a potência consumida independe do processo executado, exceto pelo tempo de realização de cada um.

No que tange aos desenvolvimentos feitos neste capítulo, estes estão em total sintonia com aqueles seguidos para os demais equipamentos, motivo pelo qual se dispensa, neste momento, maiores discussões sobre o assunto.

6.2 IDENTIFICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MODELAGEM DA MÁQUINA LAVA LOUÇAS

Mais uma vez, em consonância com os procedimentos anteriores, apresenta-se, na seqüência, os trabalhos realizados desde a busca dos modelos até a realização dos estudos comparativos de desempenho do produto.

6.2.1 Identificação do Equipamento

O equipamento analisado consiste num produto com capacidade para 25 litros, como ilustra a Figura 6.1.

A Figura 6.2 ilustra a parte inferior desse equipamento, onde está localizado o seu sistema de aquecimento, composto por uma resistência elétrica e o sistema de bombeamento, formado principalmente por uma eletrobomba de circulação [35].



Figura 6.1 – Lava louças sob ensaio.

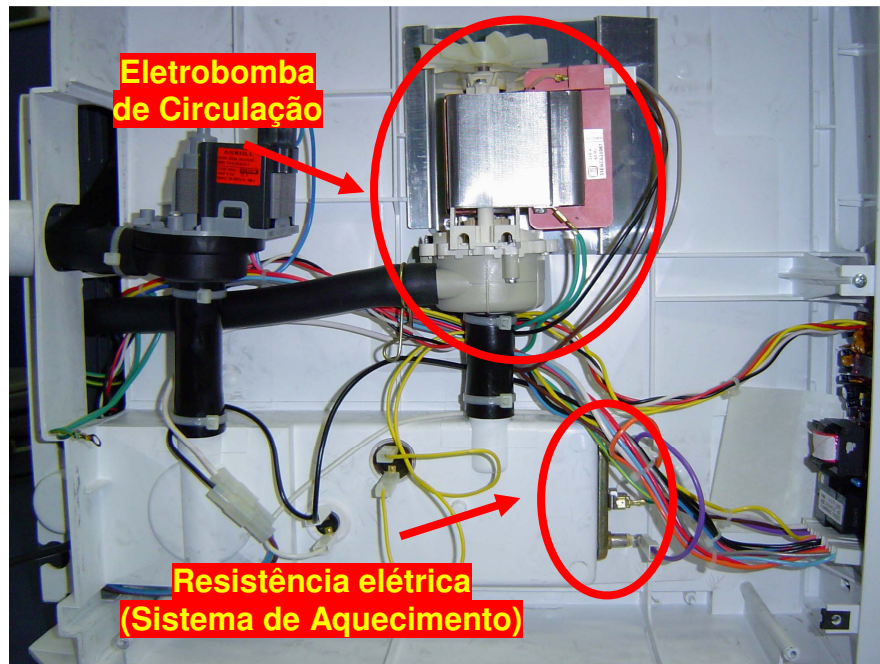


Figura 6.2 – Detalhe do sistema de aquecimento e bombeamento da lava louças.

A Figura 6.3 ilustra a parte eletrônica da lava louças. Esta é responsável pela programação das funções realizadas pelo equipamento. Este circuito eletrônico, basicamente, é composto por alguns relés, um transformador derivador, um sistema de retificação e os demais componentes responsáveis pelo funcionamento do equipamento.

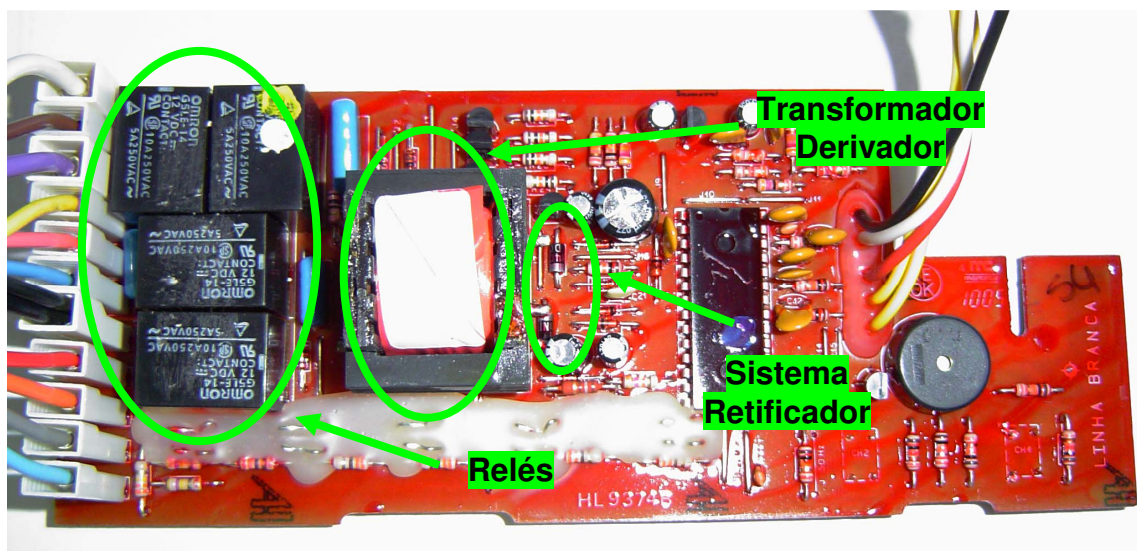


Figura 6.3 - Circuito eletrônico da lava louças.

A Tabela 6.1 apresenta as principais características da máquina lava louças utilizada nos estudos.

Tabela 6.1 – Características da lava louças analisada.

Fabricante	CONSUL
Modelo	CLC19ABBNA
Serie	CE50400359
Capacidade	6 Pessoas – 25 litros Água
Tensão	220 V
Potência	1370 W

6.2.2 Características Físicas do Equipamento

Os principais componentes elétricos da lava louças, como já mencionado, são:

- Um sistema de aquecimento, caracterizado por uma resistência elétrica;
- Um sistema de bombeamento, representado pela eletrobomba de circulação;
- Um sistema de controle, constituído pelo circuito eletrônico.

O sistema de aquecimento, basicamente, consiste numa resistência convencional, não necessitando pois de maiores comentários.

A eletrobomba de circulação, por sua vez, apresenta algumas características elétricas interessantes, especialmente pelo seu tipo de motor de indução monofásico, que corresponde ao tipo *Shaded Pole* (Anel de Defasamento) [31]. O motor *Shaded Pole* é um tipo especial do motor de indução monofásico. Possui, na face de cada pólo do campo, um anel de defasamento chamado de *Shading Coil*, esses anéis, em conjunto com o enrolamento do estator, produzem o campo magnético necessário à partida do

motor. Sua parte rotativa corresponde ao arranjo conhecido por gaiola de esquilo. Devido ao fato de possuir somente um enrolamento no estator, nenhum capacitor ou chave de partida é empregado. Este tipo de motor possui um baixo torque de partida sendo, por tal motivo, recomendado apenas para o acionamento de cargas com propriedades compatíveis.

A Figura 6.4 ilustra o motor de indução monofásico *Shaded Pole* utilizado na lava louças. Nesta figura podem ser vistos os anéis *Shading Coil*.

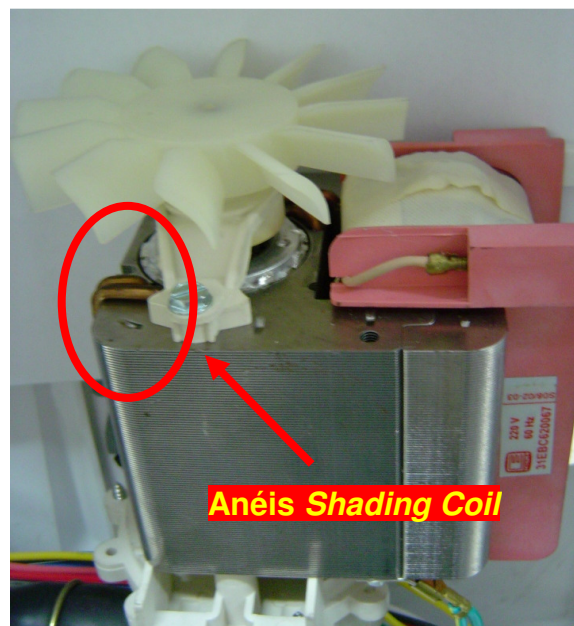


Figura 6.4 – Circuito equivalente do motor *Shaded Pole*.

A Tabela 6.2 fornece as principais características do motor *Shaded Pole* utilizado na lava louças em estudo.

Tabela 6.2 - Principais características do motor *Shaded Pole*.

Fabricante	EBERLE
Tipo	<i>Shaded Pole</i>
Modelo	31EBC620067
Serie	S08/02-03
Vazão	50 Litros / Minutos
Tensão	220 V

O circuito eletrônico foi representado por um equivalente, indicado na Figura 6.5, que conduz a uma corrente de alimentação com as mesmas características daquela verificada experimentalmente.

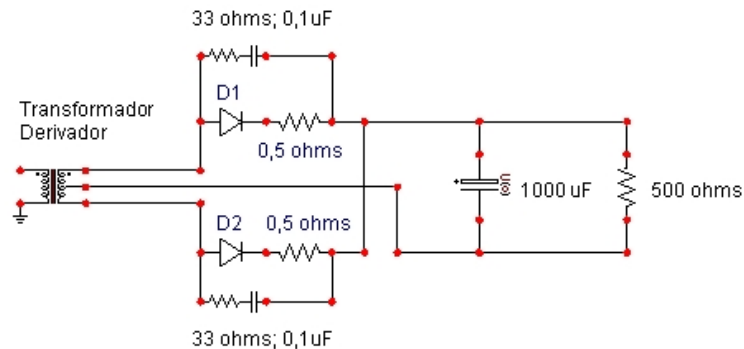


Figura 6.5 – Equivalente do circuito eletrônico da lava louças.

6.2.3 Análise Matemática e Circuito Equivalente do Motor Monofásico Shaded Pole

A modelagem matemática do motor Shaded Pole segue, em grande parte, a mesma filosofia da modelagem dos motores de indução monofásicos. Contudo, algumas alterações construtivas importantes, tais como, a presença de somente um enrolamento no estator e a ausência de mecanismo de partida auxiliar, como chaves ou capacitores, fazem com que os equacionamentos do motor *Shaded Pole* sejam distintos daquele descrito no Capítulo II.

Devido ao fato que o motor *Shaded Pole* possui apenas um enrolamento no estator e também se apresenta com anéis devidamente inseridos no circuito magnético do motor, a circulação do fluxo magnético, originado pela força magnetomotriz produzida pelo enrolamento do estator, induz uma tensão nesses anéis, a qual, por sua vez, origina uma corrente e esta, um fluxo correspondente. Este fluxo interage com o fluxo original, permitindo dessa forma, a entrada em movimento do motor.

Levando em consideração tais particularidades, a análise matemática do motor *Shaded Pole* torna-se similar àquela realizada para o motor PTC, descrita no Capítulo II. A Figura 6.6, semelhante à Figura 2.6, apresenta a alteração, simplificada, realizada no motor PTC, para a obtenção do motor em pauta.

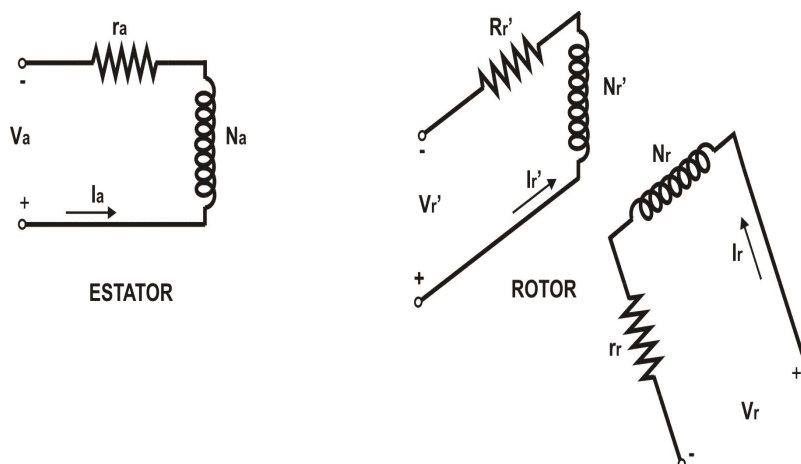


Figura 6.6 - Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor *Shaded Pole*.

6.3 ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS

Em sintonia com a lógica empregada para os demais estudos, apresentam-se, na seqüência, os procedimentos e resultados dos estudos investigativos conduzidos para a máquina lava louças.

6.3.1 Estudos Computacionais

Com base nas características dos sistemas de controle, bombeamento e aquecimento, aliado a toda descrição supracitada, procedeu-se à implementação dos modelos representativos na plataforma ATP, obtendo-se, assim, um programa computacional destinado à avaliação do desempenho operativo do equipamento sob análise.

6.3.2 Estudos Experimentais

Para maior clareza dos trabalhos, foram realizados ensaios experimentais nos dois modos básicos de operação da lava louças, a saber, o processo de lavagem e o de enxágüe. Os resultados obtidos nesses processos, como já mencionado, foram idênticos. Dessa forma, serão considerados somente os desempenhos atrelados com o processo de lavagem.

A Figura 6.7 ilustra a estrutura da montagem realizada para os trabalhos experimentais enquanto que a Figura 6.8 mostra o arranjo laboratorial.

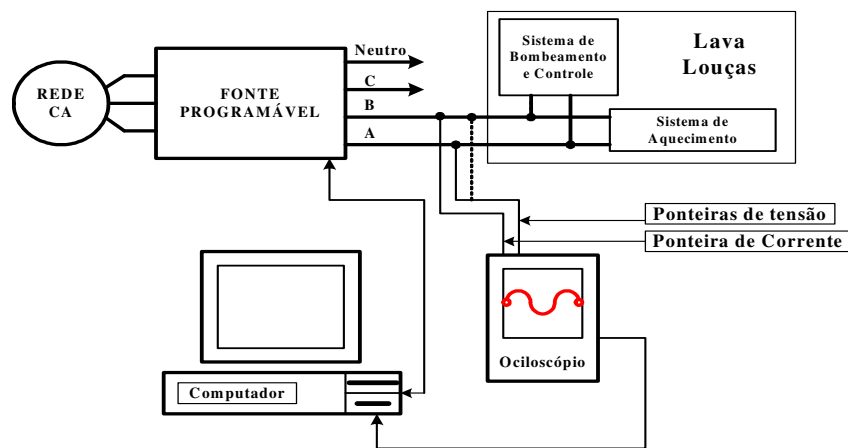


Figura 6.7 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos na lava louças.

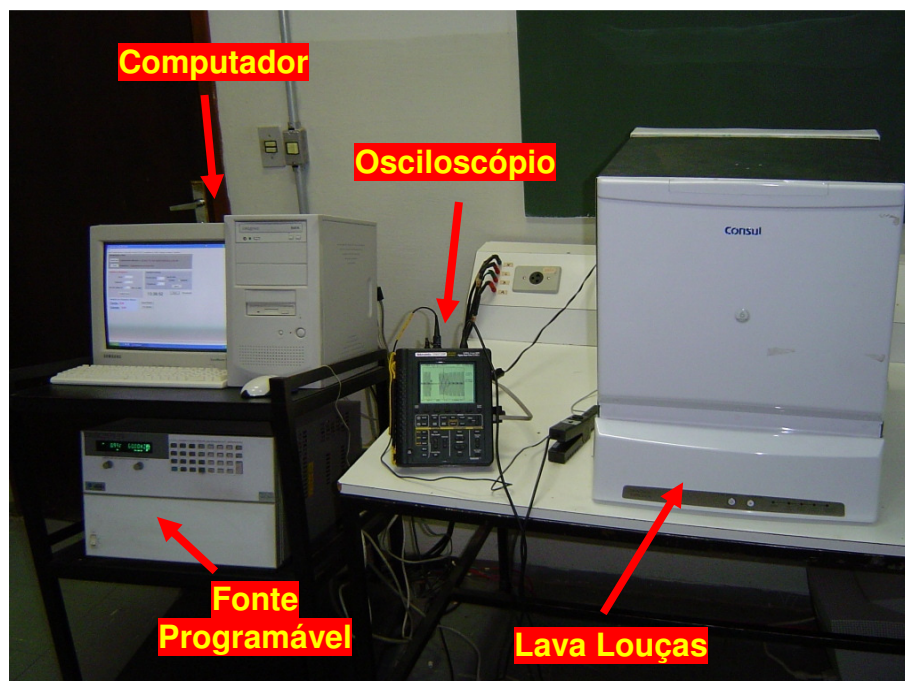


Figura 6.8 - Montagem dos ensaios laboratoriais para análise de desempenho da lava louças.

6.4 CASOS ESTUDADOS

A Tabela 6.3 apresenta uma síntese dos casos estudados.

Tabela 6.3 - Quadro Resumo dos Casos Analisados.

CASO	CARACTERÍSTICAS
1 – Condição Ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz.
2 – Elevação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Elevação para 115% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
3 – Afundamento de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Afundamento para 60% da tensão nominal; • Duração do evento de 10 ciclos.
4 – Interrupção de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Interrupção de tensão; • Duração do evento de 10 ciclos.
5 – Flutuação de Tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Pst (Probability short-term) de 5 pu.
6 – Distorção Harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão nominal de 220 V, fase-fase, eficaz; • Distorção harmônica com DHT = 20%.

6.4.1 Caso 1: Suprimento com Características Ideais

As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam, respectivamente, as tensões e correntes experimentais e computacionais.

Os resultados evidenciam uma boa semelhança entre as respostas obtidas por ambos os métodos.

A Tabela 6.4 apresenta os valores de pico e eficaz da corrente de entrada do equipamento sob teste, bem como o seu fator de potência.

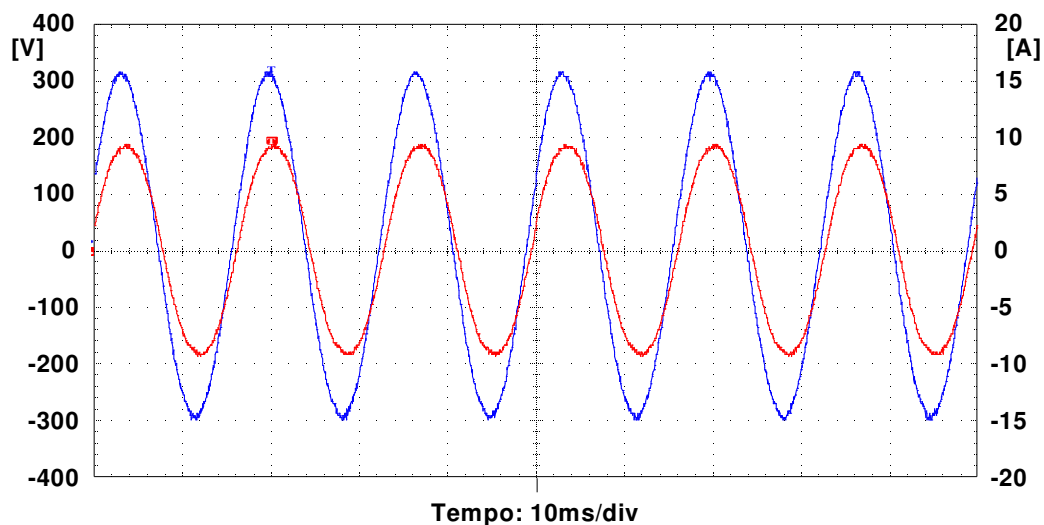


Figura 6.9 – Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 1 - Experimental.

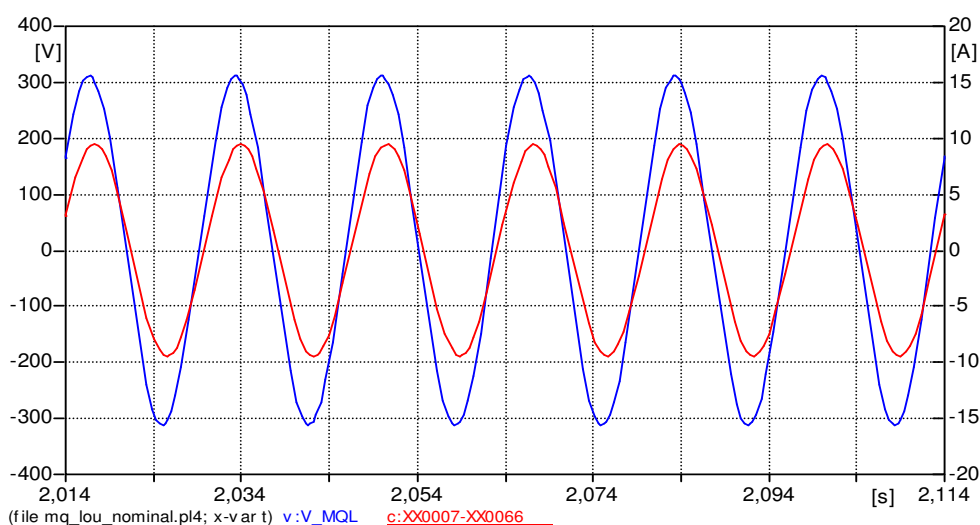


Figura 6.10 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 1 - Computacional.

Tabela 6.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 1 – Condição Nominal.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	9,40 A	9,43 A	0,32 %
Corrente Eficaz	6,69 A	6,67 A	0,30 %
Fator de Potência	0,975	0,976	0,10 %

6.4.2 Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração

As Figuras 6.11 e 6.12 ilustram as formas de onda da tensão de suprimento e corrente para uma elevação temporária de tensão que conduz o suprimento para 115 % da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental.

Da análise das figuras, verifica-se a pequena influência que este tipo de perturbação tem sobre o desempenho da corrente. Pode-se verificar que este equipamento apresenta uma característica de carga constante, isso se deve principalmente ao fato do sistema de aquecimento, que consiste de uma resistência elétrica, ser a principal carga elétrica da lava louças.

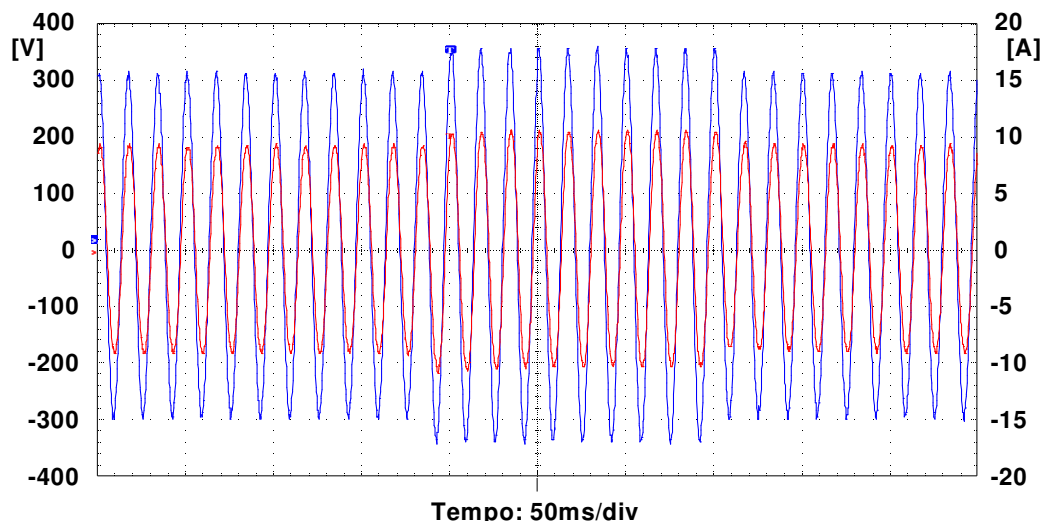


Figura 6.11 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 2 - Experimental.

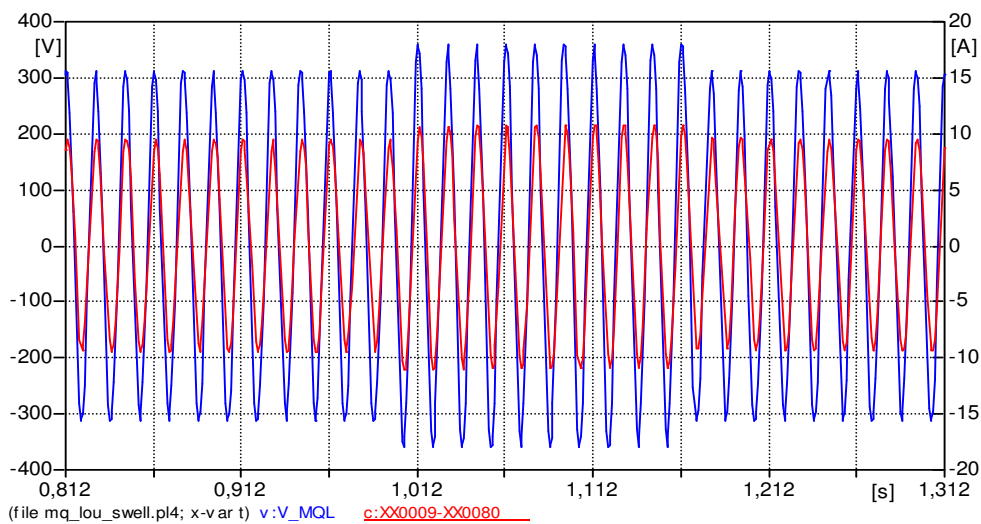


Figura 6.12 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 2 - Computacional.

A Tabela 6.5 apresenta os valores de pico das correntes verificadas no início do distúrbio aplicado.

Tabela 6.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 2 – Elevação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	-11,00 A	-11,13 A	1,17 %

6.4.3 Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração

As Figuras 6.13 e 6.14 estão associadas com as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente de entrada, quando da aplicação de um afundamento para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos.

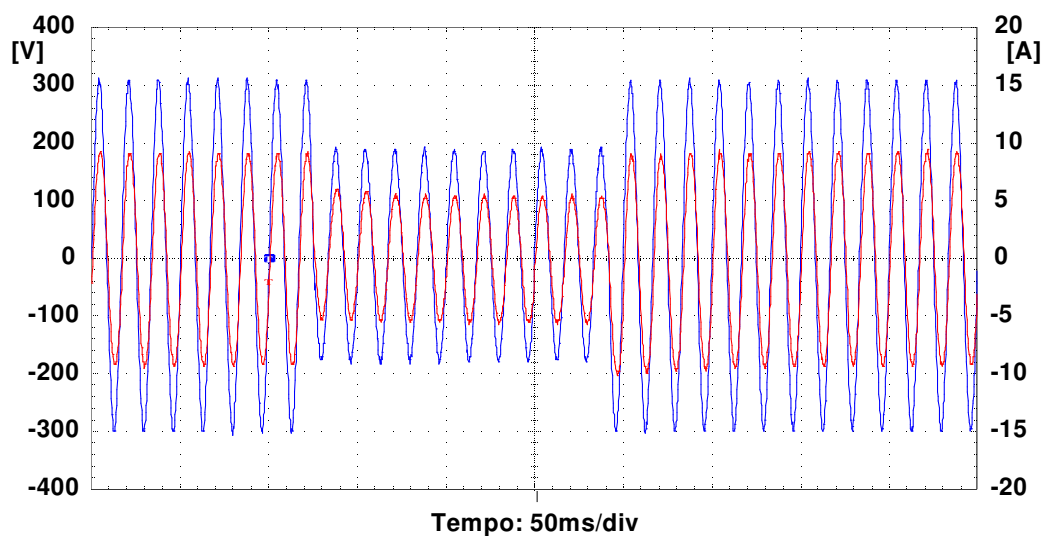


Figura 6.13 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 3 - Experimental.

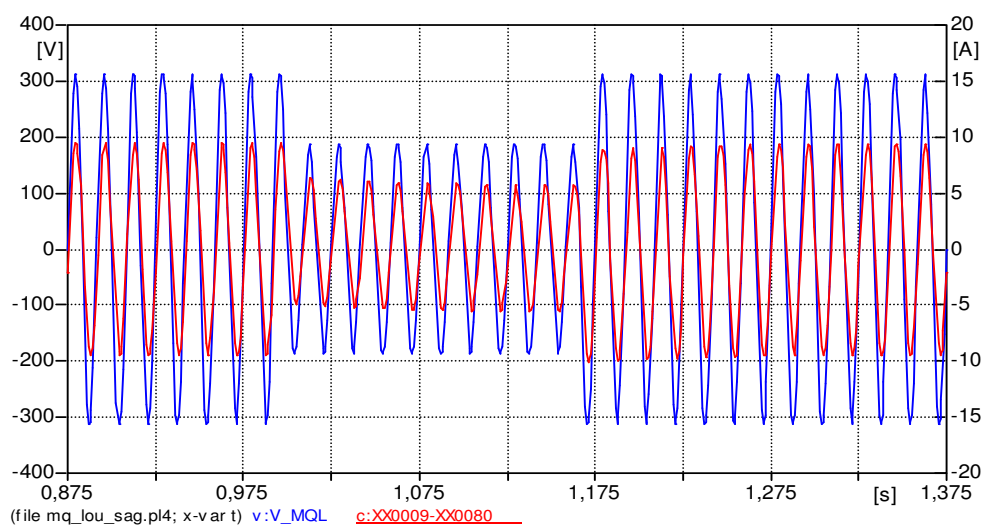


Figura 6.14 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 3 - Computacional.

Novamente para este distúrbio, verifica-se a pequena influência que este tipo de perturbação tem sobre o desempenho da corrente. Nesse caso, pode-se

comprovar que a lava louças é um equipamento com características de uma carga do tipo impedância constante. Na verdade este resultado seria esperado, visto que o resistor constitui-se no maior consumo de energia do equipamento.

A Tabela 6.6 apresenta os valores de pico das correntes ao término do distúrbio aplicado.

Tabela 6.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 3 – Afundamento de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	-10,10 A	-10,15 A	0,50 %

6.4.4 Caso 4: Interrupção do Fornecimento da Energia Elétrica

As Figuras 6.15 e 6.16 ilustram os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente solicitada pelo dispositivo quando aplicada uma interrupção plena, como duração de 10 ciclos. Observa-se que, no instante da aplicação do fenômeno a corrente no dispositivo registra uma drástica redução. O valor só não é nulo pelo fato de existir uma pequena corrente fornecida ao sistema eletrônico. Essa situação se estende por um tempo de aproximadamente de 1,5 segundo. Ao término desse intervalo o processo é reiniciado normalmente e equipamento volta ao seu funcionamento sem qualquer anomalia.

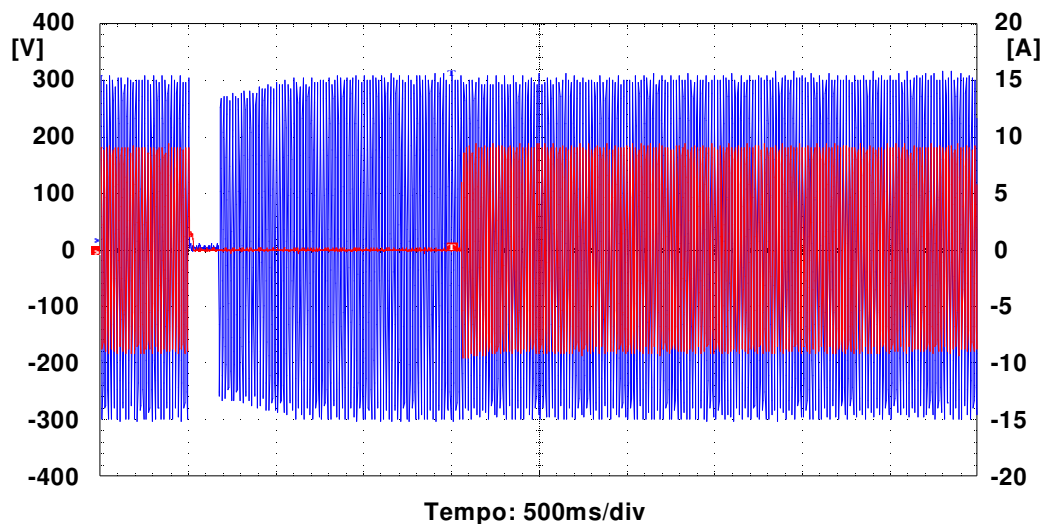


Figura 6.15 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 4 - Experimental.

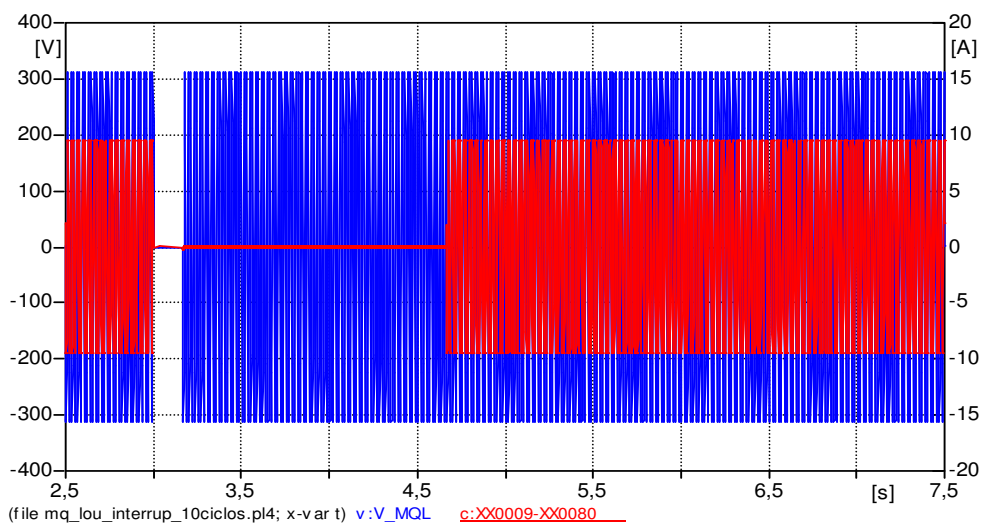


Figura 6.16 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 4 - Computacional.

A Tabela 6.7 apresenta os máximos valores obtidos para a corrente do equipamento.

Tabela 6.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 4 – Interrupção da Energia.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	-9,60 A	-9,43 A	1,77 %

6.4.5 Caso 5: Suprimento Contendo Flutuação de Tensão

As Figuras 6.17 e 6.18 contêm os oscilogramas da tensão e da corrente para o caso de um suprimento contendo flutuação de tensão definida por um PST=5 pu e frequência moduladora de 20 Hz. Vê-se, da figura, que a oscilação da tensão tem efeito direto na corrente, cuja frequência de modulação é igual à da tensão.

A Tabela 6.8 resume os resultados obtidos para a presente situação, mostrando os valores máximos das correntes atingidos.

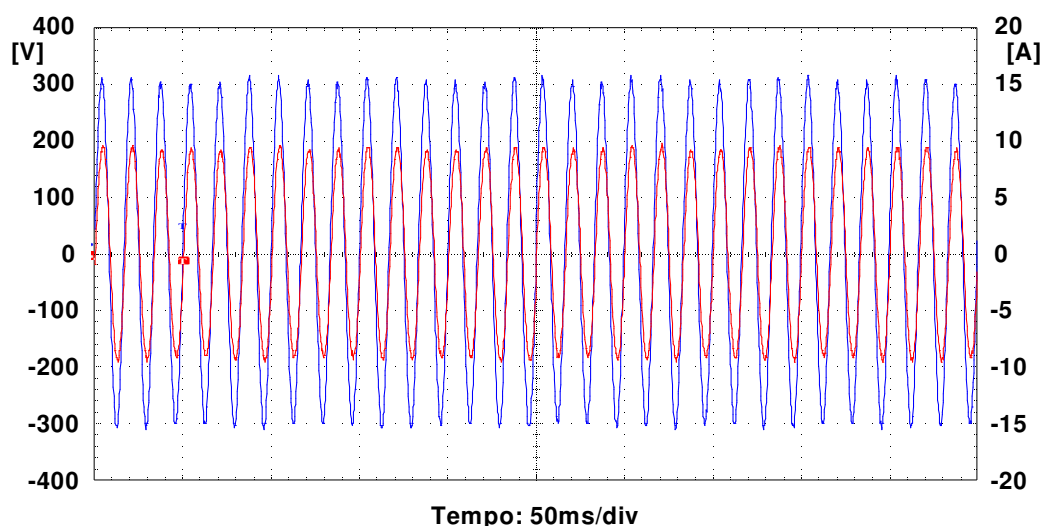


Figura 6.17 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 5 - Experimental.

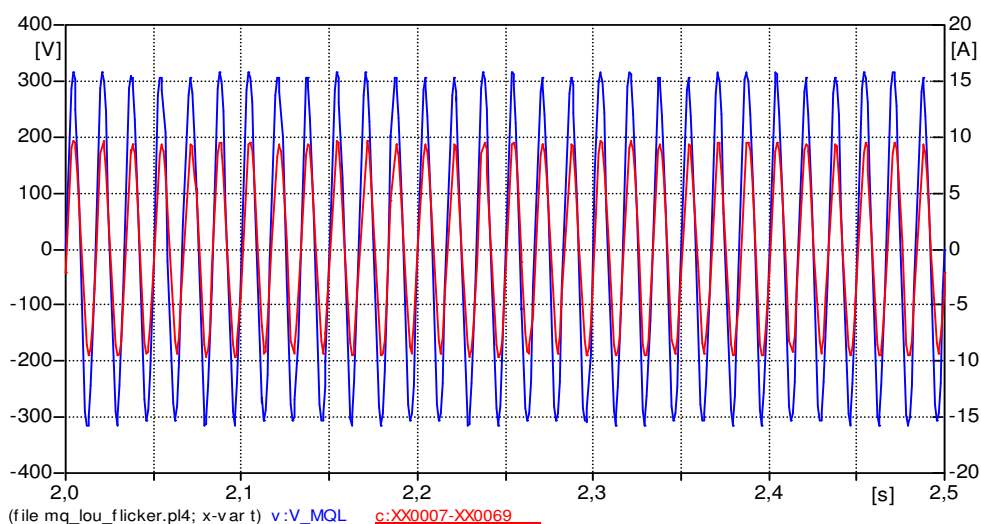


Figura 6.18 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 5 - Computacional.

Tabela 6.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 5 – Flutuação de Tensão.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	9,80 A	9,61 A	1,94 %

6.4.6 Caso 6: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão

As Figuras 6.19 e 6.20 mostram os oscilogramas da tensão aplicada e da corrente total consumida pela carga, para um DHT de 20%, contendo as mesmas componentes individuais já definidas para os demais casos.

As Figuras 6.21 e 6.22 ilustram os espectros harmônicos para os estudos laboratoriais e computacionais, respectivamente. No espectro experimental a componente de 3^a harmônica apresenta uma magnitude bem mais elevada do que a verificada no computacional. Essa diferença de magnitudes deve-se, basicamente, aos efeitos da saturação magnética que não foram inseridos na modelagem proposta. Contudo, as demais componentes apresentam uma boa correlação.

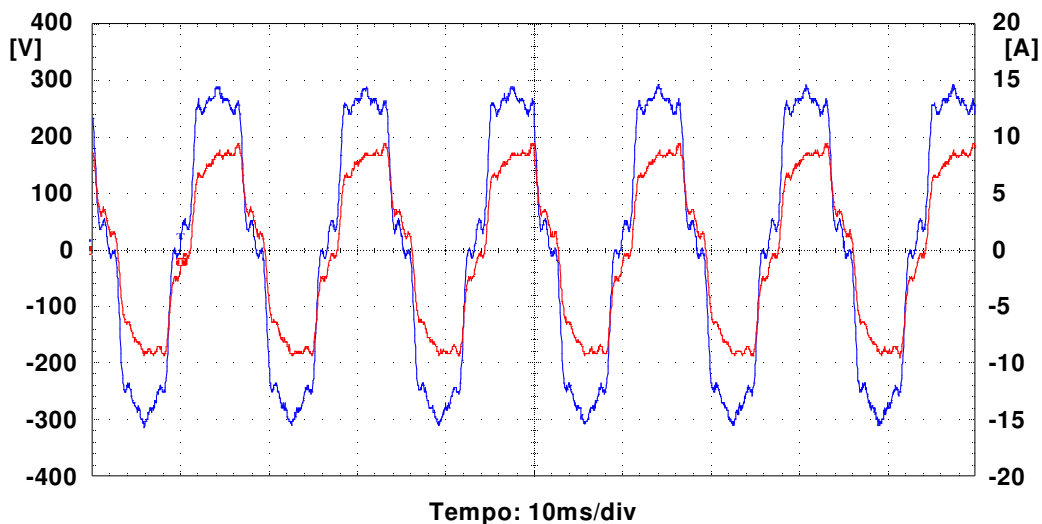


Figura 6.19 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 6 - Experimental.

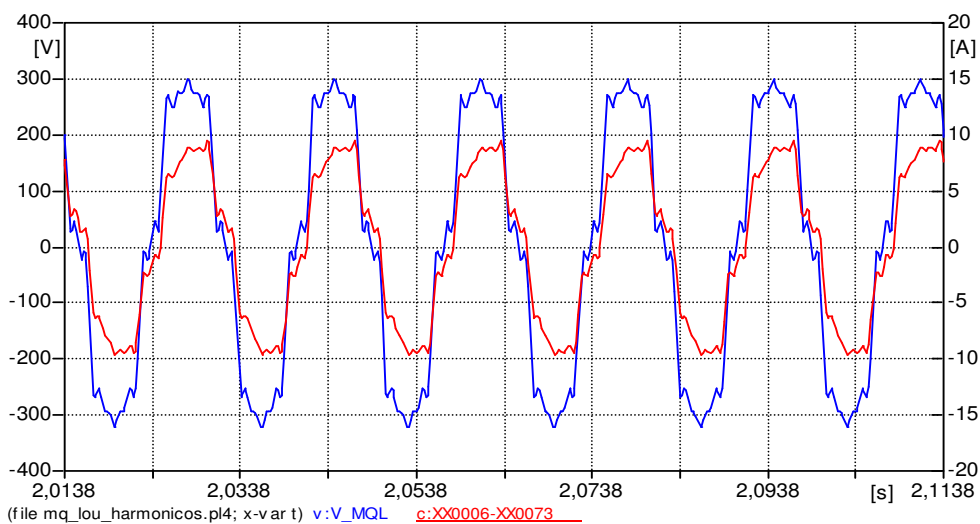
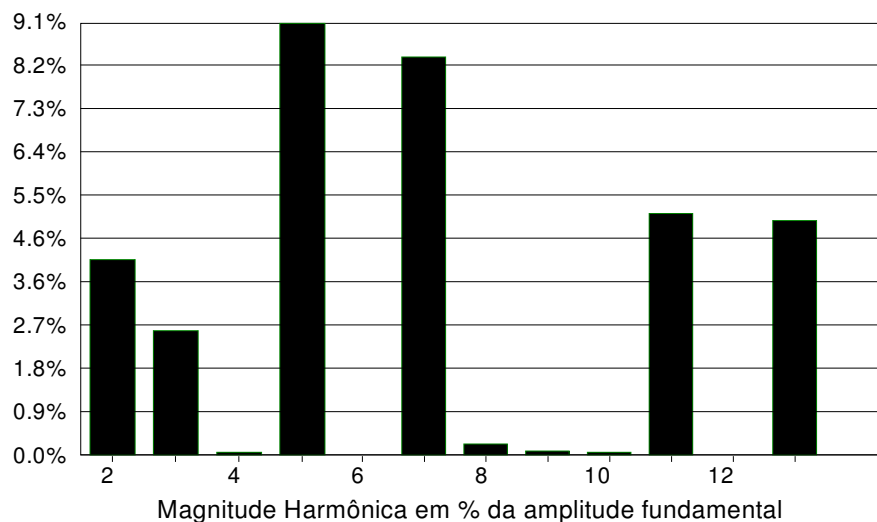
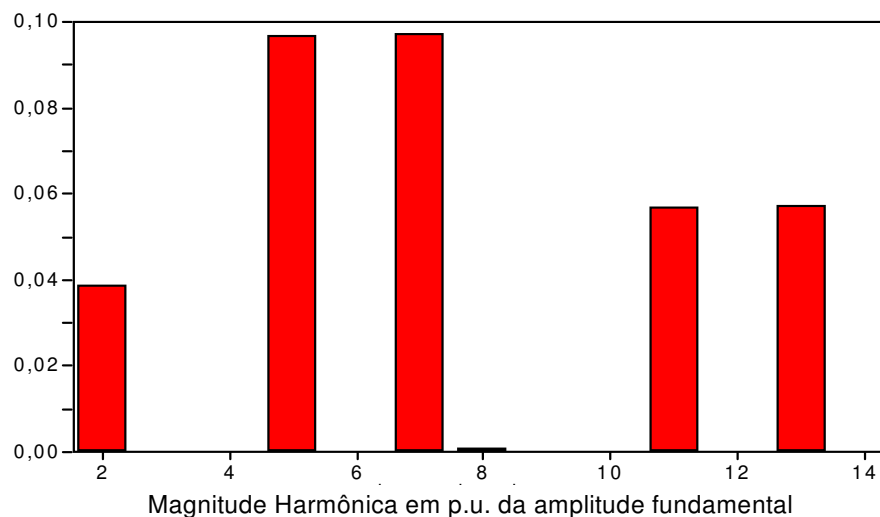


Figura 6.20 - Tensão de alimentação e corrente de entrada da lava louças. Caso 6 - Computacional.



**Figura 6.21 - Espectro harmônico da corrente de entrada do equipamento.
Caso 6 - Experimental.**



**Figura 6.22 - Espectro harmônico da corrente de entrada do equipamento.
Caso 6 - Computacional.**

A Tabela 6.9 destaca os valores de pico, eficaz e distorção harmônica total de corrente na entrada do equipamento, além dos valores individuais das harmônicas presentes na forma de onda da corrente.

Tabela 6.9 – Comparação das harmônicas entre os resultados experimentais e computacionais para o caso 6.

	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	ERRO
Corrente Pico	9,40 A	9,46 A	0,63 %
THDi	15,15 %	16,30 %	7,10 %
Ih fundamental	6,63 A	6,67 A	0,60 %
Ih 2 ^a	0,276 A	0,255 A	7,61 %
Ih 3 ^a	0,177 A	0,002 A	--
Ih 4 ^a	0,006 A	0,002 A	--
Ih 5 ^a	0,604 A	0,643 A	6,07 %
Ih 7 ^a	0,558 A	0,645 A	13,49 %
Ih 9 ^a	0,009 A	0,001 A	--
Ih 11 ^a	0,340 A	0,378 A	10,06 %
Ih 13 ^a	0,330 A	0,380 A	13,16 %

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As investigações realizadas permitem extrair as seguintes observações:

- Uma elevação de tensão aplicada ao equipamento não apresentou nenhum efeito significativo no seu desempenho. Também não se verificou incrementos de correntes em tempo algum durante o distúrbio. Pode-se perceber que a lava louças funciona como uma carga de impedância constante. Isto se deve ao fato do sistema de aquecimento, que basicamente é uma resistência elétrica, constituir-se na principal carga do presente neste equipamento;
- Afundamentos temporários de tensão também não causaram efeitos perceptíveis no funcionamento do equipamento. Com relação à forma de onda da corrente, como verificado no caso da elevação, nenhum incremento foi verificado. Novamente, percebe-se que a lava louças comporta-se como uma carga com impedância constante;

- Interrupções de tensão causaram um desligamento temporário do processo. Passado um tempo de aproximadamente 1,5 segundos o sistema retorna ao seu funcionamento normal. Durante este processo, não se verificou variações apreciáveis nas formas de onda da corrente;
- Flutuações de tensão nos níveis aplicados ao dispositivo em estudo também não produziram anormalidades que pudessem ser percebidas fisicamente. A flutuação de tensão causou uma pequena oscilação na corrente, contudo, os valores de pico destas correntes não foram muito significativos;
- Distorções harmônicas de tensão de 20 % causaram uma distorção em torno de 15 % de distorção harmônica na corrente. A magnitude desse valor e a presença característica de certas ordens harmônicas são características de cargas com alto fator de potência, como o verificado nesse equipamento. Com relação ao funcionamento do equipamento quando da aplicação desses harmônicos, não se verificou qualquer anormalidade no seu funcionamento;
- Novamente, como verificado na máquina de lavar roupa, as seleções das funções de programação são controladas por um circuito eletrônico. Para esse equipamento, segundo assistências técnicas autorizadas, o circuito eletrônico é o principal dispositivo a se danificar no presente produto. No caso computacional, esse circuito eletrônico foi implementado, levando em considerações as principais partes da placa eletrônica real. Não obstante a isto, destaca-se aqui a necessidade de maiores estudos a fim de melhorar o desempenho desta unidade.

Pode-se constatar que em praticamente todos os casos estudados, tanto no processo de lavagem como de centrifugação, verificou-se grande semelhança entre os resultados obtidos pelo método experimental e o computacional, permitindo dessa forma validar o modelo da lava louças implementado computacionalmente.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante a existência de comentários conclusivos ao término de cada um dos capítulos que compreendem esta dissertação, com vistas a oferecer uma visão mais ampla sobre as atividades desenvolvidas, apresenta-se, nesta unidade, uma síntese global das principais constatações e avanços obtidos por este trabalho de pesquisa.

O capítulo I apresentou, em termos gerais, a atualidade e importância do tema “Qualidade da Energia Elétrica”, focado na influência que a mesma tem nas características de operação de diversos equipamentos. Neste sentido, foram apresentados os principais trabalhos que relatam sobre o inter-relacionamento entre os distúrbios da rede elétrica e os impactos sobre os mais distintos equipamentos existentes em redes elétricas residenciais e comerciais e, de forma mais restrita, em algumas instalações industriais. Assim, após detido levantamento bibliográfico, ficou evidenciado o estado da arte sobre os estudos voltados para o desempenho, sensibilidade e suportabilidade de equipamentos. Isto posto, detectou-se as áreas de carência e estabeleceram-se os horizontes da presente dissertação, a qual passou a contemplar cinco tipos de produtos, a saber: refrigeradores domésticos, freezers domésticos, condicionadores de ar, máquinas de lavar roupas e lava louças. Também, a metodologia utilizada para os estudos foi detalhadamente apresentada. Encerrando o capítulo, foram descritas as contribuições deste trabalho e a estrutura completa da dissertação.

O capítulo II concentrou sua atenção, num primeiro momento, na busca de uma estratégia para a modelagem computacional para fins da representação de equipamentos refrigeradores domésticos e respectiva validação através da correlação entre os estudos teóricos e experimentais. Através da realização de ensaios sob distintas condições não ideais de suprimento, o modelo computacional proposto foi validado e os impactos sobre o funcionamento do equipamento foram devidamente verificados. De um modo geral, concluiu-se que os ensaios experimentais e computacionais realizados, sob condições de suprimento ideal e sob a ação de distúrbios, mostraram boa concordância em relação às grandezas observadas, fato este que ratifica o modelo implementado.

Os resultados obtidos tanto pelo método experimental, como pelo computacional, mostraram que o aparelho possui pouca sensibilidade e elevada suportabilidade à maioria dos distúrbios típicos, como: distorções harmônicas, elevações e afundamentos de tensão de curta duração, flutuações de tensão. O dispositivo mostrou-se, ainda, bastante tolerante a interrupções do fornecimento de energia, quando de curta duração. Exemplo da suportabilidade do dispositivo foi à aplicação de uma interrupção, com tensão nula e 7 ciclos de duração, sem que ocorresse o seu desligamento definitivo.

De modo similar ao anterior, o capítulo III enfocou a questão da modelagem computacional para fins da representação de freezers domésticos e respectiva validação através da comparação entre os resultados dos estudos teóricos e experimentais. Através de ensaios laboratoriais, devidamente comparados aos resultados computacionais, o modelo computacional proposto foi validado e os impactos sobre o funcionamento do equipamento devidamente verificados. De um modo geral todos os ensaios realizados conduziram a uma excelente correlação experimental versus computacional, fato este que permitiu validar a proposta de modelagem feita.

Mais uma vez pôde-se constatar uma grande robustez do freezer doméstico frente às condições não-ideais da rede de suprimento, assim como foi

verificado para o refrigerador. Para os distúrbios distorções harmônicas elevações e afundamentos de tensão de curta duração, flutuações de tensão, o equipamento apresentou baixa sensibilidade. Com relação à interrupção do fornecimento, isto é, tensão nula, o equipamento suportou fenômenos de até 25 ciclos, sem que ocorresse o seu desligamento definitivo.

O capítulo IV contemplou, tal como os anteriores, aspectos relacionados com a modelagem computacional. Desta feita, os condicionadores de ar foram alvos das investigações. Estudos de desempenho deste produto à luz de condições de suprimento mostraram, de modo geral, quer pelo método experimental quer pelo computacional, que o aparelho apresentou-se pouco sensível e com elevada suportabilidade à maioria dos distúrbios típicos, sem qualquer alteração funcional significativa. Estudos envolvendo interrupções do fornecimento não foram contemplados para este equipamento devido a limitações de potência impostas pela fonte programável.

O capítulo V foi direcionado à modelagem computacional das máquinas de lavar roupas. Para este produto os estudos experimentais e computacionais compreenderam a aplicação dos distúrbios de qualidade tanto no processo de lavagem como no processo de centrifugação. No processo de lavagem verificou-se uma grande robustez do sistema motriz, que fica constantemente num processo de partida. Para todos os distúrbios aplicados não se constatou nenhuma alteração no processo de lavagem. Para o processo de centrifugação, os distúrbios como distorções harmônicas, elevações de tensão de curta duração e flutuações de tensão não causaram, também, alterações significativas do processo. Contudo, interrupções de tensão, de qualquer tempo de duração, mostraram-se danosas ao equipamento, uma vez que, quando submetido a tais distúrbios, todo o processo é desligado. Passado algum tempo após o desligamento, o processo reinicia-se automaticamente.

É importante salientar que os processos desse equipamento são automatizados por um circuito eletrônico. Sendo este circuito, o principal componente com possibilidade de sofrer danos nas máquinas de lavar roupa.

O capítulo VI contemplou a modelagem computacional do último equipamento abordado nesta dissertação, uma lava louças. A metodologia para tal estudo foi semelhante à empregada para os demais equipamentos. Os resultados obtidos revelaram que os distúrbios como: distorções harmônicas, elevações de tensão de curta duração e flutuações de tensão, não causaram grandes alterações no funcionamento do equipamento. O mesmo não foi verificado para interrupções, com qualquer tempo de evento. Esses distúrbios, assim como verificado na máquina de lavar roupas, causaram um desligamento do processo por certo tempo. Após o qual, o equipamento restabeleceu seu funcionamento normal.

Novamente, como observado para as máquinas de lavar roupas, através de consultas feitas às oficinas de manutenção, constatou-se que a unidade mais vulnerável do produto corresponde a placa eletrônica, responsável pelo processo automático.

Uma observação merecedora de destaque neste momento está associada com o universo de produtos testados, o qual foi bastante restrito. De fato, apenas um tipo de cada produto foi modelado e ensaiado, o que conduz a uma cautela quanto à extensão dos resultados para todas as famílias de produtos similares. Naturalmente, em contraposição a esta ressalva, há de se considerar que as estruturas dos equipamentos analisados obedecem, via de regra, a uma filosofia comum. Isto sugere que os desempenhos obtidos possam ser aplicados a outros equipamentos, porém somente após um expressivo conjunto de ensaios tal assertiva poderá ser aplicada.

Um outro ponto merecedor de destaque está relacionado com o desenvolvimento das modelagens computacionais que foram validadas através de correspondentes ensaios experimentais. Apesar das simplificações impostas

aos modelos teóricos, ficou claro que, para a maioria dos ensaios e testes, as duas estratégias de simulação conduziram a desempenhos que, tanto qualitativa, como quantitativamente, se mostraram muito próximos comprovando, portanto, a fidelidade dos modelos propostos.

Além de nortear trabalhos destinados a subsidiar a análise de ressarcimento de danos por queima de equipamentos da linha branca, este trabalho apresentou, também, um compêndio de informações que podem contribuir como referência para concessionárias de energia, fabricantes e usuários de aparelhos eletroeletrônicos, com esclarecimentos que venham a beneficiar e adequar projetos e estratégias, no intuito de preservar a vida útil e a operação adequada destes equipamentos.

Mesmo diante dos avanços oferecidos por esta dissertação, os desenvolvimentos e discussões feitos ao longo deste trabalho deixaram lacunas a serem preenchidas. Desta forma, como sugestões para pesquisas futuras, podem ser destacadas:

- Aprimoramento do modelo matemático do compressor, de forma a melhor representar o equipamento real, incluindo as suas não linearidades;
- Estudos mais abrangentes envolvendo outros equipamentos similares, de maneira a possibilitar procedimentos estatísticos para a obtenção de curvas de sensibilidade genéricas;
- Investigações mais detalhadas sobre os circuitos eletrônicos dos equipamentos, principalmente, no que diz respeito a sensibilidade e/ou suportabilidade dos componentes eletrônicos empregados em tais circuitos;
- Extensão dos procedimentos para outros tipos de dispositivos residenciais, comerciais e industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dugan, Roger C.. et al, “Electrical Power Systems Quality”, McGraw Hill, 1996.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Ressarcimento de Danos em Equipamentos Elétricos Causados por Descargas Atmosféricas e Manobras”, Brasília, março de 2002.
- [3] Cornick, K. J., Li, H. Q., “Power Quality and Voltage Dips: Problem, Requirements, Responsibilities”, Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM 2000, pp 149 – 156, Hong Kong, Outubro 2000.
- [4] Reid, W. Edward, “Power Quality Issues – Standards Guidelines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, pp 625 – 632, May/June 1996.
- [5] PQTN Brief 39: “Ride-through Performance of Programmable Logic Controllers”, EPRI Power Electronics Applications Center, Knoxville, TN, november 1996.
- [6] Smith, J. C., Lamoree, J., Vinett, P., Duffy, T. And Klein, M., “The Impact of Voltage Sags on Industrial Plant Loads”, Int. Conf. Power Quality: End-use applications and perspectives (PQA-91), pp. 171 – 178.
- [7] IEEE “Recommended for Emergency and Stand-by Power Systems for Industrial and Commercial Applications”, Std. 446 IEEE Orange Book, 1995.
- [8] Ribeiro, T. N., “Uma Discussão dos Critérios e Normas Relativas à Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, PUC, Belo Horizonte – MG, agosto, 1998.
- [9] Sekine, Y., Yamamoto, T., Mori, S., Saito, N., Kurokawa, H., “Present State of Momentary Voltage Dip Interferences and the Countermeasure in Japan”. Inc. Conf. On Large Electric Networks (CIGRE), 34th Session 1992, Paris, France.

- [10] Anderson, Lisa M., Northeast Utilities, and Bowes, Kenth B., “The Effects of Power Line Disturbances on Consumer Eletronic Equipment”, IEEE Transation on Power Delivery, vol. 5, pp. 1062 – 1065, Apr. 1990.
- [11] Smith, Sthephen B. And Standler, Ronald B., “The Effects of Surges on Electronic Appliances”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 7, pp. 1275 – 1282, Jul. 1992.
- [12] Arseneau, R., Ouellette, M., The Effects of Supply Harmonics on the Performance of Compact Fluorescent Lamps”, IEEE Transation on Power Delivery, vol. 8, pp. 473 – 479, Apr. 1993.
- [13] Fuchs, E. F., Roesler, D. J. and Kovacs, K. P., Sensibility of Eletrical Appliances to Harmonics and Fractional harmonics of the Power Systems Voltage. Part: Television sets, Induction Wathour and Universal Machines”, IEEE Transation on Power Delivery, vol. PWRD-2,, pp. 1275 – 1282, Apr. 1987.
- [14] Santos, A. C. D., “Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, Uberlândia – MG, UFU, Dissertação de Mestrado – Setembro, 2001.
- [15] Carvalho, C. B., “Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, Uberlândia – MG, UFU, Dissertação de Mestrado, Julho, 2002..
- [16] Azevedo, A. C., “Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, Uberlândia – MG, UFU, Dissertação de Mestrado – Julho, 2002.
- [17] Magalhães, R. N. “Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia”, Uberlândia – MG, UFU, Dissertação de Mestrado – Julho, 2003.
- [18] Tavares, C. E. “Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos Diante de Distúrbios de Qualidade da Energia”, Uberlândia – MG, UFU, Dissertação de Mestrado – Maio, 2004.

- [19] A. L. S. Pacheco, “Desenvolvimento de Sistema para Medir a Resistência de Enrolamento em Motores de Compressores Energizados”, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis - SC, 2007.
- [20] D. W. M. Carmeis, “Os Efeitos da Diversidade de Tensões de Distribuição no Setor Elétrico Brasileiro. Estudo de Caso do Refrigerador Doméstico”, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas - SP, 2002.
- [21] ASHRAE, “Refrigeration Handbook”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 1998.
- [22] Krause, P. C. “Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-84, No. 11, pp. 1025-1037, September, 1965.
- [23] Sen, P. C., “Principles of Electrical Machines and Power Electronics”, Editora John Wiley & Sons.
- [24] Toro, V. D., “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, Editora Prentice Hall do Brasil.
- [25] Fitzgerald, A. E., Kingsley, Jr, Kusko, Alexander, “Máquinas Elétricas, Conversão Eletromecânica de Energia”.
- [26] IEC Std. 6100-4-11, Eletromagnetic Compatibility (EMC), part 4-11: Testing and Measurement Technics – Voltage dips, short interruptions and voltage immunity tes, Edition 1.1, 2001-03.
- [27] Needham, Joseph (1986). Science and Civilization: Volume 4, Physics and Physical Technology, Part 2, Mechanical Engineering. Taipei: Caves Books Ltd. Pages 99, 151, 233.
- [28] Mario Theriault, Great Maritime Inventions 1833-1950, Goose Lane, 2001, p. 28.
- [29] "Electric Washing Machine the Latest. Housewives can do Washing in one-third the Time," Des Moines Daily Capitol, November 12, 1904, p. 13.

- [30] William Howard Livens (23/10/1924). Improvements in apparatus for washing household crockery and the like. FR579765. UK Intellectual Property Office.
- [31] K. Makowski, “Determination of Performance Characteristics of a Single-Phase Shaded Pole Induction Motor by Circuit-Field Method”, Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements, Wroclaw University of Technology, 50-372 Wroclaw 51, Poland, 2002.
- [32] Manuais da Empresa Tecumseh do Brasil, São Carlos – SP, disponível em www.tecumseh.com.br.
- [33] Manuais da Empresa Embraco, Joinville – SC, disponível em www.embraco.com.br.
- [34] Manuais da Empresa WEG, disponível em www.weg.net/br.
- [35] Manuais da Empresa Metal Corte, disponível em: www.metalcorte.com.br/portal/manager/ba/arquivos/microacionamentosPOR.pdf.
- [36] Site Carrier, disponível em www.springer.com.br.
- [37] Site da Copel, disponível em: www.copelconforto.com/climatizacao

ANEXOS

ANEXO A

Template do Refrigerador Doméstico

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, quinta-feira 23, 2008
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6 .001
    500  1  1  1  1  0  0  1  0
MODELS
/MODELS
INPUT
MM0001 {v(XX0010)}
OUTPUT
  XX0008
  XX0031
MODEL REFRIG
COMMENT
#####
#                                     #
#           REFRIG - REFRIGERADOR DOMÉSTICO           #
#           Eng. IVANDRO ANTONIO BACCA - UBERLÂNDIA, JUNHO DE 2008 #
#                                     #
# Este modelo representa o equivalente elétrico de um refrigerador doméstico #
# que utiliza um motor de indução monofásico com relé PTC (PTCSIR). O modelo #
# desse motor foi concebido com base no modelo desenvolvido por Ana Cláudia #
# de Azevedo na dissertação "Desempenho de Refrigeradores no contexto da #
# qualidade da energia elétrica", UFU-julho 2002. #
#                                     #
#####
ENDCOMMENT
INPUT
  vinp                -- tensão eficaz aplicada ao motor, [V];
OUTPUT
  fcem                -- força contra-eletromotriz do motor, [V];
  rprot               -- sinal do relé de proteção geral;

```

DATA

----- parâmetros do motor -----

```

Pnom {dflt:0.12} -- potência nominal do motor,[cv];
rsa  {dflt:4.07} -- resist. enrolamento principal do estator,[Ohm];
xsa  {dflt:5.517} -- reat. enrolamento principal do estator,[Ohm];
rsb  {dflt:6.64} -- resist. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];
xsb  {dflt:3.52} -- reat. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];
rr   {dflt:4.07} -- resistência do rotor, por fase,[Ohm];
xr   {dflt:5.517} -- reatância do rotor, por fase,[Ohm];
xm   {dflt:200}  -- reatância de magnetização,[Ohm];
jm   {dflt:0.0006} -- momento de inércia do motor,[kg*m^2];
np   {dflt:2}   -- número de pólos do motor;
k0   {dflt:3}   -- perdas rot.,[%];

```

----- parâmetros da carga -----

```

Pc   {dflt:0.12} -- Potência nominal da carga, [cv];
x0   {dflt:0}   -- conj. carga constante, [%];
x1   {dflt:0.0065} -- conj. carga varia linearmente com a veloc.,[%];
x2   {dflt:0}   -- conj. carga varia com o quadrado da veloc.,[%];

```

CONST

```

freq {VAL:60} -- frequência nominal do motor,[Hz];

```

VAR

----- variáveis do motor -----

--%%-- # impedâncias

```

m      -- indut. mútua máxima entre estator e rotor;
lr     -- indut. dispersão do rotor;
lsa    -- indut. dispersão do enrol. principal do estator;
lsb    -- indut. dispersão do enrol. auxiliar do estator;
lsasa  -- indut. própria do enrol. principal do estator;
lsasb  -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsa  -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsb  -- indut. própria do enrol. auxiliar do estator;
lrArA  -- indut. própria do enrol. do rotor;
lrArB  -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrA  -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrB  -- indut. própria do enrolamento do rotor;
lsarA  -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsarB  -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsbrA  -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lsbrB  -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lrAsa  -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrAsb  -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrBsa  -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
lrBsb  -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;

```



```

-----
----- variáveis auxiliares -----
-----
c1          -- parcela do conjUgado eletromagnético;
c2          -- parcela do conjugado eletromagnético;
dflux_a     -- derivada do fluxo, flux_a;
dflux_b     -- derivada do fluxo, flux_b;
dflux_ra    -- derivada do fluxo, flux_ra;
dflux_rb    -- derivada do fluxo, flux_rb;
dvel_motor  -- derivada da velocidade do motor;
dteta       -- derivada do ângulo elétrico;
e1          -- força contra-eletromotriz;
v2          -- tensão ao quadrado;
iv2         -- integral da tensão ao quadrado;
K1          -- const. representa a atuação da proteção geral;
k2          -- const. representa a partida do motor;
k3          -- const. representa equalização prévia das pressões;
jmc         -- const. representa momento de inércia fictício conjunto;
TIMESTEP min:1E-5
DELAY CELLS(iv2):1/freq/timestep+ 1
INIT
t1:=0
t2:=0
t3:=0
t4:=0
isa:=0
isb:=0
ira:=0
irb:=0
teta:=0
n_rpm:=0
t_ptc:=0
itotal:=0
vel_eletr:=0
vel_motor:=0
histdef(e1):=0
histdef(c1):=0
histdef(c2):=0
histdef(iv2):=0
histdef(isa):=0
histdef(isb):=0
histdef(ira):=0
histdef(irb):=0
histdef(fcem):=0
histdef(teta):=0
histdef(Crot):=0
histdef(lsarA):=0
histdef(lsarB):=0
histdef(lsbrA):=0
histdef(lsbrB):=0

```

```

histdef(lrAsa):=0
histdef(lrAsb):=0
histdef(lrBsa):=0
histdef(lrBsb):=0
histdef(dteta):=0
histdef(n_rpm):=0
histdef(itotal):=0
histdef(flux_a):=0
histdef(flux_b):=0
histdef(flux_ra):=0
histdef(flux_rb):=0
histdef(dflux_a):=0
histdef(dflux_b):=0
histdef(dflux_ra):=0
histdef(dflux_rb):=0
histdef(vel_motor):=0
histdef(conj_eixo):=0
histdef(vel_eletr):=0
histdef(conj_elmag):=0
histdef(dvel_motor):=0
histdef(conj_carga):=0
histdef(integral(v2)):=0
histdef(integral(dteta)):=0
histdef(integral(dvel_motor)):=0
period:=recip(freq)

```

ENDINIT

EXEC

```

-----
----- equacionamento da carga -----
-----

```

```

ns:=(120*freq)/np
nn:=(2*pi*ns)/60
Tnom:=(Pnom*736)/nn
conj_carga:=(x0*Tnom)+(x1*Tnom*vel_motor)+(x2*Tnom*(vel_motor**2))

```

```

-----
----- equacionamento do motor -----
-----

```

```

-----
----- Parâmetros constantes -----
-----

```

```

n_motor:=(4*pi*freq)/np
krot:=((k0/100)*Pnom*736)/(n_motor*n_motor)
ws:=2*pi*freq
m:=xm/ws
lsa:=xsa/ws
lsb:=xsb/ws
lr:=xr/ws
lsasa:=m+lsa
lsasb:=0
lsbsa:=0

```

```

lsbsb:=m+lsb
lrArA:=m+lr
lrArB:=0
lrBrA:=0
lrBrB:=m+lr
-----
----- Tensão nominal aplicada ao motor -----
-----
v:=vinp
v2:=v*v
iv2:=integral(v2)
vrms:=sqrt((iv2-delay(iv2,period))/period)
-----
----- relé de proteção geral -----
-----
IF vrms = 0 THEN
    t1:=t
ENDIF
t1:=t1
IF vrms <> 0 AND t1 <= 0.1 THEN
    t2:=t
ENDIF
t2:=t2
IF t > t1 AND t1 >= 0.1 THEN
    t3:=t1-t2
ENDIF
t3:=t3
IF t3 > 0.155 THEN
    k1:=1
    t4:=t4+timestep
ELSE
    k1:=0
ENDIF
IF t4 >= 16 AND k1 = 1 THEN
    rprot:=0
ELSE
    rprot:=1
ENDIF
-----
----- relé PTC do enrolamento auxiliar -----
-----
t_ptc:=t_ptc+timestep
ptc1:=-2674.4*(t_ptc**6)+2248.9*(t_ptc**5)-749.2*(t_ptc**4)
ptc2:=132.5*(t_ptc**3)-18.9*(t_ptc**2)+0.0787*t_ptc+1
ptc:=ptc1+ptc2 {MIN:0}
IF ptc > 0.1 THEN
    k2:=0.0006
ELSE
    k2:=0
ENDIF

```



```

-----
----- variação da equalização das pressões -----
-----
IF ptc <= 0.1 AND t3 > 0 AND t3 <= 0.0334 THEN
    k3:=0.0001
ELSIF ptc <= 0.1 AND t3 > 0.0334 AND t3 <= 0.0667 THEN
    k3:=0.0003
ELSIF ptc <= 0.1 AND t3 > 0.0667 AND t3 <= 0.1000 THEN
    k3:=0.0005
ELSIF ptc <= 0.1 AND t3 > 0.1000 AND t3 <= 0.1334 THEN
    k3:=0.0007
ELSIF ptc <= 0.1 AND t3 > 0.1334 AND t3 <= 0.1667 THEN
    k3:=0.0009
ELSE
    k3:=0
ENDIF
jmc:=jm+k1+k2+k3
-----
----- Iteração para a obtenção dos parâmetros do motor -----
----- Método de Newton - Raphson -----
-----
COMBINE ITERATE AS case1
-----
----- Ângulo elétrico -----
-----
teta:=integral(dteta)
-----
----- indutâncias mútuas -----
-----
lsarA:=m*cos(teta)
lsarB:=-m*sin(teta)
lsbrA:=-m*sin(teta)
lsbrB:=-m*cos(teta)
lrAsa:=m*cos(teta)
lrAsb:=-m*sin(teta)
lrBsa:=-m*sin(teta)
lrBsb:=-m*cos(teta)
-----
----- Conj. eletromagnético -----
-----
c1:=isa*(-m*ira*sin(teta)-m*irb*cos(teta))
c2:=isb*(m*irb*sin(teta)-m*ira*cos(teta))
conj_elmag:=(np)*(c1+c2)
Crot:=krot*vel_motor
-----
----- velocidade elétrica e mecânica -----
-----
dvel_motor:=(1/(jmc))*(conj_elmag-conj_carga-Crot)
vel_motor:=integral(dvel_motor)
vel_eletr:=(vel_motor*np)/2

```

```

conj_eixo:=conj_elmag-Crot
n_rpm:=(vel_motor)*30/pi
dteta:=vel_eletr

-----
----- Correntes do estator -----
-----
isa:=((v-dflux_a)/rsa)
isb:(((v-dflux_b)/rsb)*ptc)
itotal:=isa+isb

-----
----- Correntes do rotor -----
-----
ira:=-dflux_ra/rr
irb:=-dflux_rb/rr

-----
----- derivadas dos fluxos -----
-----
dflux_a:=deriv(flux_a)
dflux_b:=deriv(flux_b)
dflux_ra:=deriv(flux_ra)
dflux_rb:=deriv(flux_rb)

-----
----- fluxos -----
-----
flux_a:=lsasa*isa+lsarA*ira+lsarB*irb
flux_b:=lsbsb*isb+lsbrA*ira+lsbrB*irb
flux_ra:=lrAsa*isa+lrAsb*isb+lrArA*ira
flux_rb:=lrBsa*isa+lrBsb*isb+lrBrB*irb
ENDCOMBINE

-----
----- força contra-eletromotriz -----
-----
e1:=v-(1000*itotal)
fcem:=predval(e1,t+ timestep)
ENDEXEC
ENDMODEL
RECORD
REFRIG.conj_elmag      AS    c_elmg
REFRIG.conj_carga     AS    c_carg
REFRIG.conj_eixo      AS    c_eixo
REFRIG.vel_motor      AS    v_mot
REFRIG.n_rpm          AS    n_rpm
USE REFRIG AS REFRIG
INPUT
vinp:= MM0001
DATA
Pnom:= 0.12
rsa:= 4.07
xsa:= 5.517
rsb:= 6.64

```

```

xsb:= 3.52
rr:= 4.07
xr:= 5.517
xm:= 200.
jm:= 6.E-4
np:= 2.
k0:= 3.
Pc:= 0.12
x0:= 0.0
x1:= 0.0065
x2:= 0.0
OUTPUT
XX0008:=fcem
XX0031:=rprot
ENDUSE
ENDMODELS
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
XX0008 1.E20 0
XX0011XX0008 1.E3 0
TRANSFORMER TX0001 1.E7 0
9999
1XX0039XX0041 1.E-8 1.E-8 1.
2XX0035 1.E-8 1.E-8 1.
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
XX0010XX0011 MEASURING 0
13XX0035XX0010 XX0031 0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
60XX0008 0 10.
/OUTPUT
XX0035
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

ANEXO B

Template do Freezer Doméstico

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, quinta-feira 23, 2008
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6 .001
    500  1  1  1  1  0  0  1  0
MODELS
/MODELS
INPUT
MM0001 {v(XX0010)}
OUTPUT
  XX0008
  XX0031
MODEL FREEZER
COMMENT
#####
#
#          FREEZER - FREEZER DOMÉSTICO
#          Eng. IVANDRO ANTONIO BACCA - UBERLÂNDIA, JUNHO DE 2008
#
# Este modelo representa o equivalente elétrico de um freezer doméstico
# que utiliza um motor de indução monofásico com relé de corrente (RSIR).
# O modelo desse motor foi concebido com base no modelo desenvolvido por
# Ana Cláudia de Azevedo na dissertação "Desempenho de refrigeradores no
# contexto da qualidade da energia elétrica",UFU-julho 2002.
#
#####
ENDCOMMENT
INPUT
  vinp                -- tensão fase-fase aplicada ao motor, [V];
OUTPUT
  fcem                -- força contra-eletromotriz do motor, [V];
  rprot               -- sinal do relé de proteção geral;
DATA
-----
----- parâmetros do motor -----
-----
Pnom {dflt:0.203} -- potência nominal do motor, [cv];
rsa  {dflt:10.7}  -- resist. enrolamento principal do estator,[Ohm];
xsa  {dflt:11.5}  -- reat. enrolamento principal do estator,[Ohm];
rsb  {dflt:32}    -- resist. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];

```

```

xsb  {dflt:23}    -- reat. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];
rr   {dflt:10.6}  -- resistência do rotor, por fase, [Ohm];
xr   {dflt:11.5}  -- reatância do rotor, por fase, [Ohm];
xm   {dflt:420}   -- reatância de magnetização, [Ohm];
jm   {dflt:0.001} -- momento de inércia do motor, [kg*m^2];
np   {dflt:2}    -- número de pólos do motor
k0   {dflt:3}    -- perdas rot., [%];
-----
----- parâmetros da carga -----
-----
Pc   {dflt:0.203} -- Potência nominal da carga, [cv];
x0   {dflt:0}    -- conj. carga constante, [%];
x1   {dflt:0.0059} -- conj. carga varia linearmente com a veloc.,[%];
x2   {dflt:0}    -- conj. carga varia com o quadrado da veloc.,[%];
CONST
freq {VAL:60}    -- frequência nominal do motor,[Hz];
VAR
-----
----- variáveis do motor -----
-----
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # impedâncias
m    -- indut. mútua máxima entre estator e rotor;
lr   -- indut. dispersão do rotor;
lsa  -- indut. dispersão do enrol. principal do estator;
lsb  -- indut. dispersão do enrol. auxiliar do estator;
lsasa -- indut. própria do enrol. principal do estator;
lsasb -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsa -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsb -- indut. própria do enrol. auxiliar do estator;
lrArA -- indut. própria do enrol. do rotor;
lrArB -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrA -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrB -- indut. própria do enrolamento do rotor;
lsarA -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsarB -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsbrA -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lsbrB -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lrAsa -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrAsb -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrBsa -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
lrBsb -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # correntes
isa  -- corrente do enrol. principal do estator, [A];
isb  -- corrente do enrol. auxiliar do estator, [A];
ira  -- corrente do enrol. principal do rotor, [A];
irb  -- corrente do enrol. auxiliar do rotor, [A];
itotal -- corrente total, fase a + b, [A];
irms  -- corrente eficaz verdadeira da corrente total,[A];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # tensões
v    -- tensão eficaz fase-fase aplicada ao motor, [V];

```

```

vrms          -- tensão rms, [V];
fcem          -- força contra-eletromotriz do motor, [V];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # conjugados
conj_elmag    -- conjugado eletromagnético, [Nm];
conj_carga    -- conjugado da carga, [Nm];
conj_eixo     -- conjugado do eixo, [Nm];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # velocidades
ws           -- velocidade angular, [rad/s];
teta         -- ângulo espacial entre as fmm do estator e rotor, [rad];
vel_motor     -- velocidade angular mecânica, [rad/s];
vel_eletr     -- velocidade angular elétrica, [rad/s];
n_rpm        -- velocidade nominal do motor, [rpm];
n_motor      -- velocidade nominal do motor, [rad/s];
ns           -- velocidade síncrona do motor, [rpm];
jmc          -- momento de inércia total do conjunto, [kgm^2];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # fluxos
flux_a       -- fluxo do enrol. principal do estator, [Wb];
flux_b       -- fluxo do enrol. auxiliar do estator, [Wb];
flux_ra      -- fluxo do enrol. principal do rotor, [Wb];
flux_rb      -- fluxo do enrol. auxiliar do rotor, [Wb];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # perdas
Crot         -- perdas rotacionais, [W];
krot         -- perdas rotacionais, [W];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # tempo
period       -- período, [s];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # relé térmico
rprot        -- relé de proteção total do compressor;
t1           -- tempo inicia da interrupção;
t2           -- tempo final da interrupção;
t3           -- diferença entre os tempos t1 e t2;
t4           -- tempo de atuação do relé geral;
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # relé de partida
sw           -- relé de corrente;

-----
----- variáveis da carga -----
-----
conj_carga    -- conjugado nominal da carga, [Nm];
nn           -- velocidade nominal da carga, [rad/s];
Tnom         -- variável auxiliar do conjugado nominal da carga;
jc           -- momento de inércia da carga, [kgm^2];
-----
----- variáveis auxiliares -----
-----
c1           -- parcela do conjUgado eletromagnético;
c2           -- parcela do conjugado eletromagnético;
v2           -- tensão ao quadrado;
iv2          -- integral da tensão ao quadrado;
dflux_a      -- derivada do fluxo, flux_a;
dflux_b      -- derivada do fluxo, flux_b;
dflux_ra     -- derivada do fluxo, flux_ra;

```

```
dflux_rb      -- derivada do fluxo, flux_rb;
dvel_motor    -- derivada da velocidade do motor;
dteta         -- derivada do ângulo elétrico;
e1            -- força contra-eletromotriz;
K1            -- const. representa atuação da proteção geral;
k2            -- const. representa partida do motor;
k3            -- const. representa equalização prévia das pressões;
i2            -- quadrado das correntes;
ii2           -- integral do quadrado das correntes;
TIMESTEP min:1E-5
DELAY CELLS(ii2):1/freq/timestep+ 1
      CELLS(iv2):1/freq/timestep+ 1
INIT
  t1:=0
  t2:=0
  t3:=0
  t4:=0
  sw:=0
  isa:=0
  isb:=0
  ira:=0
  irb:=0
  teta:=0
  n_rpm:=0
  itotal:=0
  vel_eletr:=0
  vel_motor:=0
  histdef(e1):=0
  histdef(c1):=0
  histdef(c2):=0
  histdef(isa):=0
  histdef(isb):=0
  histdef(ira):=0
  histdef(irb):=0
  histdef(iv2):=0
  histdef(ii2):=0
  histdef(fcem):=0
  histdef(teta):=0
  histdef(Crot):=0
  histdef(lsarA):=0
  histdef(lsarB):=0
  histdef(lsbrA):=0
  histdef(lsbrB):=0
  histdef(lrAsa):=0
  histdef(lrAsb):=0
  histdef(lrBsa):=0
  histdef(lrBsb):=0
  histdef(dteta):=0
  histdef(n_rpm):=0
  histdef(itotal):=0
```

```

histdef(flux_a):=0
histdef(flux_b):=0
histdef(flux_ra):=0
histdef(flux_rb):=0
histdef(dflux_a):=0
histdef(dflux_b):=0
histdef(dflux_ra):=0
histdef(dflux_rb):=0
histdef(vel_motor):=0
histdef(conj_eixo):=0
histdef(vel_eletr):=0
histdef(conj_elmag):=0
histdef(dvel_motor):=0
histdef(conj_carga):=0
histdef(integral(i2)):=0
histdef(integral(v2)):=0
histdef(integral(dteta)):=0
histdef(integral(dvel_motor)):=0
period:=recip(freq)

```

ENDINIT

EXEC

----- equacionamento do motor - parâmetros constantes -----

```

ns:=(120*freq)/np
n_motor:=(4*pi*freq)/np
krot:=((k0/100)*Pnom*736)/(n_motor*n_motor)
ws:=2*pi*freq
m:=xm/ws
lsa:=xsa/ws
lsb:=xsb/ws
lr:=xr/ws
lsasa:=m+lsa
lsasb:=0
lsbsa:=0
lsbsb:=m+lsb
lrArA:=m+lr
lrArB:=0
lrBrA:=0
lrBrB:=m+lr

```

----- equacionamento da carga -----

```

nn:=(2*pi*ns)/60
Tnom:=(Pnom*736)/nn
conj_carga:=(x0*Tnom)+(x1*Tnom*vel_motor)+(x2*Tnom*(vel_motor**2))

```


----- equacionamento do motor -----

----- Tensão nominal aplicada ao motor -----

```
v:=vinp
v2:=v*v
iv2:=integral(v2)
vrms:=sqrt((iv2-delay(iv2,period))/period)
```

----- relé de proteção geral -----

```
IF vrms = 0 THEN
    t1:=t
ENDIF
t1:=t1
IF vrms <> 0 AND t1 <= 0.1 THEN
    t2:=t
ENDIF
t2:=t2
IF t > t1 AND t1 >= 0.1 THEN
    t3:=t1-t2
ENDIF
t3:=t3
IF t3 > 0.405 THEN
    k1:=1
    t4:=t4+timestep
ELSE
    k1:=0
ENDIF
IF t4 >= 5 AND k1 = 1 THEN
    rprot:=0
ELSE
    rprot:=1
ENDIF
```

----- relé de partida do enrolamento auxiliar -----

```
i2:=isa*isa
ii2:=integral(i2)
irms:=sqrt((ii2-delay(ii2,period))/period)
IF irms >= 6.7 THEN
    sw:=1
ENDIF
sw:=sw
IF irms <= 6.3 THEN
    sw:=0
ENDIF
sw:=sw
```

```

-----
----- variação da equalização das pressões -----
-----
IF sw = 1 AND t <= 0.45 THEN
    k2:=0.00285
ELSE
    k2:=0
ENDIF
IF sw = 1 AND t3 >= 0.00001 AND t3 < 0.1667 THEN
    k3:=0.0
ELSIF sw = 1 AND t3 >= 0.1667 AND t3 < 0.2505 THEN
    k3:=0.00095
ELSIF sw = 1 AND t3 >= 0.2500 THEN
    k3:=0.001
ELSE
    k3:=0
ENDIF
jmc:=jm+k1+k2+K3
-----
----- Iteração para a obtenção dos parâmetros do motor --
----- Métddo de Newotn - Raphson -----
-----
COMBINE ITERATE {500} AS case1
-----
----- Ângulo elétrico -----
-----
    teta:=integral(dteta)
-----
----- indutâncias mútuas -----
-----
lsarA:=m*cos(teta)
lsarB:=-m*sin(teta)
lsbrA:=-m*sin(teta)
lsbrB:=-m*cos(teta)
lrAsa:=m*cos(teta)
lrAsb:=-m*sin(teta)
lrBsa:=-m*sin(teta)
lrBsb:=-m*cos(teta)
-----
----- Conj. eletromagnético -----
-----
    c1:=isa*(-m*ira*sin(teta)-m*irb*cos(teta))
    c2:=isb*(+m*irb*sin(teta)-m*ira*cos(teta))
    conj_elmag:=(np)*(c1+c2)
    Crot:=krot*vel_motor
-----
----- velocidade elétrica e mecânica-----
-----
    dvel_motor:=(1/(jmc))*(conj_elmag-conj_carga-Crot)
    vel_motor:=integral(dvel_motor)

```

```

    vel_eletr:=(vel_motor*np)/2
    conj_eixo:=conj_elmag-Crot
    n_rpm:=(vel_motor)*30/pi
    dteta:=vel_eletr

-----
----- Correntes do estator -----
-----
    isa:=((v-dflux_a)/rsa)
    isb:=(((v-dflux_b)/rsb)*sw)
    itotal:=isa+isb

-----
----- Correntes do rotor -----
-----
    ira:=-dflux_ra/rr
    irb:=-dflux_rb/rr

-----
----- derivadas dos fluxos -----
-----
    dflux_a:=deriv(flux_a)
    dflux_b:=deriv(flux_b)
    dflux_ra:=deriv(flux_ra)
    dflux_rb:=deriv(flux_rb)

-----
----- fluxos -----
-----
    flux_a:=lsasa*isa+lsarA*ira+lsarB*irb
    flux_b:=lsbsb*isb+lsbrA*ira+lsbrB*irb
    flux_ra:=lrArA*ira+lrAsb*isb+lrAsa*isa
    flux_rb:=lrBrB*irb+lrBsb*isb+lrBsa*isa
    ENDCOMBINE

-----
----- força contra-eletromotriz -----
-----
    e1:=v-(1000*itotal)
    fcem:=predval(e1,t+ timestep)
ENDEXEC
ENDMODEL
RECORD
    FREEZER.conj_elmag      AS    c_elmg
    FREEZER.conj_carga      AS    c_carg
    FREEZER.conj_eixo       AS    c_eixo
    FREEZER.vel_motor       AS    v_mot
    FREEZER.n_rpm           AS    n_rpm
USE FREEZER AS FREEZER
INPUT
    vinp:= MM0001
DATA
    Pnom:= 0.203
    rsa:= 10.7
    xsa:= 11.5

```


ANEXO C

Template do Condicionador de Ar

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, quinta-feira 23, 2008
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6 .001
  500 1 1 1 1 0 0 1 0
MODELS
/MODELS
INPUT
MM0001 {v(XX0019)}
OUTPUT
  XX0012
MODEL COND_AR
COMMENT
#####
# #
#          COND_AR - CONDICIONADOR DE AR #
#          Eng. IVANDRO ANTONIO BACCA - UBERLÂNDIA, JUNHO DE 2008 #
# #
# Este modelo representa o equivalente elétrico de um condicionador de ar #
# que utiliza um motor de indução monofásico com capacitor permanente e #
# capacitor de partida (CSR). O modelo desse motor de indução monofásico #
# foi concebido com base no modelo desenvolvido Bismark Castilho Carvalho #
# na dissertação "Desempenho de aparelho condicionador de ar no contexto #
# da qualidade da energia elétrica", UFU-julho 2002. #
# #
#####
ENDCOMMENT
INPUT
  vinp          -- tensão fase-fase aplicada ao motor [V]
OUTPUT
  fcem          -- força contra-eletromotriz, [V];
DATA
-----
----- parâmetros do motor -----
-----
Pnom {dflt:1.23} -- potência nominal do motor, [cv];
rsa  {dflt:3.86} -- resist. enrolamento principal do estator,[Ohm];
xsa  {dflt:5.86} -- reat. enrolamento principal do estator,[Ohm];
rsb  {dflt:11.49} -- resist. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];
xsb  {dflt:9.49} -- reat. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];

```

```

rr      {dflt:3.86}  -- resistência do rotor, por fase, [Ohm];
xr      {dflt:4.5}   -- reatância do rotor, por fase, [Ohm];
xm      {dflt:92}    -- reatância de magnetização, [Ohms];
jmc     {dflt:0.00095} -- momento de inércia do motor + carga, [kg.m^2];
np      {dflt:2}     -- número de pólos do motor;
k0      {dflt:3}     -- perdas rot., [%];
ccap    {dflt:23}    -- capacitor permanente, [uF];

-----
----- parâmetros da carga -----
-----
Pc      {dflt:1.23}  -- Potência nominal da carga, [cv];
x0      {dflt:0}     -- conj. carga constante,;
x1      {dflt:0.0053} -- conj. carga varia linearmente com a veloc.;
x2      {dflt:0}     -- conj. carga varia com o quadrado da veloc.;
CONST
freq    {VAL:60}    -- frequência nominal do motor,[Hz];
cap_e   {VAL:20E-6} -- capacitor de partida, [F];
VAR
-----
----- variáveis do motor -----
-----
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # impedâncias
lsa     -- indut. dispersão do enrol. principal do estator;
lsb     -- indut. dispersão do enrol. auxiliar do estator;
lr      -- indut. dispersão do rotor;
m       -- indut. mútua máxima entre estator e rotor;
lsasa   -- indut. própria do enrol. principal do estator;
lsasb   -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsa   -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsb   -- indut. própria do enrol. auxiliar do estator;
lrArA   -- indut. própria do enrol. do rotor;
lrArB   -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrA   -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrB   -- indut. própria do enrolamento do rotor;
lsarA   -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsarB   -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsbrA   -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lsbrB   -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lrAsa   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrAsb   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrBsa   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
lrBsb   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # correntes
isa     -- corrente do enrol. principal do estator, [A];
isb     -- corrente do enrol. auxiliar do estator, [A];
ira     -- corrente do enrol. principal do rotor, [A];
irb     -- corrente do enrol. auxiliar do rotor, [A];
itotal  -- corrente total, fase a + b, [A];

```



```
icap_p      -- corrente do capacitor de poliester;
vcap_p      -- tensão do capacitor de poliester;
ch          -- chave do relé voltimétrico.
TIMESTEP MIN:1E-5
DELAY CELLS(iv2):1/freq/timestep+ 1
INIT
ch:=0
isa:=0
isb:=0
ira:=0
irb:=0
vref:=0
teta:=0
icap_e:=0
icap_p:=0
flux_a:=0
flux_b:=0
flux_ra:=0
flux_rb:=0
dflux_a:=0
dflux_b:=0
dflux_ra:=0
dflux_rb:=0
vel_eletr:=0
vel_motor:=0
histdef(v):=0
histdef(c1):=0
histdef(c2):=0
histdef(e1):=0
integral(v2):=0
histdef(iv2):=0
histdef(isa):=0
histdef(isb):=0
histdef(ira):=0
histdef(irb):=0
histdef(iisb):=0
histdef(fcem):=0
histdef(teta):=0
histdef(Crot):=0
histdef(vref):=0
histdef(vcap):=0
histdef(lsarA):=0
histdef(lsarB):=0
histdef(lsbrA):=0
histdef(lsbrB):=0
histdef(lrAsa):=0
histdef(lrAsb):=0
histdef(lrBsa):=0
histdef(lrBsb):=0
histdef(dteta):=0
```



```

histdef(n_rpm):=0
histdef(itotal):=0
histdef(flux_a):=0
histdef(flux_b):=0
histdef(icap_p):=0
histdef(icap_e):=0
histdef(flux_ra):=0
histdef(flux_rb):=0
histdef(dflux_a):=0
histdef(dflux_b):=0
histdef(dflux_ra):=0
histdef(dflux_rb):=0
histdef(conj_eixo):=0
histdef(vel_eletr):=0
histdef(vel_motor):=0
histdef(conj_carga):=0
histdef(conj_elmag):=0
histdef(dvel_motor):=0
histdef(integral(v2)):=0
histdef(integral(dteta)):=0
histdef(integral(icap_p)):=0
histdef(integral(dvel_motor)):=0
period:=recip(freq)

```

ENDINIT

EXEC

----- relé voltimétrico -----

```

v2:=vref*vref
iv2:=integral(v2)
vref_rms:=sqrt((iv2-delay(iv2,period))/period)
IF vref_rms >= 168 THEN
    ch:=1
ENDIF
ch:=ch
IF vref_rms <= 65 THEN
    ch:=0
ENDIF
ch:=ch

```

----- equacionamento do motor - parâmetros constantes -----

```

ns:=(120*freq)/np
n_motor:=(2*pi*((120*freq)/np))/60
krot:=(k0/100)*Pnom*736/(n_motor*n_motor)
ws:=2*pi*freq
m:=xm/ws
lsa:=xsa/ws
lsb:=xsb/ws
lr:=xr/ws

```

```

lsasa:=m+lsa
lsasb:=0
lsbsa:=0
lsbsb:=m+lsb
lrArA:=m+lr
lrArB:=0
lrBrA:=0
lrBrB:=m+lr

```

----- equacionamento da carga -----

```

nn:=(2*pi*ns)/60
Tnom:=(Pnom*736)/nn
conj_carga:=(x0*Tnom)+(x1*Tnom*vel_motor)+(x2*Tnom*(vel_motor**2))

```

----- equacionamento do motor -----

----- Tensão nominal aplicada ao motor -----

```
v:=vinp
```

----- Iteração para a obtenção dos parâmetros do motor --
----- Método de Newton - Raphson -----

COMBINE ITERATE AS case 1

----- Ângulo elétrico -----

```
teta:=integral(dteta)
```

----- indutâncias mútuas -----

```

lsarA:=m*cos(teta)
lsarB:=m*sin(teta)
lsbrA:=-m*sin(teta)
lsbrB:=m*cos(teta)
lrAsa:=m*cos(teta)
lrAsb:=-m*sin(teta)
lrBsa:=m*sin(teta)
lrBsb:=m*cos(teta)

```

----- Conj. eletromagnético -----

```

c1:=isa*(-m*ira*sin(teta)+m*irb*cos(teta))
c2:=isb*(-m*irb*sin(teta)-m*ira*cos(teta))
conj_elmag:=(np)*(c1+c2)
Crot:=krot*vel_motor

```

```

-----
----- velocidade elétrica e mecânica-----
-----
dvel_motor:=((1/(jmc))*(conj_elmag-conj_carga-Crot))
vel_motor:=integral(dvel_motor)
vel_eletr:=(vel_motor*np)/2
conj_eixo:=conj_elmag-Crot
n_rpm:=((vel_motor)*30/pi)
dteta:=vel_eletr
-----
----- tensão no capacitor-----
-----
vcap:=((1/(ccap*1E-6))*(iisb))
vref:=itotal*15
icap_e:=cap_e*deriv(vref)*ch
icap_p:=isb-icap_e
iisb:=integral(icap_p)
-----
----- Correntes do estator -----
-----
isa:=((v-(dflux_a))/rsa)+0.5*sin(2*pi*2.4*t)
isb:=((v-(vcap+dflux_b))/rsb)
itotal:=(isa+isb)
-----
----- Correntes do rotor -----
-----
ira:=-dflux_ra/rr
irb:=-dflux_rb/rr
-----
----- derivadas dos fluxos -----
-----
dflux_a:=deriv(flux_a)
dflux_b:=deriv(flux_b)
dflux_ra:=deriv(flux_ra)
dflux_rb:=deriv(flux_rb)
-----
----- fluxos -----
-----
flux_a:=lsasa*isa+lsarA*ira+lsarB*irb
flux_b:=lsbsb*isb+lsbrA*ira+lsbrB*irb
flux_ra:=lrAsa*isa+lrAsb*isb+lrArA*ira
flux_rb:=lrBsa*isa+lrBsb*isb+lrBrB*irb
ENDCOMBINE
-----
----- força contra-eletromotriz -----
-----
e1:=v-(1000*itotal)
fcem:=predval(e1,t+ timestep)
ENDEXEC
ENDMODEL

```


XX0019
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

ANEXO D

Template da Máquina de Lavar Roupas

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, quinta-feira 23, 2008
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6 .001
    500  1  1  1  1  0  0  1  0
MODELS
/MODELS
INPUT
MM0001 {v(XX0077)}
OUTPUT
  XX0029
MODEL MQ_ROUPA
COMMENT
#####
#
#           MQ_ROUPA - MÁQUINA DE LAVAR ROUPA
#           Eng. IVÂNDRO ANTONIO BACCA - UBERLÂNDIA, JUNHO DE 2008
#
# Este modelo representa o equivalente elétrico de uma máquina de lavar
# roupa que utiliza um motor de indução monofásico com capacitor permanente
# (PSC). O modelo desse motor de indução monofásico foi concebido com base
# no modelo desenvolvido Bismark Castilho Carvalho na dissertação
# "Desempenho de aparelho condicionador de ar no contexto da qualidade da
# energia elétrica", UFU-julho 2002.
#
#####
ENDCOMMENT
INPUT
  vinp                -- tensão fase-fase aplicada ao motor [V]
OUTPUT
  fcem                -- força contra-eletromotriz, [V];
DATA
-----
----- parâmetros do motor -----
-----
Pnom {dflt:0.25} -- potência nominal do motor, [cv];
rsa  {dflt:7.12} -- resist. enrolamento principal do estator,[Ohm];
xsa  {dflt:5.65} -- reat. enrolamento principal do estator,[Ohm];
rsb  {dflt:7.12} -- resist. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];
xsb  {dflt:5.65} -- reat. enrolamento auxiliar do estator,[Ohm];

```

```

rr      {dflt:7.12}  -- resistência do rotor, por fase, [Ohm];
xr      {dflt:5.65}  -- reatância do rotor, por fase, [Ohm];
xm      {dflt:60}    -- reatância de magnetização, [Ohms];
jm      {dflt:0.002} -- momento de inércia do motor, [kg.m^2];
np      {dflt:4}     -- número de pólos do motor;
k0      {dflt:3}     -- perdas rot., [%];
ccap    {dflt:29}    -- capacitor de partida, [uF];

-----
----- parâmetros da carga -----
-----
proces  {dflt:1}     -- processo da máquina, 1=lavagem, 2=centrifugação
Pc      {dflt:0.25}  -- Potência nominal da carga, [cv];
x0      {dflt:0}     -- conj. carga constante,;
x1      {dflt:0}     -- conj. carga varia linearmente com a veloc.;
x2      {dflt:0.00013} -- conj. carga varia com o quadrado da veloc.;
CONST
freq    {VAL:60}    -- frequência nominal do motor,[Hz];
VAR
-----
----- variáveis do motor -----
-----
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # impedâncias
lsa     -- indut. dispersão do enrol. principal do estator;
lsb     -- indut. dispersão do enrol. auxiliar do estator;
lr      -- indut. dispersão do rotor;
m       -- indut. mútua máxima entre estator e rotor;
lsasa   -- indut. própria do enrol. principal do estator;
lsasb   -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsa   -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsb   -- indut. própria do enrol. auxiliar do estator;
lrArA   -- indut. própria do enrol. do rotor;
lrArB   -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrA   -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrB   -- indut. própria do enrolamento do rotor;
lsarA   -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsarB   -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsbrA   -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lsbrB   -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lrAsa   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrAsb   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrBsa   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
lrBsb   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # correntes
isa     -- corrente do enrol. principal do estator, [A];
isb     -- corrente do enrol. auxiliar do estator, [A];
ira     -- corrente do enrol. principal do rotor, [A];
irb     -- corrente do enrol. auxiliar do rotor, [A];
itotal  -- corrente total, fase a + b, [A];

```



```
lig          -- var. auxiliar do processo de centrifugação;  
v1          -- tensão de entrada;  
v2          -- derivada da tensão de entrada;  
v3          -- retificação da tensão de entrada;  
v4          -- retificação da derivada da tensão de entrada;  
v5          -- soma das tensões retificadas.  
t1          -- tempo de referência.  
ix          -- corrente auxiliar.
```

```
TIMESTEP MIN:1E-5
```

```
INIT
```

```
t1:=0  
isa:=0  
isb:=0  
ira:=0  
irb:=0  
lig:=0  
vcap:=0  
teta:=0  
t_lav:=0  
ch_lav:=0  
flux_a:=0  
flux_b:=0  
flux_ra:=0  
flux_rb:=0  
dflux_a:=0  
dflux_b:=0  
t_cent:=0  
ch_cent:=0  
dflux_ra:=0  
dflux_rb:=0  
vel_eletr:=0  
vel_motor:=0  
histdef(v):=0  
histdef(ix):=0  
histdef(c1):=0  
histdef(c2):=0  
histdef(e1):=0  
histdef(isa):=0  
histdef(isb):=0  
histdef(ira):=0  
histdef(irb):=0  
histdef(iisb):=0  
histdef(fcem):=0  
histdef(vcap):=0  
histdef(teta):=0  
histdef(Crot):=0  
histdef(vinp):=0  
histdef(IsarA):=0  
histdef(IsarB):=0  
histdef(IsbrA):=0
```

```

histdef(lsbrB):=0
histdef(lrAsa):=0
histdef(lrAsb):=0
histdef(lrBsa):=0
histdef(lrBsb):=0
histdef(dteta):=0
histdef(n_rpm):=0
histdef(itotal):=0
histdef(flux_a):=0
histdef(flux_b):=0
histdef(flux_ra):=0
histdef(flux_rb):=0
histdef(dflux_a):=0
histdef(dflux_b):=0
histdef(dflux_ra):=0
histdef(dflux_rb):=0
histdef(conj_eixo):=0
histdef(vel_eletr):=0
histdef(vel_motor):=0
histdef(conj_carga):=0
histdef(conj_elmag):=0
histdef(dvel_motor):=0
histdef(integral(isb)):=0
histdef(integral(dteta)):=0
histdef(integral(dvel_motor)):=0

```

ENDINIT

EXEC

----- equacionamento do motor - parâmetros constantes -----

```

ns:=(120*freq)/np
n_motor:=(2*pi*((120*freq)/np))/60
krot:=((k0/100)*Pnom*736)/(n_motor*n_motor)
ws:=2*pi*freq
m:=xm/ws
lsa:=xsa/ws
lsb:=xsb/ws
lr:=xr/ws
lsasa:=m+lsa
lsasb:=0
lsbsa:=0
lsbsb:=m+lsb
lrArA:=m+lr
lrArB:=0
lrBrA:=0
lrBrB:=m+lr

```

----- equacionamento da carga - proces = 1 # Lavagem -----

```

t_lav:=t_lav+timestep

```

```

IF proces = 1 THEN
  IF t_lav = 0.500 THEN
    t_lav:=0
  ENDIF
  t_lav:=t_lav
  IF t_lav >= 0.2518 THEN
    ch_lav:=0
    jc:=0.001999
  ELSE
    ch_lav:=1
    jc:=0
  ENDIF
  ch_centra:=1
  nn:=(2*pi*ns)/60
  Tnom:=(Pnom*736)/nn
  conj_carga:=(x0*Tnom)+(x1*Tnom*vel_motor)+(x2*Tnom*(vel_motor**2))

```

----- equacionamento da carga - proces = 2 # centrifugação -----

```

ELSIF proces = 2 THEN
  v1:=vimp
  v2:=deriv(vimp)/(2*pi*freq)
  v3:=abs(v1)
  v4:=abs(v2)
  v5:=v3+v4
  IF v5 <= 2 AND t >= 10*timestep THEN
    lig:=1
    t1:=t1+timestep
  ELSE
    t1:=t1
  ENDIF
  IF lig = 1 THEN
    t_centra:=t_centra+timestep
  ENDIF
  IF t_centra > 0 AND t_centra <= (5+t1) THEN
    ch_centra:=0
    lig:=1
  ELSE
    ch_centra:=1
    lig:=0
  ENDIF
  IF ch_centra = 0 THEN
    jc:=0.001999
  ELSE
    jc:=-0.05
  ENDIF
  ch_lav:=1
  xaux:=4.25E-5
  nn:=(2*pi*ns)/60
  Tnom:=(Pnom*736)/nn

```

```

conj_carga:=(x0*Tnom)+(x1*Tnom*vel_motor)+((x2-
xaux)*Tnom*(vel_motor**2))

```

```

ENDIF

```

```

----- equacionamento do motor -----

```

```

----- Tensão nominal aplicada ao motor -----

```

```

v:=vinp

```

```

----- Iteração para a obtenção dos parâmetros do motor -----

```

```

----- Método de Newton - Raphson -----

```

```

COMBINE ITERATE AS case 1

```

```

----- Ângulo elétrico -----

```

```

teta:=integral(dteta)

```

```

----- indutâncias mútuas-----

```

```

lsarA:=m*cos(teta)

```

```

lsarB:=m*sin(teta)

```

```

lsbrA:=-m*sin(teta)

```

```

lsbrB:=m*cos(teta)

```

```

lrAsa:=m*cos(teta)

```

```

lrAsb:=-m*sin(teta)

```

```

lrBsa:=m*sin(teta)

```

```

lrBsb:=m*cos(teta)

```

```

----- Conj. eletromagnético -----

```

```

c1:=isa*(-m*ira*sin(teta)+m*irb*cos(teta))

```

```

c2:=isb*(-m*irb*sin(teta)-m*ira*cos(teta))

```

```

conj_elmag:=(np)*(c1+c2)

```

```

Crot:=krot*vel_motor

```

```

----- velocidade elétrica e mecânica-----

```

```

dvel_motor:=((1/(jm-jc))*(conj_elmag-conj_carga-Crot))

```

```

vel_motor:=integral(dvel_motor)

```

```

vel_eletr:=(vel_motor*np)/2

```

```

conj_eixo:=conj_elmag-Crot

```

```

n_rpm:=((vel_motor)*30/pi)

```

```

dteta:=vel_eletr

```

```

----- tensão no capacitor -----

```

```

vcap:=((1/(ccap*1E-6))*(ix))

```

```

ix:=iisb*ch_lav
iisb:=integral(isb)
-----
----- Correntes do estator -----
-----
isa:=((v-(dflux_a))/rsa)*ch_lav*ch_cent
isb:=((v-(vcap+dflux_b))/rsb)*ch_lav*ch_cent
itotal:=isa+isb*ch_lav*ch_cent
-----
----- Correntes do rotor -----
-----
ira:=-dflux_ra/rr
irb:=-dflux_rb/rr
-----
----- derivadas dos fluxos -----
-----
dflux_a:=deriv(flux_a)
dflux_b:=deriv(flux_b)
dflux_ra:=deriv(flux_ra)
dflux_rb:=deriv(flux_rb)
-----
----- fluxos -----
-----
flux_a:=lsasa*isa+lsarA*ira+lsarB*irb
flux_b:=lsbsb*isb+lsbrA*ira+lsbrB*irb
flux_ra:=lrAsa*isa+lrAsb*isb+lrArA*ira
flux_rb:=lrBsa*isa+lrBsb*isb+lrBrB*irb
ENDCOMBINE
-----
----- força contra-eletromotriz -----
-----
e1:=v-(1000*itotal)
fcem:=predval(e1,t+ timestep)
ENDEXEC
ENDMODEL
RECORD
MQ_ROUPA.conj_elmag      AS   c_elmg
MQ_ROUPA.conj_eixo      AS   c_eixo
MQ_ROUPA.conj_carga     AS   c_carg
MQ_ROUPA.vel_motor      AS   v_mot
MQ_ROUPA.n_rpm          AS   n_rpm
USE MQ_ROUPA AS MQ_ROUPA
INPUT
vinp:= MM0001
DATA
Pnom:= 0.25
rsa:= 7.12
xsa:= 5.65
rsb:= 7.12
xsb:= 5.65

```

```

rr:= 7.12
xr:= 5.65
xm:= 60.
jm:= 0.002
np:= 4.
k0:= 3.
ccap:= 29.
proces:= 1.
Pc:= 0.25
x0:= 0.0
x1:= 0.0
x2:= 1.3E-4
OUTPUT
XX0029:=fcem
ENDUSE
ENDMODELS
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER TX0001 1.E7 0
9999
1XX0077 1.E-8 1.E-8 1.
2XX0041XX0051 1.E-8 1.E-8 1.
XX0045XX0049 .75758 3.3 0
XX0047XX0045 10. 0
XX0049XX0045 1.7E6 0
XX0051XX0043 .0025 1.E3 0
XX0043XX0049 10. 0
XX0085XX0029 1.E3 0
XX0029 1.E20 0
TRANSFORMER TX0002 1.E7 0
9999
1XX0097XX0099 1.E-6 1.E-6 1.
2XX0093 1.E-6 1.E-6 1.
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
XX0041XX0047 MEASURING 1
11XX0049XX0051 CLOSED 0
XX0093XX0077 MEASURING 0
XX0077XX0085 MEASURING 1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
60XX0029 0 10.
/OUTPUT
XX0093
BLANK MODELS

```

BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

ANEXO E

Template da Lava Louças

```
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, quinta-feira 23, 2008
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEfAS - NORWAY 1994-2003
C -----
$DUMMY, XYZ000
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6 .001
  500 1 1 1 1 0 0 1 0
MODELS
/MODELS
INPUT
MM0001 {v(XX0104)}
MM0002 {v(XX0112)}
OUTPUT
  XX0033
  XX0046
  XX0122
MODEL chave
INPUT
  v
OUTPUT
  ch
VAR
  v1
  v2
  v3
  v4
  v5
  ch
  lig
  t1
  t_cont
INIT
  t1:=0
  lig:=0
  t_cont:=0
ENDINIT
EXEC
  v1:=v
  v2:=deriv(v)/(2*pi*60)
  v3:=abs(v1)
  v4:=abs(v2)
```



```

v5:=v3+v4
IF v5 <= 8 AND t >= 10*timestep THEN
    lig:=1
    t1:=t1+timestep
ELSE
    t1:=t1
ENDIF
IF lig = 1 THEN
    t_cont:=t_cont+timestep
ENDIF
IF t_cont > 0 AND t_cont <= (1.5+t1) THEN
    ch:=0
ELSE
    ch:=1
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
MODEL MQ_LOU
COMMENT
#####
#
#           MQ_LOU - MÁQUINA DE LAVAR LOUÇA           #
#           Eng. IVANDRO ANTONIO BACCA - UBERLÂNDIA, JUNHO DE 2008 #
#
# Este modelo representa o equivalente elétrico de uma máquina de lavar #
# louça que utiliza um motor de indução monofásico do tipo Shaded Pole (Anel #
# de defasamento). #
# #
#####
ENDCOMMENT
INPUT
    vinp          -- tensão eficaz aplicada ao motor, [V];
OUTPUT
    fcem          -- força contra-eletromotriz do motor, [V];
    ch            -- chave que atua durante a interrupção.
DATA
-----
----- parâmetros do motor -----
-----
Pnom {dflt:0.2} -- potência nominal do motor,[cv];
rsa  {dflt:6.5} -- resist. enrolamento principal do estator,[Ohm];
xsa  {dflt:7.5} -- reat. enrolamento principal do estator,[Ohm];
rr   {dflt:6.5} -- resistência do rotor, [Ohm];
xr   {dflt:7.5} -- reatância do rotor, [Ohm];
xm   {dflt:140} -- reatância de magnetização,[Ohm];
jmc  {dflt:0.01} -- momento de inércia do motor + carga,[kg*m^2];
np   {dflt:2}   -- número de pólos do motor;
k0   {dflt:3}   -- perdas rot.,[%];

```

```

-----
----- parâmetros da carga -----
-----
Pc      {dflt:0.2}    -- Potência nominal da carga, [cv];
x0      {dflt:0}     -- conj. carga constante;
x1      {dflt:0}     -- conj. carga varia linearmente com a veloc.;
x2      {dflt:0.00012}-- conj. carga varia com o quadrado da veloc.;
CONST
freq    {VAL:60}    -- frequência nominal do motor,[Hz];
VAR
-----
----- variáveis do motor -----
-----
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # impedâncias
m       -- indut. mútua máxima entre estator e rotor;
lr      -- indut. dispersão do rotor;
lsa     -- indut. dispersão do enrol. principal do estator;
lsasa   -- indut. própria do enrol. principal do estator;
lsasb   -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsa   -- indut. mútua dos enrol. principal e auxiliar do estator;
lsbsb   -- indut. própria do enrol. auxiliar do estator;
lrArA   -- indut. própria do enrol. do rotor;
lrArB   -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrA   -- indut. mútua dos enrolamentos do rotor;
lrBrB   -- indut. própria do enrolamento do rotor;
lsarA   -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsarB   -- indut. mútua entre enrol. principal do estator e rotor;
lsbrA   -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lsbrB   -- indut. mútua entre enrol. auxiliar do estator e rotor;
lrAsa   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrAsb   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e principal;
lrBsa   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
lrBsb   -- indut. mútua entre enrol. do rotor e auxiliar;
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # correntes
isa     -- corrente do enrol. principal do estator, [A];
ira     -- corrente do enrol. principal do rotor, [A];
irb     -- corrente do enrol. auxiliar do rotor, [A];
itotal  -- corrente total, fase a + b, [A];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # tensões
v       -- tensão eficaz aplicada ao motor, [V];
fcem    -- força contra-eletromotriz do motor, [V];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # conjugados
conj_elmag -- conjugado eletromagnético, [Nm];
conj_carga -- conjugado da carga, [Nm];
conj_eixo  -- conjugado do eixo, [Nm];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # velocidades
ws      -- velocidade angular, [rad/s];
teta    -- ângulo espacial entre as fmm do estator e rotor, [rad];
vel_motor -- velocidade angular mecânica, [rad/s];
vel_eletr -- velocidade angular elétrica, [rad/s];

```

```

n_rpm      -- velocidade nominal do motor, [rpm];
n_motor    -- velocidade nominal do motor, [rad/s];
ns         -- velocidade síncrona do motor, [rpm];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # fluxos
flux_a     -- fluxo do enrol. principal do estator, [Wb];
flux_b     -- fluxo do enrol. auxiliar do estator, [Wb];
flux_ra    -- fluxo do enrol. principal do rotor, [Wb];
flux_rb    -- fluxo do enrol. auxiliar do rotor, [Wb];
--%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%-- # perdas
Crot       -- perdas rotacionais, [W];
krot       -- perdas rotacionais, [W];

```

```

-----
----- variáveis da carga -----
-----

```

```

conj_carga -- conjugado nominal da carga, [Nm];
nn         -- velocidade nominal da carga, [rad/s];
Tnom       -- variável auxiliar do conjugado nominal carga;

```

```

-----
----- variáveis auxiliares -----
-----

```

```

c1         -- parcela do conjUgado eletromagnético;
c2         -- parcela do conjugado eletromagnético;
dflux_a   -- derivada do fluxo, flux_a;
dflux_b   -- derivada do fluxo, flux_b;
dflux_ra  -- derivada do fluxo, flux_ra;
dflux_rb  -- derivada do fluxo, flux_rb;
dvel_motor -- derivada da velocidade do motor;
dteta     -- derivada do ângulo elétrico;
e1        -- força contra-eletromotriz;
ch        -- chave que atua durante a interrupção;
t_cont    -- tempo de referência da chave ch;
lig       -- var. auxiliar da interrupção;
v1        -- tensão de entrada;
v2        -- derivada da tensão de entrada;
v3        -- retificação da tensão de entrada;
v4        -- retificação da derivada da tensão de entrada;
v5        -- soma das tensões retificadas;
t1        -- tempo de interrupção da tensão.

```

```

TIMESTEP MIN:1E-5

```

```

INIT

```

```

ch:=0
t1:=0
isa:=0
ira:=0
irb:=0
lig:=0
teta:=0
n_rpm:=0
itotal:=0
t_cont:=0

```

```

vel_eletr:=0
vel_motor:=0
histdef(e1):=0
histdef(c1):=0
histdef(c2):=0
histdef(isa):=0
histdef(ira):=0
histdef(irb):=0
histdef(fcem):=0
histdef(teta):=0
histdef(Crot):=0
histdef(lsarA):=0
histdef(lsarB):=0
histdef(lsbrA):=0
histdef(lsbrB):=0
histdef(lrAsa):=0
histdef(lrAsb):=0
histdef(lrBsa):=0
histdef(lrBsb):=0
histdef(dteta):=0
histdef(n_rpm):=0
histdef(itotal):=0
histdef(flux_a):=0
histdef(flux_b):=0
histdef(flux_ra):=0
histdef(flux_rb):=0
histdef(dflux_a):=0
histdef(dflux_b):=0
histdef(dflux_ra):=0
histdef(dflux_rb):=0
histdef(vel_motor):=0
histdef(conj_eixo):=0
histdef(vel_eletr):=0
histdef(conj_elmag):=0
histdef(dvel_motor):=0
histdef(conj_carga):=0
histdef(integral(dteta)):=0
histdef(integral(dvel_motor)):=(((120*freq)/np)*pi)/30

```

ENDINIT

EXEC

----- equacionamento da carga -----

```

ns:=(120*freq)/np
nn:=(2*pi*ns)/60
Tnom:=(Pnom*736)/nn
conj_carga:=(x0*Tnom)+(x1*Tnom*vel_motor)+(x2*Tnom*(vel_motor**2))

```

----- chave geral para interrupção da energia -----

```

v1:=vinp
v2:=deriv(vinp)/(2*pi*freq)
v3:=abs(v1)
v4:=abs(v2)
v5:=v3+v4
IF v5 <= 8 AND t >= 10*timestep THEN
    lig:=1
    t1:=t1+timestep
ELSE
    t1:=t1
ENDIF
IF lig = 1 THEN
    t_cont:=t_cont+timestep
ENDIF
IF t_cont > 0 AND t_cont <= (1.5+t1) THEN
    ch:=0
ELSE
    ch:=1
ENDIF

```

----- equacionamento do motor -----

```

----- Parâmetros constantes -----
n_motor:=(4*pi*freq)/np
krot:=((k0/100)*Pnom*736)/(n_motor*n_motor)
ws:=2*pi*freq
m:=xm/ws
lsa:=xsa/ws
lr:=xr/ws
lsasa:=m+lsa
lsasb:=0
lsbsa:=0
lsbsb:=m
lrArA:=m+lr
lrArB:=0
lrBrA:=0
lrBrB:=m+lr

```

----- Tensão nominal aplicada ao motor -----

```
v:=vinp
```

```

----- Iteração para a obtenção dos parâmetros do motor --
-----          Método de Newton - Raphson          -----
-----
COMBINE ITERATE AS case1
-----
-----          Ângulo elétrico          -----
-----
          teta:=integral(dteta)
-----
-----          indutâncias mútuas          -----
-----
          lsaA:=m*cos(teta)
          lsaB:=-m*sin(teta)
          lsbrA:=-m*sin(teta)
          lsbrB:=-m*cos(teta)
          lraA:=m*cos(teta)
          lraB:=-m*sin(teta)
          lrsa:=-m*sin(teta)
          lrbsb:=-m*cos(teta)
-----
-----          Conj. eletromagnético          -----
-----
          c1:=isa*(-m*ira*sin(teta)-m*irb*cos(teta))
          c2:=-m*ira*cos(teta)
          conj_elmag:=(np)*(c1+c2)
          Crot:=krot*vel_motor
-----
-----          velocidade elétrica e mecânica-----
-----
          dvel_motor:=(1/(jmc))*(conj_elmag-conj_carga-Crot)
          vel_motor:=integral(dvel_motor)
          vel_eletr:=(vel_motor*np)/2
          conj_eixo:=conj_elmag-Crot
          n_rpm:=(vel_motor)*30/pi
          dteta:=vel_eletr
-----
-----          Correntes do estator          -----
-----
          isa:=((v-dflux_a)/rsa)
          itotal:=isa
-----
-----          Correntes do rotor          -----
-----
          ira:=-dflux_ra/rr
          irb:=-dflux_rb/RR
-----
-----          derivadas dos fluxos          -----
-----
          dflux_a:=deriv(flux_a)

```

```

dflux_b:=deriv(flux_b)
dflux_ra:=deriv(flux_ra)
dflux_rb:=deriv(flux_rb)

-----
----- fluxos -----
-----

flux_a:=lsasa*isa+lsarA*ira+lsarB*irb
flux_b:=(lsbrA*ira+lsbrB*irb)
flux_ra:=(lrArA*ira+lrAsa*isa)*0.02
flux_rb:=(lrBrB*irb+lrBsa*isa)*0.02
ENDCOMBINE

-----
----- força contra-eletromotriz -----
-----

e1:=v-(1000*itotal)
fcem:=predval(e1,t+ timestep)
ENDEXEC
ENDMODEL
RECORD
    MQ_LOU.conj_elmag      AS   c_elmg
    MQ_LOU.conj_carga     AS   c_carg
    MQ_LOU.conj_eixo      AS   c_eixo
    MQ_LOU.vel_motor      AS   v_mot
    MQ_LOU.n_rpm          AS   n_rpm
USE chave AS chave
INPUT
v:= MM0001
OUTPUT
XX0033:=ch
ENDUSE
USE MQ_LOU AS MQ_LOU
INPUT
vinp:= MM0002
DATA
Pnom:= 0.2
rsa:= 6.5
xsa:= 7.5
rr:= 6.5
xr:= 7.5
xm:= 140.
jmc:= 0.01
np:= 2.
k0:= 3.
Pc:= 0.2
x0:= 0.0
x1:= 0.0
x2:= 1.2E-4
OUTPUT
XX0046:=fcem
XX0122:=ch

```

```

ENDUSE
ENDMODELS
C   1   2   3   4   5   6   7   8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  XX0056XX0058      500.              0
  XX0060XX0056      33.      .1      0
  XX0064XX0056      33.      .1      0
  XX0016XX0056      .5              0
  XX0012XX0056      .5              0
  XX0056XX0058          1.E3          0
  TRANSFORMER          TX0001 1.E8          0
    9999
  1XX0142XX0144      1.E-8 1.E-8  1.
  2XX0104          1.E-8 1.E-8  1.
  XX0120XX0046      1.E3              0
  XX0046          1.E20              0
  XX0126          37.8              0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\TRAFO_~1.LIB, XX0102, #####, XX0060, XX0058 $$
, XX0064
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
11XX0064XX0012          CLOSED          0
  XX0104XX0102          MEASURING        0
11XX0060XX0016          0
  XX0104XX0112          MEASURING        0
13XX0104XX0126          XX0033 0
13XX0112XX0120          XX0122 1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
60XX0046 0          10.
/INITIAL
  2XX0056      12.
  2XX0058      12.
  3XX0056XX0058          0.0
/OUTPUT
  XX0104
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```


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](#)