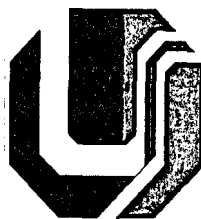


SISBI/UFU



1000205265



MOU
621.3
C352 da
TES/mem

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

**DESEMPENHO DE APARELHO CONDICIONADOR
DE AR NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada por Bismarck Castillo Carvalho à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) - UFU
Antônio Carlos Delaiba, Dr. Eng. - UFU
José Wilson Lima Nerys, Dr. - UFG

Uberlândia, 26 de Julho de 2002.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Eden e Otilia (in memoriam), a minha esposa Marisa e a minhas filhas Patrícia, Camila e Lais, pela compreensão e incentivo, fundamentais nos momentos de maior dificuldade.

AGRADECIMENTOS

De maneira muito especial, apresento aos Professores **José Carlos de Oliveira e Antônio Carlos Delaiba**, meus sinceros agradecimentos pelo apoio, incentivo e colaboração recebida durante os mais de 12 meses de duração dos trabalhos desta dissertação. Agradeço também, pela amizade e confiança dispensada, que, com toda certeza, estão além da conclusão do curso de mestrado.

Ao professor **Luciano Martins Neto**, pela cessão do equacionamento básico utilizado na modelagem matemática do dispositivo utilizado nos trabalhos.

Ao professor **Darizon Alves de Andrade**, de maneira especial, pela ajuda dada, fundamental para a conclusão da implementação computacional do modelo.

Aos professores **José Antônio Lambert e Einstein Lemos de Aguiar**, pela perseverança na coordenação do Mestrado Interinstitucional da UFMT, apesar das enormes dificuldades vivenciadas.

Aos colegas e amigos da Pós Graduação, **Ana Claudia de Azevedo, Anderson Villaça, Carlos Augusto Medeiros, Fernando Belchior e Marcelo Fandi**, pelo companherismo e importante apoio que me deram no início da dissertação e nos trabalhos experimentais.

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

À **Joana Maria Proença**, pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da Pós Graduação.

À empresa **TECUMSEH do Brasil LTDA**, fabricante de compressores, na pessoa do Engenheiro **Eduardo Augusto Gomes Pereira**, pelo fornecimento de informações indispensáveis para a realização das investigações e a cessão de unidades de compressores, para fins de realização de ensaios.

À **CAPES** por ter concedido suporte financeiro para a realização do **MINTER**, conveniado entre a **UFU, UFMT** e aquele órgão de fomento.

RESUMO

Na atualidade, pesquisas e desenvolvimentos associados à Qualidade de Energia Elétrica, são motivos de grande preocupação no país e na comunidade internacional. Entre as diversas áreas de interesse, encontram-se os estudos relacionados com a operação de grandes, médios e pequenos dispositivos, existentes nas instalações industriais, comerciais e residenciais. 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 do dispositivo Condicionador de AR. Distúrbios típicos, tais como: distorção da forma de onda, elevações e afundamentos de tensão, oscilações e interrupções do suprimento de energia, são utilizados para avaliar o desempenho do dispositivo. Os estudos são realizados pelos métodos experimental e computacional. Para os estudos computacionais foi desenvolvido e implementado computacionalmente, no simulador SABER, um modelo matemático, no domínio do tempo, cuja validação se deu pela comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

ABSTRACT

In the present days, researches and developments associated to Electrical Power Quality rise as major concerns to both international and national communities. Amongst the various areas of interest emerge the studies related to the operation of large, medium and small electric appliances found in industrial, commercial and residential installations. This dissertation goes toward the investigation of the relationship between air conditioner devices and the electrical supply quality. Typical disturbances such as voltage distortion, voltage sag and swell, voltage oscillation and even interruptions are taken into account to a commercial type of device. Both experimental and computational approaches are used to study the overall equipment behavior and, the laboratory results are used to validate the time domain model implemented into the SABER simulator.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	01
1.2 - PRINCIPAIS INDICADORES DE QUALIDADE.....	04
1.3 - ESTADO DA ARTE.....	05
1.3.1 - Conceitos de Qualidade de Energia.....	06
1.3.2 - Tipos e Características dos Distúrbios de Qualidade de Energia	06
1.3.3 - Consolidação de Trabalhos Realizados na Área de Sensibilidade e Suportabilidade de Equipamentos.....	08
1.4 - JUSTIFICATIVA PARA O PRESENTE TRABALHO.....	16
1.5 - AS CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO	18
1.6 - ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO	21

CAPÍTULO II

REFRIGERAÇÃO: ASPECTOS TECNOLÓGICOS E EQUIPAMENTOS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	24
2.2 - HISTÓRICO DA REFRIGERAÇÃO.....	25
2.3 - PARTES COMPONENTES E FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	27
2.3.1 - Ciclo de Refrigeração.....	27
2.3.2 - Gases Refrigerantes.....	29

2.4 - PARTES COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	31
2.4.1 - Componentes Mecânicos.....	31
2.4.2 - Componentes Elétricos.....	34
2.5 - TIPOS DE SISTEMAS DE COMPRESSÃO.....	38
2.5.1 - Compressores Alternativos.....	39
2.5.2 - Compressores Rotativos.....	39
2.6 - CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	40
2.7 - ESQUEMAS ELÉTRICOS DE DISPOSITIVOS DE REFRIGERAÇÃO E CONDICIONADORES DE AR ENCONTRADOS COMERCIALMENTE	42
2.7.1 - Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Resistência.....	43
2.7.2 - Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Capacitor.....	45
2.7.3 - Motor de Indução de Fase Dividida Com Capacitor Permanente.....	46
2.7.4 - Motor de Indução a Duplo Capacitor.....	47
2.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48

CAPÍTULO III

MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO: MODELAGEM MATEMÁTICA, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO DO MODELO NO DOMÍNIO DO TEMPO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	50
3.2 - MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO: MODELAGEM MATEMÁTICO NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	51
3.2.1 - Desenvolvimento Matemático.....	51

3.2.2 - Equações Elétricas.....	55
3.2.3 - Equação Mecânica.....	58
3.2.4 - Sistemas de Equações dinâmicas que Regem o Comportamento da Máquina de Indução Bifásica Assimétrica.....	58
3.3 - MOTOR ELÉTRICO UTILIZADO NO DISPOSITIVO SOB ESTUDO.....	67
3.4 - VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	68
3.4.1 - Ensaio Experimentais.....	68
3.4.2 - Simulação Computacional.....	69
3.4.3 - Operação do Motor Sob Condições de Tensão de Suprimento Senoidal.....	71
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76

CAPÍTULO IV

APARELHO CONDICIONADOR DE AR: ANÁLISE DE DESEMPENHO NO CONTEXTO DA QUALIDADE

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	78
4.2 - CARACTERÍSTICAS E CIRCUITO EQUIVALENTE DO EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	79
4.2.1 - Características Físicas do Condicionador de Ar Analisado	80
4.2.2 - Arranjo Físico da Unidade Elétrica do Equipamento Ensaiado	81
4.3 - ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS.....	82
4.3.1 - Ensaio Experimentais.....	82
4.3.2 - Simulação Computacional.....	85
4.4 - CASOS ESTUDADOS.....	86

4.4.1 - Suprimento com Característica Ideal – Caso 1.....	88
4.4.2 - Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração – Caso 2.....	91
4.4.3 - Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração – Caso 3.....	95
4.4.4 - Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica – Caso 4	107
4.4.5 - Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão – Caso 5.....	111
4.4.6 - Suprimento Contendo Flutuação de Tensão – Caso 6.....	114
4.5 - SENSIBILIDADE E SUPORTABILIDADE DO EQUIPAMENTO A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO E INTERRUPÇÕES.....	117
4.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	119

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS.....	121
------------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
---------------------------------	-----

ANEXOS

ANEXO A	130
ANEXO B	137

CAPÍTULO I

Introdução Geral

1.1 - Considerações Iniciais

O conceito de “*Qualidade da Energia Elétrica*”, vem sofrendo alterações ao longo dos anos. No princípio, a preocupação maior era apenas com o fornecimento contínuo deste insumo, sem no entanto, preocupar-se com questões, hoje fundamentais, como a forma, amplitude e equilíbrio da tensão da energia fornecida. Esta filosofia das empresas do setor de energia elétrica, contudo, não teve consequências maiores no passado, pois, as instalações e equipamentos massivamente utilizados à época, possuíam tecnologia eletromecânica bastante robusta, além de não existirem “cargas perturbadoras”, como as atualmente existentes.

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 e/ou corrente elétrica [1]**, caracterizando desta forma uma rede elétrica com qualidade fora dos padrões considerados ideais.

Nas décadas de 80 e 90, ocorreu avanço vertiginoso na tecnologia da eletrônica e eletrônica de potência e como consequência, um rápido desenvolvimento de equipamentos que utilizam destas tecnologias, pesquisas

indicando que, no ano 2000, este tipo de carga estaria na faixa de 60% da capacidade instalada de uma instalação típica [2].

Este tipo de carga, se por um lado contribui para o uso mais racional e mais eficiente da energia elétrica, por outro, apresenta características que são motivo de grande preocupação por parte de pesquisadores, consumidores, concessionárias e fabricantes de equipamentos. Uma delas, é o fato de serem causadoras da deterioração da energia elétrica suprida, principalmente pela geração de componentes harmônicos de diversas ordens, com efeitos drásticos tanto sobre a forma de onda de tensão como da amplitude desta.

Outra questão, não menos importante, é que, paradoxalmente, estes equipamentos além de serem geradores de distorções, são também altamente sensíveis a alterações da qualidade do suprimento.

O atual perfil do parque de equipamentos utilizados nas áreas residencial, comercial e industrial, de forma massiva, conforme acima mencionado, tem despertado interesse de pesquisadores do mundo inteiro, levando ao desenvolvimento de trabalhos de pesquisa de grande número de equipamentos, conforme levantamento feito por [3] e que se encontra resumidamente reproduzido no presente trabalho.

É importante ressaltar, que não apenas equipamentos sensíveis sofrem com a deterioração do suprimento de energia elétrica. Trabalhos recentes comprovaram que equipamentos considerados “robustos”, a exemplo de motores trifásicos de indução [2], cabos de energia [4], transformadores [5], dentre outros, embora não possuindo qualquer tecnologia eletrônica ou digital, também sofrem os efeitos de distúrbios na tensão, provocando aumento das perdas, funcionamento fora do padrão considerado normal e em casos extremos provocando redução drástica de sua vida útil, devido ao sobreaquecimento provocado pelas componentes harmônicas.

Vê-se então que, Qualidade de Energia, envolve não apenas o aspecto técnico da energia suprida, mas também os seus aspectos econômicos, para os agentes envolvidos, quais sejam; os consumidores (usuários), pois afeta o correto funcionamento de máquinas e equipamentos, aumento das perdas e, em última instância levando a perda ou dano de componentes ou equipamentos, e conseqüente necessidade de reposição. Acrescenta-se, ainda, às perdas citadas, os prejuízos decorrentes de paradas do processo produtivo. Por outro lado, as concessionárias de energia elétrica também sofrem as conseqüências pelo não faturamento da energia disponibilizada para o mercado e pela poluição do sistema que pode comprometer outras instalações e assim por diante.

Conseqüência das questões acima levantadas e como resultado de uma maior conscientização por parte dos consumidores, sobre seus direitos quanto aos serviços recebidos de empresas do setor, diversos trabalhos têm sido realizados por grupos específicos criados para este fim pelos órgãos reguladores e de controle do setor energia elétrica brasileiro, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Os trabalhos foram realizados em estreita parceria com Universidades e Institutos de Pesquisas do país, com o intuito de se estabelecer as diretrizes para a normatização dos padrões da Qualidade da Energia Elétrica no Brasil.

É nesta perspectiva que se inserem as metas e objetivos da presente dissertação, voltadas para o estudo da sensibilidade e/ou suportabilidade de equipamentos elétricos, frente aos aspectos relacionados a qualidade de energia elétrica fornecida, fato de grande atualidade e importância no cenário econômico nacional e mundial. Vale ressaltar, devido a inexistência de uma definição precisa para os termos sensibilidade e suportabilidade, que, no presente trabalho, sob a designação *sensibilidade* deve-se entender a continuidade operacional do dispositivo, sem maiores conseqüências e, sob o título *suportabilidade* a

descontinuidade do funcionamento ou entrada em regiões proibitivas de operação (efeitos térmicos inadmissíveis, etc).

Para tanto, o presente trabalho tem as seguintes metas:

- modelagem matemática, no domínio do tempo, de um motor de indução bifásico assimétrico, com rotor em gaiola de esquilo e com capacitor permanente, utilizado como máquina motriz do equipamento em estudo, qual seja, um *Condicionador de Ar*;
- implementação computacional desse modelo;
- realização de estudos experimentais e computacionais, comparativamente, para validação do modelo implementado;
- Realização de estudos de desempenho do dispositivo frente a diferentes itens de qualidade, empregando-se para tanto de estratégias experimentais e computacionais;
- Definição das características de sensibilidade e suportabilidade do equipamento enfocado.

1.2 - Principais Indicadores de Qualidade

O assunto “indicadores de Qualidade de Energia”, ganhou maior destaque nas últimas décadas, quando das discussões sobre qualidade de energia na área de sistemas de potência. Alguns destes indicadores de qualidade destacados pela literatura, conforme orientação da referência [6], encontram-se listados na Tabela 1.1.

TABELA 1.1: INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA

Especificação	Definição	Principais aplicações
Distorção Harmônica Total (THD)	$\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2} / I_1$	Uso geral; normatização. Conceito similar é utilizado para a tensão.
Fator de Potência (PF)	$P_{tot} / V_{rms} I_{rms} $	Medidas de eficiência; redução de perdas
Fator de influência de telefone	$\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \omega_i^2 I_i^2} / I_{rms}$	Interferência em circuitos de áudio
Índice C de mensagem	$\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} c_i^2 I_i^2} / I_{rms}$	Interferência em comunicações
Produto IT	$\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \omega_i^2 I_i^2}$	Interferência em circuitos de áudio, estresse de capacitores Shunt
Produto VT	$\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \omega_i^2 V_i^2}$	Índice de distorção de tensão
Fator K	$\sum_{h=1}^{\infty} h^2 I_h^2 / \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2$	“Derating” de transformadores
Fator de crista	V_{pico} / V_{rms}	Estresse dielétrico
Fator de desequilíbrio	$ V_- / V_+ $	Desequilíbrio de circuitos trifásicos
Fator de flicker	$\Delta V / V $	Operação de lâmpadas incandescentes; regulação de barras de tensão; estudos da capacidade de curto circuito.

Na Tabela 1.1, ω_i representa o fator de influência telefônico, h a ordem das componentes harmônicas e V_+, V_- as componentes da tensão de seqüência positiva e negativa, respectivamente.

1.3 - Estado da Arte

Após exaustivos estudos da bibliografia atual e encontrada pelos meios tradicionais de acesso, obteve-se um expressivo conjunto de informações que

orientam sobre os mais distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no contexto aqui focado. A seguir apresenta-se uma síntese dos trabalhos considerados mais significativos e que conduzem a uma melhor compreensão dos conceitos, terminologias e progressos da área.

1.3.1 - Conceitos de Qualidade de Energia

Fatores de ordem técnica e econômica vem mudando o comportamento dos agentes envolvidos com a energia elétrica, em níveis de geração, transmissão e distribuição.

O avanço tecnológico e fabricação de equipamentos cada vez mais sofisticados e mais sensíveis à qualidade do suprimento da energia elétrica, vêm provocando, de forma crescente no mundo inteiro, esforços no sentido de avaliar como esses novos equipamentos respondem quando a eles é fornecida energia com qualidade fora da considerada ideal.

É oportuno lembrar que, além de sensíveis, equipamentos de última geração também têm a característica de serem os grandes vilões no que diz respeito à crescente constatação de distúrbios nos sistemas elétricos.






Conseqüências das afirmações acima foram verificadas por ocasião do levantamento bibliográfico realizado. Verificou-se a grande quantidade de trabalhos que vem sendo desenvolvidos em instituições de natureza diversa, no mundo inteiro, com o objetivo de avaliar o desempenho de equipamentos, dos mais diversos tipos, quando estes são submetidos a distúrbios no suprimento.

1.3.2 - Tipos e Características dos Distúrbios de Qualidade de Energia







Há muitas maneiras de categorizar-se problemas relativos a qualidade de energia [7]. Uma delas está relacionada ao impacto que um determinado problema de qualidade causa no espectro de freqüência, por exemplo, ruídos

podem ser fenômenos de frequências muito elevadas, ou o *flicker* que é um fenômeno a baixas frequências. A magnitude do fenômeno é outra forma que pode ser utilizada para categorizá-los. A classificação mais utilizada, entretanto, relaciona-se com os fenômenos que ocorrem em regime permanente, por exemplo harmônicos (múltiplos inteiros da frequência fundamental), e não aqueles que ocorrem eventualmente, ou uma única vez. Na Tabela 1.2 encontra-se, de forma resumida, a classificação mais comum dos distúrbios, ressaltando-se o fato de que todos eles são causadores de problemas, de uma forma ou de outra. É importante salientar que na referência [1] pode-se encontrar uma classificação mais completa dos distúrbios aqui mais mencionados.

TABELA 1.2: CATEGORIAS E CARACTERÍSTICAS DE DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA

Categoria	Faixa de Frequência	Duração	Magnitude	Formas de onda
Sobretensões transitórias				
impulso	Ns a ms	<50ns, >1ms	0 a 10 pu	
Oscilações	1 kHz a 10 MHz	<1us, >50ms	0 – 6 pu	
Variações de tensão de Curta duração				
“Interrupções”	Colapso	10ms a 3s	0 – 0.1 pu colapso de tensão	
Afundamentos de tensão (“Voltage Sag”)	Frequência industrial	0.5 a 50 ciclos	0.1 a 0.9 pu	
Elevações de tensão (“Voltage Swell”)	Frequência industrial	0.5 a 50 ciclos	1.1 a 1.8 pu	

**TABELA 1.2: CATEGORIAS E CARACTERÍSTICAS DE DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA-
Continuação**

Categoria	Faixa de Frequência	Duração	Magnitude	Formas de onda
Variações de longa duração				
Interrupções	Colapso	3s a 1 min	0 – 0.1 pu colapso de tensão	
Subtensões	Frequência industrial	> 1 min	0.8 a 0.9 pu	
Sobretensões	Frequência industrial	> 1 min	1.1 a 1.2 pu	
Distorção da forma de onda				
Harmônicos	0 a 10 DTH	Contínua	0 a 25%	
"Notching"	Broad band	Contínua	0 a 10%	
Desequilíbrio de tensão	Frequência industrial	Contínua	<3%	

1.3.3 - Consolidação de Trabalhos Realizados na Área de Sensibilidade e Suportabilidade de Equipamentos

Nas Tabelas 1.1 e 1.2, foram apresentados quadros resumo contendo os principais indicadores de qualidade, a classificação dos distúrbios mais comuns e as aplicações em estudos de qualidade. Na Tabela 1.3 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/u suportabilidade.

Observa-se da Tabela 1.3, que grande parte dos estudos realizados avaliam o desempenho 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 temporários de tensão. Outros aplicam dois ou três itens de qualidade e, somente as referências [2], [4] e [15], avaliam o desempenho do equipamento considerando praticamente todos os indicadores de qualidade que podem comprometer o a sua operação.

TABELA 1.3: QUADRO RESUMO DE TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA DE SENSIBILIDADE DE EQUIPAMENTOS

Instituição	Equipamento	Tipo de estudo	Resultados
EPRI [3], [7]	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.
	CLP's modernos	Afundamentos de tensão	Apresentam problemas a partir de 40 a 50% de afundamento (0.6 a 0.5 Vn)
	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.
W. Eduard Reid (IEEE Transactions on Industry Applications) [8]	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 [9]	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 [10]	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 [11]	Computadores e equipamentos eletro-eletrônicos	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.
ITIC [12]	Computadores		Modificação das curvas CBEMA, possuindo tolerâncias menos rígidas.
Sekine, Yamamoto, Mori, Saito e Kurokawa [13]	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 [14]	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 [15]	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 [16]	Lâmpadas fluorescentes compactas: reator eletromagnético com e sem correção de fator de potência e reator eletrônico	Distorção harmônica	Lâmpadas com reator eletromagnético, sem correção do FP, apresentam menor sensibilidade e menor geração de harmônicos, do que os com reator eletrônico ou com correção do FP.
Fuchs, Roesler e Kovacs [17]	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.
Daroz, Ana Claudia UFU [3]	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.
Souto, Olívio Carlos Nascimento UFU [2]	Motores de indução trifásicos	Afundamentos e elevações de tensão, desequilíbrios e distorção harmônica	Distorções harmônicas acima de total 5% alteram o desempenho do aparelho. Desequilíbrios acima de 2% o provocam aumentos de temperatura.

A referência [8], consolidou 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 é um assunto cuja solução depende das duas partes envolvidas: concessionárias de energia elétrica e fabricantes de equipamentos. 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, 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 e fabricantes, e estabelecendo-se limites para ambos, que os problemas serão resolvidos ou minimizados.

De tudo o que até aqui foi abordado, pode se ter a falsa impressão de que apenas equipamentos mais modernos são sensíveis a suprimentos com qualidade deteriorado. Esta certamente é uma conclusão equivocada. Como já mencionado, equipamentos elétricos de tecnologia não tão recente, a exemplo de

transformadores, motores de indução, cabos de energia dentre outros, quando submetidos a condições não ideais de operação, também sofrem com essa situação. Redes elétricas poluídas é um fato comum nos sistemas elétricos industriais, e nos sistemas pertinentes às concessionárias, quer em nível de distribuição, subtransmissão, etc. Dentro deste contexto, 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 seja preservada.

Componente principal de equipamentos de refrigeração é o compressor. Este, tem como força motriz, um motor de indução mono ou bifásico. Desta forma, é oportuno aqui, fazer o registro de trabalhos sobre o desempenho deste tipo de equipamento, quando operando com suprimento com qualidade comprometida.

Estudos realizados em [2], revelam que, aproximadamente, 75% do consumo total de energia elétrica no Brasil, está associado á presença de motores de indução no sistema elétrico. Esta constatação reforça a pertinência e oportunidade da realização de trabalhos envolvendo este tipo de dispositivo.

Respeito ao tema específico da dissertação, com foco na qualidade, nada foi encontrado na pesquisa realizada. Há, porém, trabalhos realizados com motores de indução trifásicos, em seus aspectos normativos e de desempenho, quando submetidos a diversos itens de qualidade. Desta forma, a seguir é apresentado resumo daquilo que foi encontrado, de maneira a servir como referência e subsídio ao presente trabalho, por tratar-se de tema com maior afinidade do que aqueles constantes da Tabela 1.3.

- **Normatização Específica**

Na literatura pesquisada, foram encontradas publicações normativas sobre máquinas elétricas girantes, algumas de abrangência mais geral, tal é o

caso da NBR 7094, que trata da especificação de motores elétricos de indução ou da NBR 5383, que trata da determinação das características destas mesmas máquinas. Outras normas encontradas têm abrangência mais específica, como a NBR 5882, que trata sobre condicionadores de ar, mas para a determinação de suas características de desempenho ou a NBR 12967, que padroniza os instrumentos de medição utilizados na medição das características termodinâmicas de condicionadores de ar. Da mesma forma a norma IEEE Std. 839-1986, estabelece os procedimentos de teste para motores de indução mono e trifásicos utilizados em compressores herméticos, para a determinação da eficiência e outras características de desempenho deste tipo de equipamento. A norma ANSI/IEEE Std. 114 - 1982, estabelece procedimentos de teste para a determinação das características de desempenho de motores de indução monofásicos.

As normas, acima referenciadas, tratam da determinação das características de desempenho de equipamentos quando submetidos a suprimento com características senoidais. Não tratam da avaliação do desempenho quando o suprimento apresenta algum tipo de degradação.

A norma NEMA MG-1-1998, parte 30, recomenda a determinação do chamado “*derating factor*”, ou fator de redução da potência, para motores operando na condição nominal e tensão de alimentação contendo componentes harmônicas.

• Distorções Harmônicas

De acordo com a referência [2], a distorção harmônica, é o tema que predomina nas pesquisas e publicações a cerca da influência da qualidade da energia e seus efeitos nos motores trifásicos. Destaca-se nesta referência, que a maior parte dos trabalhos está voltada para a questão das perdas e os efeitos sobre a vida útil do equipamento. Em casos extremos, em que seja atingido o

limite térmico devido as componentes harmônicas, torna-se imperativo efetuar o “*derating*” no mesmo, sob risco de em não o fazendo, reduzir drasticamente a sua vida útil.

- **Variações de Tensão de Longa, Média e Curta Duração**

Outro item de qualidade, que será utilizado nos trabalhos da presente dissertação está relacionado com as variações no valor RMS nominal da tensão de suprimento.

Trabalhos encontrados e referenciados na Tabela 1.3, evidenciam que variações de tensão de curta duração (“*Voltage Sag*” e “*Voltage Swell*”) e interrupções, são os maiores causadores de problemas em equipamentos ditos sensíveis (superior a 80%) [17]. Ainda a referência [17], recomenda que, devido ao comportamento dinâmico dos motores de indução, que podem influenciar na recuperação do sistema a um afundamento de tensão, sejam considerados em estudos de “*Voltage Sags*”. Por outro lado, a amplitude da corrente durante o “*sag*” pode atingir valores superiores a corrente de partida direta do equipamento e sua duração pode ultrapassar em até duas vezes o tempo de partida normal do motor.

- **Desequilíbrios**

O efeito imediato do desequilíbrio de tensão nos motores é o aumento das perdas internas, acarretando redução da vida útil dos motores, conforme abordado na referência [2]. No presente trabalho, no entanto, por tratar-se de carga bifásica, este item de qualidade não será abordado.

- **Temas Complementares**

Além dos itens referentes à *Qualidade da Energia* e seus efeitos sobre os motores de indução, ressalta-se a existência de temas correlatos, que complementam os estudos aqui enfocados. Assim, os levantamentos

bibliográficos foram complementados no sentido de se verificar o estado da arte dos assuntos abaixo relacionados:

- Modelagem de motores de indução mono e bifásicos, no domínio do tempo, e implementação computacional;
- Normas de operação aplicáveis a motores de indução mono e bifásicos;
- Normas técnicas (procedimentos) de testes e medição de distúrbios aplicados a equipamentos;
- Tecnologia de equipamentos de refrigeração e;
- Estado da arte sobre o desempenho de equipamentos de refrigeração.

1.4 - Justificativas Para o Presente Trabalho

Na escolha do tema do presente trabalho, inicialmente foram definidos critérios que permitissem o atendimento a premissas, de ordem técnica e econômica e ainda que o resultado da mesma pudesse ter aplicabilidade imediata, dada a sua influência na matriz de consumo de energia elétrica nacional. Nesta óptica, a seguir é feita breve descrição dos aspectos determinantes na definição.

- **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 em fase de consolidação na Universidade Federal de Mato Grosso.
- **Quanto ao equipamento:** A escolha do equipamento foi direcionada para aqueles que, em função das características do país/região, tivessem uso massivo por parte de todos os setores econômicos, inclusive o

residencial, independentemente do consumo de energia unitário do equipamento. Nesse sentido, considerando as características tropicais do Brasil, preliminarmente, a opção recaiu sobre equipamentos de refrigeração, pois estes fazem parte básica de qualquer instalação, seja para condicionamento de ar, para conservação de alimentos ou até mesmo em inúmeros processos produtivos na área industrial.

Considerando a ampla gama de equipamentos de refrigeração existente, função de sua utilização final, a escolha da presente dissertação recaiu sobre aparelhos “Condicionadores de Ar”, tipo janela, de utilização intensa nas áreas residencial, comercial, pública, industrial e outras. Este tipo de equipamento, em sua grande maioria não ultrapassa os 2 kW de potência. Sua utilização é contínua, por períodos médios diários de até 10 horas, o que leva a ter forte impacto no consumo total de qualquer instalação, mais ainda no momento de crise vivenciado pelo sistema elétrico nacional. No Brasil, em 1996, o consumo de condicionadores de ar representava 20% do consumo total de energia elétrica do setor comercial. Considerando-se apenas o setor comercial, como grandes edifícios, hotéis e Shopping Center, este percentual atinge patamares superiores a 50%.

Além dos aspectos acima descritos, antes da definição final do tema, procedeu-se a ampla pesquisa bibliográfica, no intuito de obter o estado da arte sobre o assunto, muito pouco tendo sido encontrado. Dentre os trabalhos correlacionados com o tema, a maioria enfoca aspectos isolados da qualidade, e não de uma forma global, onde seriam aplicados todos os indicadores de qualidade do suprimento, mas sim, aplicando-se um ou no máximo dois itens de qualidade.

É nesta óptica que se encontra o trabalho ora apresentado, voltado para a avaliação da sensibilidade ou suportabilidade equipamentos, com total enfoque ao “*aparelho condicionador de ar*”, tipo janela. A avaliação do desempenho do equipamento dar-se-á dentro do contexto da qualidade, ou seja, submetendo-o a suprimento de energia elétrica fora dos padrões considerados ideais e analisando-se os impactos dos distúrbios aplicados no equipamento.

1.5 - As Contribuições Desta Dissertação

Vê-se do exposto, que a literatura e estudos a respeito de motores de indução mono/bifásicos é muito restrita, mais ainda, se voltada para aplicações específicas em equipamentos de refrigeração e relacionados com qualidade de energia de suprimento.

Modelagens de motores monofásicos/bifásicos, quando encontradas, foram no domínio da frequência. Estes modelos, contudo, não são adequados para os estudos aqui realizados, não permitindo a aplicação de itens de qualidade e a observação da resposta completa do equipamento. Constatação semelhante ocorre para o caso de equipamentos de refrigeração, pois também não foi encontrado qualquer trabalho analisando seu desempenho em função da qualidade do suprimento.

Outro aspecto interessante de destacar-se, é que compressores utilizados em equipamentos de refrigeração, passaram, na última década, por processos de modernização tecnológica. Esta modernização teve como consequência maior aumento significativo no rendimento global dos equipamentos e, conseqüentemente, redução do consumo de energia elétrica. Esta redução atingiu patamares da ordem de 50% nos últimos anos.

Dentro deste cenário, constata-se como maiores contribuições desta pesquisa:

a) Estado da Arte

O resultado do trabalho de pesquisa bibliográfica encontra-se consolidado na Tabela 1.3. Nessa tabela são descritos, de forma resumida, os principais estudos realizados por pesquisadores do mundo inteiro, no intuito de avaliar os problemas causados no desempenho pelas perturbações na qualidade da energia fornecida aos equipamentos. Todavia, as pesquisas mostram a inexistência de trabalhos relacionados com a sensibilidade e suportabilidade de equipamentos de refrigeração frente aos distúrbios do suprimento.

Com o desenvolvimento desta dissertação, pretende-se que os resultados obtidos possam servir como referência para fabricantes e usuários destes equipamentos, de forma a que possam ser traduzidos na adequação de projetos e estratégias objetivando que a operação e a vida útil do equipamento seja preservada.

b) Modelagem Matemática do Motor de Indução Bifásico Assimétrico no Domínio do Tempo

Visando a concretização dos objetivos propostos para o trabalho, uma outra contribuição desta dissertação consiste no desenvolvimento de um modelo matemático, no domínio do tempo, para motor de indução bifásico assimétrico com capacitor permanente. O modelo foi desenvolvido de acordo com a referência [18], respeitando-se especificidades do modelo real que está sendo estudado.

O motor de indução é representado por equações diferenciais que descrevem seu comportamento as quais são, posteriormente, implementadas computacionalmente para simular a operação do equipamento.

c) Implementação Computacional e Validação Experimental da Representação do Motor de Indução Bifásico Assimétrico no Domínio do Tempo

A modelagem matemática sem a devida implementação computacional, não seria de grande valia. Neste sentido, e para propiciar um estudo mais completo do equipamento, a modelagem é implementada num programa computacional, no domínio do tempo. A escolha recaiu na plataforma computacional SABER, que utiliza linguagem própria “*mast*”. Com o auxílio do programa, são reproduzidos computacionalmente os ensaios experimentais, em diversas condições de operação. Os resultados obtidos através de simulação, são confrontados com os resultados experimentais, para validação do modelo, no caso de suprimento senoidal.

d) Aplicação de Itens de Qualidade na Análise de Sensibilidade do Equipamento – Estudos Computacionais e Experimentais

Conforme mencionado, a literatura sobre motores de indução mono ou bifásicos é bastante restrita. Mais ainda, se aplicado a equipamentos de refrigeração. Além disto, não foram encontrados trabalhos que abordassem simultaneamente estudos de diferentes itens de qualidade.

Com a implementação do modelo no simulador SABER, obter-se-á, pois, uma ferramenta computacional, no domínio do tempo, que possibilite a operação de motores de indução aplicando itens isolados ou simultâneos de qualidade tais como: distorções harmônicas, flutuações de tensão, desequilíbrios, “*voltage sag*”, “*voltage swell*”, etc. Não foi encontrada na literatura pesquisada, menção sobre o efeito das flutuações de tensão, causadoras do fenômeno “*flicker*”, no desempenho de motores, como por exemplo aumento das vibrações.

A realização de ensaios experimentais traz grande contribuição no sentido de validar os modelos teóricos e verificar a eficiência dos mesmos.

1.6 - Estrutura Desta Dissertação

Como visto, este trabalho apresenta, no capítulo I, 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, pelos capítulos descritos no a seguir.

CAPÍTULO 2 - REFRIGERAÇÃO: ASPECTOS TECNOLÓGICOS E EQUIPAMENTOS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS

Este capítulo é iniciado apresentando breve histórico da refrigeração, seguido da descrição dos aspectos tecnológicos e funcionamento destes dispositivos, mostrando os componentes principais e como se processa um ciclo completo de refrigeração.

Na seqüência, é feita classificação dos diversos dispositivos existentes, indicando os dispositivos comercialmente disponíveis e respectivos circuitos elétricos, função de sua utilização final.

CAPÍTULO 3 - MOTOR DE INDUÇÃO BIFÁSICO ASSIMÉTRICO: MODELAGEM MATEMÁTICA, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO DO MODELO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Este Capítulo apresenta o detalhamento da modelagem matemática, no domínio do tempo, do componente elétrico principal do compressor: o motor de indução bifásico assimétrico, com capacitor permanente.

São apresentados ainda, resultados dos ensaios experimentais realizados com suprimento senoidal, comparado-os com os resultados da simulação, objetivando a validação do modelo implementado.

CAPÍTULO 4 - APARELHO CONDICIONADOR DE AR: ANÁLISE DE DESEMPENHO NO CONTEXTO DA QUALIDADE

Neste capítulo é apresentado um resumo sobre as recomendações normativas para procedimentos de ensaios a equipamentos, quando da aplicação de perturbações.

São mostrados e analisados resultados de ensaios experimentais e de simulação para tensão de suprimento ideal e, através de uma fonte programável, são aplicados suprimentos elétricos que fogem a esta condição. Através da fonte especial, são geradas perturbações de naturezas diversas, avaliando o desempenho do equipamento em termos da sensibilidade e suportabilidade a cada um dos itens aplicados.

Ao final é feita uma avaliação do desempenho do equipamento e a obtenção de curvas de sensibilidade e suportabilidade.

CAPÍTULO 5 - 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 elencados alguns tópicos correlatos e que certamente poderão constituir-se em temas para futuros desenvolvimentos.

ANEXO A

Neste anexo encontra-se uma listagem do programa computacional utilizado nos estudos digitais.

ANEXO B

As características completas do compressor investigado podem ser encontradas.

CAPÍTULO II

Refrigeração: Aspectos Tecnológicos e Equipamentos Comercialmente Disponíveis

2.1 - Considerações Iniciais

No capítulo precedente, foram identificados e justificados os motivos que levaram a escolha do dispositivo enfocado nos estudos da presente dissertação, contextualizando aspectos de natureza econômica e técnica, assim como o estado da arte das investigações técnico/científicas sobre o funcionamento de equipamentos de refrigeração frente aos atuais problemas de qualidade encontrados nos suprimentos elétricos.

Tendo em vista que, para os objetivos maiores desta dissertação torna-se essencial a modelagem elétrica, a simulação computacional e análises experimental e computacional do componente sob distintas situações não-ideais de funcionamento, considera-se, neste momento, conveniente, por motivos didáticos, a estruturação deste capítulo de forma a atender aos seguintes anseios:

- Síntese histórica da evolução da refrigeração e da sua importância para o desenvolvimento da humanidade;
- Apresentação de conceitos e informações a respeito da refrigeração, em seus aspectos tecnológicos e de aplicabilidade;

- Resumo das aplicações mais comuns da refrigeração, sua classificação e dispositivos encontrados comercialmente;
- Descrição detalhada do funcionamento de equipamentos de refrigeração;
- Identificação de suas partes componentes, mecânicas e elétricas, bem como dos arranjos elétricos utilizados em dispositivos encontrados comercialmente.

2.2 - Histórico da Refrigeração

O processo de remover calor de um corpo data do tempo dos egípcios, gregos e romanos. Na Grécia antiga, eram utilizados escravos para o transporte de neve das montanhas que, armazenadas em palha, eram utilizadas nos meses quentes do verão. Os egípcios colocavam vasos, confeccionados em material poroso, cheios de água, fora de suas casas durante a noite. O vento frio do deserto resfriava a água pela evaporação da umidade [19].

Pessoas que fazem uso da refrigeração, geralmente, desconhecem a importância que ela teve no desenvolvimento da sociedade. Mais do que isso, muitos não fazem idéia até que ponto dependem da refrigeração para sua perfeita existência. Não seria possível, por exemplo, preservar ou transportar gêneros alimentícios em quantidades suficientes para sustentar a população urbana, crescente, sem a refrigeração mecânica. Do mesmo modo, muitas edificações, nas quais encontram-se instaladas indústrias, comércio e setor público, poderiam tornar-se inabitáveis no verão por causa do calor. O condicionamento de ar nestas instalações, além de proporcionar o conforto das pessoas, tem a função de criar ambientes agradáveis, adequadamente controlados. Geralmente, instalações físicas com estas características, permitem que as pessoas trabalhem em seus níveis ótimos de desempenho, o que traz benefícios diretos em termos de eficiência e economia.

Atualmente existem meios para produzir refrigeração em qualquer estação do ano, mas, foi a partir de 1923, que a refrigeração tomou seu grande impulso com o advento da unidade mecânica, abrangendo desde a fabricação de sorvetes à conservação do leite e outros produtos perecíveis [20].

A refrigeração pode ser produzida de várias maneiras, mas a forma mais simples é manter em contato duas substâncias, uma quente e outra fria. O calor, fluindo da mais quente para a mais fria, proporcionará, em determinado momento, um equilíbrio térmico, isto é, igualará a temperatura de ambas as substâncias. Portanto, o processo de resfriamento consiste na retirada de calor de um corpo ou substância sendo este, absorvido por um outro corpo que se encontre em uma temperatura mais baixa.

Apesar de refrigeração e condicionamento de ar serem originados do mesmo princípio, são inteiramente distintos quanto ao uso. Enquanto refrigeração é um processo de resfriamento, o condicionamento é um processo de tratamento do ar, visando o controle da umidade, temperatura e impurezas.

Na atualidade, o campo de aplicação da refrigeração é muito grande. Além das aplicações de refrigeração mais conhecidas, tais como condicionamento de ar para conforto ambiental e o beneficiamento, congelamento, armazenamento, transporte e exposição de alimentos perecíveis, a refrigeração é também parte fundamental no processo de fabricação de grande número dos artigos ou objetos de utilidade encontrados atualmente no mercado [21].

Comprovadamente, é forte a participação da refrigeração em qualquer atividade da vida moderna, tanto do ponto de vista de utilização, como também, o que representa em termos de consumo globais de energia elétrica, que reforça a convicção quanto à escolha do equipamento para a realização do trabalho desta dissertação.

2.3 - Partes Componentes e Funcionamento de Sistemas de Refrigeração

Nas seções seguintes descrevem-se aspectos construtivos, funcionamento, ciclo de refrigeração de compressores, suas partes componentes e os circuitos elétricos dos dispositivos encontrados comercialmente.

2.3.1 - Ciclo de Refrigeração

Existe grande semelhança no ciclo de refrigeração dos diversos sistemas existentes. Basicamente todos utilizam os mesmos tipos de componentes elétricos e mecânicos, variando somente quanto à forma e capacidade e respectivos dispositivos de controle e proteção, função de sua capacidade ou importância.

Um ciclo completo de refrigeração a compressão é semelhante ao mostrado na figura 2.1.

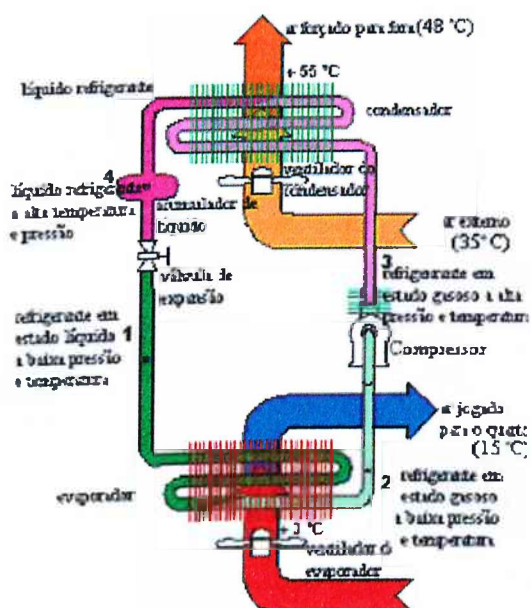


Figura 2.1: Diagrama esquemático de um condicionador de ar tipo janela ilustrando um ciclo de refrigeração

O ciclo de refrigeração tem início com o compressor aspirando o vapor refrigerante do evaporador, a baixa pressão, comprimindo-o, aumentando assim a pressão e temperatura do gás, para, em seguida, enviá-lo ao condensador.

No condensador, o vapor refrigerante é transformado em líquido refrigerante por convecção (natural ou forçada), cedendo o calor ao meio ambiente. O líquido refrigerante a alta pressão, deixa o condensador e, atravessando o filtro, penetra no tubo capilar (ou válvula de expansão, dependendo do equipamento), que por sua vez, funcionando como um dispositivo regulador de refrigerante, produz a queda de pressão necessária para o evaporador. O gás líquido chega ao evaporador em forma de “chuveiro”, e em virtude do amplo espaço existente, perde pressão, vaporizando-se, e absorvendo o calor latente do espaço refrigerado. A seguir é novamente succionado pelo compressor, iniciando-se um novo ciclo de refrigeração.

Nas figuras 2.2 e 2.3 ilustram-se os sentidos dos fluxos de ar num condicionador de ar tipo janela.

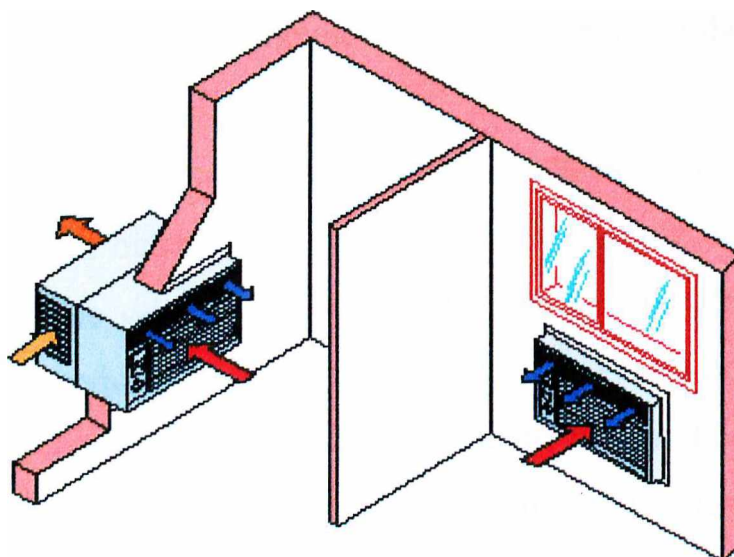


Figura 2.2: Vista, em corte, de condicionadores de ar tipo janela, ilustrando o sentido dos fluxos de ar.

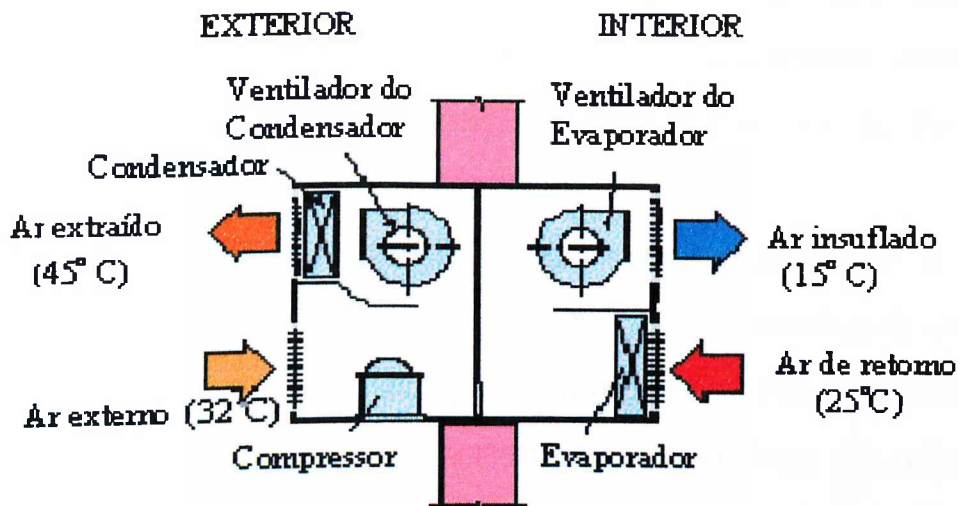


Figura 2.3: Detalhe do condicionador de ar tipo janela mostrando o sentido dos fluxos de ar, de e para o recinto.

2.3.2 - Gases Refrigerantes

A transferência de calor do espaço refrigerado para o condensador, e deste para o meio ambiente exterior, é conseguida através de um agente refrigerante que pode ser água, álcool, amônia, bióxido de carbono, anidrido sulfuroso, éter metílico, cloreto de metila e outros, muito embora cada um destes frigorigenos apresente certas desvantagens.

No ano de 1928 foi sintetizada uma substância, à base de cloro, que apresentava, além de outras características positivas, a de não ser inflamável e de possuir um índice de toxicidade bastante baixo [20]. Mas foi somente em 1931 que se introduziu no mercado o Diclorofluorometano (comumente chamado de CFC – Carbono Flúor Carbono). Este gás, também conhecido como freon 12, é que deu início à grande expansão das indústrias de refrigeração e condicionamento de ar.

Durante mais de cinco décadas os refrigerantes de fluorcarboneto demonstraram ser absolutamente seguros, pois, além das características antes

descritas, são ainda inodoros, quimicamente estáveis, ou seja, sem efeito corrosivo. Contudo, na década de 90, ficou comprovada a grande desvantagem dos CFC's: a sua capacidade de destruição da camada de ozônio do planeta, quando lançados na atmosfera.

Conseqüência desta característica negativa dos refrigerantes a base de CFC, foi decisão adotada pelos países industrializados, em meados da década de 90, quando foi proibido o uso deste tipo de refrigerante. Foi estabelecido um prazo para que as indústrias do setor substituíssem o uso deste gás refrigerante, na manutenção e fabricação de novos produtos, por outros que não fossem nocivos ao meio ambiente, conforme acordo firmado no Protocolo de Montreal [22].

No Brasil, a data limite para utilização dos CFC's, como por exemplo, o R12, na fabricação de novos produtos, foi fixada para 1º de janeiro de 2001. Sua utilização na manutenção de sistemas de refrigeração, é ainda encontrada, com tendência gradual de redução até atingir uma eliminação total.

Atualmente, de maneira a atender tratados internacionais quanto a preservação do meio ambiente, as indústrias fabricantes estão produzindo equipamentos para utilização de gases chamados de "ecológicos", por não constituir risco para a vida no planeta. De maneira a melhor ilustrar a importância da substituição dos gases refrigerantes à base de CFC pelos chamados ecológicos, pesquisas recentes comprovaram que com a redução do uso dos primeiros, em refrigeradores e condicionadores de ar, estabilizou-se o efeito danoso sobre a camada de ozônio da atmosfera. Além disso, com tais atitudes, estima-se que o período de regeneração completa do "buraco" foi reduzido de 50 para 40 anos.

2.4 - Partes Componentes de um Sistema de Refrigeração

Os componentes de um sistema de refrigeração, seja para uso em refrigeradores ou em condicionadores de ar, são basicamente os mesmos, conforme referido no item 2.3.1. Às vezes estes últimos possuem número maior de componentes elétricos em função de sua maior complexidade e porte. A seguir são descritos os componentes mecânicos e elétricos de sistemas de refrigeração, de acordo com as referências [22] e [23].

2.4.1 - Componentes Mecânicos

Em aparelhos de refrigeração de pequeno porte, os componentes fundamentais são três: o condensador, o evaporador e o compressor, este último possuindo acoplado à parte mecânica um motor elétrico. Outro componente importante é o tubo capilar que, dependendo da aplicação final do equipamento, pode ser substituído por uma válvula de expansão.

2.4.1.1 - Condensadores e Evaporadores como Trocadores de Calor

O condensador e o evaporador são superfícies de troca de calor. A função do evaporador é a de absorver o calor latente de vaporização do espaço refrigerado, enviando-o, através do compressor, ao condensador. Desta forma, promove-se a troca de calor com o meio ambiente.

Construtivamente, o condensador é formado por tubos de cobre prensado e pequenas chapas de alumínio (aletas) que aumentam a área, melhorando a transferência de calor. A estrutura do evaporador é semelhante a do condensador, como pode ser observado na figura 2.4.

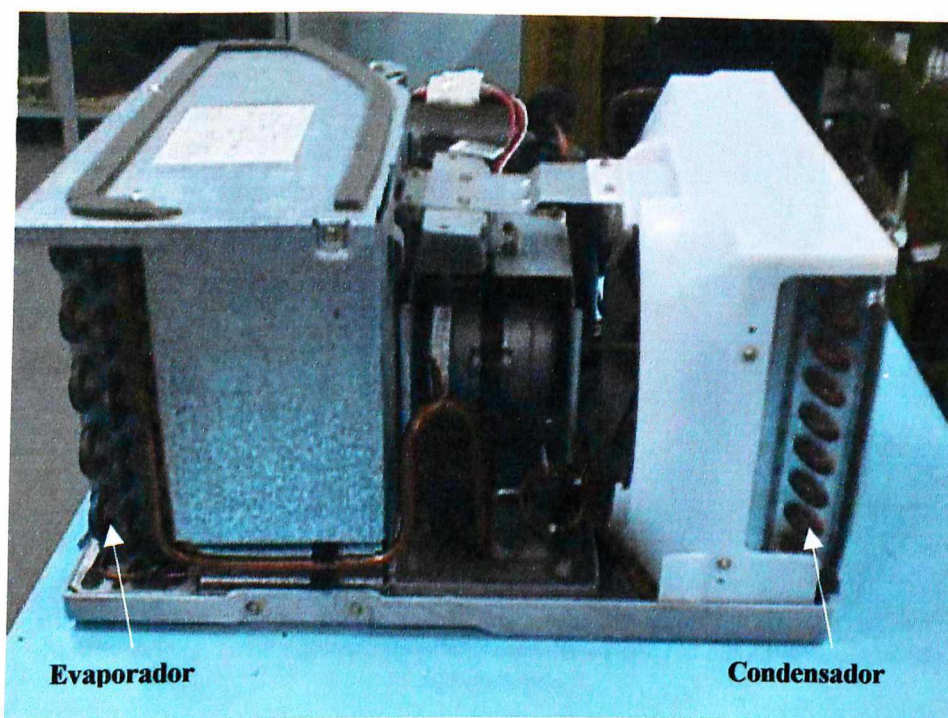


Figura 2.4: Componentes de um condicionador de ar de janela: Evaporador e Condensador

Assim, tanto em refrigeradores como em condicionadores de ar, as estruturas de evaporadores e condensadores são semelhantes, diferenciando apenas no material que é utilizado em sua fabricação. Nos evaporadores de refrigeradores utiliza-se o alumínio, enquanto que, em condicionadores de ar, é utilizado o cobre.

2.4.1.2 - Tubo Capilar

O capilar é um tubo de cobre de reduzidas dimensões utilizado no lado de alta pressão. Sua função é regular a quantidade de refrigerante que chega ao evaporador através de seu reduzido diâmetro, que por sua vez em função de seu comprimento causa a queda de pressão necessária, dividindo o sistema em duas seções de pressão: o lado de alta e o lado de baixa pressão.

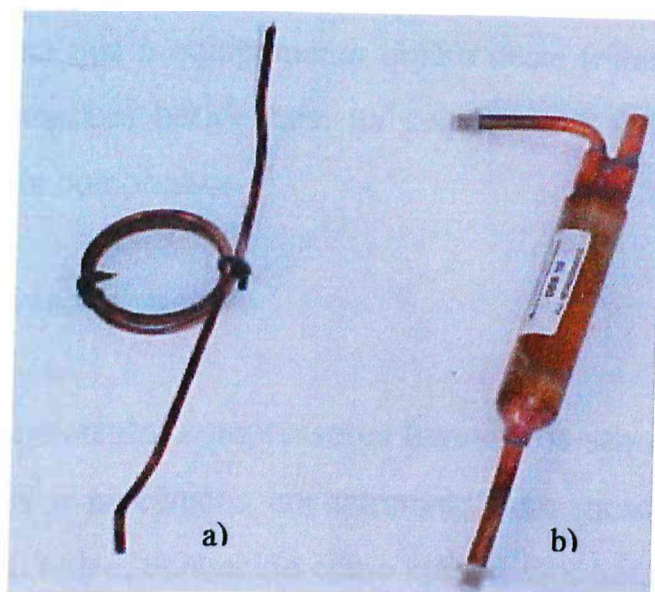


Figura 2.5: a) Tubo capilar e b) filtro secador utilizados em equipamentos de refrigeração

2.4.1.3 - Compressores

O compressor pode ser considerado como o coração de um sistema de refrigeração. Ele é o responsável pelas transformações físicas que ocorrem no fluido refrigerante, transformações essas, que culminam no fenômeno da refrigeração. Sua função é a de succionar e impulsionar o gás refrigerante, para que este possa circular no sistema. Esta unidade é constituída, basicamente, por duas partes distintas: uma elétrica e outra mecânica. Ambas as partes, dependendo principalmente do porte do equipamento, podem encontrar-se juntas, numa mesma unidade, formando os chamados “compressores herméticos”. Nos equipamentos de maior capacidade, por motivos de ordem técnica, as partes elétricas e mecânicas são montadas separadamente, embora possuindo acoplamento mecânico. Estes são os compressores conhecidos como semi-herméticos ou abertos.

Grande parte das aplicações de pequeno porte, tais como: refrigeradores, freezers, bebedouros e aparelhos de ar condicionado residencial, utilizam compressores do tipo hermético.

Tendo em vista que o equipamento objeto deste trabalho enquadra-se na categoria dos compressores herméticos, na seqüência é feito um estudo mais detalhado deste tipo de compressor.

2.4.1.4 - Compressores Herméticos

Conforme mencionado, compressores herméticos são aqueles em que os componentes elétricos e mecânicos encontram-se num mesmo compartimento, formando um conjunto único, conhecido como compressor hermético.

Neste tipo de compressor, as únicas ligações com a parte externa do compressor (carcaça) são os tubos de conexão mecânica da linha de aspiração e de descarga do gás refrigerante e os três terminais elétricos para conexão com a alimentação externa.

A parte elétrica de compressores herméticos consiste de um motor elétrico monofásico ou bifásico, além dos dispositivos de partida e proteção cujos detalhes construtivos encontram-se detalhados no próximo item.

2.4.2 - Componentes Elétricos

Neste item são descritos os principais componentes elétricos constituintes de equipamentos de refrigeração, ressaltando que, os componentes a serem utilizados em determinado caso, dependem da importância e porte do sistema.

2.4.2.1 - Motor Elétrico do Compressor

O motor elétrico do compressor é do tipo indução, com rotor em gaiola de esquilo. O rotor e o estator encontram-se fixados diretamente no eixo e no

corpo da bomba do compressor. Ele é o responsável pela transformação da energia elétrica de suprimento em energia mecânica no eixo do motor.

Construtivamente, o motor do compressor é formado por dois enrolamentos: um principal ou de marcha e outro auxiliar ou de partida. Este último podendo permanecer ou não conectado ao circuito, dependendo da finalidade de uso do compressor.

Para uso em refrigeradores, o enrolamento de partida, normalmente, atua somente na partida do motor do compressor, sendo retirado após atingir-se o regime permanente. Já para utilização em condicionadores de ar, por tratar-se de equipamentos de maior porte, normalmente tal enrolamento permanece conectado, em série com um capacitor.

Ainda no decorrer deste capítulo são analisados os circuitos elétricos, mais comuns, utilizados em equipamentos de refrigeração, evidenciando-se, em cada caso, a função do enrolamento auxiliar e do capacitor, nos casos onde este último é empregado.

A figura 2.5 ilustra as conexões elétricas do motor com o circuito externo. Como se vê, estas são feitas através de três terminais fixos na carcaça, identificados de forma padrão, conforme as siglas descritas.

C - Terminal comum às duas bobinas

S - Terminal da bobina de partida

R - Terminal da bobina principal

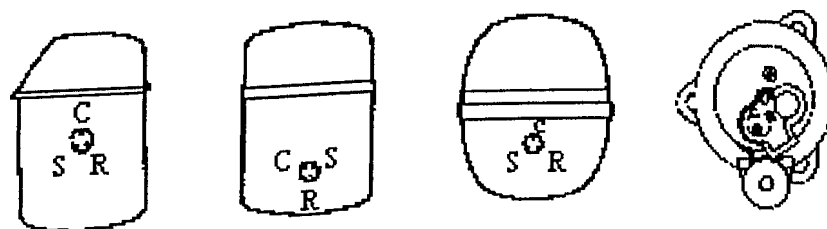


Figura 2.5: Disposição dos terminais de conexão do motor elétrico

2.4.2.2 - Relé de Partida Eletromagnético

O relé de partida do compressor hermético é um dispositivo utilizado em unidades de pequena capacidade, tais como pequenos refrigeradores domésticos. Este componente se apresenta com os contatos normalmente abertos. A bobina do relé de partida é ligada em série com o enrolamento principal do compressor, que, devido ao valor elevado da corrente na partida, origina um campo magnético que atrai a armadura, fechando o contato e conectando o enrolamento auxiliar. Quando o motor atinge a rotação de serviço, a corrente diminui, gradativamente, até o momento em que o campo magnético não tem força para manter a armadura atracada. Dessa forma, a armadura, pela ação da gravidade, desce, abrindo os contatos e conseqüentemente desconectando a bobina de partida do motor.

2.4.2.3 - Relé de Coeficiente de Temperatura Positivo - PTC

O relé PTC é um dispositivo semicondutor, formado por uma pastilha de material cerâmico, utilizado na partida de unidades de refrigeração. Este material possui a propriedade de aumentar a resistência elétrica, quando aquecido, devido ao aumento da corrente que passa através dele. Durante a partida do motor, o PTC está frio e com baixa resistência elétrica, conseqüentemente, conduz corrente através da bobina de partida, fazendo o motor girar. Esta corrente irá aquecê-lo, fazendo com que a resistência aumente e a corrente através da bobina de partida diminua, até se tornar praticamente nula.

Seu uso é recomendado para freezers e refrigeradores domésticos, onde o tempo entre os ciclos de operação é suficiente para o PTC esfriar e permitir nova partida.

2.4.2.4 - Relé Voltimétrico

Usado normalmente em equipamentos de médio porte, onde estão presentes capacitores de partida e capacitores permanentes no esquema de ligação do motor. O relé voltimétrico possui os contatos normalmente fechados. A bobina do relé é ligada em paralelo com a bobina auxiliar do compressor.

A tensão na bobina do enrolamento auxiliar aumenta com o aumento da velocidade do motor, até atingir o valor específico de "*pickup*". Neste ponto, a armadura do relé é atraída, abrindo os contatos do relé e desconectando o capacitor de partida do circuito. Após a abertura, a tensão induzida na bobina de partida é suficiente para continuar atraindo a armadura e manter os contatos do relé abertos.

2.4.2.5 - Protetor Térmico Bimetálico

Este componente é ligado em série com o circuito que alimenta o motor. É fixo e encostado à cabeça do compressor, atuando, quando requerido, para abrir o circuito, desligando o compressor rapidamente na presença de qualquer aumento anormal de temperatura ou de corrente, ocasionados por problemas mecânicos, elétricos ou por aplicação inadequada.

Um disco bimetálico (dentro do protetor), sensível a excesso de temperatura e/ou corrente, flexiona, abrindo os contatos e desenergizando o circuito. Alguns protetores possuem uma resistência em série com o disco que, com o seu aquecimento, auxilia a abertura dos contatos em situações de aumento excessivo da corrente elétrica.

2.4.2.6 - Capacitor

Este dispositivo, como já é amplamente conhecido, tem a função de, conectado em série com o enrolamento auxiliar, produzir defasagens entre os

campos magnéticos principal e auxiliar, de modo a favorecer o processo de partida. Tal componente se faz presente de duas formas, conforme considerado a seguir.

a) Capacitor de Partida

Em caso de necessidade de torque de partida elevado, conforme se faz necessário em sistemas não auto-equalizados, utiliza-se um capacitor em série com a bobina auxiliar ou de partida. Este aumenta a corrente na bobina de partida causando, conseqüentemente, apreciáveis aumentos do torque. O capacitor atua somente na partida, sendo desconectado pelo relé, quando o motor atinge rotação normal de funcionamento.

b) Capacitor Permanente

O capacitor permanente é projetado para atuar continuamente, em série com a bobina de partida, melhorando o torque de partida, o torque de regime e a eficiência elétrica do motor. Este esquema de ligação é aplicado aos sistemas auto-equalizados.

2.5 - Tipos de Sistemas de Compressão

Três são os tipos mais comuns de compressores utilizados em equipamentos de refrigeração de pequeno porte, são eles: compressores alternativos, compressores rotativos e compressores centrífugos. A diferença entre os diversos tipos está no princípio de funcionamento mecânico. A seguir é feita breve descrição das características dos dois primeiros tipos de compressores, visto que o terceiro foge do escopo do presente trabalho.

2.5.1 - Compressores Alternativos

Estes são os compressores de maior uso no mercado brasileiro e encontram aplicações desde a refrigeração doméstica até a industrial. Tais componentes são constituídos por um ou dois cilindros, cabeçote, válvula de descarga, válvula de admissão, bloco, fole da vedação, biela, virabrequim, mancais, pistões e sistema de lubrificação. A figura 2.6 mostra dois modelos de compressores herméticos utilizados em equipamentos de refrigeração.



Figura 2.6: Compressor hermético alternativo para utilização em: a) aparelhos condicionadores de ar e b) refrigeradores domésticos e comerciais

2.5.2 - Compressores Rotativos

Os compressores de palheta rotativa tiveram seu uso generalizado em equipamentos de refrigeração domésticos. Com o passar dos anos, buscaram-se formas mais econômicas para a construção dos compressores e então houve a substituição destes pelos compressores alternativos, que são mais baratos, porém menos eficientes.

Na atualidade, como consequência da necessidade de aumentar a eficiência em todos os setores, de promover redução de custos, e uma maior preocupação com a conservação e racionalização da energia elétrica, a tendência mundial é que os compressores rotativos voltem a ser fabricados em substituição aos alternativos, mesmo a um custo inicial maior.

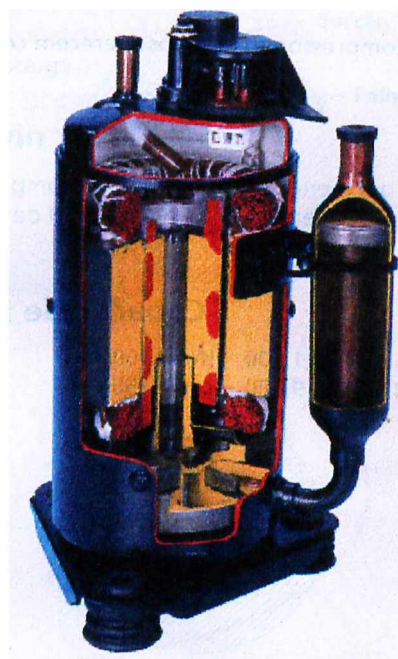


Figura 2.7: Compressor hermético rotativo para utilização em aparelhos condicionadores de ar de diferentes capacidades.

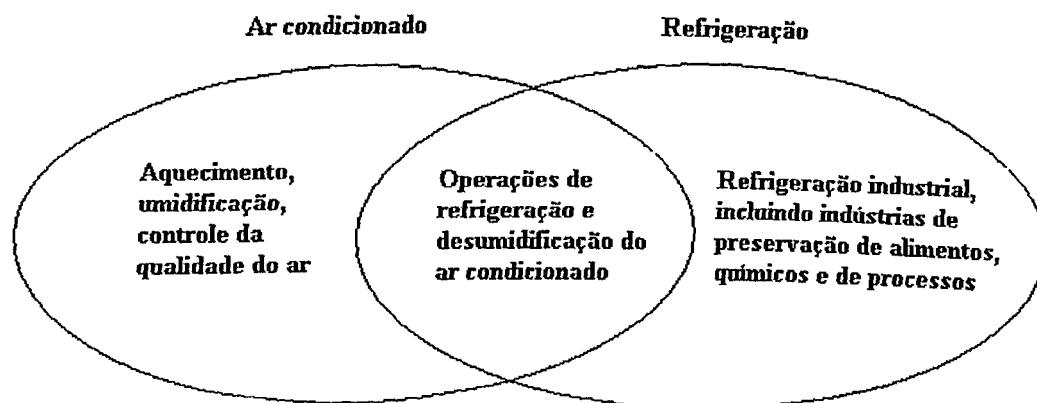
Como pode ser observado na figura 2.7, os compressores rotativos são unidades herméticas e compactas e constituem-se fundamentalmente de: bloco divisor, estator, rotor, eixo e excêntrico, impulsor e cilindros.

2.6 - Classificação dos Sistemas de Refrigeração

Para conveniência de estudos, as aplicações de refrigeração podem ser agrupadas em seis categorias gerais [20], a seguir relacionadas:

- Refrigeração doméstica;
- Refrigeração comercial;
- Refrigeração industrial;
- Refrigeração marítima e de transporte;
- Condicionamento de ar para conforto ambiental;
- Condicionamento de ar industrial.

É importante registrar que os limites exatos destas áreas não são definidos precisamente e que há uma interligação considerável entre as diversas áreas.



*Figura 2.8: Relação entre as áreas de refrigeração e de condicionamento de ar.
Fonte: Refrigeração e ar condicionado, Wilbert F. Stoecker, McGraw-Hill*

Os equipamentos encontrados dentro do contexto da refrigeração doméstica incluem, principalmente, os refrigeradores e os condicionadores de ar de pequena capacidade, muito embora estes também sejam usados para fins comerciais e industriais, [21]. A refrigeração comercial, onde são incluídos os balcões frigoríficos e as geladeiras comerciais, muitas vezes se confunde com a refrigeração industrial. Por isso, é difícil classificar um equipamento neste ou naquele grupo. Pode-se, de um modo geral, dentro de um padrão de características de capacidade, classificar as diversas instalações em frigoríficas ou para conforto humano.

O presente trabalho de pesquisa restringe-se a uma área muito específica da refrigeração, enfocando, como mostrado na figura 2.8, o aparelho de ar condicionado dentro do acondicionamento para conforto ambiental, no contexto da qualidade da energia elétrica de seu suprimento.

2.7 - Esquemas Elétricos de Dispositivos de Refrigeração e Condicionadores de Ar Encontrados Comercialmente

É grande a variedade de circuitos e dispositivos utilizados em refrigeração e condicionamento de ar. Suas características e capacidades variam principalmente em função da aplicação que se tem em vista.

Com o intuito de levantar os circuitos elétricos mais comuns utilizados pelos diversos fabricantes estabelecidos no país, foi realizada ampla pesquisa sobre estes equipamentos. Várias fontes foram consultadas, dentre as quais pode-se destacar: literatura específica sobre o tema; fabricantes de equipamentos (diretamente ou em Sites da Internet), escolas profissionalizantes (Escola Técnicas Federais e SENAI), e ainda a empresas que comercializam estes dispositivos.

Como resultado deste levantamento, pode-se afirmar o que segue:

- Os dispositivos comercializados, independentemente do fabricante, são semelhantes do ponto de vista técnico, com diferenças pouco significativas em termos do rendimento elétrico global;
- Os circuitos elétricos, de uma forma geral, não apresentam diferenças significativas de um fabricante para outro e,
- foram identificadas somente duas empresas que produzem compressores no país. A produção de ambas destina-se ao abastecimento dos diversos fabricantes de condicionadores de ar e

equipamentos de refrigeração no país, assim como para exportação. Estes dois fabricantes, portanto, são fornecedores de compressores para as empresas que “fabricam” equipamentos de refrigeração, com participação mais ou menos equilibrada no mercado nacional. Desta forma, pouca diferença existe entre equipamentos de diferentes marcas, no tocante aos sistemas eletromecânicos.

As informações técnicas e circuitos a seguir apresentados, foram disponibilizados pela empresa Tecumseh do Brasil, fabricante de compressores, localizada na cidade de São Carlos, Estado de São Paulo. Justifica-se a citação da empresa, pela importância de sua contribuição para este trabalho e por ter sido a única empresa que atendeu ao pedido de parceria com a UFU/UFMT. Neste sentido, foram fornecidas informações técnicas sobre os componentes utilizados, notadamente do compressor. Foram cedidos, ainda, para uso nos trabalhos experimentais, compressores herméticos idênticos aos utilizados pelo equipamento estudado.

A seguir são apresentados os circuitos elétricos utilizados em equipamentos de refrigeração, os quais, como se constata, sofrem alterações conforme o porte do equipamento e das características de operação. Por exemplo, a característica da partida, com ou sem carga, determina a curva de operação do motor (normal ou outra).

2.7.1 - Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Resistência

Nesta configuração, figura 2.9, o motor possui enrolamentos principal e auxiliar, sem qualquer outro componente que melhore as características de partida ou de desempenho do dispositivo. Vale ressaltar que, neste tipo de configuração, o enrolamento auxiliar atua somente na partida do aparelho, sendo desligado pelo relé, quando o motor atinge rotação próxima à de regime

permanente. O desligamento do enrolamento auxiliar ocorre por ação do relé eletromagnético, devido à redução da corrente no enrolamento auxiliar, à medida que a velocidade do motor vai se aproximando da velocidade normal de funcionamento.

A bobina de partida embora “atue” apenas por alguns segundos durante a partida do motor, é a responsável pela determinação do sentido de rotação e pelo torque de partida necessário para que o rotor comece a girar.

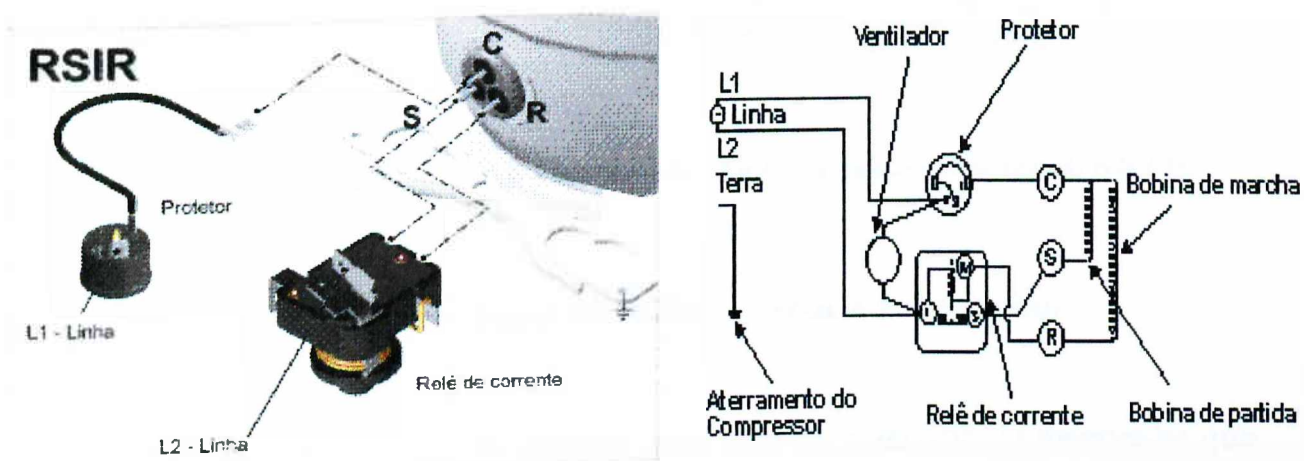


Figura 2.9: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Resistência utilizando relé eletromagnético.

Este tipo de circuito é empregado em equipamentos que exigem torque normal de partida e, por conseguinte, encontra aplicação em refrigeradores domésticos de pequeno porte, com dispositivo de controle de fluxo por tubo capilar, onde há a equalização prévia das pressões para uma nova partida do motor. A sigla RSIR - Resistor Start Induction Run, na figura 2.9, é utilizada por fabricantes e na literatura técnica, motivo pelo qual foi mantida.

Existem modelos de equipamentos de refrigeração que, ao invés do relé eletromagnético, utilizam o relé PTC como elemento responsável pela retirada do enrolamento auxiliar. Isto pode ser observado na figura 2.10. O princípio de

funcionamento é semelhante ao caso anterior. A sigla PTCSIR significa partida com relé PTC e funcionamento por indução.

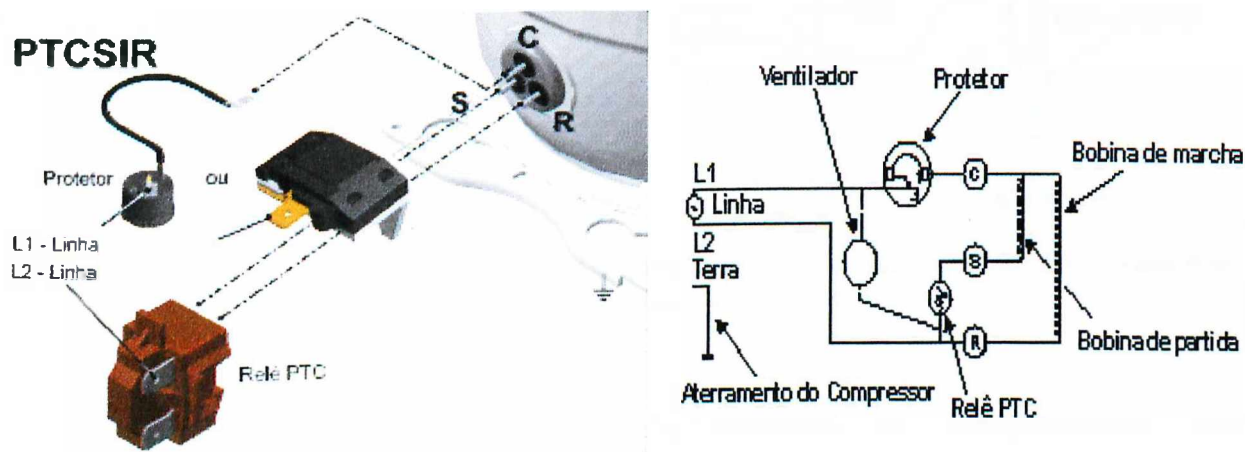


Figura 2.10: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Resistência utilizando relé PTC.

2.7.2 - Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Capacitor

A figura 2.11 ilustra um circuito com esta característica. Observa-se que, além dos enrolamentos principal e auxiliar, o equipamento possui ainda um capacitor em série com este último, que atua somente na partida. Por este motivo é denominado de capacitor de partida. Sua função é aumentar a corrente no enrolamento auxiliar de forma a incrementar o torque de arranque do motor. Assim sendo, fica evidente que estes circuitos se destinam a sistemas de refrigeração sem auto equalização de pressões.

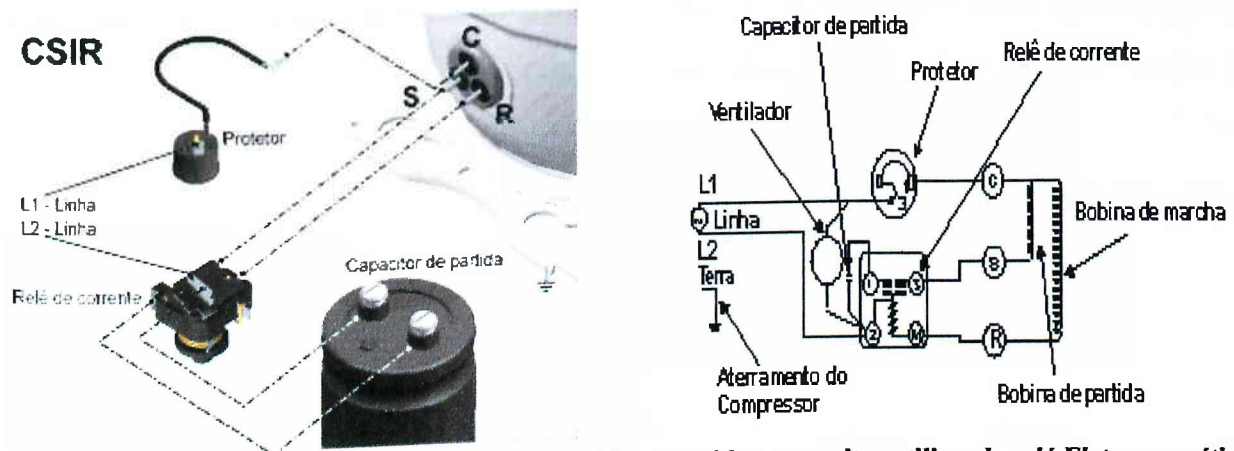


Figura 2.11: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a capacitor utilizando relé Eletromagnético. CSIR - Capacitor Start Induction Run

Comercialmente, são encontrados modelos de equipamentos que utilizam o relé PTC ao invés do relé eletromagnético, tendo princípios de funcionamento semelhantes. Uma configuração deste tipo pode ser observada na figura 2.12.

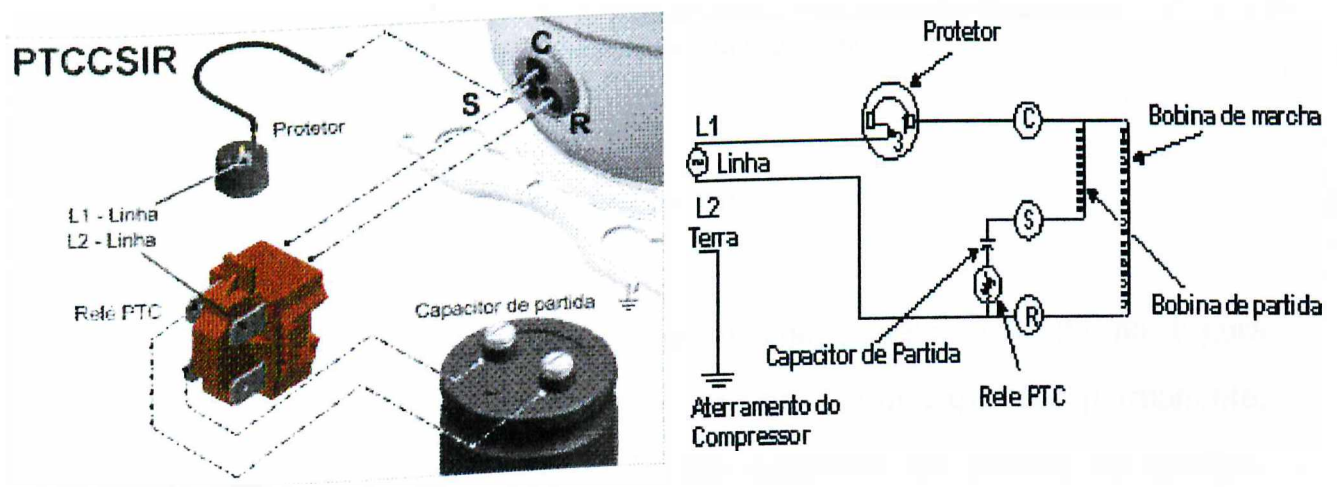


Figura 2.12: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a capacitor utilizando relé PTC. PTCCSIR – Partida por PTC / Capacitor Start Induction Run

2.7.3 - Motor de Indução de Fase Dividida com Capacitor Permanente

Equipamentos com esta configuração, figura 2.13, utilizam um capacitor permanente em série com o enrolamento auxiliar, permanentemente energizado.

Estes possuem torque normal de partida e são recomendados para aplicações em sistemas com dispositivos de controle de fluxo por tubo capilar, onde há equalização prévia das pressões para a partida.

Este tipo de configuração encontra grande aplicação em condicionadores de ar tipo janela.

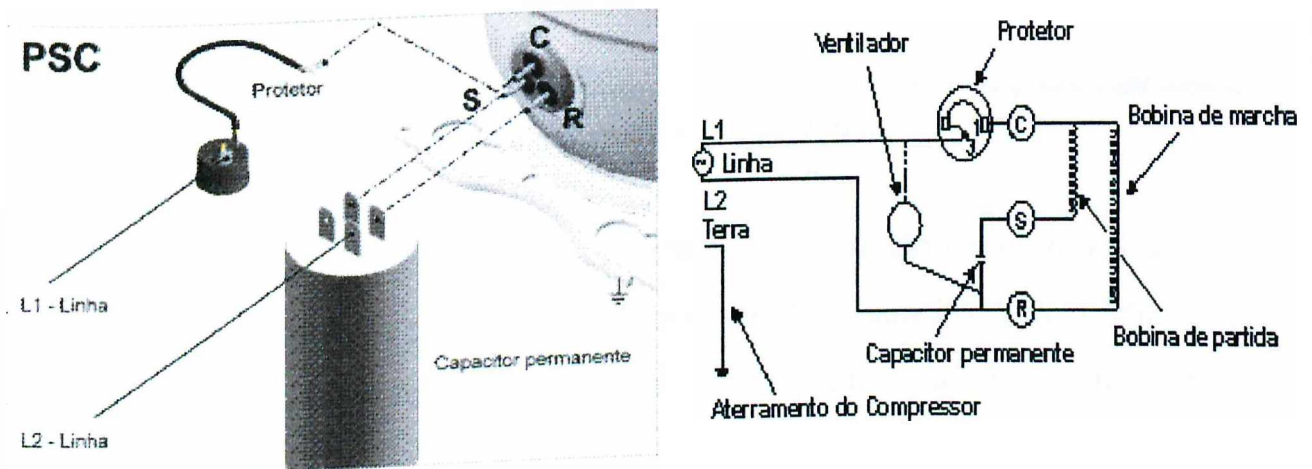


Figura 2.13: Motor de Indução de Fase Dividida – Com Capacitor Permanente.
PSC –Permanent Split Capacitor

2.7.4 - Motor de Indução a Duplo Capacitor

A configuração com duplo capacitor encontra-se ilustrada na Figura 2.14. Este arranjo é semelhante ao caso anterior, com capacitor permanente, diferenciando-se apenas pela adição de um capacitor de partida ao mesmo. Como resultado, o sistema possui elevado torque de partida e os dispositivos assim obtidos podem ser utilizados em sistemas com tubo capilar ou válvula de expansão, mantendo os mesmos níveis de eficiência dos motores com capacitor permanente.

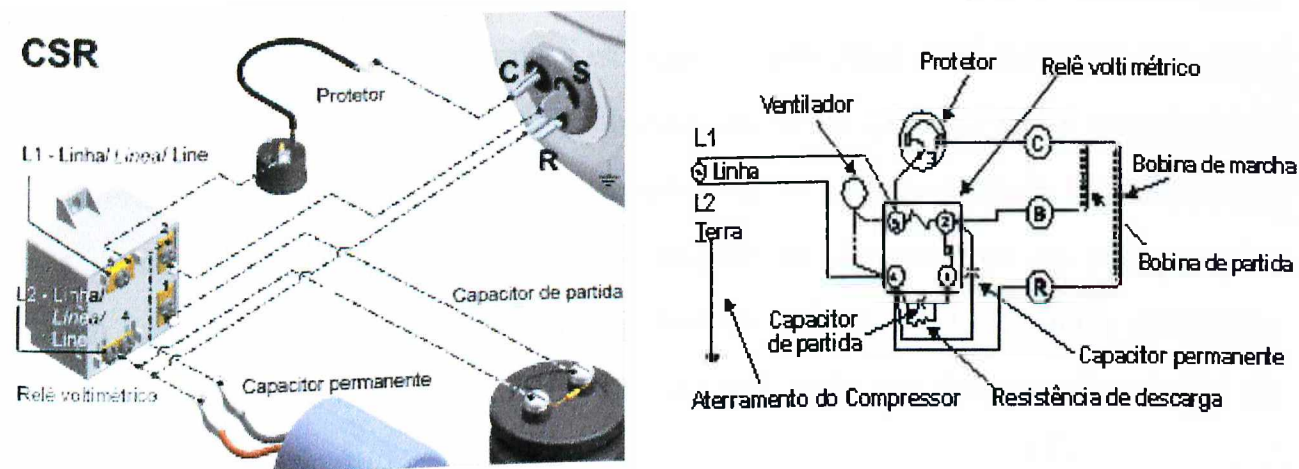


Figura 2.14: Motor de Indução de Fase Dividida – A Duplo Capacitor Utilizando Relé Voltimétrico. CSR – Capacitor Star and Run

Na configuração com duplo capacitor, também são encontrados modelos semelhantes ao anterior, porém utilizando o relé PTC, ao invés do voltimétrico, para a desconexão do enrolamento auxiliar, conforme ilustrado na figura 2.15.

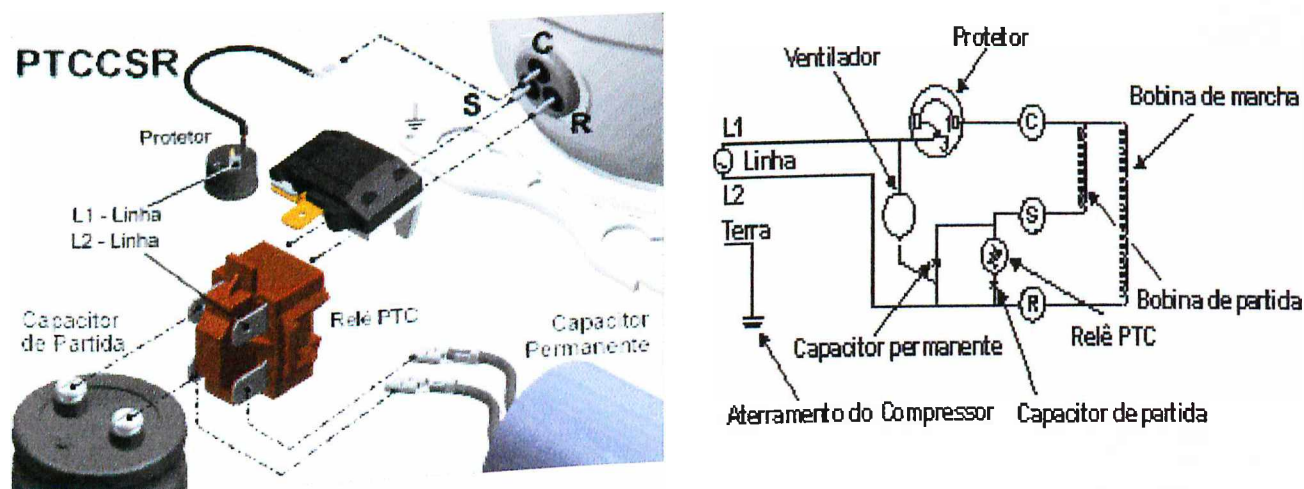


Figura 2.15: Motor de Indução de Fase Dividida – A Duplo Capacitor Utilizando Relé PTC. PTCCSR – Partida por PTC / Capacitor and Run

2.8 - Considerações Finais

Este capítulo, inicialmente, abordou aspectos gerais da refrigeração, caracterizando a sua evolução ao longo do tempo bem como a sua importância crescente na sociedade moderna.

Prosseguindo, fez-se uma descrição do princípio de funcionamento deste tipo de dispositivo, exemplificado através da descrição do ciclo completo de refrigeração de um aparelho condicionador de ar. Na seqüência, de maneira a possibilitar o entendimento do funcionamento de dispositivos de refrigeração, foram apresentados os principais componentes, elétricos e mecânicos, utilizados nestes equipamentos, assim como a função que cada um desempenha dentro de um determinado circuito.

Encerrando o capítulo, foram apresentados os compressores do tipo hermético atualmente encontrados em aparelhos de refrigeração de pequeno porte, bem como os arranjos elétricos mais comuns de dispositivos comercialmente disponíveis, em função de seu porte e/ou aplicação.

CAPÍTULO III

Motor de Indução Bifásico Assimétrico: Modelagem Matemática, Implementação Computacional e Validação do Modelo no Domínio do Tempo

3.1 - Considerações Iniciais

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento matemático da modelagem, no domínio do tempo, da máquina de indução bifásica assimétrica, que, conforme apresentado no capítulo anterior, atua como máquina motriz do equipamento de ar condicionado, objeto do estudo desta dissertação. No desenvolvimento do modelo, o motor é considerado como sendo uma carga linear, ou seja, os efeitos da saturação do circuito magnético são desprezados.

A partir das equações dinâmicas que representam o comportamento da máquina, é desenvolvido um programa computacional, utilizado para simular o comportamento do motor, no domínio do tempo, utilizando para tal o pacote SABER.

Objetivando a validação do modelo implementado, estudos computacionais são comparados às correspondentes situações experimentais, empregando-se, para tanto, um suprimento elétrico sob condições consideradas

ideais. Os resultados obtidos através destas duas estratégias são confrontados observando-se as formas de onda, valores eficazes, ângulos de fase, potências, etc.

3.2 - Motor de Indução Bifásico Assimétrico: Modelagem Matemática no Domínio do Tempo

Modelar um motor considerando-se as técnicas no domínio do tempo, significa representar o funcionamento da máquina através das equações diferenciais de forma que os diversos fenômenos eletromagnéticos possam ser reproduzidos matematicamente. Também, a solução deste conjunto de expressões conduz ao comportamento das grandezas eletromecânicas do dispositivo em função do tempo. Assim sendo, os estudos permitem a constatação dos fenômenos associados ao regime transitório e permanente de funcionamento do motor, muito embora, para fins desta pesquisa, apenas o desempenho em regime permanente seja alvo das atenções.

3.2.1 - Desenvolvimento Matemático

O modelo matemático é desenvolvido com base nas equações dos enlaces de fluxo e da equação de equilíbrio dos conjugados. As equações são escritas para uma máquina bifásica assimétrica, 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, [24], 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 3.1 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 [25], [26], [27]. No desenvolvimento da modelagem matemática do motor bifásico são consideradas as simplificações adotadas em [24], quais sejam:

- a) Os enrolamentos do estator são distribuídos de maneira a produzir uma onda de força magnetomotriz (fmm) senoidal no espaço;
- b) 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;
- c) O entreferro é uniforme;
- d) 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 3.1, já referenciada. 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_m e w_r , respectivamente. A direção positiva do ângulo θ_e gira em direção oposta a rotação do rotor.

Na figura 3.1 o símbolo (•) representa a corrente saindo do plano da figura, e o símbolo (x) representa a corrente penetrando no plano da figura.

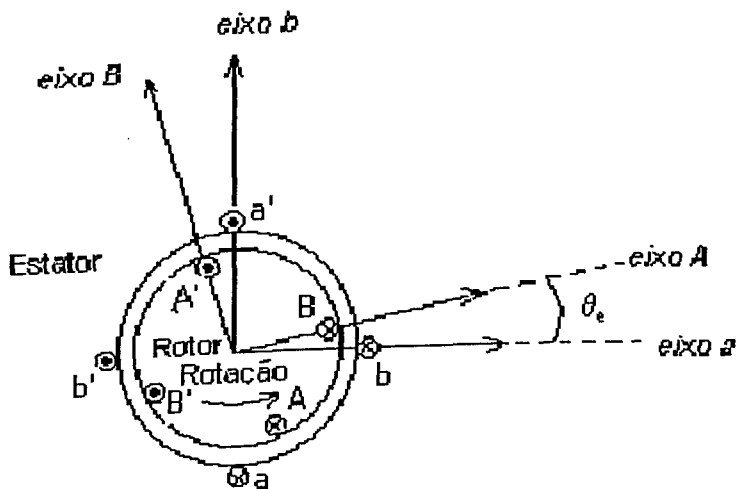


Figura 3.1: Representação do motor de indução bifásico assimétrico

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 enrolamento, por um enrolamento monofásico equivalente, conforme mostrado na figura 3.2.

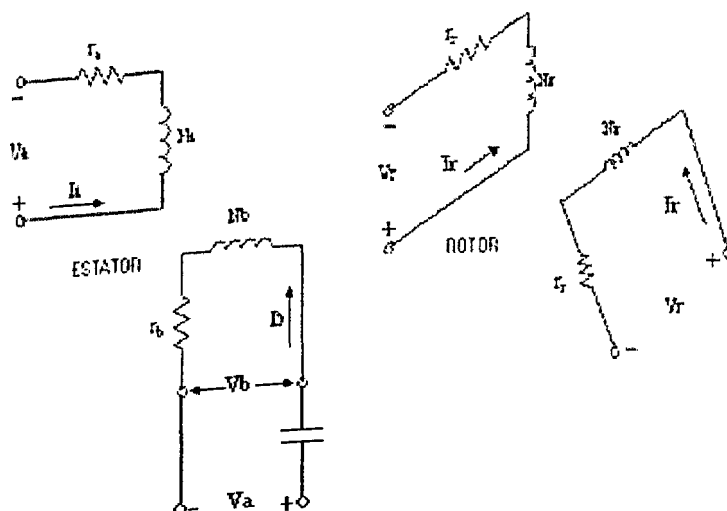


Figura 3.2: Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor

A seguir são apresentados os símbolos utilizados no presente trabalho:

- 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;
- 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 equivalente do rotor;
- l_{BB} - indutância própria do enrolamento equivalente do rotor;
- l_{AB} - indutância mútua dos enrolamentos rotóricos;
- l_{BA} - indutância mútua dos enrolamentos rotóricos;
- 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;
- v_{cap} - valor instantâneo da tensão no capacitor;
- 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;
- θ_e - deslocamento angular elétrico;
- θ_{mec} - deslocamento angular mecânico;
- T - conjugado eletromagnético;
- T_c - conjugado da carga;
- J - momento de inércia da carga + momento de 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.

3.2.2 - 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**

Conforme referido, a representação da máquina está ilustrada na figura 3.2. Do circuito podem ser obtidas as equações de tensão para o estator e rotor, utilizadas para determinar as equações que descrevem o comportamento da máquina [24], [28], [29]. Desta forma, para os enrolamentos do estator obtém-se:

$$v_a = r_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (3.1)$$

$$v_b = r_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (3.2)$$

Onde:

v_i - valores instantâneos da tensão na fase i .

λ_i - fluxo concatenado na fase i .

i - assume os 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:

$$v_A = 0 = r_A i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad (3.3)$$

$$v_B = 0 = r_B i_B + \frac{d\lambda_B}{dt} \quad (3.4)$$

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

- **Tensão no Capacitor**

O capacitor, conforme mencionado no capítulo precedente, é utilizado em aplicações onde seja necessário melhorar alguma característica de desempenho dos dispositivos, em função da aplicação a que se destina.

Da teoria de circuitos sabe-se que a corrente através do capacitor é dada pela equação:

$$i_b = C \frac{dv_{cap}}{dt}$$

Que pode ser reescrita na forma:

$$\frac{dv_{cap}}{dt} - \frac{1}{C} i_b = 0 \quad (3.5)$$

Desta forma, reportando-se à figura 3.2, a equação 3.2, do ramo do enrolamento auxiliar, é reescrita, considerando-se um capacitor permanente, em série com o enrolamento auxiliar, resultando na seguinte equação:

$$v = v_{cap} + v_b = v_a \quad (3.6)$$

3.2.3 - Equação Mecânica

O valor instantâneo do conjugado eletromagnético, T , pode ser obtido de duas maneiras. Uma através da variação da energia no sistema em relação aos deslocamentos angulares do rotor, supondo os fluxos concatenados constantes. A 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 3.7, obter-se-á a expressão do conjugado eletromagnético, dada pela equação 3.8:

$$T = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta_{mec}} \quad (3.7)$$

$$T = \frac{p}{2} \sum_i \sum_j i_i i_j \frac{dl_{ij}}{d\theta} \quad (3.8)$$

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

3.2.4 - Sistemas de Equações Dinâmicas que Regem o Comportamento da Máquina de Indução Bifásica Assimétrica

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 na forma de indutâncias mútuas e próprias, cuja expressão genérica assume a forma a seguir:

$$\lambda_i = l_{ii}i_i + \sum l_{ij}i_j$$

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:

$$\lambda_a = l_{aa}i_a + l_{aA}i_A + l_{aB}i_B \quad (3.9)$$

$$\lambda_b = l_{bb}i_b + l_{bA}i_A + l_{bB}i_B \quad (3.10)$$

$$\lambda_A = l_{AA}i_A + l_{Aa}i_a + l_{Ab}i_b \quad (3.11)$$

$$\lambda_B = l_{BB}i_B + l_{Ba}i_a + l_{Bb}i_b \quad (3.12)$$

Onde, os termos l_{ii} e l_{ij} referem-se às indutâncias próprias 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 , genéricas, são dadas pela expressão:

$$l_{ij} = L_{ij} \cos \theta_e = l_{ji} \quad (3.13)$$

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 3.14 a 3.17 representam as indutâncias próprias dos enrolamentos rotóricos e estáticos. Como os enrolamentos do rotor foram assumidos idênticos, ambos têm o mesmo valor de indutância própria.

$$l_{aa} = L_{aa} \cos 0^\circ = L_{aa} \quad (3.14)$$

$$l_{bb} = L_{bb} \cos 0^\circ = L_{bb} \quad (3.15)$$

$$l_{AA} = L_{AA} \cos 0^\circ = L_{AA} \quad (3.16)$$

$$l_{BB} = L_{BB} \cos 0^\circ = L_{BB} \quad (3.17)$$

• **Indutâncias mútuas:**

Da forma análoga, as equações de 3.18 a 3.23 permitem obter-se as indutâncias mútuas, sendo, portanto, iguais a:

$$l_{aA} = L_{aA} \cos \theta_e = l_{Aa} \quad (3.18)$$

$$l_{aB} = L_{aB} \cos(\theta_e - 90^\circ) = L_{aB} \text{sen} \theta_e = l_{Ba} \quad (3.19)$$

$$l_{bA} = L_{bA} \cos(\theta_e + 90^\circ) = -L_{bA} \text{sen} \theta_e = l_{Ab} \quad (3.20)$$

$$l_{bB} = L_{bB} \cos(\theta_e) = l_{Bb} \quad (3.21)$$

$$l_{ab} = L_{ab} \cos 90^\circ = l_{ba} = 0 \quad (3.22)$$

$$l_{AB} = L_{AB} \cos 90^\circ = l_{BA} = 0 \quad (3.23)$$

Substituindo as expressões das indutâncias das equações 3.14 a 3.23, nas expressões 3.9 a 3.12, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{aA} \cos \theta_e i_A + L_{aB} \text{sen}(\theta_e) i_B \quad (3.24)$$

$$\lambda_b = L_{bb} i_b - L_{bA} \text{sen} \theta_e i_A + L_{bB} \cos \theta_e i_B \quad (3.25)$$

$$\lambda_A = L_{AA} i_A + L_{aA} \cos \theta_e i_a - L_{bA} \text{sen} \theta_e i_b \quad (3.26)$$

$$\lambda_B = L_{BB} i_B + L_{aB} \text{sen} \theta_e i_a + L_{bB} \cos \theta_e i_b \quad (3.27)$$

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:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_{mec}$$

onde p é o número de pólos.

Fazendo $\theta_{mec} = \theta$, tem-se:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta \quad (3.28)$$

Substituindo-se a expressão 3.28 nas equações 3.24 a 3.27, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_A + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_B \quad (3.29)$$

$$\lambda_b = L_{bb} i_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_A + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_B \quad (3.30)$$

$$\lambda_A = L_{AA} i_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_a - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_b \quad (3.31)$$

$$\lambda_B = L_{BB} i_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_a + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2} \theta\right) i_b \quad (3.32)$$

Partindo das expressões 3.29 a 3.32, que permitem a determinação dos fluxos existentes no dispositivo, obtém-se as equações dinâmicas da máquina, conforme a seguir. Salienta-se que, doravante, o símbolo “ \bullet ”, colocado sobre qualquer variável representa o operador d/dt .

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} \dot{I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{I} \end{bmatrix} [I] \quad (3.33)$$

Para o enlace de fluxo λ_a no enrolamento principal do estator, a partir da expressão 3.29, obtém-se:

$$\dot{\lambda}_a = L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \dot{\theta} \quad (3.34)$$

Analogamente obtêm-se para λ_b , λ_A , λ_B , a partir das expressões 3.30 a 3.32, as expressões 3.35 a 3.37, respectivamente.

$$\dot{\lambda}_b = L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \dot{\theta} \quad (3.35)$$

$$\dot{\lambda}_A = L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} i_b \dot{\theta} \quad (3.36)$$

$$\dot{\lambda}_B = L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_b \dot{\theta} \quad (3.37)$$

Fazendo uso das expressões que fornecem as derivadas dos fluxos concatenados, equações 3.34 a 3.37 e, reescrevendo-se as expressões para as tensões nos enrolamentos, equações 3.1 a 3.4, na forma matricial, obtêm-se um conjunto de expressões da forma a seguir.

$$[V] = [R][I] + \begin{bmatrix} \dot{\lambda} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Deste modo, as expressões das tensões para os enrolamentos do estator e do rotor da máquina, considerando-se o capacitor permanente em série com o enrolamento auxiliar, são as seguintes:

$$v = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \dot{\theta} \quad (3.39)$$

$$v = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \dot{\theta} + v_{cap} \quad (3.40)$$

$$v_A = 0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} \dot{i}_b \dot{\theta} \quad (3.41)$$

$$v_B = 0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b \dot{\theta} \quad (3.42)$$

• 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:

$$W'' = W'_a + W'_b + W'_A + W'_B$$

Onde:

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

Ou considerando todas as contribuições:

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

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:

$$W' = L_{aa} \frac{i_a^2}{2} + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_a + L_{aB} \operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_a + L_{bb} \frac{i_b^2}{2} - L_{bA} \operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_b + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_b + L_{AA} \frac{i_A^2}{2} + L_{BB} \frac{i_B^2}{2} \quad (3.43)$$

• Determinação do conjugado eletromagnético

O conjugado eletromagnético é dado pela derivada da co-energia em relação ao deslocamento angular. Assim, partindo da equação 3.43, e encontrando sua derivada em relação ao deslocamento angular, obtém-se a expressão do conjugado eletromagnético, (T), que assume a seguinte forma:

$$T = -\left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{aA} \operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A + L_{aB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \right] i_a + \left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A - L_{bB} \operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \right] i_b \quad (3.44)$$

• Determinação do conjugado da carga

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

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

$$T = T_C + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3.45)$$

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.

A velocidade e a aceleração angular podem ser determinadas a partir das equações 3.46 e 3.47, respectivamente:

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.46)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.47)$$

Substituindo as expressões 3.46 e 3.47 na equação 3.45, obtêm-se:

$$T = T_C + J \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + B \frac{d\theta}{dt} \quad \text{ou} \quad T = T_C + J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (3.48)$$

Reescrevendo a expressão 3.48, de maneira a explicitar o conjugado da carga, chega-se a seguinte equação:

$$T_C = T - J \dot{\omega} + B\omega \quad (3.49)$$

O resultado do equacionamento matemático acima, é o conjunto de equações, 3.50 a 3.56, que determina o comportamento do motor de indução bifásico:

$$v = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega \quad (3.50)$$

$$v = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega + v_c \quad (3.51)$$

$$0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} i_b \omega \quad (3.52)$$

$$0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_b \omega \quad (3.53)$$

$$T_C = -\left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{aA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A + L_{aB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \right] \dot{i}_a + \left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A - L_{bB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \right] \dot{i}_b - J \dot{\omega} - B \omega \quad (3.54)$$

$$0 = -\frac{1}{C} i_b + \dot{v}_{cap} \quad (3.55)$$

$$0 = -\omega + \dot{\theta} \quad (3.56)$$

3.3 - Motor Elétrico Utilizado no Dispositivo sob Estudo

Várias são as técnicas utilizadas para produzir o campo girante necessário a partida de motores de indução mono e bifásicos. Para o equipamento estudado neste trabalho, utiliza-se um capacitor permanente em série com o enrolamento auxiliar, conforme ilustrado na figura 3.3.

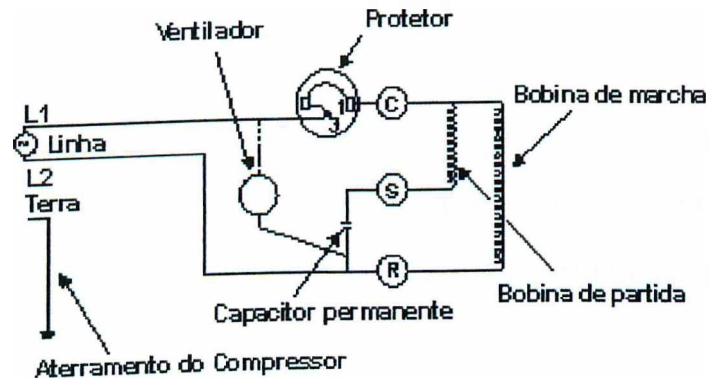


Figura 3.3: Esquema elétrico do motor de indução monofásico utilizado no condicionador de ar.

Em equipamentos de refrigeração que utilizam compressores herméticos, o motor elétrico encontra-se acondicionado dentro da carcaça do compressor. Aspectos construtivos deste tipo de motor encontra-se ilustrado na figura 3.4. Esta ilustração evidencia: o estator, os enrolamentos estáticos, o eixo do rotor e parte dos componentes mecânicos.



Figura 3.4: Motor elétrico utilizado no acionamento de compressores herméticos.

3.4 - Validação do Modelo Matemático

Para a validação do modelo matemático será adotada como estratégia, a realização de ensaios experimentais e computacionais, cuja confrontação dos resultados, em função do grau de concordância, possibilitará, a sua validação.

3.4.1 - Ensaios Experimentais

Este item, objetivando a validação do modelo matemático do motor de indução bifásico implementado, trata, tão apenas, dos ensaios e simulações relacionados com o funcionamento do dispositivo sob condições ideais de suprimento, ou seja, tensão de alimentação puramente senoidal. No capítulo IV, o estudo compreenderá a aplicação dos diversos itens de qualidade, que possibilitarão a avaliação do desempenho do equipamento sob condições adversas à presente.

É importante registrar, que a característica hermética do compressor utilizado no aparelho, introduziu limitações de ordem técnica, quanto às grandezas que poderiam ser observadas e registradas nos trabalhos experimentais. Exemplo dessas restrições são as grandezas mecânicas no eixo do moto-compressor, tais como a velocidade e o conjugado, grandezas estas inacessíveis pela hermeticidade do conjunto.

Face o exposto, para fins de validação do modelo, são tomadas como referências as correntes nos enrolamentos principal, auxiliar e a corrente total do equipamento.

3.4.2 - Simulação Computacional

O caráter científico desta dissertação não estaria completo, caso fossem realizados somente trabalhos experimentais. Por este motivo, paralelamente aos estudos práticos, procedeu-se a um estudo computacional através da

implementação de um modelo que reproduzisse o desempenho do equipamento real, respeitadas as considerações ou limitações impostas. Neste sentido, os modelos matemáticos anteriormente descritos foram implementados num programa computacional na plataforma *SABER*[®], pacote este, escolhido por ter uma forte versatilidade gráfica, facilidade na ampliação das grandezas observáveis e interface com diversas outras linguagens. O programa elaborado, denominado por *template condicionador de ar*, encontra-se no **Anexo A**.

Este template possui como características principais, as seguintes:

Objetivo: Avaliar o desempenho de um motor de indução bifásico assimétrico utilizado nos trabalhos de simulação do aparelho condicionador de ar.

➤ Variáveis de entrada:

- r_{sa} - resistência do enrolamento principal do estator, fase a;
- x_{sa} - reatância do enrolamento principal do estator, fase a;
- r_{sb} - resistência do enrolamento auxiliar do estator, fase b;
- x_{sb} - reatância do enrolamento auxiliar do estator, fase b;
- r_r - resistência do rotor, por fase;
- x_r - reatância do rotor, por fase;
- x_m - reatância de magnetização;
- K_0 - Porcentagem da potência nominal representativa das perdas rotacionais;
- f - frequência [Hz];
- v_{nom} - Tensão eficaz fase-fase em [V];
- s_{nom} - Potência nominal do motor [cv];
- J - momento de inércia da carga + momento de inércia do motor
- $ccap$ - capacitor permanente [μF],
- V_0 - condição inicial do capacitor de partida;
- N_a - número de espiras do enrolamento principal;

- N_b - número de espiras do enrolamento auxiliar;
- n_p - número de pólos do motor (no desenvolvimento matemático foi chamado “ p ”);

➤ Variáveis de saída:

- i_{sa} - corrente no enrolamento principal do estator;
- i_{sb} - corrente no enrolamento auxiliar do estator;
- i_{rA} - Corrente na fase A do rotor;
- i_{rB} - Corrente da fase B do rotor;
- con_elmag - Conjugado eletromagnético do motor [N.m];
- con_eixo - Conjugado mecânico no eixo do motor [N.m];
- con_carga - Conjugado mecânico solicitado pela carga [N.m];
- vel_motor - Velocidade angular do rotor do motor [rad/s];
- vel_eletr - Velocidade angular do campo girante do motor [rad/s];
- $teta$ - Ângulo espacial entre as fmm do estator e do rotor.

3.4.3 - Operação do Motor Sob Condições de Tensão de Suprimento Senoidal

Conforme já referido, esta situação tem por finalidade a validação do modelo computacional proposto e implementado. Dentro destas condições, serão efetuados ensaios experimentais e computacionais e estabelecidos termos comparativos entre ambas respostas, de modo a verificar a coerência entre o modelo matemático e o modelo real. Em ambos os estudos, computacional e experimental, o motor foi submetido a uma tensão de alimentação ideal e igual ao seu valor nominal de 220 [V] - RMS. Por outro lado, o motor encontra-se operando com suas características nominais. Finalmente, deve-se destacar, que na Tabela 3.1 encontram-se as características principais do equipamento

investigado, e, as características completas do motor e do compressor estão descritas no **Anexo B**.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS DO EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO

Vnom (V)	f (Hz)	Snom (CV)	Np	Na	Nb	Ccap (uF)	J (kg*m ²)
220	60	1.0	2	1	1.16	17.5	0.0015
Rsa (Ω)	Xsa (Ω)	Rsb (Ω)	Xsb (Ω)	Rr (Ω)	Xr (Ω)	Xm (Ω)	
3.86	5.44	11.49	3.44	4.5	2.5	212	

É importante reforçar que as grandezas monitoradas nos ensaios experimentais limitaram-se às correntes e tensão, devido às características herméticas do equipamento. Porém, no modelo computacional, será possível observar-se grandezas adicionais tais como: velocidade, conjugado e outras.

As figuras 3.5 e 3.6 mostram as formas de onda da tensão de alimentação e das correntes absorvidas pelo motor, para os casos experimental e simulado, respectivamente. Observa-se, no caso experimental que, mesmo com a alimentação senoidal suprida pela fonte, as formas de onda das correntes, total e nos enrolamentos, se mostram distorcidas, fato este que demonstra a natureza não linear da carga estudada. Já no caso computacional, as formas de onda das correntes, embora bastante semelhantes em forma e magnitude, não se apresentam distorcidas. As diferenças entre os dois casos, devem-se as simplificações introduzidas no item 3.2.1. Explica-se esse fato devido a saturação dos materiais ferromagnéticos, ressaltando que, uma das simplificações feitas no modelo implementado, foi justamente a desconsideração da saturação, portanto, o circuito simulado é tido como linear. Essa simplificação, entretanto, é perfeitamente aceitável, uma vez que, o objetivo é a

análise do desempenho global do motor, dentro do contexto da qualidade da energia elétrica de suprimento. Conclui-se, portanto, que este fato não compromete e nem prejudica o estudo aqui realizado.

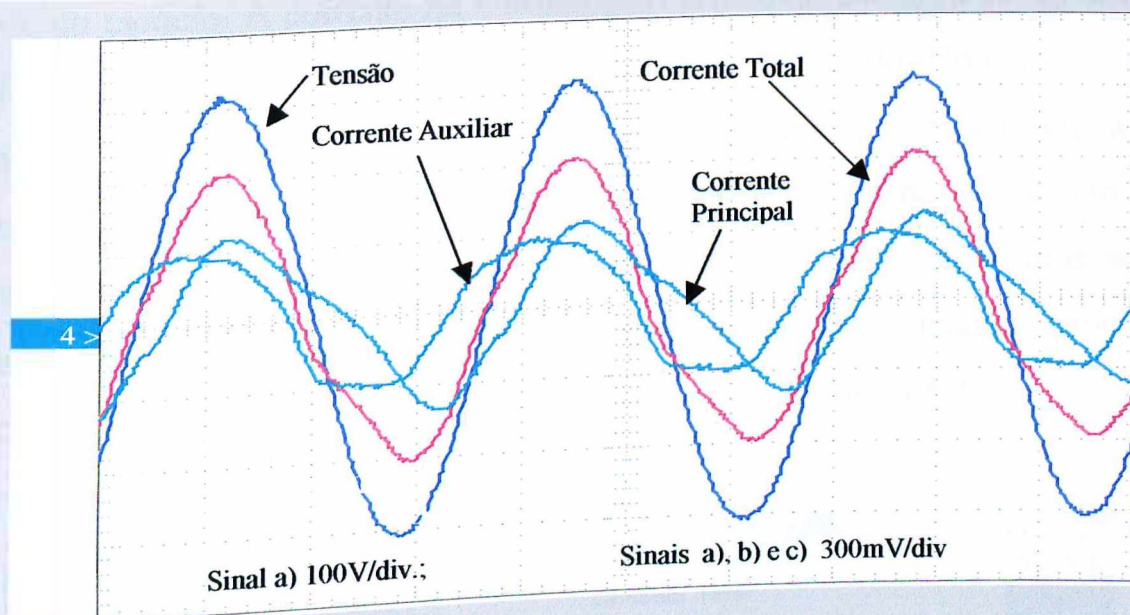


Figura 3.5: a) Tensão de alimentação, b) Corrente total solicitada pelo condicionador, c) Corrente enrolamento principal e d) Corrente enrolamento Auxiliar. **Experimental**

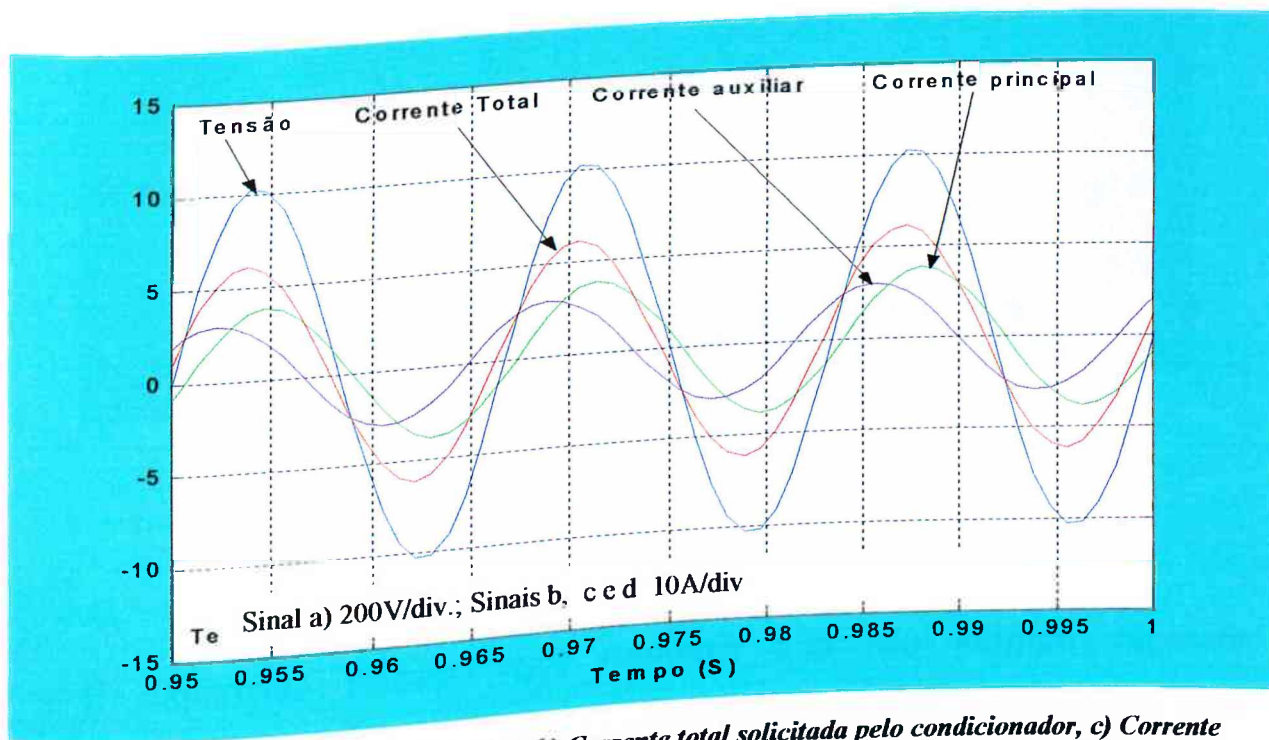


Figura 3.6: a) Tensão de alimentação, b) Corrente total solicitada pelo condicionador, c) Corrente enrolamento principal e d) Corrente enrolamento Auxiliar r- **Computacional**

Ainda nas figuras citadas, é importante atentar para as defasagens entre as diferentes correntes e a tensão de suprimento. Observa-se coerência entre os resultados dos dois tipos de estudos realizados, mais uma vez mostrando a validade do modelo. A corrente no enrolamento principal, encontra-se em atraso em relação à tensão, devido a característica indutiva do mesmo. No enrolamento auxiliar, devido ao efeito do capacitor, tem-se uma característica capacitiva, o que se observa pela corrente adiantada em relação à tensão de suprimento. A corrente total solicitada pela carga, soma das duas anteriores, mostra-se praticamente em fase com a tensão de alimentação, apresentando fator de potência em torno de 0.96, conforme pode observar-se na figura 3.7.

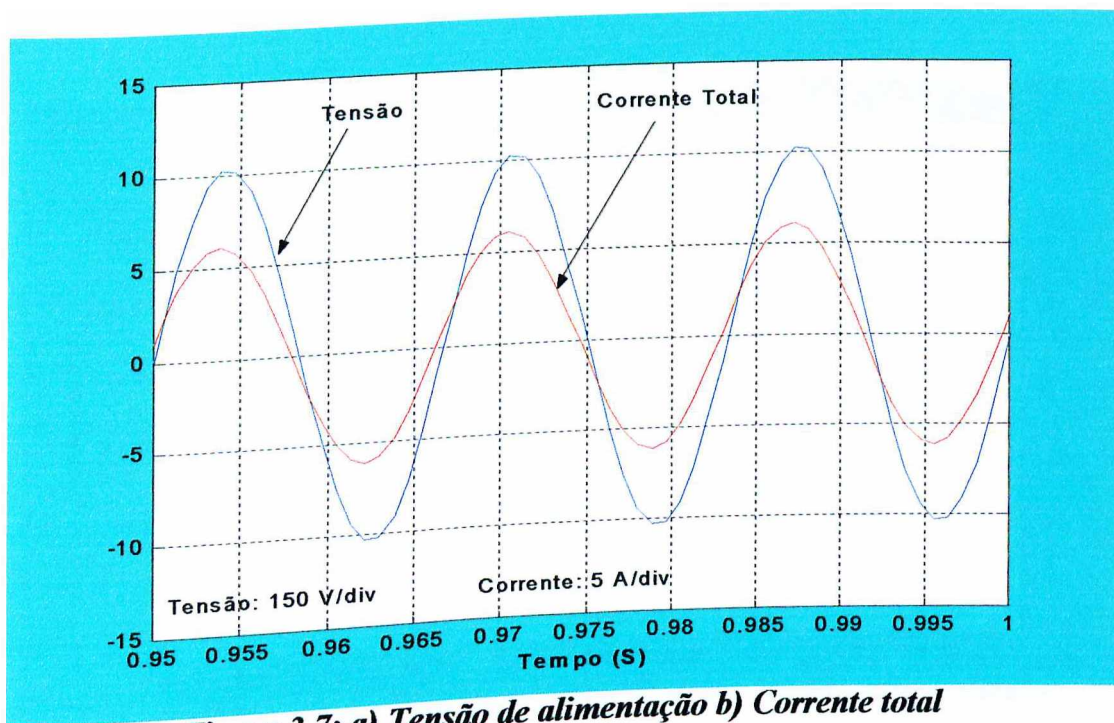


Figura 3.7: a) Tensão de alimentação b) Corrente total Computacional

É importante ressaltar que, motores que não utilizam capacitor permanente, tanto experimental quanto computacionalmente, apresentaram fator de potência baixo, em torno de 0.55, indutivo [30]. Exemplo deste tipo de motor

é aquele utilizado em refrigeradores domésticos, monofásico, com enrolamento de partida.

Conforme mencionado, em todas as análises realizadas, os resultados obtidos são coerentes, demonstrando a validade do modelo e, por conseguinte, autorizando a sua utilização nos estudos mais completos que serão realizados no capítulo IV.

Considerando a resposta satisfatória do modelo computacional, na figura 3.8 está mostrada a curva da velocidade em relação ao tempo, atingindo a velocidade de regime permanente, 3.435 RPM, em aproximadamente 0.3 segundos. Conforme já mencionado, esta característica não foi possível de se verificar no caso experimental, devido às características construtivas do motor.

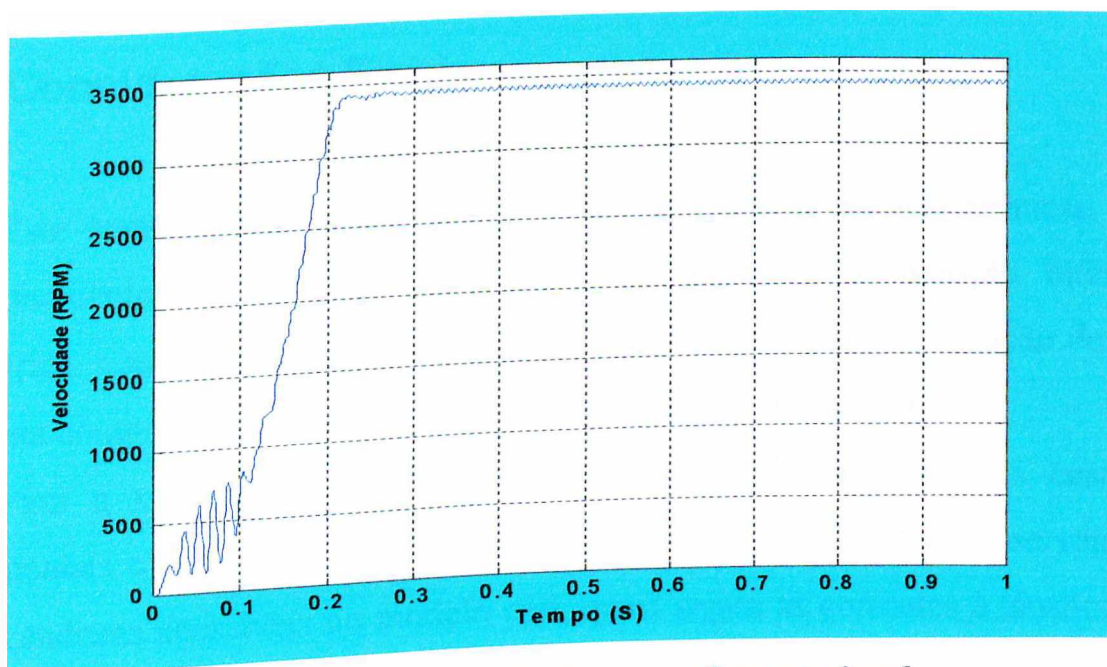


Figura 3.8: Velocidade do motor - Computacional

Da mesma forma, na figura 3.9, é apresentada a curva do conjugado eletromagnético desenvolvido pelo dispositivo apresentando comportamento condizente com os estudos teóricos realizados.

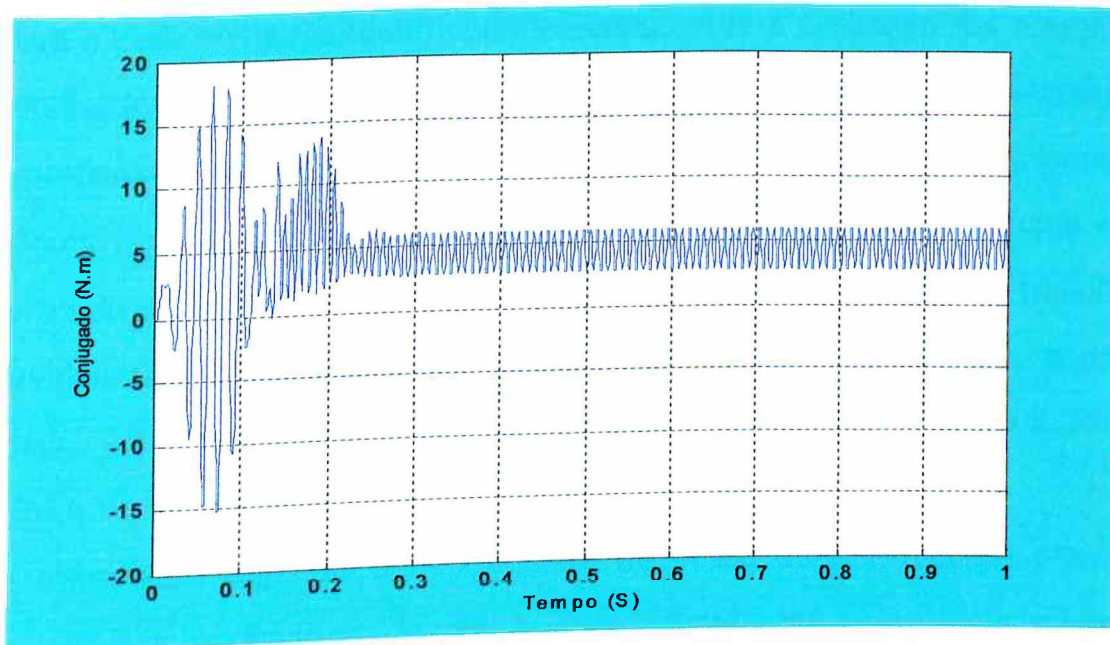


Figura 3.9: Conjugado eletromagnético - Computacional

3.5 - Considerações Finais

Este capítulo teve como meta principal apresentar a fundamentação e o equacionamento, no domínio do tempo, da máquina de indução bifásica assimétrica, com rotor em gaiola de esquilo, com vistas à implementação de um programa computacional, que reproduza a operação do dispositivo.

Para a validação do modelo implementado, foram realizados ensaios experimentais e computacionais, em condições de suprimento ideal, observando-se as grandezas acessíveis no modelo real, quais sejam as correntes e tensões de suprimento.

Da confrontação das grandezas observadas experimentalmente com aquelas obtidas da simulação, verificou-se grande semelhança entre os resultados obtidos pelos dois métodos, o que permitiu a validação do modelo. Deste modo, é possível analisar o comportamento de dispositivos que possuem como máquina motriz um motor elétrico, como o aqui estudado, a partir de estudos computacionais.

Para o caso computacional, complementarmente à avaliação das correntes, foram analisados, ainda, a velocidade do motor e o conjugado eletromagnético. Os comportamentos e valores obtidos para estas grandezas, foram confrontadas com valores obtidos teoricamente, apresentando-se compatíveis. Vencida esta etapa, e tendo sido verificada a validade do modelo, a ferramenta de trabalhos obtida evidencia a possibilidade da realização de outros estudos, como aqueles relacionados à avaliação de desempenho dos aparelhos de ar condicionado frente aos distintos distúrbios de qualidade de energia.

É importante registrar a necessidade da posse de informações precisas com relação aos parâmetros do dispositivo, dificultados pelas características construtivas.

CAPÍTULO IV

Aparelho Condicionador de Ar: Análise de Desempenho no Contexto da Qualidade

4.1 - Considerações Iniciais

Nos capítulos precedentes foram abordados aspectos diversos referentes ao equipamento em estudo, o condicionador de ar. No Capítulo 3 foram introduzidos a modelagem matemática e o programa computacional que representam o funcionamento deste dispositivo, encerrando com a validação da representação digital implementada sob condições ideais de suprimento.

Neste capítulo, serão realizados diversos casos experimentais e computacionais, direcionados à avaliar o desempenho do dispositivo, quando mesmo encontra-se operando com tensões de suprimento fora das condições ideais. O objetivo desta etapa dos trabalhos é de, portanto, avaliar o desempenho do equipamento do ponto de vista da qualidade da energia elétrica, bem como levantar as curvas de suportabilidade e/ou sensibilidade do mesmo, às perturbações aplicadas.

Para atender os objetivos aqui propostos, este capítulo encontra-se estruturado da forma seguinte:

- Identificação do dispositivo a ser estudado - Aparelho Condicionador de Ar;
- Metodologia e esquematização adotada para a realização dos trabalhos experimentais e computacionais;
- Síntese das normas e recomendações sobre procedimentos de ensaios a serem utilizados nos trabalhos experimentais de levantamento das características de sensibilidade e/ou suportabilidade dos mais distintos componentes dos complexos elétricos, limitados a uma potência definida por corrente de alimentação de até 16 A;
- Casos investigados, experimentais e computacionais, com a aplicação de indicadores de qualidade necessários a estudos desta natureza;
- Levantamento das curvas de suportabilidade e sensibilidade do dispositivo e;
- Considerações finais.

4.2 - Características e Circuito Equivalente do Equipamento Analisado

A seguir é feita a apresentação do equipamento utilizado nos ensaios, destacando-se suas características construtivas e de desempenho mais relevantes, assim como também o circuito elétrico representativo.

4.2.1 - Características Físicas do Condicionador de Ar Analisado

O equipamento a ser estudado, de modo experimental e computacionalmente, consiste num aparelho de condicionador de ar de 7500 BTUs, tipo janela, que se encontra ilustrado nas figuras 4.1.a. e 4.1b. Através destas ilustrações podem ser observados os principais componentes internos do dispositivo.



Fig 4.1 (a): Foto do condicionador de ar utilizado nos trabalhos experimentais

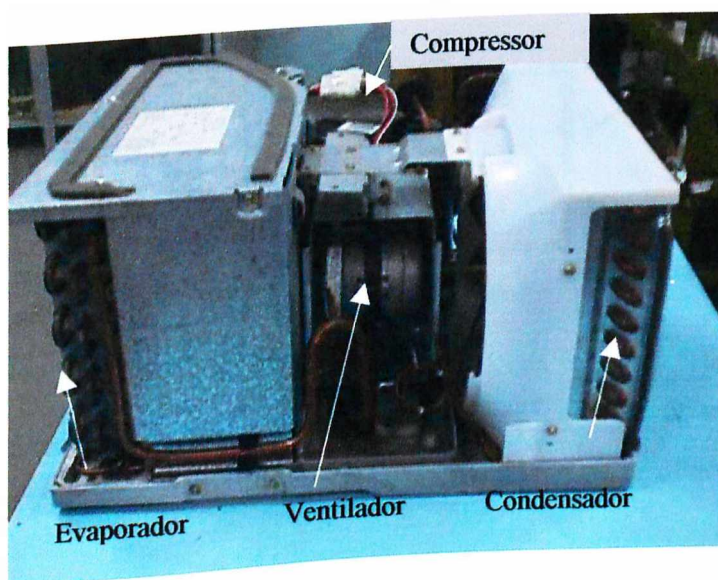


Figura 4.1(b): Foto do interior do aparelho condicionador de ar submetido aos testes identificando os componentes internos principais

O dispositivo enfocado é dotado de um compressor do tipo hermético alternativo, cujas características completas estão descritas no Anexo B.

4.2.2 - Arranjo Físico da Unidade Elétrica do Equipamento Ensaiado

O motor de indução bifásico assimétrico estudado no capítulo III corresponde ao componente elétrico fundamental do condicionador de ar ensaiado, pois é ele quem disponibiliza a potência mecânica no eixo do motor, conforme se faz necessário pelo compressor, para a realização dos ciclos de refrigeração de forma contínua.

A figura 4.2 mostra o arranjo físico dos componentes que perfazem o acionamento elétrico do equipamento utilizado nos trabalhos experimentais. Como se vê, além da representação dos enrolamentos do motor, podem ser identificados ainda: o ventilador, o capacitor permanente e o protetor térmico (bimetálico), cujas funções foram descritas no capítulo II.

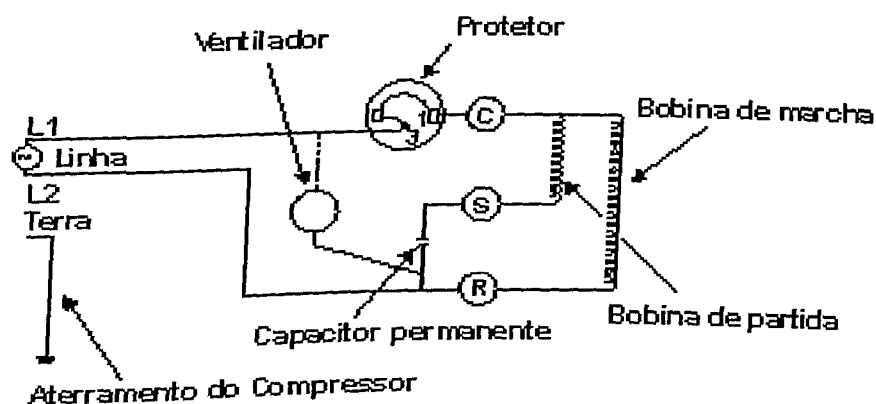


Figura 4.2: Esquema elétrico simplificado do aparelho condicionador de ar

É importante ressaltar que, para a realização dos estudos computacionais, algumas simplificações foram efetuadas, as quais, todavia, não comprometem a precisão quantitativa e qualitativa dos resultados obtidos. Dentre as

simplificações, pode-se citar que foram omitidas as representações do ventilador e do termostato. O ventilador não participa do funcionamento do compressor, apenas insufla o ar frio para o recinto e o ar quente para o ambiente exterior. A dupla ventilação é atribuída à existência de duas turbinas no mesmo eixo. Por outro lado, o termostato, tem como função abrir o circuito de alimentação do compressor, desligando-o, quando atingida a temperatura ajustada. Com o aumento da temperatura do ambiente, o termostato restabelece a continuidade do circuito, possibilitando novo ciclo de refrigeração.

4.3 - Estratégia para os Estudos

Os estudos realizados neste trabalho, conforme já mencionado, abrangem a parte experimental e computacional, focadas nos aspectos da qualidade do suprimento aplicado ao equipamento. Em ambos os casos, o equipamento em teste foi submetido a diversos itens de perda da qualidade da energia elétrica, os quais estão em consonância com os tipos de distúrbios mencionados no capítulo I. Dos resultados obtidos, computacionais e experimentais, para cada caso, é feita uma análise comparativa com vistas a, mais uma vez, validar a metodologia computacional e concluir sobre o nível de inter-relacionamento entre os distúrbios e o desempenho do equipamento testado.

4.3.1 - Ensaio Experimentais

O equipamento estudado pode funcionar nos modos de ventilação e de condicionamento de ar. O modo de ventilação não faz parte dos objetivos do trabalho, por este motivo, o estudo compreenderá somente a operação na função de condicionamento de ar, com o termostato ajustado em seu valor máximo. É

importante ressaltar, que o ajuste do termostato em seu valor máximo, não significa maior potência demandada da rede, mas sim, um período de tempo maior de funcionamento, função das dimensões e da temperatura do ambiente a ser refrigerado. Já o ventilador, cujo consumo de energia é independente do compressor, destina-se a promover a circulação do ar resfriado para o recinto e o ar quente para o ambiente externo, aumentando desta forma o rendimento do sistema como um todo.

Na figura 4.3, mostra-se o diagrama esquemático da montagem para os trabalhos experimentais, identificando as conexões e os diferentes dispositivos utilizados.

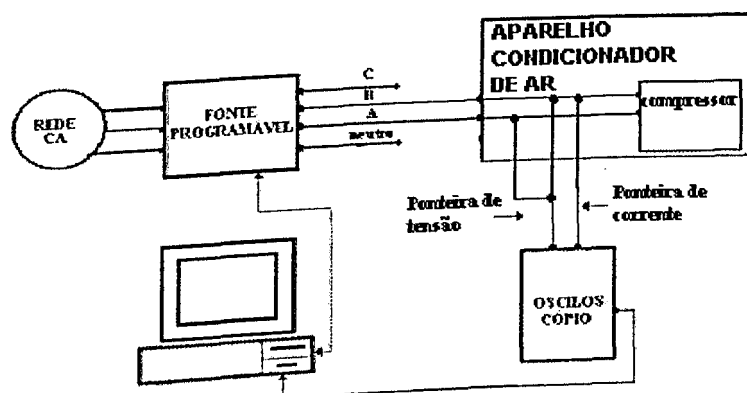


Figura 4.3: Diagrama esquemático utilizado nos trabalhos experimentais

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

- A fonte especial, programável, trifásica, marca HP, modelo HP 6834 A, com potência nominal de 4,5 KVA, tem a função de fonte de suprimento para o aparelho condicionador de ar. Ela permite, quando for o caso, a aplicação dos

diversos itens de qualidade, de forma controlada, à tensão de alimentação. Dada sua importância, na figura 4.4, estão mostrados os módulos internos componentes da fonte, que possibilitaram a aplicação dos distúrbios.

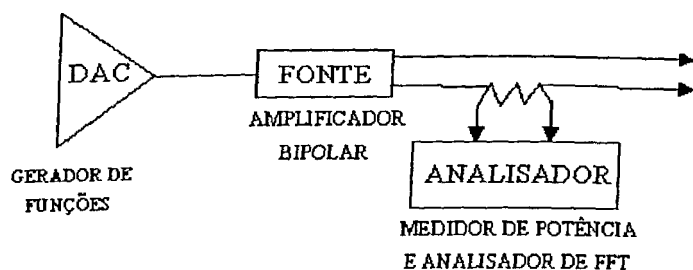


Figura 4.4: Módulos constituintes da fonte HP6834A

- O osciloscópio, de 4 canais, tem a finalidade de realizar a aquisição dos sinais de tensão e corrente solicitados pelo aparelho em 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 com o auxílio do programa *WaveStar*, software aplicativo do osciloscópio utilizado, que permite dentre outros recursos a decomposição harmônica das formas de onda das grandezas registradas.
- O micro-computador tem a função de controlar a fonte programável, além de armazenar e processar o tratamento dos sinais capturados pelo osciloscópio.

A programação dos eventos realizados pela fonte (variação de tensão e frequência) pode ser local ou remota, feita através de um PC via HP-IB e/ou via porta serial RS-232. Neste trabalho foi utilizado o modo remoto, com a utilização de programas desenvolvidos pela Universidade Federal de Uberlândia.

4.3.2 - Simulação Computacional

Complementarmente aos trabalhos experimentais, foram realizadas simulações computacionais, sempre estabelecendo uma análise comparativa entre os resultados obtidos. Para a realização dos trabalhos de simulação, como já dito, utilizou-se o pacote computacional SABER ao qual foi implementada a estratégia de modelagem considerada no capítulo III.

O esquema do circuito do condicionador de ar utilizado nos estudos computacionais está mostrado na figura 4.5. Observa-se da figura, que as diferenças deste para o circuito mostrado na figura 4.3, está na omissão dos dispositivos de proteção e do ventilador.

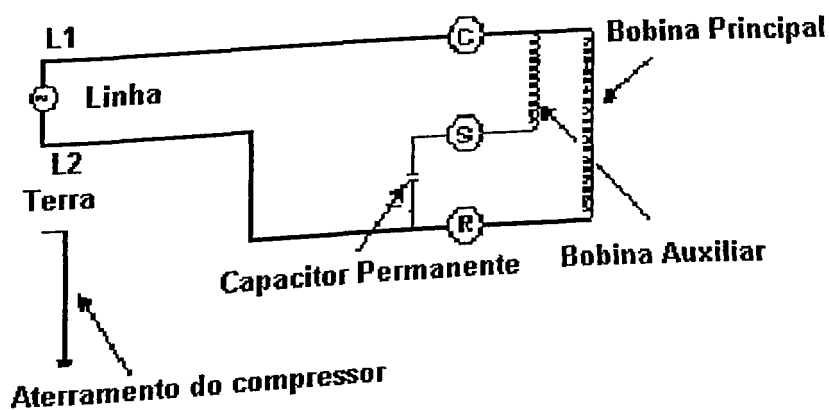


Figura 4.5: Esquema elétrico do condicionador de ar utilizado nos trabalhos computacionais

Na seqüência são descritos os casos estudados e, subseqüentemente, apresentados os resultados práticos e digitais obtidos, sendo realizados todos os comparativos necessários.

4.4 - Casos Estudados

Os casos analisados, experimentais e computacionais, consistiram em submeter o condicionador de ar alguns itens de perda de qualidade, quais sejam:

- Variações de tensão de curta duração (*voltage sag*) e (*voltage swell*);
- Interrupções do fornecimento de energia;
- Distorções Harmônicas;
- Flutuações de tensão.

De maneira a possibilitar uma visão ampla da abrangência deste trabalho, na Tabela 4.1 encontram-se consolidados todos os casos estudados, com breve descrição das condições de operação do aparelho para cada situação.

Os trabalhos foram realizados sempre em observância às normas de procedimentos para aplicação dos itens de qualidade, no tocante a magnitudes e duração das perturbações, e utilizando as duas estratégias de ensaios: experimental e computacional.

TABELA 4.1: QUADRO RESUMO DOS CASOS ANALISADOS

Caso	Características da tensão de Suprimento	Tipo de estudo
1	Característica ideal	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
2	Elevação de tensão de curta duração (<i>Voltage swell</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
3	Afundamento de tensão de curta duração (<i>Voltage sag</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
4	Interrupção no fornecimento de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
5	Suprimento contendo distorção harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
6	Flutuação de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional

Devido às características herméticas do compressor, somente estão acessíveis para observação e registro os sinais elétricos de tensão e corrente fornecidos ao equipamento. Por este motivo, para avaliar o comportamento do equipamento em estudo, serão utilizadas a tensão de suprimento, a corrente total e as correntes das fases principal e auxiliar. Para cada caso estudado é feita a análise da forma de onda correspondente, destacando-se os efeitos mais significativos no equipamento, como resposta ao distúrbio aplicado.

Com respeito às investigações computacionais, as mesmas condições de operação, às quais o aparelho condicionador de ar foi submetido experimentalmente, foram reproduzidas digitalmente.

Os ensaios realizados no equipamento, experimental e computacional, com o suprimento contendo diversos itens de qualidade, seqüencialmente, foram feitos com diferentes graus de severidade e duração, de maneira a possibilitar avaliar o desempenho do dispositivo, quando submetido a essas condições adversas. Entretanto, em cada um dos casos estudados, independente da severidade ou da duração da perturbação, o comportamento do equipamento apresenta-se semelhante, respeitadas as magnitudes das grandezas aplicadas. Desta forma, para cada um dos casos estudados, será apresentado no presente trabalho, uma ou no máximo duas situações, pois, como mencionado, este é representativo e suficiente para a observação e entendimento dos fenômenos envolvidos.

Para cada caso estudado, os resultados experimentais serão primeiramente apresentados e, na seqüência, aqueles obtidos por via computacional.

4.4.1 - Suprimento com Característica Ideal - Caso 1

Esta primeira situação, considerada como base ou referência, é utilizada para fins de comparação com as demais condições estudadas, nas quais o suprimento não mais possui a característica ideal.

a) Tensão e Corrente de alimentação

Com o auxílio da fonte especial descrita anteriormente, ao aparelho condicionador de ar foi aplicada uma tensão de alimentação com característica muito próxima da ideal, de valor rms 220V, como se observa na figura 4.6, obtida pelo método experimental. O conteúdo harmônico da onda de tensão é inferior a 0.5%. Ainda na mesma figura, observa-se que a forma de onda da corrente total solicitada pelo equipamento, no entanto, apresenta-se distorcida.

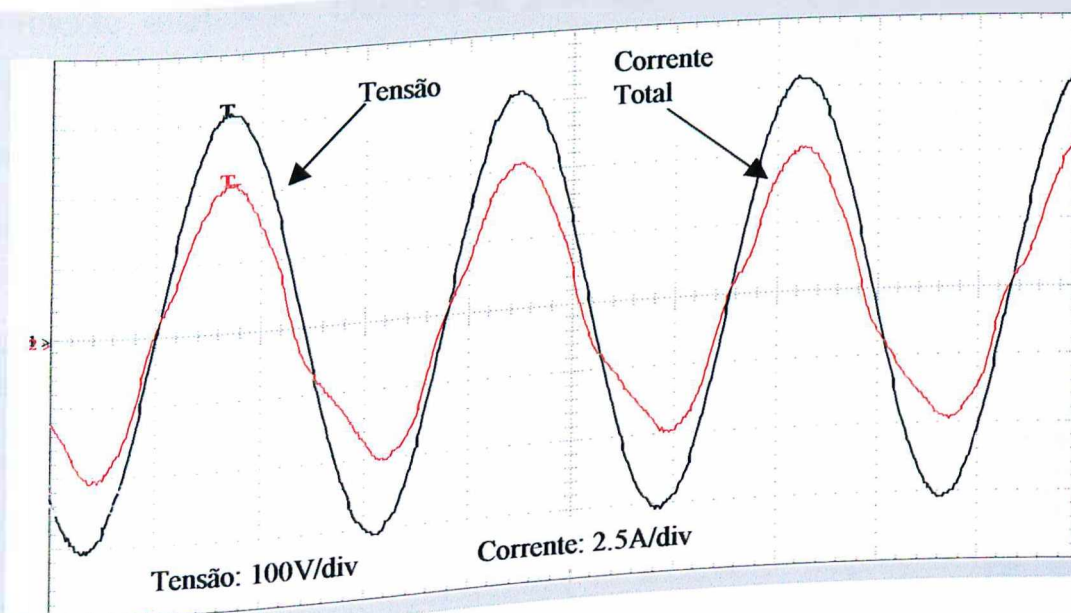


Figura 4.6: Caso 1: Alimentação senoidal – Experimental

A figura 4.7 mostra a corrente total consumida e as correntes nos enrolamentos principal e auxiliar absorvidas pelo motor, evidenciando-se, de forma mais acentuada, a forte não linearidade do dispositivo.

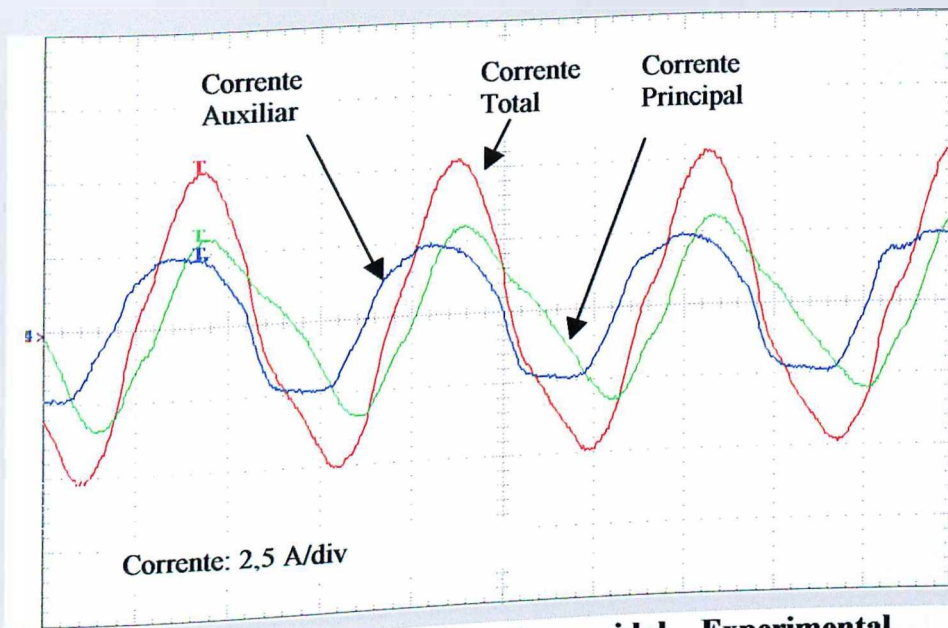


Figura 4.7: Caso 1: Alimentação senoidal – Experimental

Nas figuras 4.8 e 4.9, são mostrados dois conjuntos de formas de onda, obtidos por meio computacional, que correspondem ao caso experimental anteriormente analisado. Observa-se das figuras computacionais que estas conferem com suas equivalentes experimentais, ressalvadas diferenças decorrentes das considerações impostas, que resultaram na não reprodução da não-linearidade.

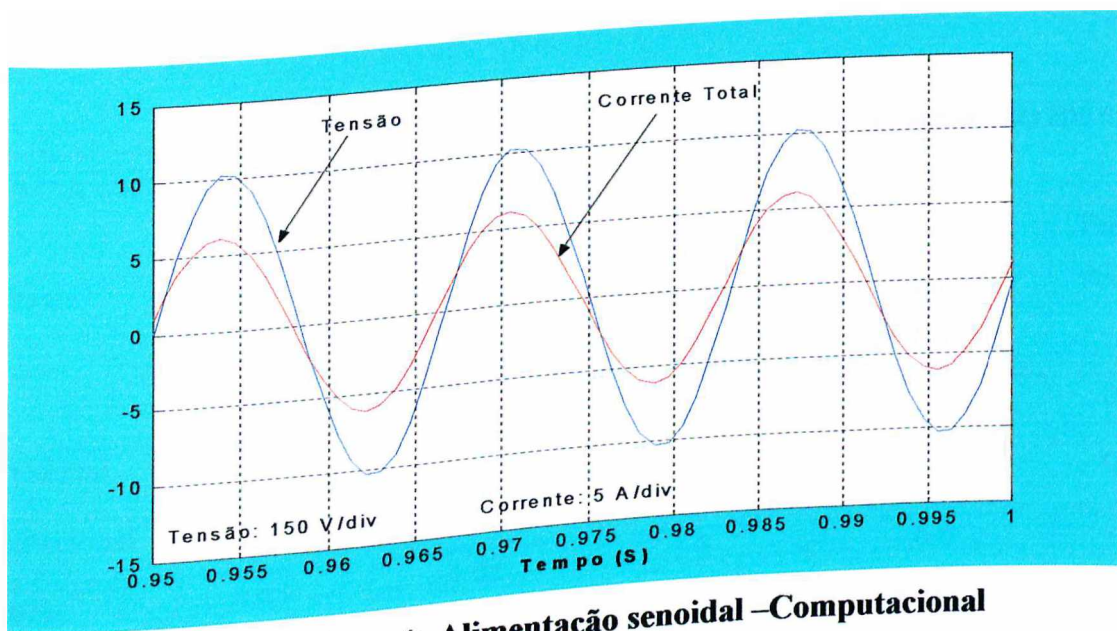


Figura 4.8: Caso 1: Alimentação senoidal –Computacional

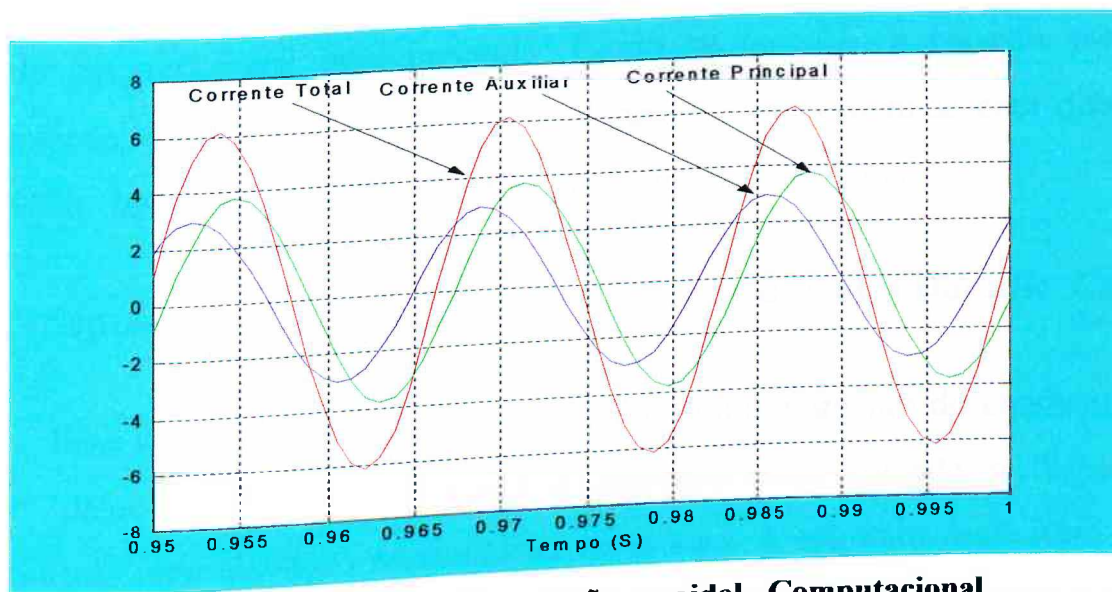


Figura 4.9: Caso 1: Alimentação senoidal –Computacional

Os resultados anteriormente apresentados esclarecem sobre a similaridade qualitativa das formas de onda. Para maior clareza, os correspondentes oscilogramas, no que tange aos seus valores RMS, são sintetizados através da Tabela 4.2. Esta permite uma correlação direta entre os valores obtidos experimental e computacionalmente, para as tensões e correntes, para o suprimento ideal.

TABELA 4.2: QUADRO DE TENSÕES E CORRENTES DO CASO 1 – SUPRIMENTO IDEAL – VALORES RMS

Método	Tensão de suprimento [V]	Corrente Total [A]	Corrente Enrolamento Principal [A]	Corrente Enrolamento Auxiliar [A]	Fator de Potência
Experimental	219.0	4.41	2.8	2.25	0.96
Computacional	220.0	4.23	3.01	2.10	0.95
Desvio%	0.45	-4.08	7.5	-6.6	-1.0

Os resultados constantes da tabela anterior, permitem constatar uma boa correlação entre os resultados experimentais e aqueles obtidos através do modelo computacional implementado. Como se percebe, a corrente total de alimentação, derivada por ambos procedimentos, apresentam-se com diferença de 4.08%, dentro, portanto, dos padrões plenamente aceitáveis.

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

Este item tem por objetivo verificar o comportamento do condicionador de ar, pelos métodos experimental e computacional, quando o dispositivo experimenta uma elevação momentânea de tensão. A estrutura deste item e dos subseqüentes, fundamenta-se na análise dos oscilogramas das correntes e outras alterações que possam ser percebidas de forma audível, visual ou outra qualquer. Para o caso dos estudos computacionais, devido às facilidades oferecidas pelo procedimento, poderão ser ainda analisados, em função das perturbações aplicadas, os desempenhos de grandezas como: velocidade do motor, torques mecânicos e eletromagnéticos, etc. A figura 4.10 ilustra a forma de onda da tensão de suprimento, mostrando uma elevação temporária de tensão de 10% durante 10 ciclos da frequência fundamental. A corrente total solicitada pelo condicionador de ar, resultante da alimentação imposta é também indicada

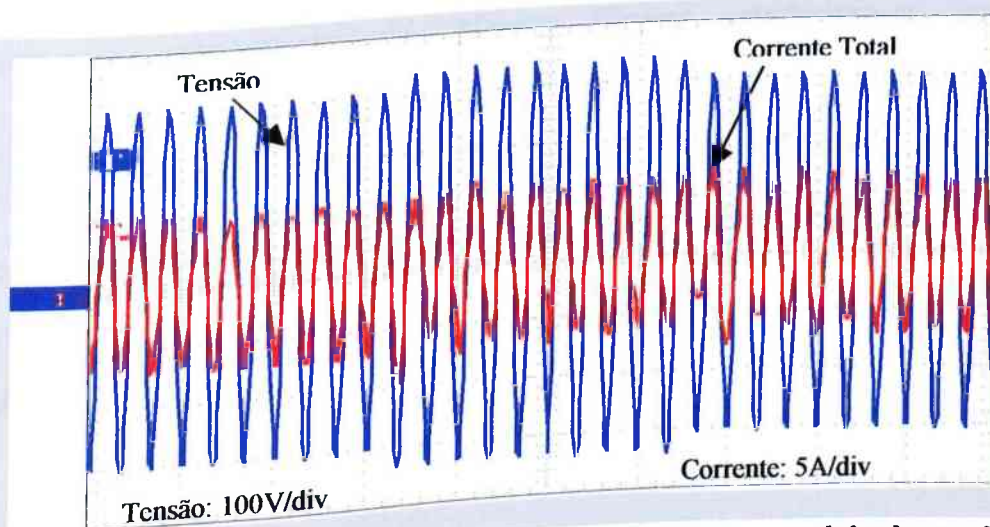


Figura 4.10: Caso 2: Alimentação contendo elevação temporária de tensão, 10% - 10 ciclos –Experimental

A figura 4.11 ilustra as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente total do dispositivo, para o caso computacional. Os resultados mostram-se com boa semelhança qualitativa e quantitativa, ratificando o adequado desempenho do modelo e programa computacional utilizados.

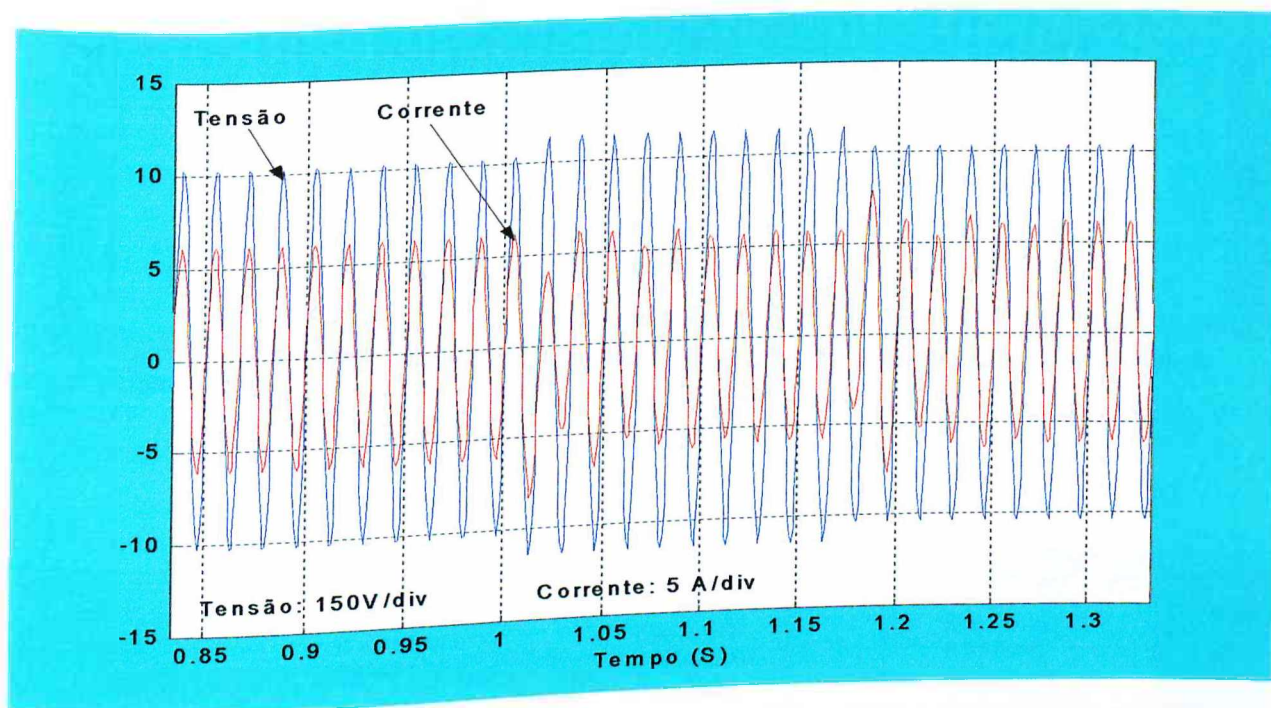


Figura 4.11: Caso 2: Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 10% - 10 ciclos – Computacional

Nas figuras 4.12 e 4.13, podem ser observadas as formas de onda das correntes total e nos enrolamentos principal e auxiliar, experimentais e computacionais, respectivamente. Nestas figuras, evidencia-se, com maior clareza, a pequena influência que a perturbação aplicada tem sobre as correntes, salvo nos instantes do início e término do fenômeno, quando ocorre um incremento transitório da corrente total, com duração de meio ciclo. Observa-se ainda que, o incremento é devido apenas a contribuição do enrolamento principal, não se observando variações significativas da corrente no enrolamento auxiliar. Os resultados, mais uma vez, mostram-se semelhantes para ambos métodos utilizados.

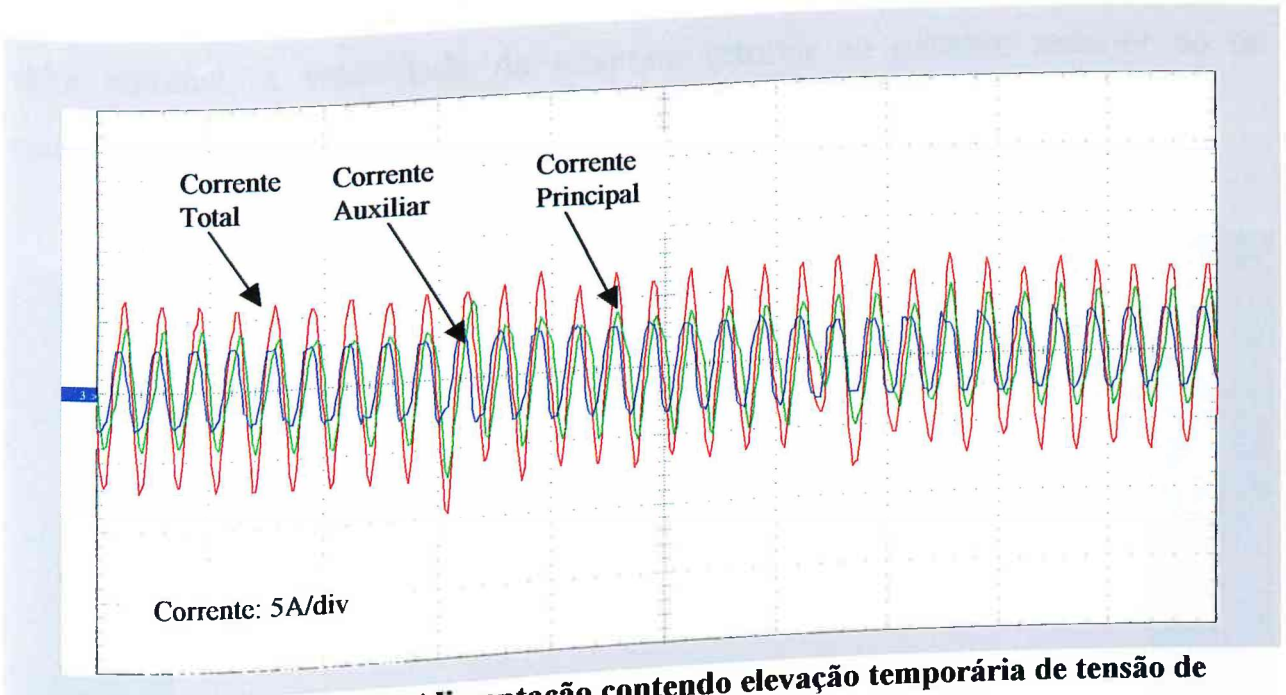


Figura 4.12: Caso 2: Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 10%-10 ciclos –Experimental

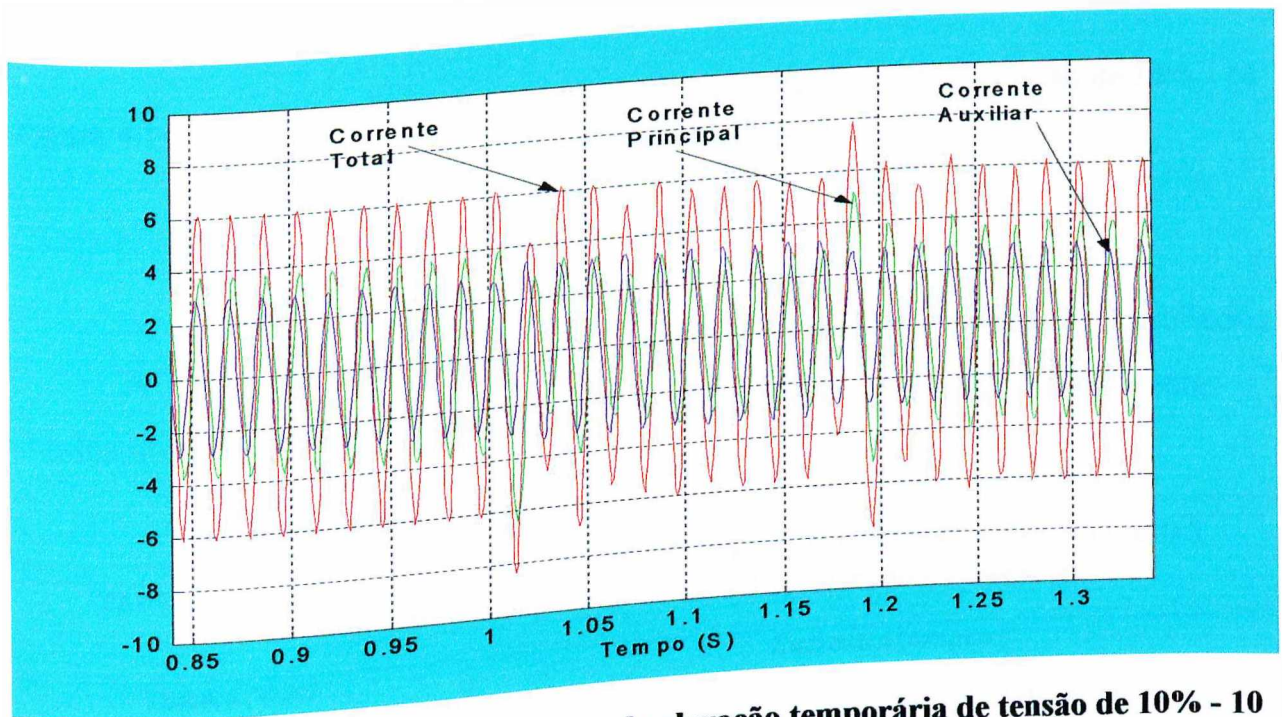


Figura 4.13: Caso 2: Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 10% - 10 ciclos –Computacional

Na figura 4.14, obtida dos estudos computacionais, está ilustrado o desempenho da velocidade do motor, observando-se pequenas alterações durante a ocorrência do "Voltage Swell". Após o restabelecimento da tensão ao

valor nominal, a velocidade da máquina retorna ao patamar anterior ao da manifestação do fenômeno.

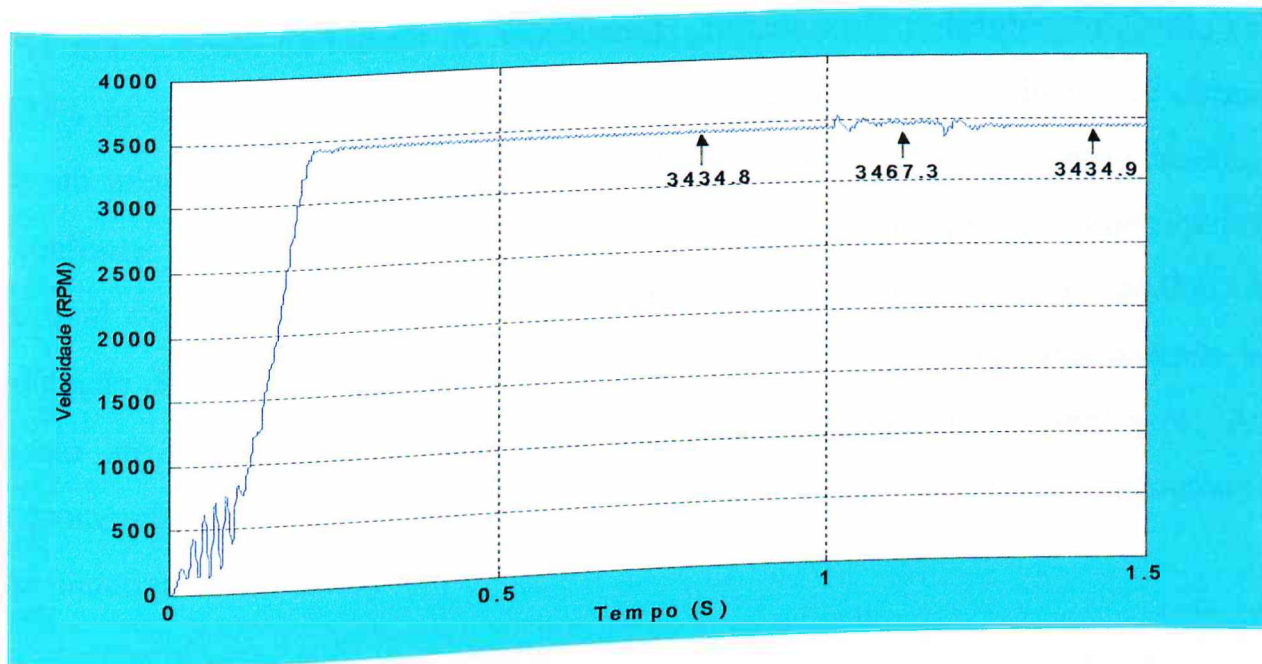


Figura 4.14: Caso 2: Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 10% - 10 ciclos –Computacional
Velocidade do motor

A título de ilustração, a Tabela 4.3, sintetiza os principais resultados obtidos nos estudos deste caso, tanto experimental como computacionalmente.

TABELA 4.3: SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS NO CASO 2
Elevação temporária de Tensão de 10%, duração de 10 ciclos

Tensões (Volt)				Correntes (Ampère)							
Pré-Distúrbio Regime		Durante o Distúrbio		Pré-Distúrbio Regime		Durante o Distúrbio					
Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.			Comp.		
				Regime	Regime	Início	Durante	Fim	Início	Durante	Fim
219.2	220.9	241.1	242.9	4.2	4.3	6.3	4.6	5.6	5.9	4.1	5.6

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

Para este estudo, o equipamento analisado foi submetido a vários níveis de afundamento de tensão de suprimento, gradualmente reduzidos, iniciando em 90% de seu valor nominal e introduzindo degraus de 10% de redução até chegar a um mínimo de 10% da tensão nominal. A partir desse nível de afundamento, conforme anteriormente visto, fica caracterizada a interrupção do fornecimento, o qual consiste num outro item de qualidade a ser explorado neste trabalho. A duração do fenômeno, para cada nível de tensão de ensaio, foi variada desde ½ ciclo até 100 ciclos, em conformidade com a norma IEC 61000-4-11. As recomendações deste documento, para fins de realização dos testes, encontram-se sintetizadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Níveis de tensão e duração preferenciais para ensaios de afundamentos de tensão e interrupções

Tensão para os ensaios %V _n	Nível do afundamento de tensão e interrupções %V _n	Duração (em ciclos)
0	100	0.5
		1
		5
40	60	10
		25
		50
70	30	x

Fonte: International Electrotechnical Commission –IEC 61000-4-11 Edição 03/2001

Observa-se ainda na Tabela 4.4, que a referida norma recomenda a utilização de tempos de até 50 ciclos e apenas 2 níveis de afundamento de tensão, 40% e 70% da tensão de nominal. Contudo, de maneira a poder levantar número de pontos em quantidade suficiente para o traçado das curvas de sensibilidade e suportabilidade, tanto os tempos como também os níveis de

tensão utilizados nos ensaios, foram para além daqueles indicados pelo IEC. O “x” contido na última coluna da tabela anterior, refere-se a tempos de duração diferentes dos constantes na tabela e, por conseguinte, a sua aplicação dependente da finalidade ou de normatizações específicas de um determinado país ou centro de estudos.

Apesar de se ter realizado um elevado número de estudos com suprimento contendo afundamentos de tensão, experimentais e computacionais, conforme já mencionado, somente 2 situações são apresentadas neste trabalho, as quais bem ilustram os efeitos resultantes.

a) Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de 10% com duração de 10 ciclos - Caso 3.A

A figura 4.15 ilustra o comportamento experimental do dispositivo, contemplando as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente total solicitada pelo condicionador de ar, quando da aplicação do fenômeno supra identificado.

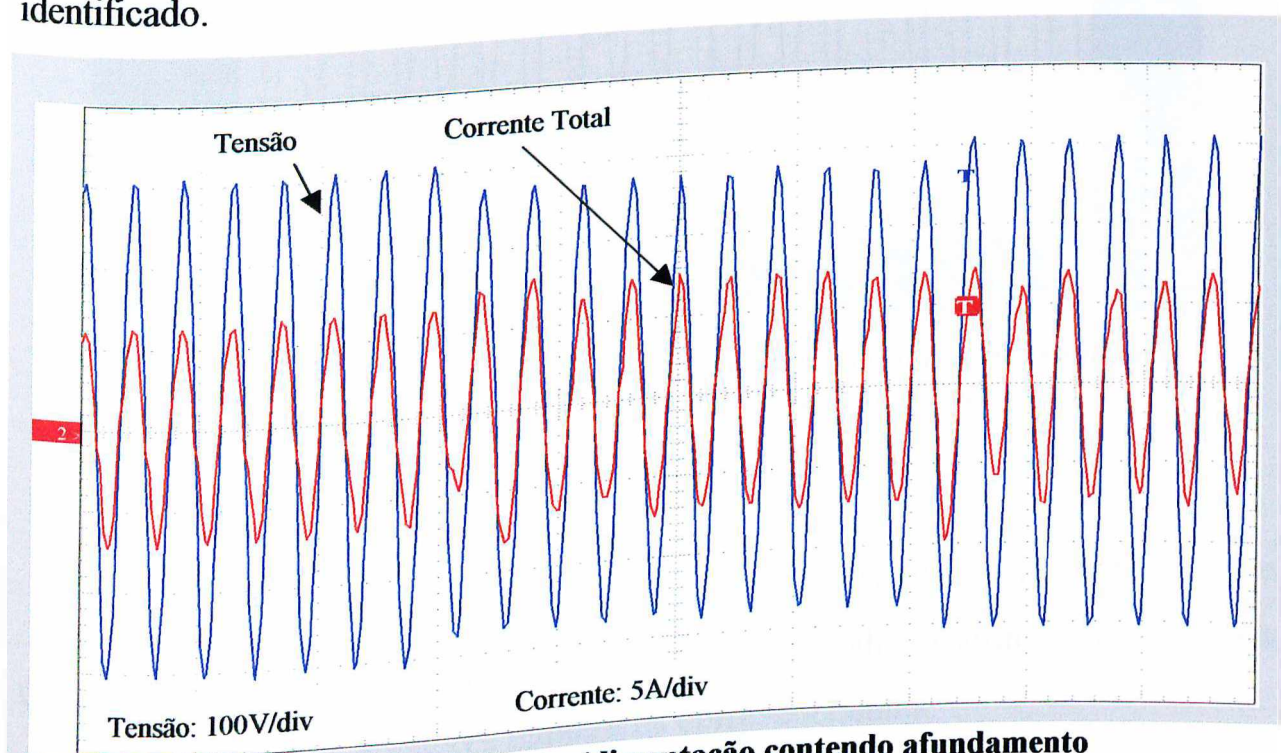


Figura 4.15: Caso 3.A: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão, 10% - 10 ciclos –Experimental

Na figura anterior, observa-se que, como resposta ao afundamento aplicado, ocorre um acréscimo da corrente total solicitada pela carga, permanecendo neste novo valor, enquanto perdurar o fenômeno. Uma vez restabelecida a tensão, a corrente retorna ao seu valor pré-afundamento, levando para isto alguns ciclos.

Na seqüência, a figura 4.16 ilustra os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente total solicitada pelo dispositivo, para o mesmo caso de afundamento. Os resultados mostrados estão associados aos estudos computacionais.

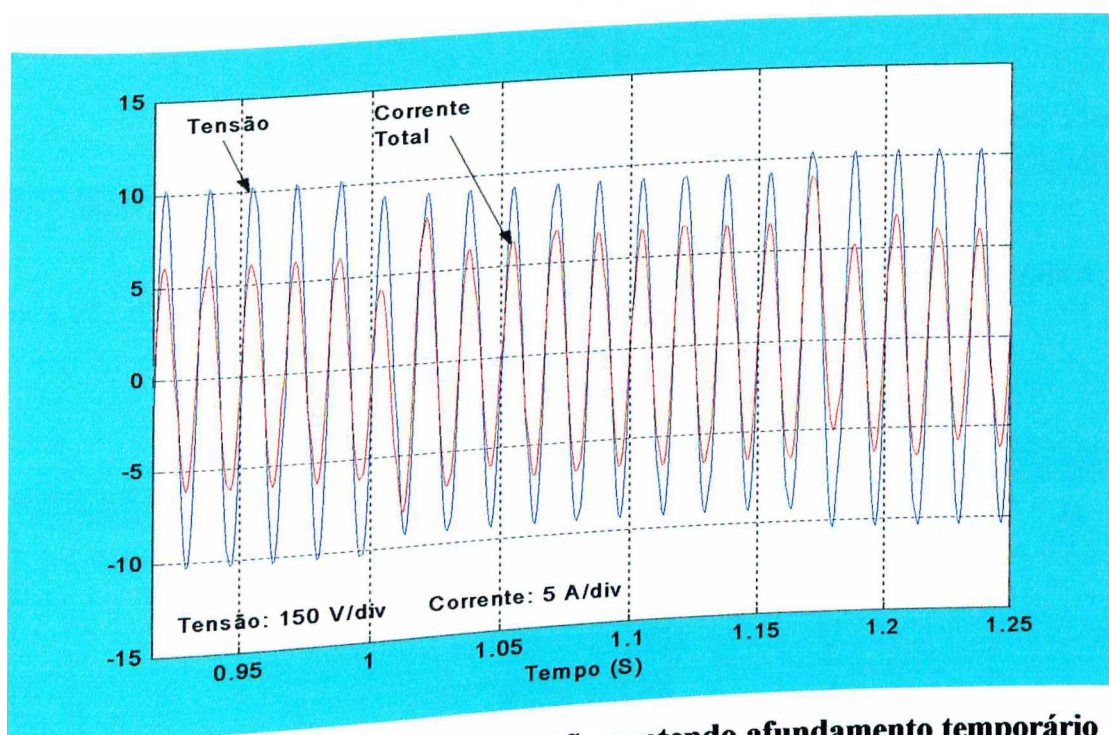


Figura 4.16: Caso 3.A: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão, 10% - 10 ciclos – Computacional

Da figura anterior, mais uma vez observa-se a concordância das respostas do dispositivo, comparativamente ao método experimental, verificada pelas formas de onda e valores numéricos correspondentes.

As figuras 4.17 e 4.18 ilustram detalhes do comportamento da tensão de suprimento e da corrente total, experimental e computacional, nos instantes da aplicação e retirada do afundamento de tensão, respectivamente.

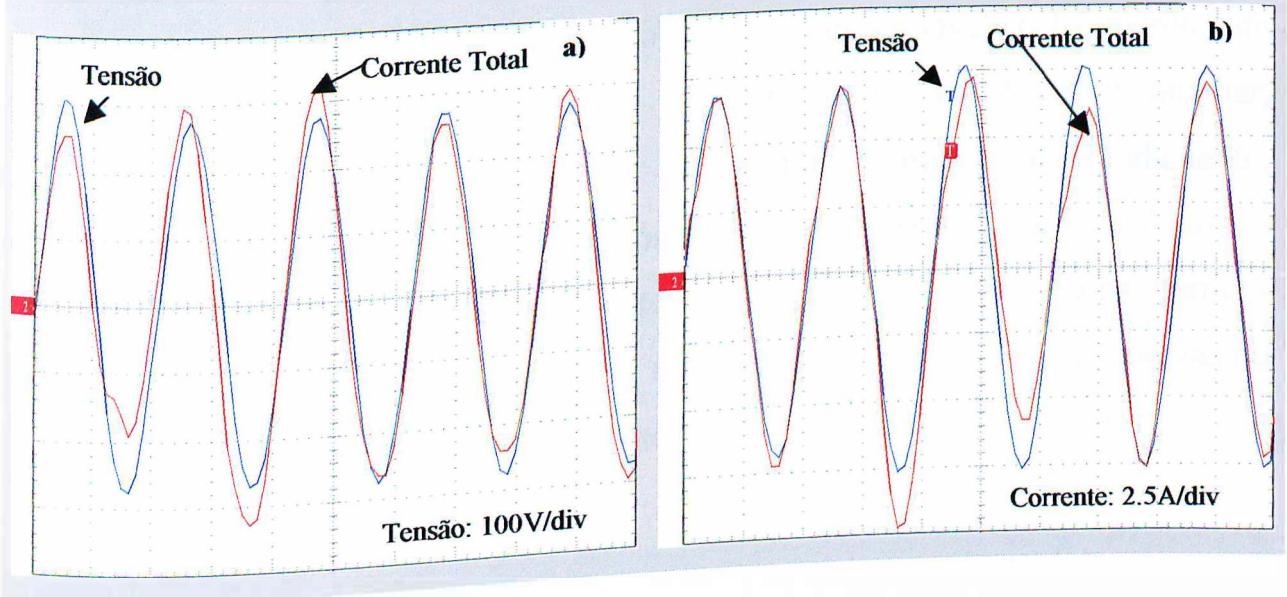


Figura 4.17: Caso 3.A: Detalhe da tensão e corrente total, nos instantes da aplicação e da retirada do afundamento de 10%-10 ciclos– Experimental
a) Instante da aplicação, b) Instante da retirada

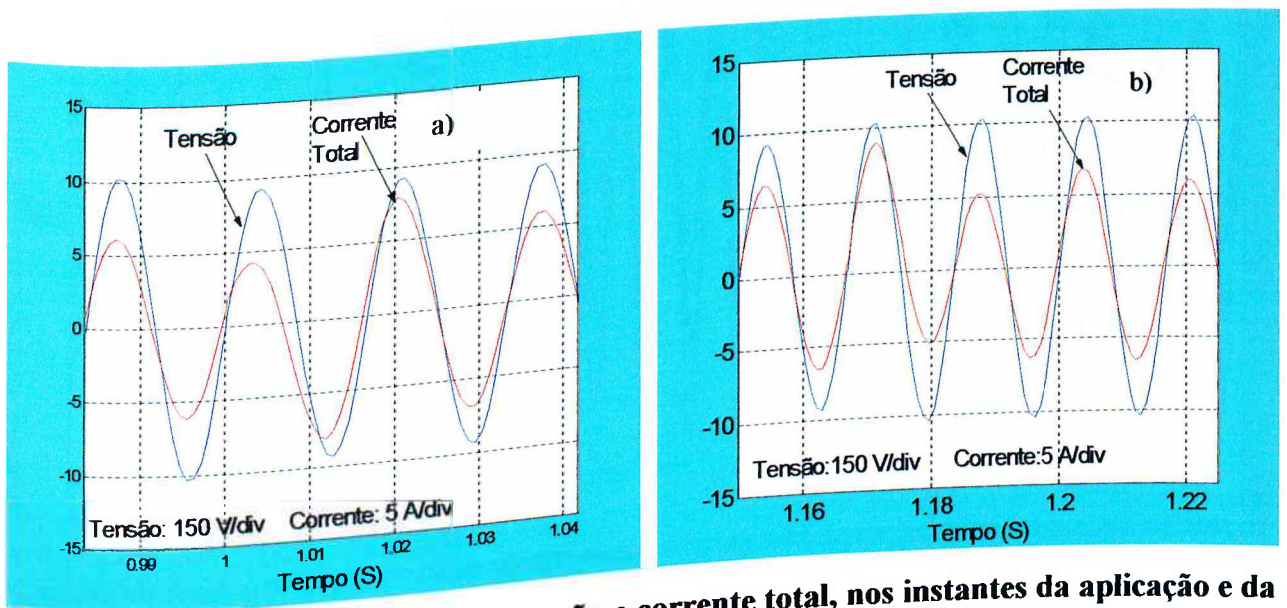


Figura 4.18: Caso 3.A: Detalhe da tensão e corrente total, nos instantes da aplicação e da retirada do afundamento de 10%-10 ciclos– Computacional
a) Instante da aplicação, b) Instante da retirada

As figuras 4.19 e 4.20, ilustram as formas de onda da corrente total e das correntes nos enrolamentos principal e auxiliar, resultados das investigações experimental e computacional, respectivamente.

Da análise dos oscilogramas vê-se que, para ambos casos, que o efeito mais severo do afundamento de tensão aplicado, reflete-se apenas no enrolamento principal, portanto, sendo este o responsável pelo incremento observado na corrente total. Quanto a corrente no enrolamento auxiliar, contrariamente, ocorre um pequeno decréscimo durante o afundamento, voltando ao seu valor normal após cessar a perturbação. Após o restabelecimento da tensão, as correntes retornam aos seus valores normais depois de decorridos alguns ciclos, com as conhecidas conseqüências nocivas no desempenho e na vida útil do equipamento.

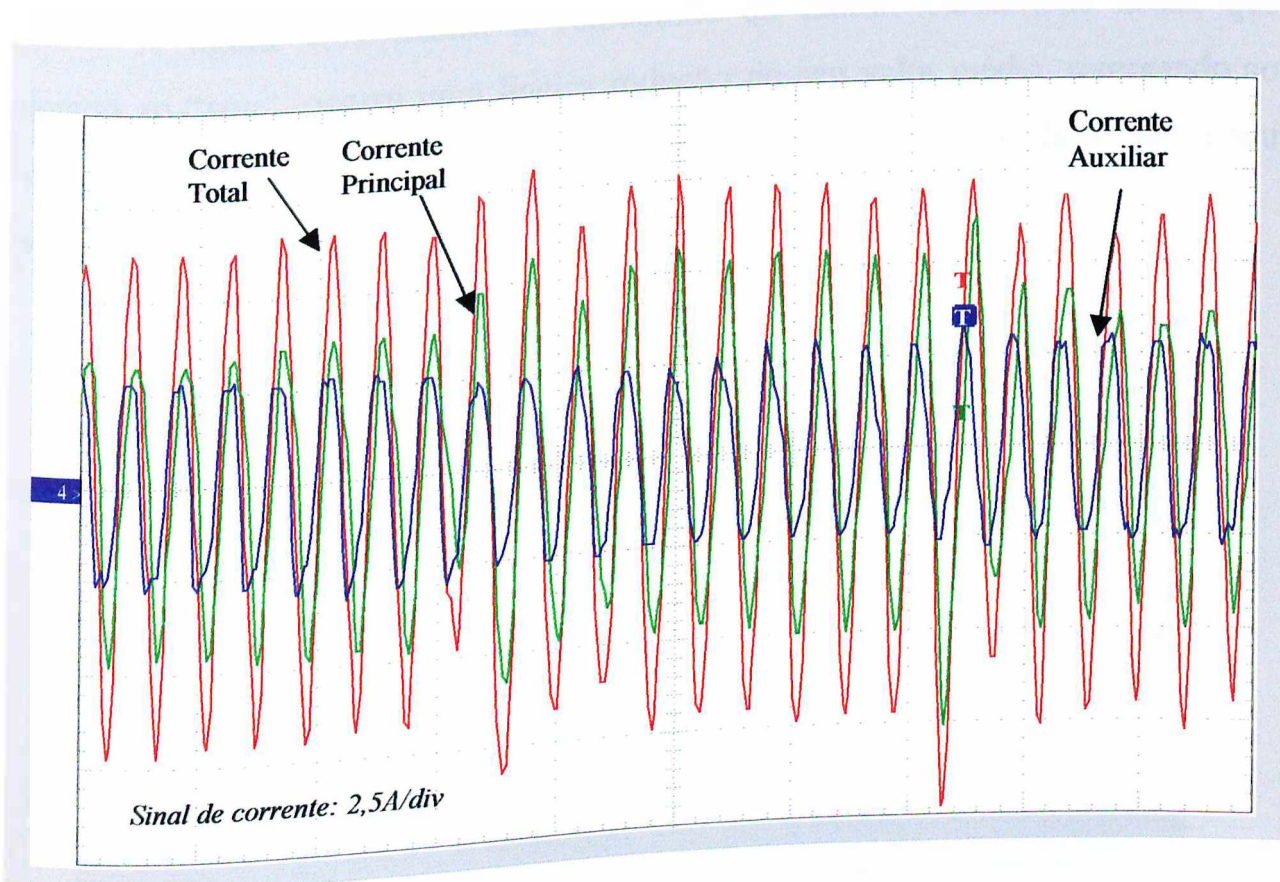


Figura 4.19: Caso 3.A: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão de 10%-10 ciclos –Experimental

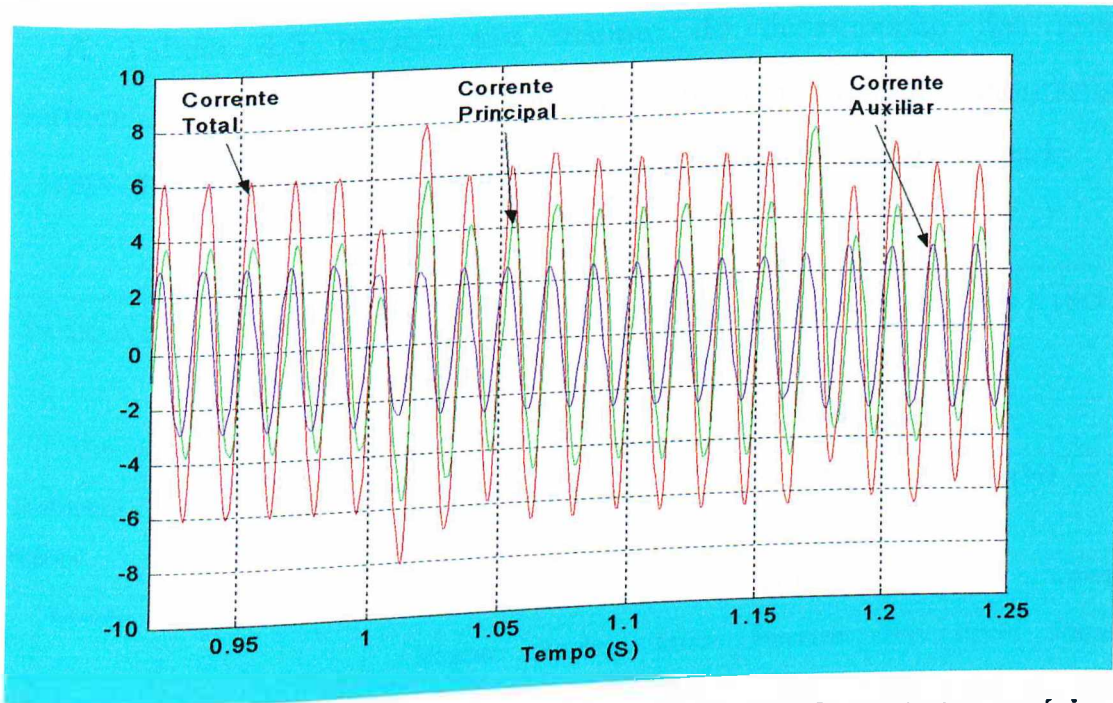


Figura 4.20: Caso 3.A: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão de 10%-10 ciclos –Computacional

A figura 4.21 ilustra a velocidade do motor. Observa-se nesta, que devido ao “sag”, ocorre uma ligeira redução de seu valor médio, retornando ao valor anterior à perturbação, somente após o restabelecimento da tensão a seu valor nominal.

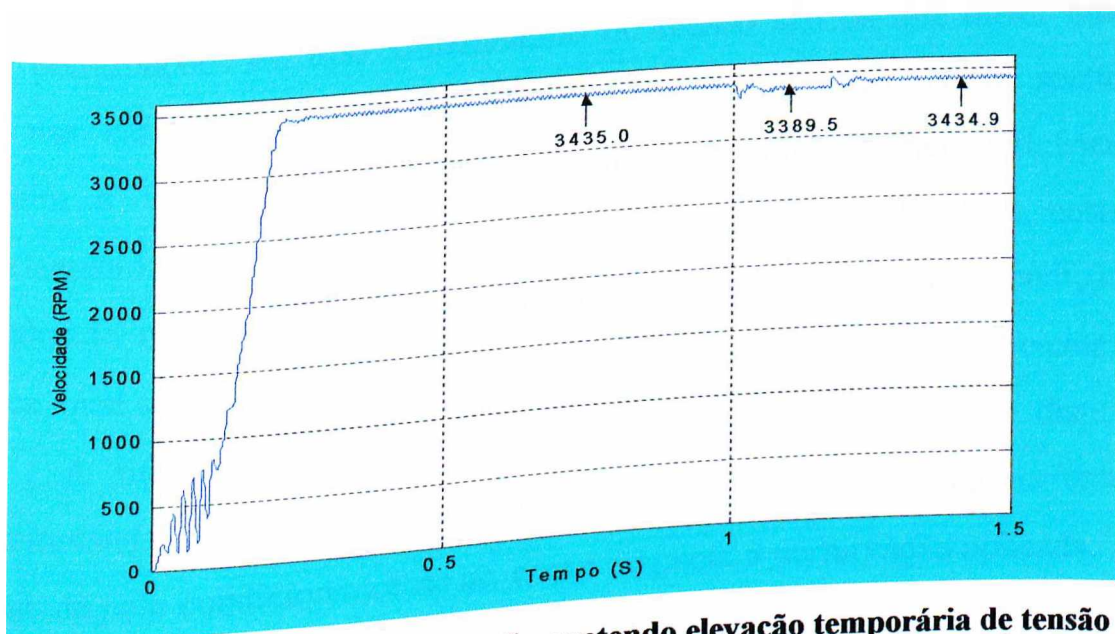


Figura 4.21: Caso 3.A: Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 10% - 10 ciclos –Computacional
Velocidade do motor

A Tabela 4.5 mostra um resumo do desempenho das grandezas anteriormente destacadas, referente aos estudos experimental e computacional, como resposta do aparelho condicionador de ar ao afundamento aplicado.

TABELA 4.5: SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS NO CASO 3.A
Elevação temporária de Tensão de 10%, duração de 10 ciclos

Tensões (Volt)				Correntes (Ampère)							
Pré-Distúrbio Regime		Durante o Distúrbio		Pré-Distúrbio Regime		Durante o Distúrbio					
Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp. Regime	Comp. Regime	Exp.			Comp.		
						Início	Durante	Fim	Início	Durante	Fim
219.2	219.9	197.3	198.1	4.2	4.3	6.0	4.9	6.9	5.6	4.8	6.4

Exp.: Experimental; Comp.: Computacional

b) Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de 30% com duração de 10 ciclos – Caso 3.B

Os resultados obtidos do estudo realizado no item anterior mostraram que, perturbações do tipo afundamento de tensão são os que maior influência tem nas características de desempenho do equipamento. Neste sentido, de maneira a se obter dados mais abrangentes sobre a real influência dos afundamentos de tensão sobre o desempenho no condicionador de ar, neste item, é realizado mais um trabalho investigativo, desta vez para uma condição mais crítica, qual seja: 30% de afundamento de tensão com duração de 10 ciclos.

A figura 4.22 ilustra o comportamento experimental do dispositivo, contemplando as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente total solicitada pelo condicionador de ar, como resposta à perturbação aplicada.

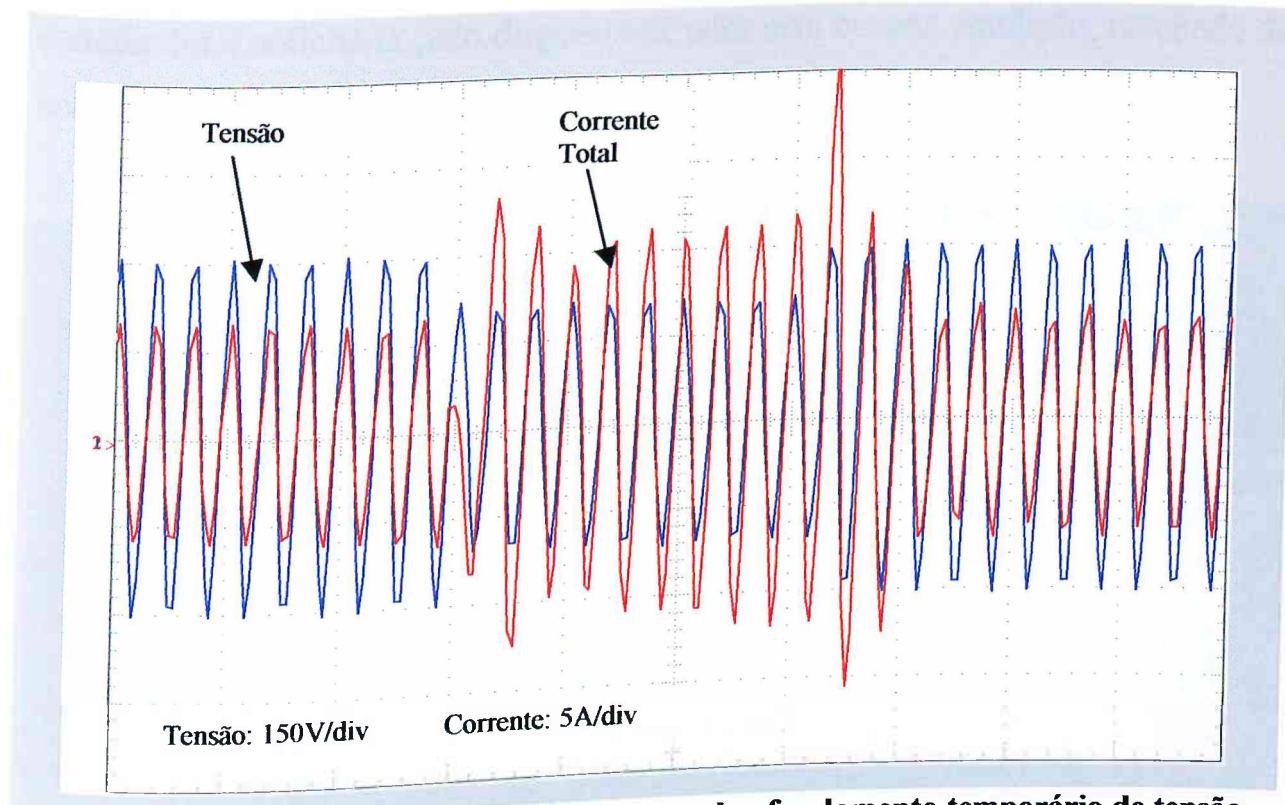


Figura 4.22: Caso 3.B: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão, 30% - 10 ciclos – Experimental

Observa-se na figura acima que, semelhantemente ao caso anterior, de menor severidade, ocorre acréscimo da corrente total solicitada pela carga, porém com amplitude intensificada, pois maior foi a perturbação aplicada. Passado o período transitório, a corrente permanece num patamar superior ao do pré-afundamento, enquanto perdurar o fenômeno. Uma vez normalizada a tensão de suprimento, e passados alguns ciclos, a corrente volta ao nível anterior ao fenômeno. Observam-se, também, os “picos” de corrente com duração de $\frac{1}{2}$ ciclo, no início e no término do afundamento, com valores RMS 250% e 300% superiores à nominal, aproximadamente. Deve-se salientar que, outros casos experimentais mais severos, envolvendo afundamentos de tensão, podem provocar a atuação do dispositivo de proteção, desligando o condicionador de ar. Exemplo da situação mencionada é o caso de 40% de afundamento com 10 ciclos de duração.

A figura 4.23 ilustra os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente total solicitada pelo dispositivo, para esta mesma condição, resultado da investigação computacional.

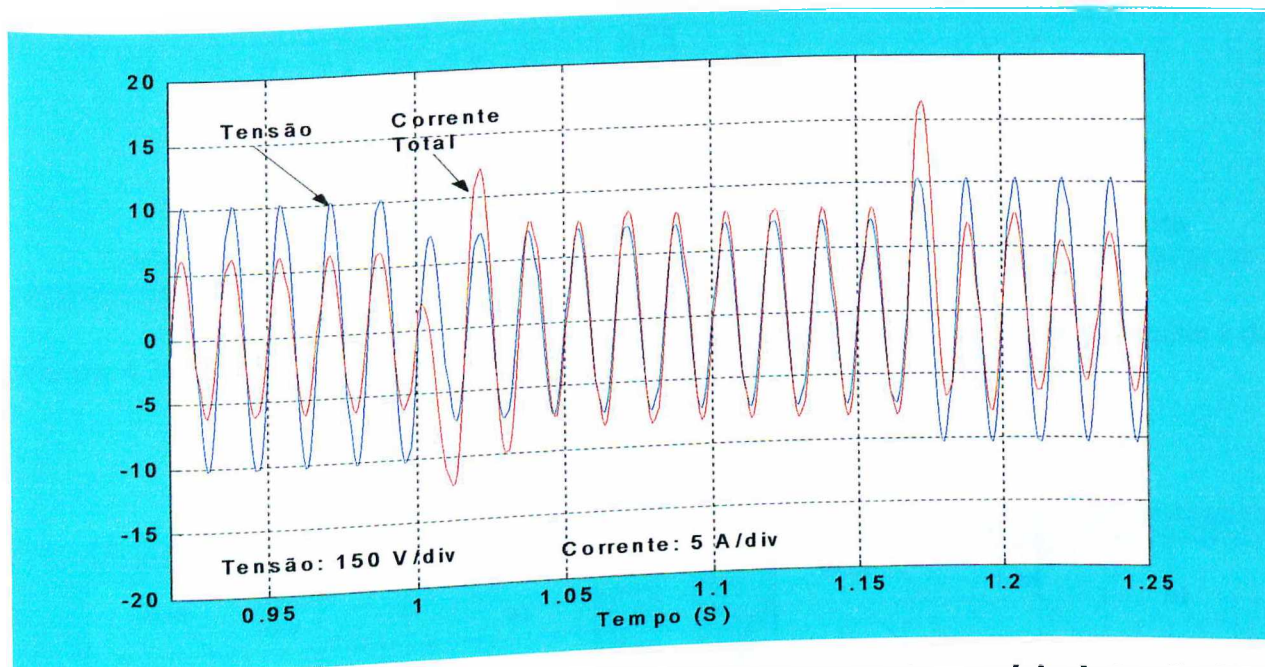


Figura 4.23: Caso 3.B: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão de 30%-10 ciclos – Computacional

A figura anterior evidencia o adequado desempenho da ferramenta computacional utilizada, comparativamente ao método experimental, verificada em seus aspectos qualitativos e quantitativos.

As figuras 4.24 e 4.25 ilustram detalhes do comportamento da tensão de suprimento e da corrente total, experimental e computacional, nos instantes da aplicação e retirada do afundamento de tensão, respectivamente.

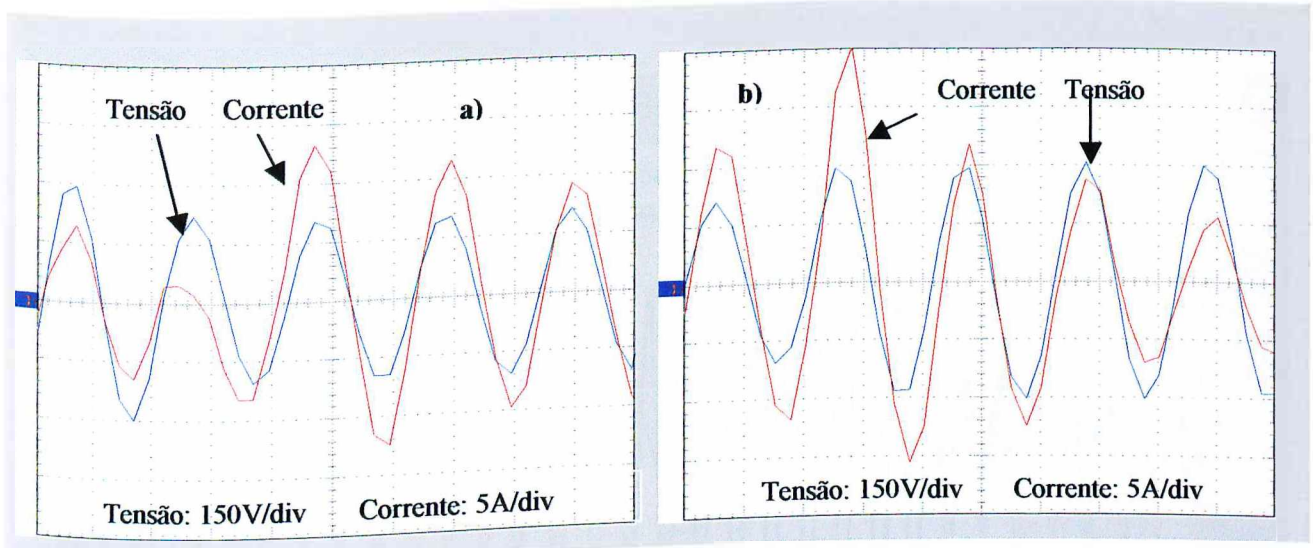


Figura 4.24: Caso 3.B: Detalhe da tensão e corrente total, nos instantes da aplicação e da retirada do afundamento de 30%-10 ciclos – Experimental
 a) Instante da aplicação, b) Instante da retirada.

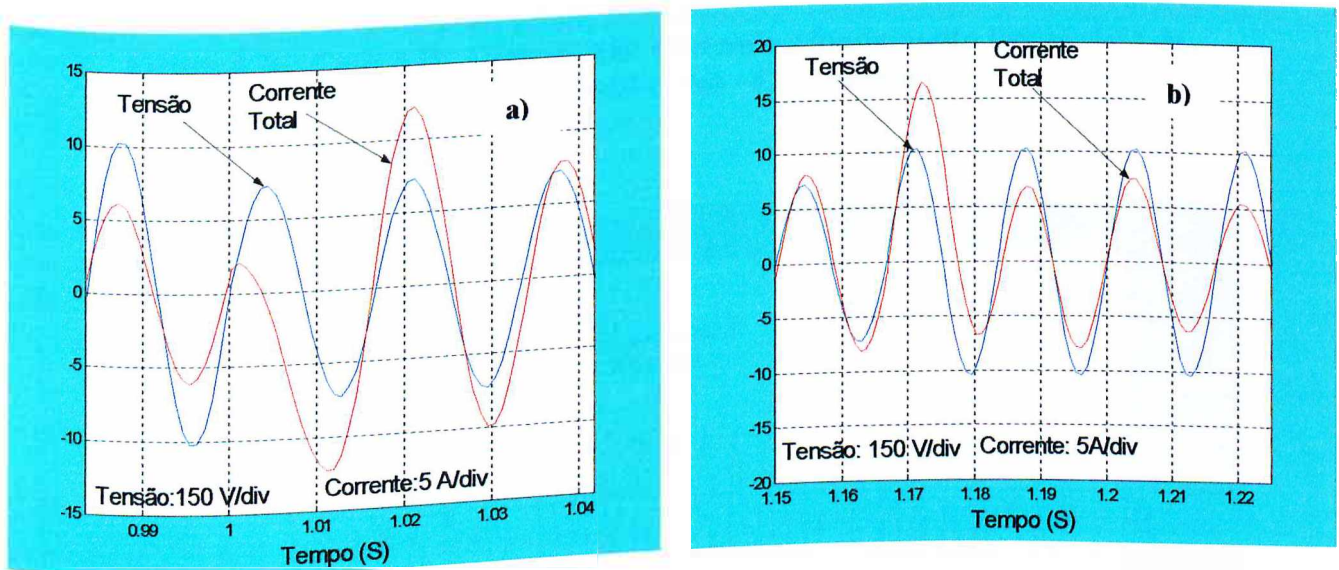


Figura 4.25: Caso 3.B: Detalhe da tensão e corrente total, nos instantes da aplicação e da retirada do afundamento de 30%-10 ciclos – Computacional
 a) Instante da aplicação, b) Instante da retirada

As figuras 4.26 e 4.27, apresentam os oscilogramas da corrente total e das correntes nos enrolamentos principal e auxiliar, para os estudos experimental e computacional, respectivamente.

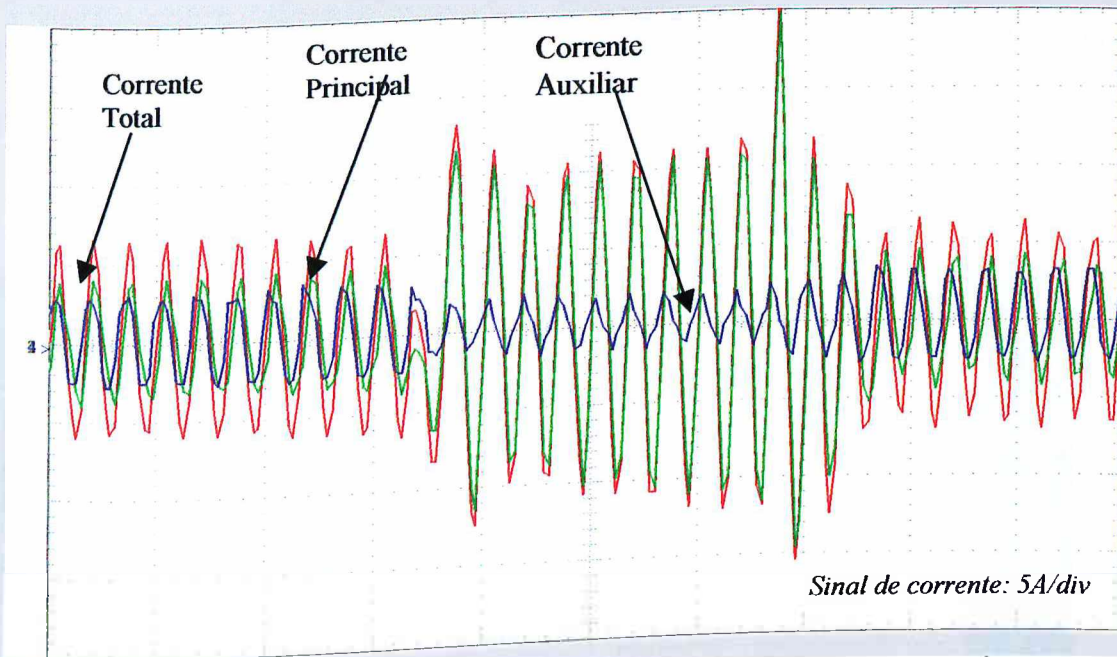


Figura 4.26: Caso 3.B: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão de 30%-10 ciclos –Experimental

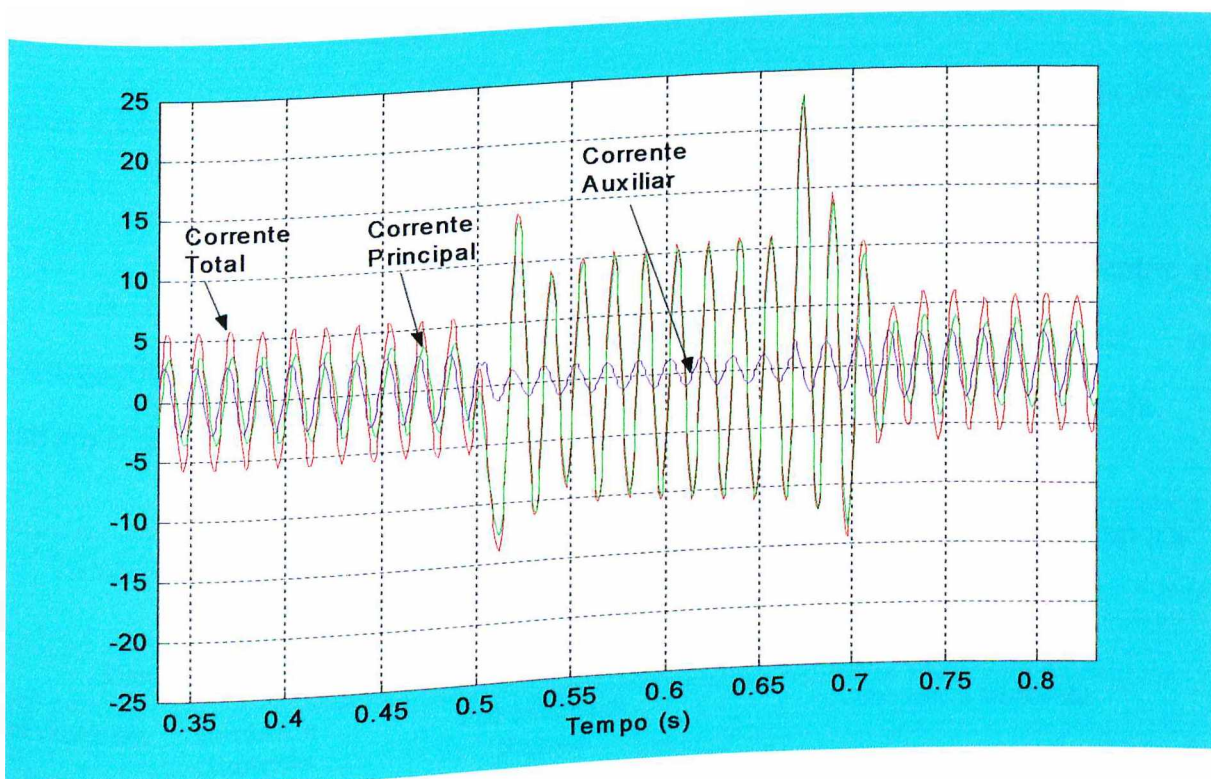


Figura 4.27: Caso 3.B: Alimentação contendo afundamento temporário de tensão de 30%-10 ciclos –Computacional

Na figura 4.28 está ilustrada a velocidade do motor, onde se observa uma redução ainda maior, comparativamente ao caso anterior, devido ao “sag” aplicado. Após restabelecer-se a tensão ao valor nominal, a velocidade da máquina retorna ao patamar anterior ao fenômeno.

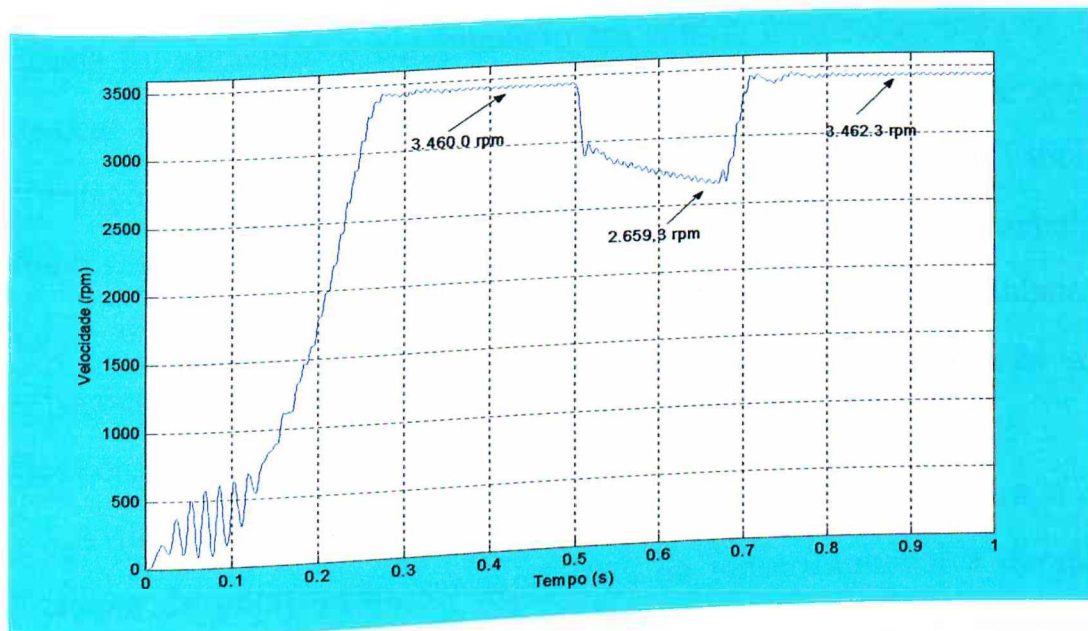


Figura 4.28: Caso 3B: Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 30% - 10 ciclos –Computacional
Velocidade do motor

A Tabela 4.6 mostra, de forma sintética, os resultados decorrentes das investigações realizadas neste caso, experimentais e computacionais, que ilustram o desempenho do dispositivo como resposta à perturbação aplicada.

TABELA 4.6: SÍNTESE DAS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS OBSERVADAS NO CASO 3.B
Elevação temporária de Tensão de 30%, duração de 10 ciclos

Tensões (Volt)				Correntes (Ampère)							
Pré-Distúrbio		Durante o Distúrbio		Pré-Distúrbio Regime		Durante o Distúrbio					
Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.			Comp.		
				Regime	Regime	Início	Durante	Fim	Início	Durante	Fim
219.2	220.9	153.4	153.9	4.2	4.3	8.9	5.7	13.9	8.6	5.7	14.0

4.4.4 - Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica – Caso 4

Os estudos experimentais e computacionais realizados nesta seção buscam estabelecer os limites de vulnerabilidade do aparelho condicionador de ar, e conseqüentemente do compressor, sob condições de interrupção do fornecimento de energia elétrica. Para tanto, inicialmente, a estratégia idealizada foi alimentar o equipamento em estudo com valor nominal de tensão e provocar interrupções no suprimento, com durações variando de acordo com as orientações da referência [29], resumidamente transcritas na Tabela 4.4. É oportuno ressaltar que, nos testes realizados com aplicação de afundamentos de tensão, o dispositivo em estudo apresentou tolerância muito limitada a essas perturbações, ocorrendo desligamentos mesmo para níveis de tensão superiores àqueles considerados como interrupção do fornecimento.

A título de exemplo do acima mencionado, o ensaio para a condição mais amena de interrupção, ou seja, 10% da tensão nominal e duração de $\frac{1}{2}$ ciclo resultou no desligamento do dispositivo. Desta forma, os oscilogramas de tensão e corrente, são apresentados como forma de permitir observar o comportamento do dispositivo em resposta a esse tipo de perturbação.

Na figura 4.29 estão ilustradas as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente total absorvida pelo componente, formas estas obtidas pelo método experimental. Observa-se nos oscilogramas que, aplicada uma interrupção plena (0% de tensão) com duração de 5 ciclos, no instante posterior à ocorrência, todas as correntes decrescem para um valor praticamente nulo com o conseqüente desligamento do equipamento. É importante ressaltar que o desligamento se deu pela ausência de conjugado (tensão e correntes nulos) e não pela atuação da proteção. Uma vez restabelecida a tensão de suprimento, as correntes absorvidas aumentam até atingir valores da ordem da corrente de partida direta, na tentativa da retomada do funcionamento. Neste instante, os lados de alta e baixa pressão do circuito do gás refrigerante no dispositivo, ainda

não foram equalizados, portanto, oferecendo um elevado conjugado resistente para o motor. No capítulo II foram mostrados os arranjos comumente utilizados em equipamentos de refrigeração comercialmente disponíveis e mencionadas suas características mais importantes. O motor utilizado no condicionador de ar possui curva de conjugado categoria N, dessa forma, explica-se o porque de não ocorrer nova partida do motor, mesmo com as correntes atingindo valores suficientes para tal. Passados alguns ciclos, e como consequência do elevado valor das correntes durante esse período, o relé bimetálico atua, desenergizando o circuito, desta feita até que ocorra a equalização das pressões e o “re-arme” do relé térmico. Em outras palavras, o equipamento desliga e permanece nessa condição até que ocorra a equalização do gás refrigerante contida no aparelho e também o resfriamento do protetor térmico, para permitir nova partida.

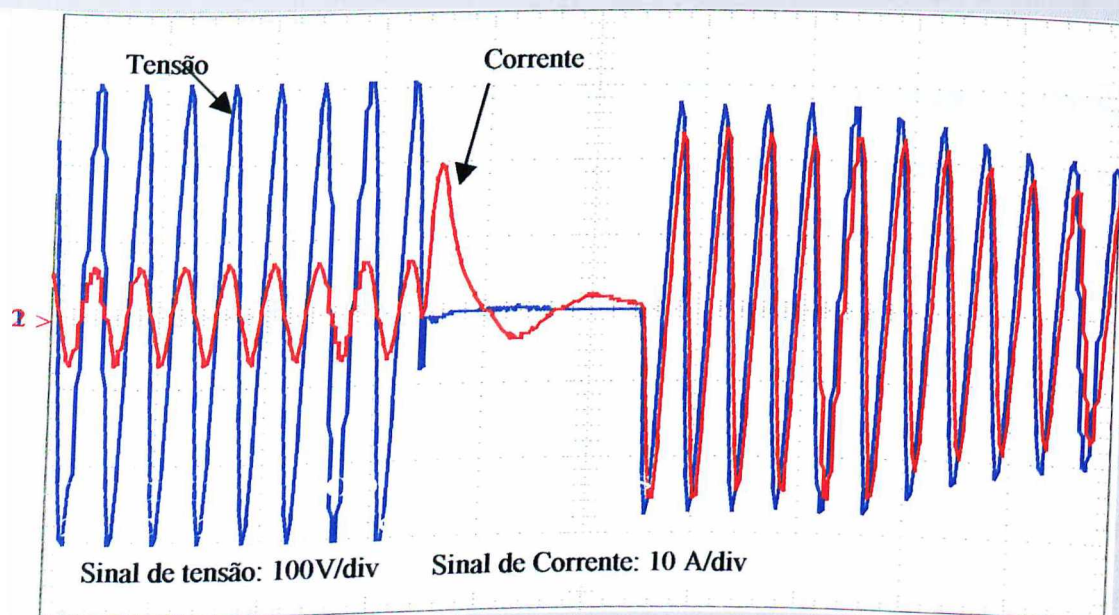


Figura 4.29: Caso 4: Interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 5 ciclos- Experimental

A figura 4.30 mostra o mesmo caso anteriormente analisado, porém, utilizando a estratégia computacional. Observa-se que, novamente, é grande a

semelhança dos resultados obtidos por ambos métodos, mais uma vez indicando o adequado desempenho do modelo matemático e do programa implementado.

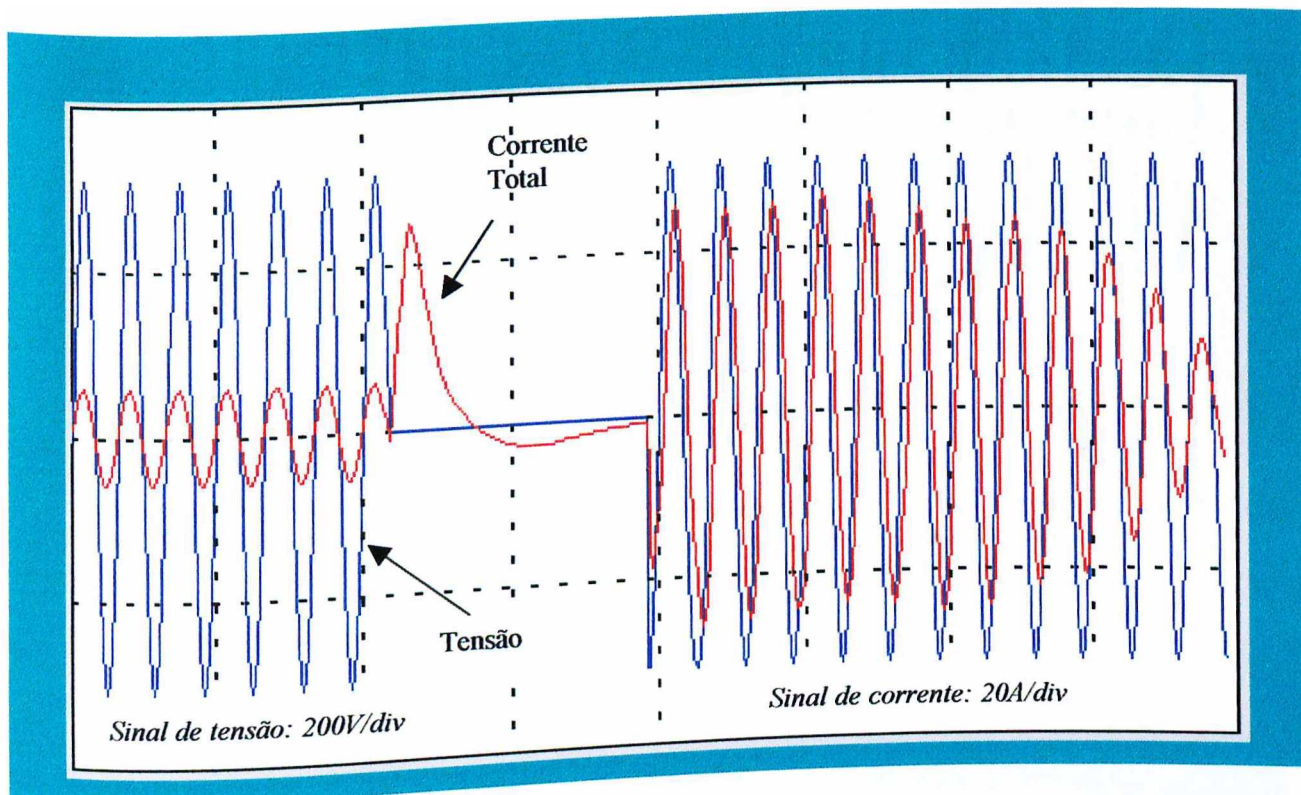


Figura 4.30: Caso 4: Interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 5 ciclos –Computacional

As figuras 4.31 e 4.32 ilustram ainda o caso de interrupção de fornecimento, métodos experimental e computacional, respectivamente, com todas as grandezas envolvidas, quais sejam: tensão de suprimento, corrente total e correntes nos enrolamentos principal e auxiliar.

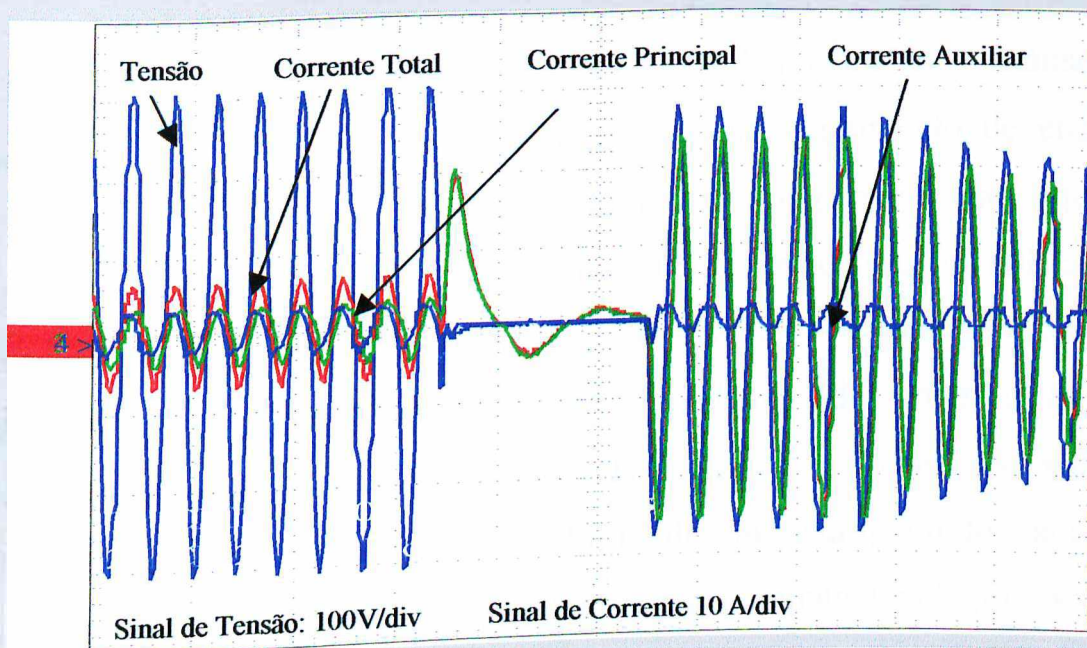


Figura 4.31: Caso 4: Interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 5 ciclos –Experimental

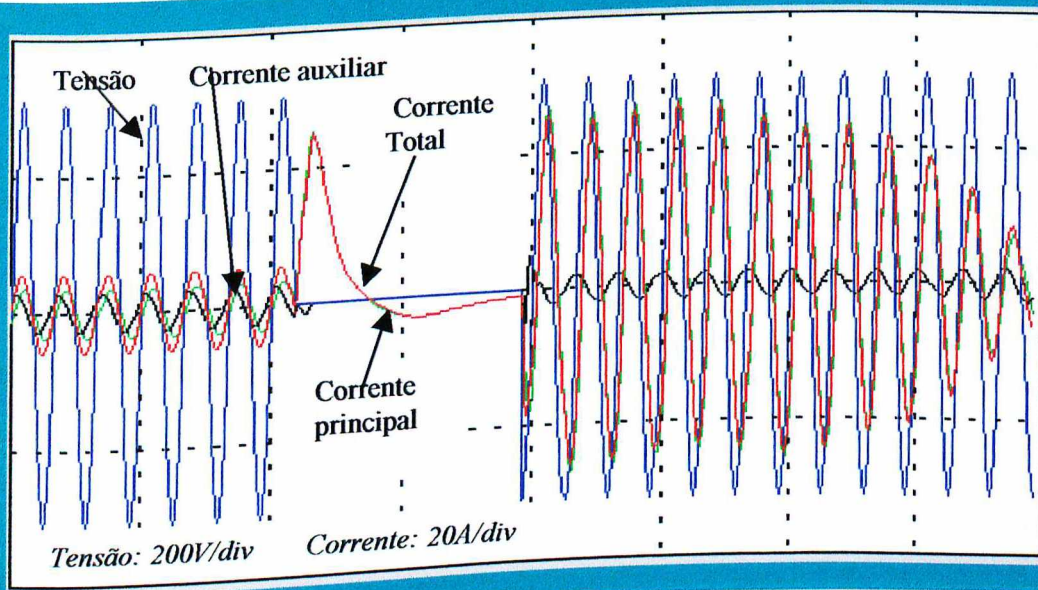


Figura 4.32: Caso 4: Interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 5 ciclos – Computacional

4.4.5 - Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão - Caso 5

Esta seção contempla os resultados de estudos voltados à análise de desempenho do condicionador de ar submetido a um suprimento de energia elétrica contendo distorções harmônicas, em níveis compatíveis com aqueles normalmente encontrados nos sistemas elétricos. Para este fim, foi utilizada a fonte especial programável HP referenciada no capítulo I, que possibilita a aplicação de quaisquer valores de DHT, resultante da contribuição de harmônicas individuais de ordens diversas. Os estudos compreenderam valores de DHT variando entre 5% e 15%. Contudo, tendo em vista que todos os casos analisados, tanto pelo método experimental como computacional, provocaram no aparelho resposta análoga, salvo pela severidade do efeito, estão apresentadas somente as respostas para um suprimento contendo DHT de 10%.

A Tabela 4.7 detalha os percentuais harmônicos individuais e totais aos quais o equipamento foi submetido, ressaltando-se que as harmônicas individuais foram aplicadas em fase com a tensão fundamental e que, neste trabalho, está apresentado apenas o caso de DHT de 10%.

TABELA 4.7: DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS APLICADAS AO CONDICIONADOR DE AR - CASO 5

DHT	Distorção Harmônica Individual (DHI)		
	3ª Ordem	5ª Ordem	7ª Ordem
5%	2%	4%	2%
10%	3%	8%	5%
15%	5%	10%	8%

A figura 4.33 mostra os oscilogramas da tensão aplicada e da corrente total consumida pela carga, para um DHT de 10% da fundamental, pela

estratégia experimental. Vê-se que o oscilograma de corrente apresenta forte distorção, comparativamente a uma onda senoidal. Por outro lado, quanto a alterações físicas perceptíveis no 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.

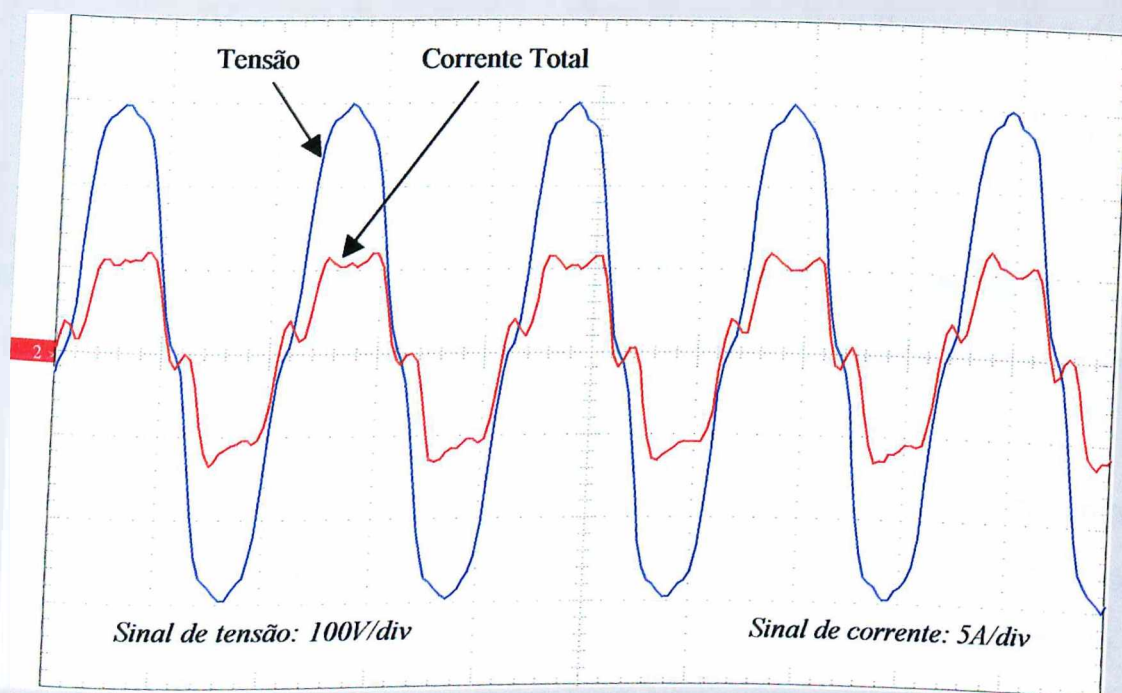


Figura 4.33: Caso 5: Tensão de alimentação contendo distorção harmônica total (DHT) de 10% –Experimental

Na figura 4.34 é apresentado o mesmo caso anterior, porém, mostrando os resultados obtidos pelo método computacional. Observa-se alguma discordância, em relação às respostas obtidas pelo método experimental, na forma de onda da corrente. Isto se deve, fundamentalmente, ao emprego de modelos lineares para o motor simulado. Mesmo assim, pode-se reconhecer uma forte semelhança entre ambas estratégias, fato este que ratifica a adequação do modelo e programa implementado.

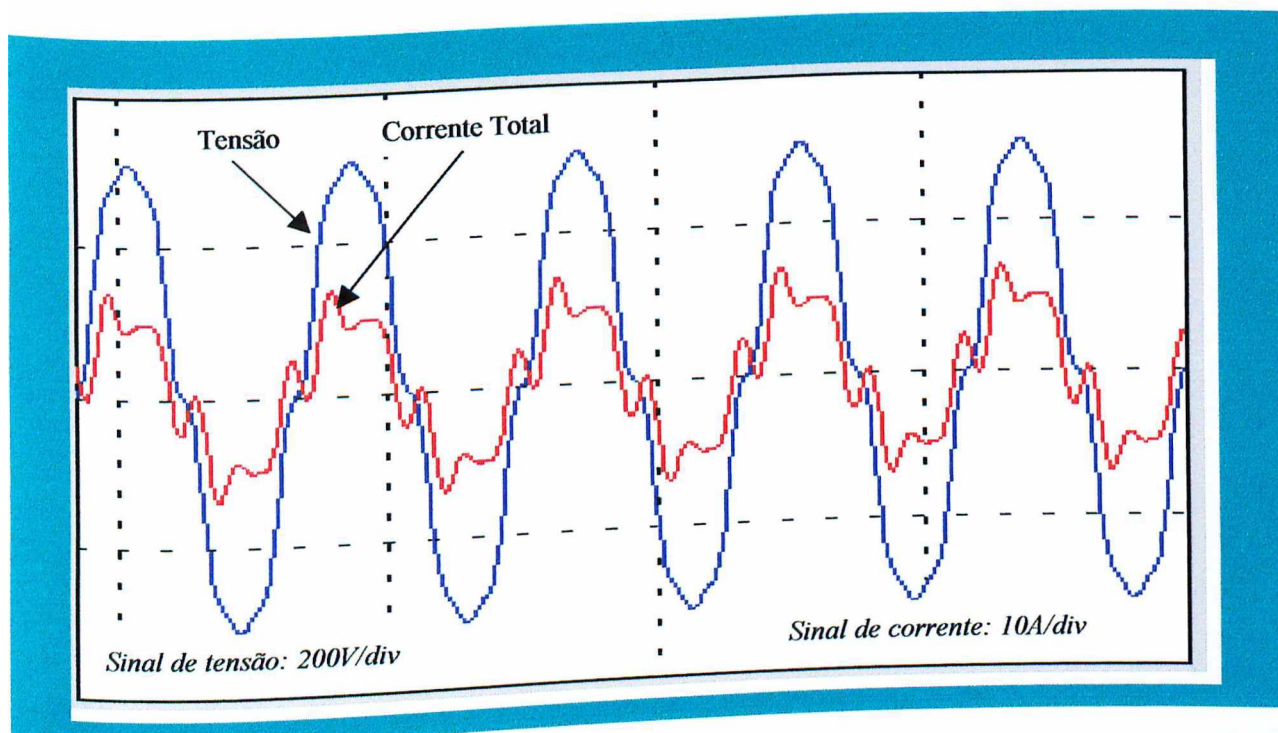


Figura 4.34: CASO 5: Tensão de alimentação contendo distorção harmônica total (DHT) de 10% – Computacional

As figuras 4.35 e 4.36 ilustram as formas de onda, experimentais e simuladas, respectivamente, de todas as correntes envolvidas no processo, a saber: corrente total, corrente no enrolamento principal e corrente no enrolamento auxiliar. Observa-se, mais uma vez, uma resposta satisfatória do modelo computacional.

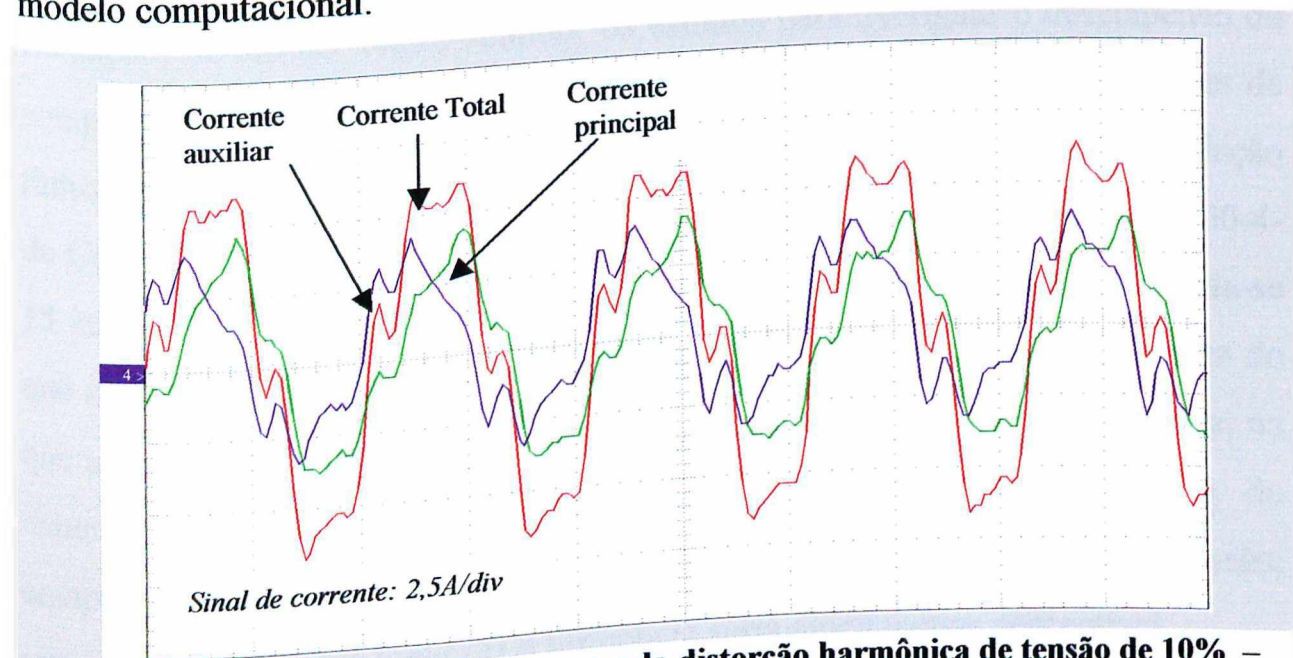


Figura 4.35: Caso 5: Alimentação contendo distorção harmônica de tensão de 10% – Experimental

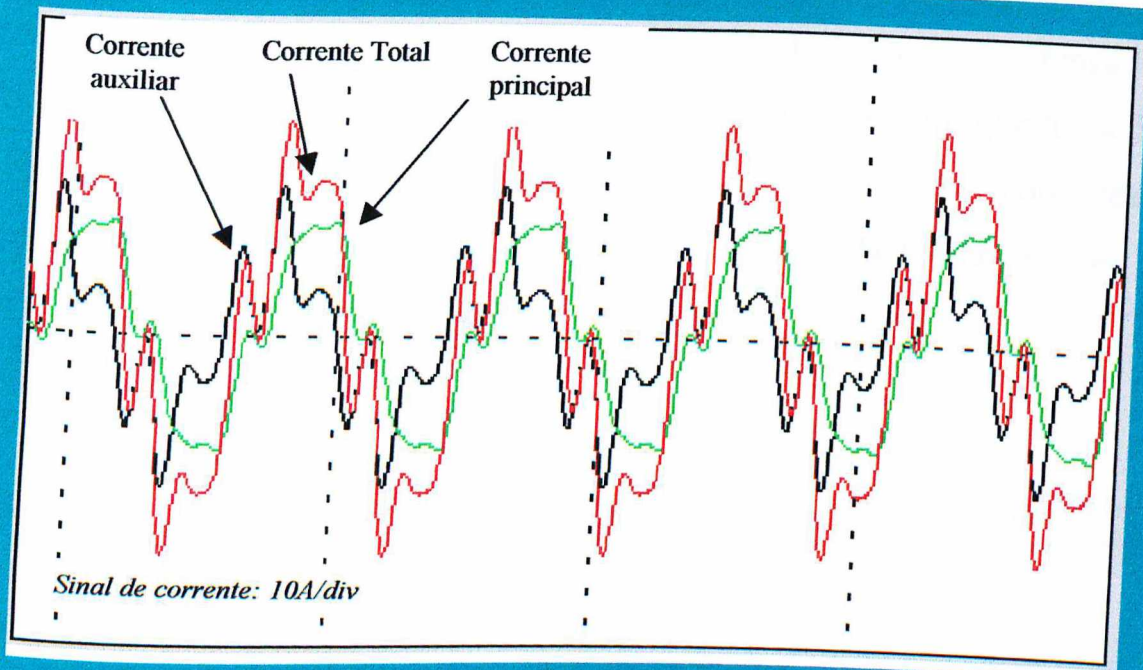


Figura 4.36: Caso 5: Alimentação contendo distorção harmônica de tensão de 10% – Computacional

4.4.6 Suprimento Contendo Flutuação de Tensão – Caso 6

Complementarmente aos estudos anteriores, uma outra análise refere-se à resposta do aparelho condicionador de ar perante um suprimento contendo flutuações de tensão. Neste sentido, os estudos para averiguar o desempenho do equipamento operando nestas condições, consistiram na aplicação de índices de flutuação conforme sugerido em [31] e em conformidade com a recomendação da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), em sua publicação IEC 61000-4-15 intitulada “*Flickermeter – Functional and Design Specifications*”. Ressalta-se que o caso apresentado neste trabalho, trata-se de 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.

A figura 4.37 contém os oscilogramas da tensão e da corrente total, obtidos experimentalmente, para suprimento contendo flutuação de tensão com $PST=3$ e frequência da moduladora de 20Hz. Vê-se, da figura, que a oscilação da tensão tem efeito direto na corrente total, e, portanto, nas correntes nos enrolamentos, cuja frequência de modulação é igual à da tensão, porém, com seus valores de máximos e mínimos defasados de 180° .

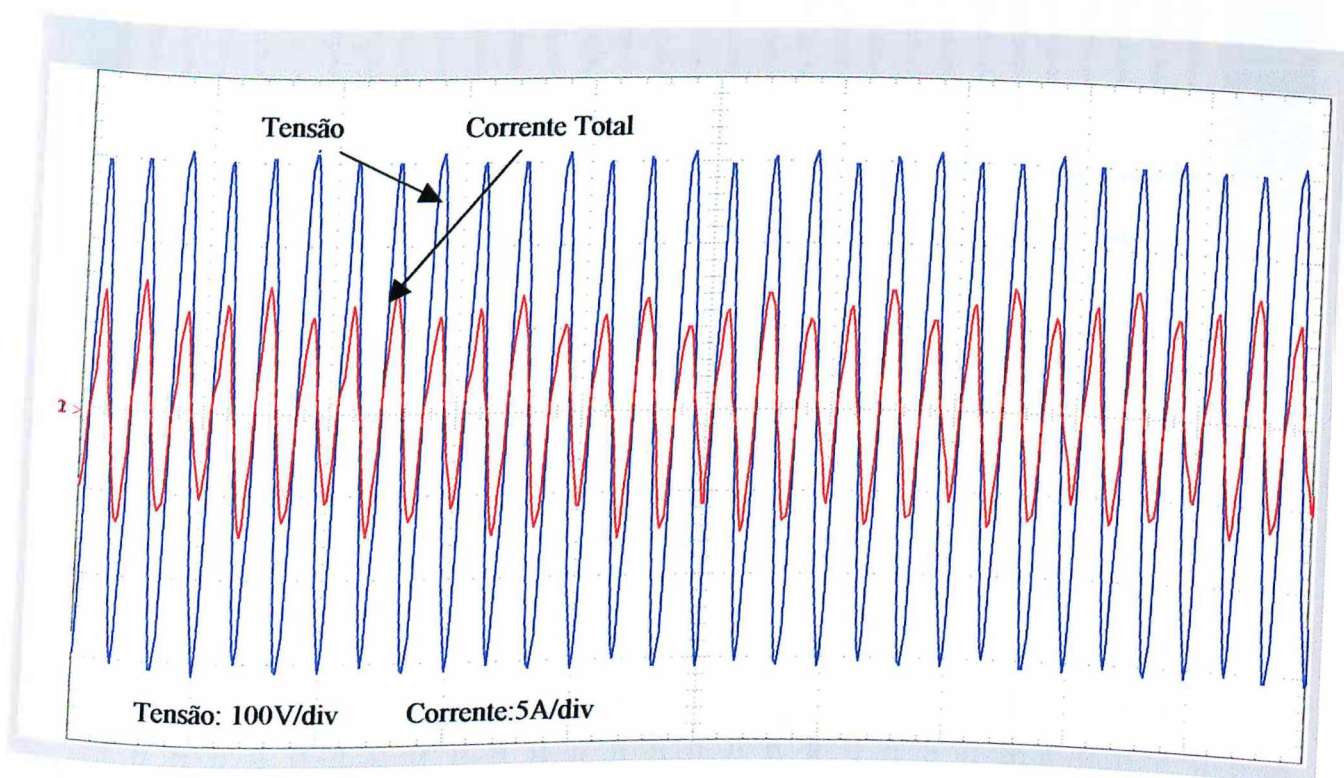


Figura 4.37: Caso 6: Alimentação contendo flutuação de tensão: $PST=3$ e Frequência da moduladora de 20 Hz –Experimental

A figura 4.38 apresenta os resultados para o mesmo caso, obtido por meio digital, sendo grande a semelhança das respostas obtidas pelos dois métodos.

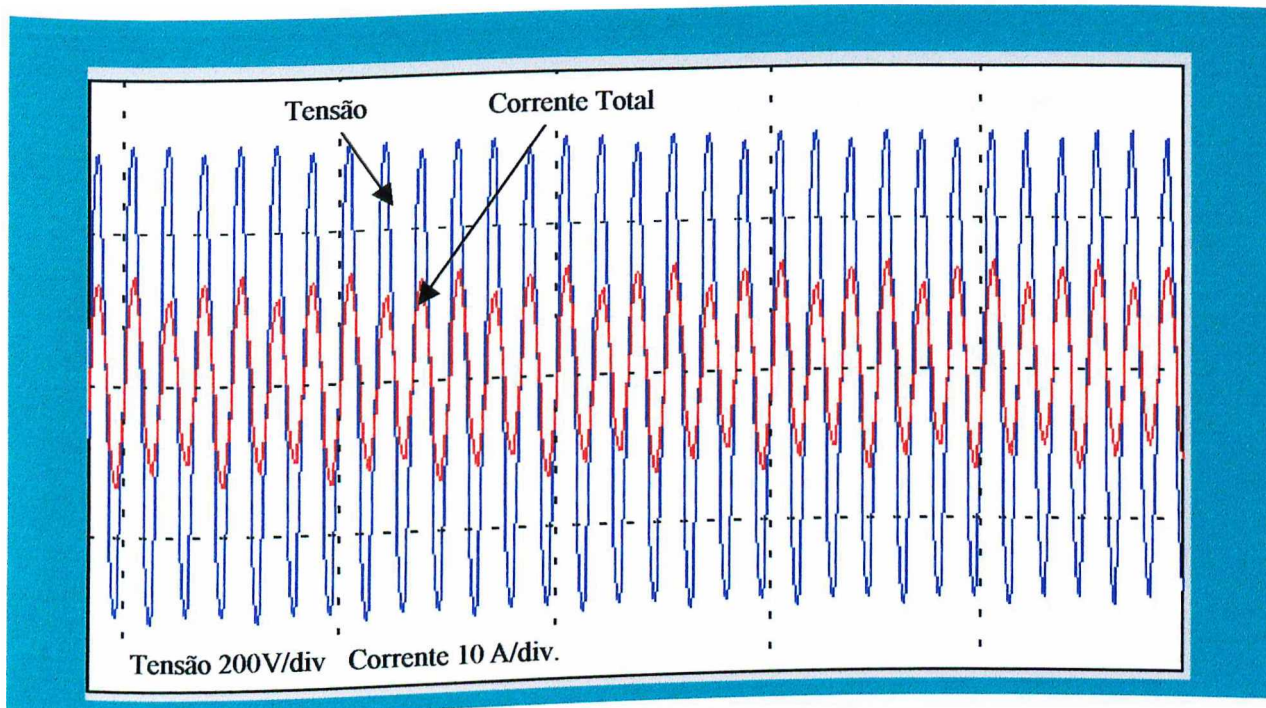


Figura 4.38: Caso 6: Alimentação contendo flutuação de tensão: PST=3 e Frequência da moduladora de 20 Hz –Computacional

As figuras 4.39 e 4.40 apresentam os oscilogramas da tensão e correntes, experimentais e computacionais, onde se observa o comportamento de cada uma delas e a sua contribuição para a corrente total.

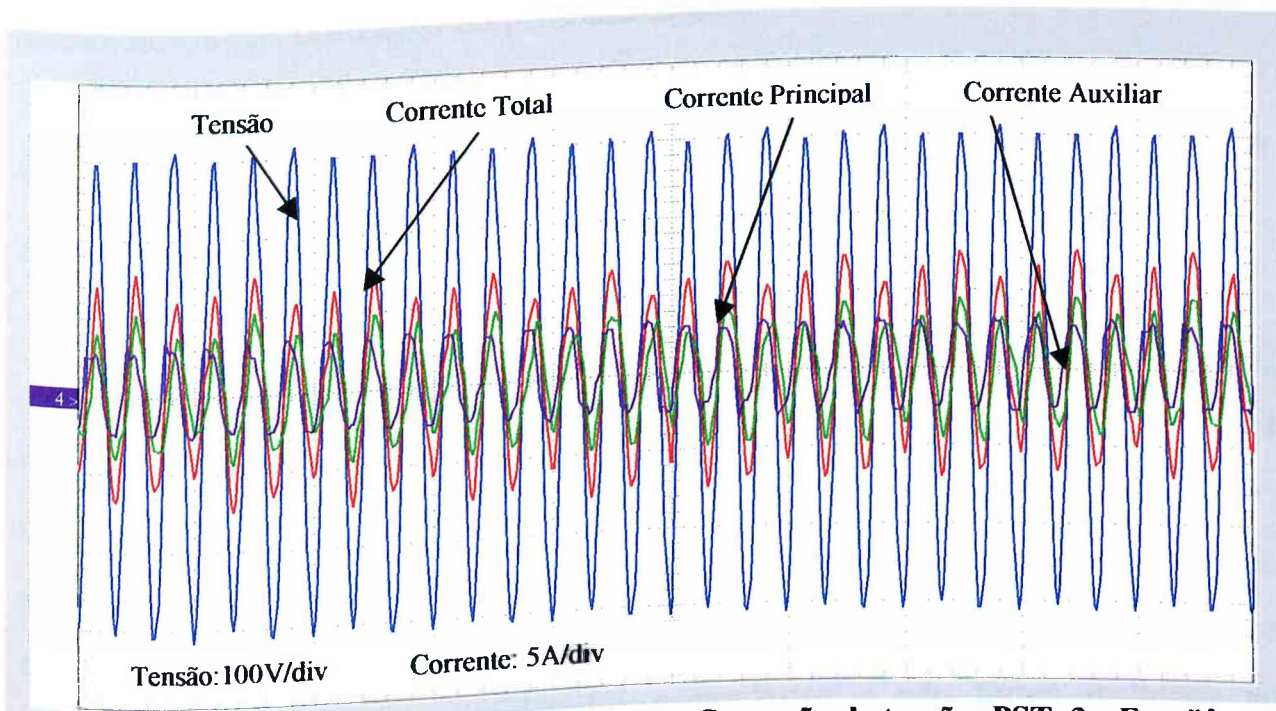


Figura 4.39: Caso 6: Alimentação contendo flutuação de tensão: PST=3 e Frequência da moduladora de 20 Hz –Experimental

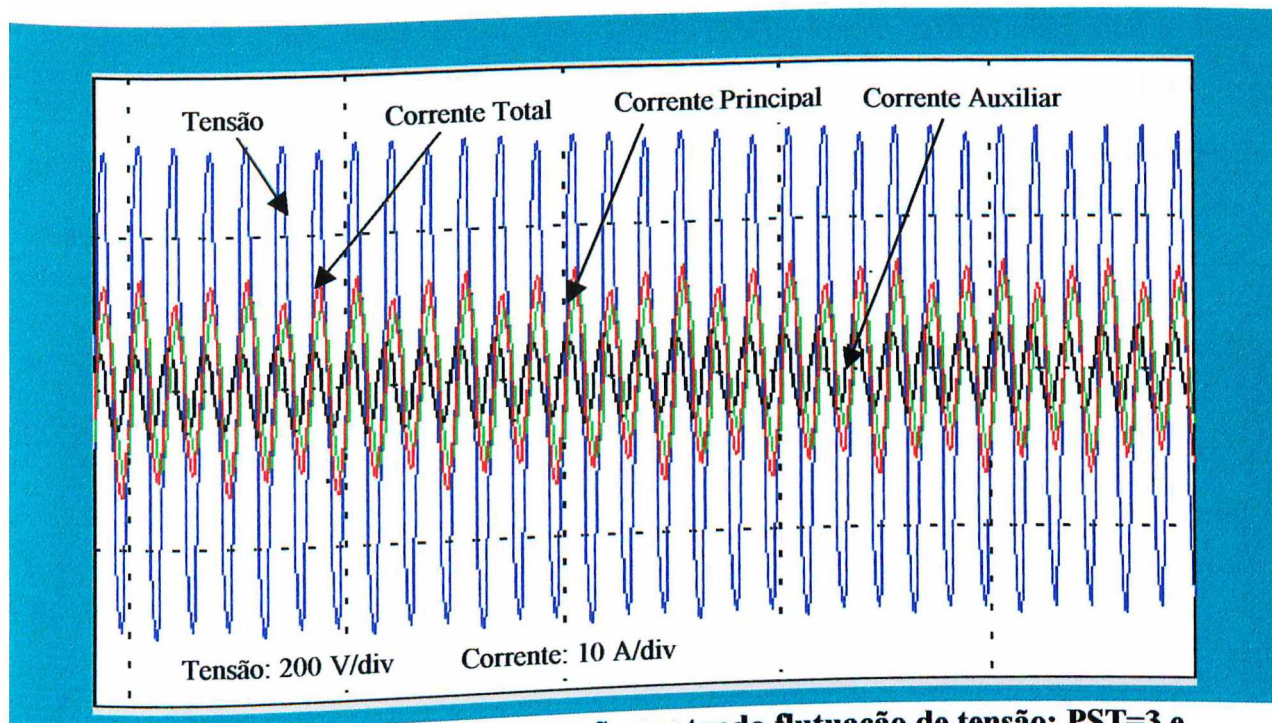


Figura 4.40: Caso 6: Alimentação contendo flutuação de tensão: PST=3 e Frequência da moduladora de 20 Hz –Computacional

A Tabela 4.7 resume os resultados obtidos dos trabalhos de investigação, experimental e computacional, para o caso de suprimento contendo oscilação de tensão, nos níveis utilizados no presente estudo.

4.5 - Sensibilidade e Suportabilidade do Equipamento a Afundamentos de Tensão de Curta Duração e Interrupções

De acordo com os resultados obtidos, itens de qualidade tais como distorções harmônicas, elevações de tensão de curta duração e oscilações mostraram-se de pouca influência na operação do aparelho condicionador de ar, e, por consequência, não implicam em qualquer anomalia à operação normal do equipamento. Por este motivo, estes distúrbios, dentro dos níveis empregados para os estudos, foram considerados secundários e não foram incluídos no escopo das curvas de sensibilidade e suportabilidade elaboradas.

Finalmente, com base nos estudos realizados, parte dos quais foram apresentados ao longo do texto deste capítulo, chegou-se a figura 4.41, que expressa a sensibilidade e suportabilidade do aparelho condicionador de ar, quando submetido a afundamentos de tensão e interrupções.

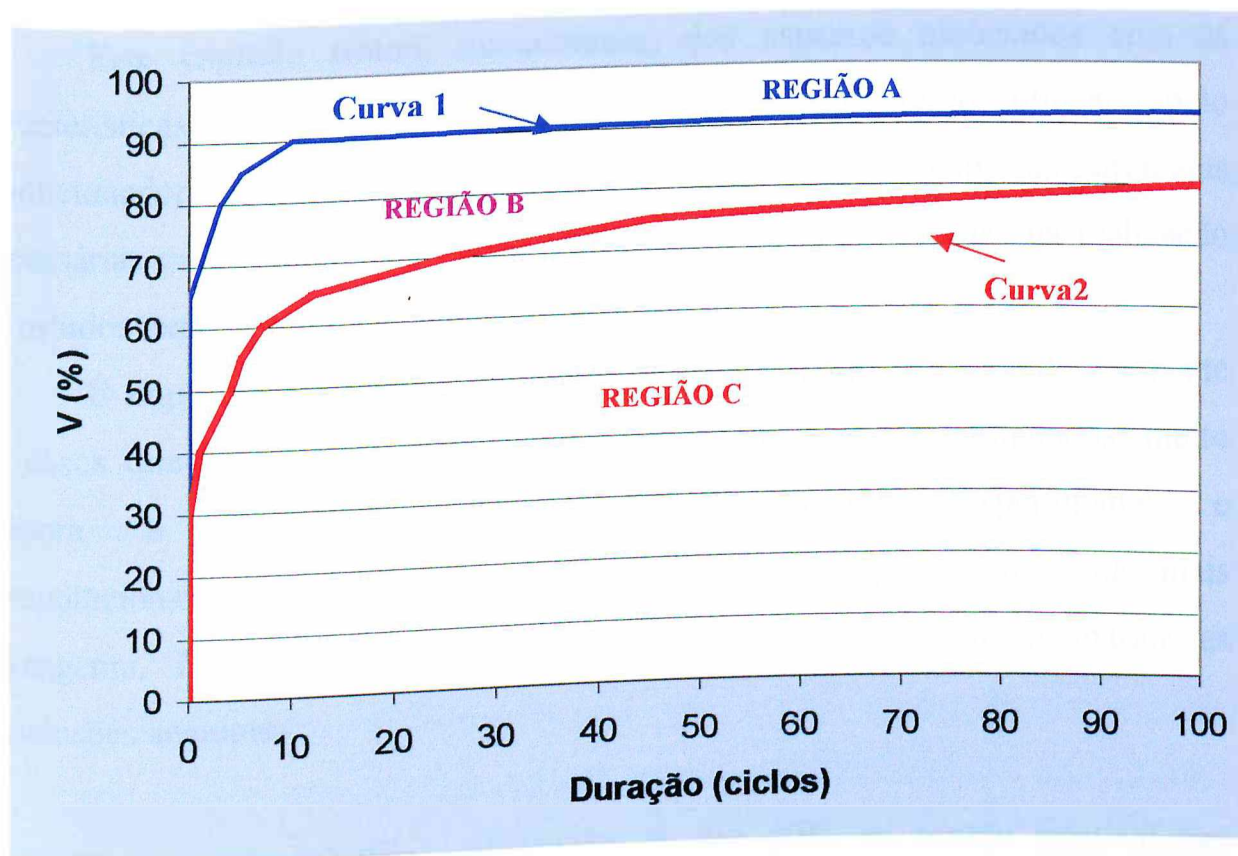


Figura 4.41 – Curvas de sensibilidade e suportabilidade a afundamentos temporários de tensão e interrupções do aparelho condicionador de ar

Nesta figura, a **região A**, delimitada pela **curva 1**, está associada ao funcionamento normal do dispositivo, mesmo para valores de tensão abaixo do nominal. A **região B**, delimitada pelas **curvas 1 e 2**, define a operação do condicionador de ar com algum tipo de anormalidade, seja pelo surgimento de ruídos audíveis diferentes aos da condição normal, seja pelo aumento da vibração do aparelho ou outros tipos de efeitos. Esta região pode ser considerada como o limite de sensibilidade do equipamento. Finalmente, a **curva 2**, que delimita a **região C**, define o limite de suportabilidade do equipamento, ou seja,

qualquer ponto de operação sobre a curva ou abaixo desta está relacionada com o desligamento do equipamento.

4.5 - Considerações Finais

Este capítulo tratou, inicialmente, dos aspectos associados com as características gerais e o circuito equivalente do compressor utilizado pelo condicionador de ar utilizado nos estudos. A seguir foram traçadas as estratégias necessárias para atingir as metas e objetivos propostos, pautadas na realização de estudos experimentais e computacionais.

É importante ressaltar que, neste trabalho, foram apresentados somente os casos que permitem melhor observar os fenômenos aqui estudados, muito embora a quantidade de casos investigados, experimental e computacionalmente, em termos de severidade e duração, tenha sido mais abrangente. Desta forma, as investigações realizadas permitem extrair as conclusões seguintes:

- Elevações temporárias de tensão de até 20% da tensão nominal, com duração de 100 ciclos não tiveram efeito significativo sobre o desempenho do condicionador de ar, observando-se apenas um pequeno acréscimo do valor RMS da corrente, acompanhado de um acréscimo da velocidade durante a ocorrência. Por motivos de segurança quanto a preservação da integridade do aparelho, os ensaios limitaram-se ao valor máximo acima mencionado.
- Afundamentos temporários de tensão e interrupções foram caracterizados como as perturbações mais prejudiciais ao desempenho do equipamento. De uma forma geral, o dispositivo estudado possui elevada sensibilidade a este item de qualidade, apresentando algum tipo de

anormalidade, sejam estes perceptíveis fisicamente ou pela constatação através dos valores RMS das correntes. Através do método computacional observou-se, ainda, decréscimos do valor médio da velocidade, variando de acordo com a severidade do fenômeno. O aparelho indicou não possuir suportabilidade a afundamentos acima de 60% e interrupções do fornecimento. Observou-se que todo o efeito do afundamento de tensão é sentido tão somente pelo enrolamento principal do motor do compressor, cujo aumento significativo da corrente é preocupante em termos da potência dissipada por efeito joule e suas implicações na vida e/ou integridade do equipamento.

- Distorções harmônicas de tensão, nos níveis e ordens aplicadas, não tiveram reflexos perceptíveis no aparelho, entretanto, observou-se total descaracterização das formas de onda. Somado a isto, observou-se uma ligeira elevação da velocidade do motor.
- 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 das correntes e da velocidade, sem que isto influenciasse a operação do dispositivo analisado.
- Em todos os casos estudados verificou-se grande semelhança entre os resultados obtidos pelo método experimental e o computacional, validando o modelo e programa implementado. Vale destacar que tal similaridade possui, como seria esperado, forte correlação com a qualidade dos parâmetros fornecidos para a modelagem. Ainda, a busca de modelos mais completos, como a inclusão do efeito da saturação para os motores pode melhorar mais a precisão dos resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

Ao término de cada um dos capítulos que conformam esta dissertação foram tecidos comentários conclusivos sobre os estudos ali realizados. Neste capítulo, contudo, será feita uma abordagem global das atividades desenvolvidas e dos resultados obtidos, de maneira a proporcionar ao leitor uma visão completa, porém dinâmica, de toda a investigação realizada no presente trabalho. Para tanto, é feita a consolidação das conclusões parciais emitidas ao final de cada capítulo, dando assim, conclusões gerais a respeito dos estudos aqui realizados, bem como das contribuições decorrentes do mesmo.

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 dos diversos equipamentos. Foram apresentados quadros resumo dos itens de qualidade comumente utilizados pela comunidade científica, suas causas e efeitos, evidenciando-se, desta forma, a importância e abrangência da área dentro do contexto da operação de Sistemas Elétricos. Na seqüência, como resultado da exaustiva pesquisa bibliográfica realizada, foi apresentado o estado da arte de estudos voltados para o desempenho - sensibilidade e/ou suportabilidade - de equipamentos, apontando número significativo de instituições de pesquisa atuando nesta área da engenharia elétrica. Ainda como resultado da consulta à literatura, ficou evidenciada a lacuna existente no tocante a avaliação de desempenho de equipamentos de refrigeração no contexto da qualidade, e em particular de aparelhos

condicionadores de ar de janela. No tocante à regulamentação brasileira sobre a matéria, foram apresentadas as principais diretrizes normativas em vigor desde outubro de 2000, com respectivas alterações. Encerrando o capítulo, foram descritas as contribuições deste trabalho e a estrutura completa da dissertação.

O capítulo II prestou-se, inicialmente, para mostrar que a refrigeração faz parte do cotidiano humano desde tempos remotos, e que, com os avanços científicos e tecnológicos, essa relação foi-se multiplicando ao longo dos anos, em termos das aplicações hoje existentes e também da eficiência dos dispositivos utilizados. Foi visto que, os componentes utilizados no comando e proteção destes dispositivos, e até mesmo o próprio sistema de refrigeração, apresentam grande similariedade entre os diferentes fabricantes dos equipamentos, resguardadas as capacidades em função do porte do equipamento. Constatou-se que o compressor, componente principal de equipamentos de refrigeração e, conseqüentemente do condicionador de ar, possui como máquina motriz um motor elétrico de indução, bifásico, com rotor em gaiola de esquilo, fato este que possibilitou a definição, para posterior implementação computacional, de um modelo matemático para o dispositivo. O capítulo foi encerrado mostrando os arranjos elétricos utilizados por dispositivos comercialmente disponíveis, os quais estão em conformidade com os princípios sobre máquinas girantes, CA, em suas diversas configurações de partida.

Identificado o componente responsável pelo funcionamento deste tipo de dispositivo, no capítulo III, abordou-se aspectos relacionados com a constituição física do motor, efetuando-se o desenvolvimento matemático de um modelo para o condicionador de ar, no domínio do tempo, e, posteriormente, culminando com a implementação de um programa computacional, para fins de estudos do motor de indução, também por meios digitais. Objetivando a validação do modelo, foram realizados ensaios experimentais e computacionais com tensão de suprimento senoidal. Os recursos laboratoriais foram providos pela Faculdade

de Engenharia da Universidade Federal de Uberlândia. Os estudos computacionais foram viabilizados através do simulador SABER. Embora este capítulo não tenha tido a pretensão de explorar plenamente as potencialidades do programa implementado, o que é feito no capítulo IV, os estudos comparativos realizados mostraram uma boa semelhança nas respostas obtidas, verificadas através das formas de onda e dos valores numéricos obtidos pelos dois métodos. Para tanto foram realizados estudos de desempenho do equipamento focado neste trabalho, com suprimento ideal.

O capítulo IV inicia abordando os aspectos associados às características gerais e circuito equivalente do aparelho condicionador de ar, escolhido como alvo neste trabalho de pesquisa. O equipamento estudado constitui-se em uma aplicação clássica da refrigeração doméstica - o conforto ambiental. O condicionador de ar, como destacado, é um componente importante dentro dos sistemas elétricos, face, não apenas a sua massificação, mas também ao seu comportamento dinâmico durante e na recuperação a perturbações, notadamente afundamentos de tensão. Foram discutidos, ainda, as estratégias e procedimentos experimentais e computacionais requeridos, com vistas a atingir os objetivos propostos. Após a realização dos ensaios, pelos dois métodos, foram mostrados e discutidos os resultados digitais e de laboratório, evidenciando-se o desempenho do equipamento como resposta aos itens de qualidade aplicados. É importante destacar que foi verificada grande semelhança entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados computacionais, o que atribui à ferramenta computacional um grau de confiabilidade suficiente para proceder-se à definição de limites de sensibilidade e suportabilidade. Finalmente, foram levantadas as curvas de sensibilidade e suportabilidade do condicionador de ar, experimentalmente, quando submetido a afundamentos temporários de tensão.

De modo geral, os resultados obtidos para o condicionador de ar, quer pelo método experimental quer pelo computacional, o aparelho apresentou-se

pouco sensível e com elevada suportabilidade à maioria dos distúrbios típicos, sem qualquer alteração funcional significativa. Esta afirmativa refere-se ao desempenho quanto à presença de distorções harmônicas, elevações de tensão de curta duração e flutuações de tensão, dentro dos padrões frequentemente presentes nos sistemas elétricos.

Não obstante as afirmações acima feitas, verificou-se que, sob a ação de afundamentos temporários de tensão e/ou interrupções, conforme seus níveis e duração, a operação do citado equipamento sofre substanciais efeitos, que variam desde uma operação temporariamente imprópria até seu completo desligamento. Dois aspectos de grande relevância foram evidenciados os que se denominam de grau de sensibilidade e grau de suportabilidade, ou imunidade do equipamento. Em outras palavras, o condicionador de ar mostrou possuir um elevado nível de sensibilidade e relativamente baixa suportabilidade, se considerada a sua robustez e porte, que resultam em que, qualquer nível de afundamento de tensão, independente da duração, é suficiente para causar algum tipo de anormalidade do funcionamento do dispositivo, sem, contudo, provocar o seu desligamento. Para os casos de afundamentos de tensão mais acentuados e interrupções, numa certa região definida pelos níveis e duração, o dispositivo mostrou-se igualmente de pouca suportabilidade, muitas das vezes não suportando sequer $\frac{1}{2}$ ciclo de afundamento de tensão, quando ocorre o colapso total, traduzido no desligamento do equipamento. Estes resultados foram altamente significativos e traduzidos na forma de curva de sensibilidade e suportabilidade anexada ao capítulo correspondente.

Os valores numéricos obtidos são reconhecidamente válidos e aplicáveis ao produto testado, no entanto, os mesmos são orientativos e não devem servir de referência para todo e qualquer outro equipamento similar ao testado. Para o estabelecimento de recomendações mais abrangentes torna-se necessária a

realização de testes de desempenho, empregando-se uma grande variedade de equipamentos com características similares.

Uma outra contribuição merecedora de destaque, resultado desta pesquisa, está relacionada com o desenvolvimento de uma modelagem computacional que foi validada através de correspondentes ensaios experimentais. Apesar das simplificações impostas ao modelo teórico, 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.

Mesmo diante dos avanços oferecidos por esta dissertação, os desenvolvimentos e discussões feitos ao longo deste trabalho deixaram claro a existência de 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 que objetivem a melhoria do nível de sensibilidade e/ou suportabilidade do equipamento, face aos padrões de afundamentos reais dos sistemas elétricos nos quais se encontra conectado;
- Estudos mais abrangentes envolvendo outros equipamentos similares, de maneira a possibilitar procedimentos estatísticos para a obtenção de curvas de sensibilidade mais genéricas do que as obtidas neste trabalho;
- Considerando o significativo aumento da corrente, no instante da aplicação, durante e após a retirada dos afundamentos, e ainda a grande quantidade destes equipamentos em operação, introduzir modelos de condicionadores de ar em estudos dinâmicos de sistemas de potência, de maneira a avaliar os impactos no sistema.

CAPITULO V – Conclusões Gerais

- Discussões e análises para melhor caracterizar o significado do termo Sensibilidade dado para os dispositivos elétricos.
- Extensão dos procedimentos para outros tipos de dispositivos residenciais, comerciais e industriais.

Referências Bibliográficas

- [1] Dugan, Roger C. & Outros, “Electrical Power Systems Quality”, McGraw Hill, 1996.
- [2] Souto, O. C. N., “Efeitos da Qualidade da Energia Elétrica sobre a Operação de Motores Trifásicos”, Tese de Doutorado - UFU, Uberlândia – MG, Dezembro, 2001.
- [3] 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.
- [4] Pacheco, C. Roberto, “Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Cabos Isolados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia – MG, Maio de 2002.
- [5] Delaiba, A. C., “Comportamento de Transformadores com Cargas Não Lineares. Uma Abordagem Analítica, Experimental e Numérica pelo Método dos Elementos Finitos”, Tese de Doutorado, USP, São Paulo – SP, Julho de 1997.
- [6] Heydt, G. T., “Power Quality Engineering”, IEEE Power Engineering Review, pp 5 - 7, Setembro de 2001.
- [7] 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.
- [8] PQTN Brief 39: “Ride-through Performance of Programmable Logic Controllers”, EPRI Power Electronics Applications Center, Knoxville, TN, november 1996.
- [9] Reid, W. Edward, “Power Quality Issues – Standards Guidelines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, pp 625 – 632, May/June 1996.
- [10] 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.
- [11] IEEE “Recommended for Emergency and Stand-by Power Systems for Industrial and Comercial Applications”, Std. 446 IEEE Orange Book, 1995.
- [12] Ribeiro, T. N., “Uma Discussão dos Critérios e Normas Relativas à Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, PUC, Belo Horizonte – MG, agosto, 1998.
- [13] Sekine, Y., Yamonoto, T., Mori, S., Saito, N., Kurokawa, H., “Presents State of Momentary Voltage Dip Interferences and the Countermeasure in Japan”.Inc. Conf. On Large Eletric Networks (CIGRE), 34th Session 1992, Paris, France.
- [14] Anderson, Lisa M., Northeast Utilits, and Bowes, Kenth B., “The Effects of Power Line Disturbances on Consumer Eletronic Equipment”, IEEE Transation on Power Delivery, vol. 5, pp. 1062 – 1065, April 1990.
- [15] Smith, Sthephen B. And Standler, Ronald B., “The Effects of Surges on Eletronic Appliances”, IEEE Transation on Power Delivery, vol. 7, pp. 1275 – 1282, July 1992.
- [16] 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, April 1993.
- [17] Fuchs, E. F., Roesler, D. J. e 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, April 1987
- [18] Neto, Luciano Martins, Avaliação do Desempenho de Motores Monofásicos em Regime de Alimentação Senoidal, Relatório UFU.
- [19] Mendes, L. M. de Oliveira, “Refrigeração e Ar Condicionado”, Editora Tecnoprint SA, 1984.

Referências Bibliográficas

- [20] Dassot, Roy J., "Princípios de Refrigeração", Hemus Livraria Editora, 1980.
- [21] Stoecker, F. Wilbert e Jones, W. Jerold, "Refrigeração e Ar Condicionado", McGraw Hill do Brasil, 1985.
- [22] Manuais da empresa Tecumseh do Brasil, São Carlos – SP
- [23] *Lauand, Carlos A. e Pugliese, M., "Manual Prático de Geladeiras, Refrigeração Industrial e Doméstica", Hemus Editora Ltda.*
- [24] 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, 1965.
- [25] Sen, P. C., "Principles of Electrical Machines and Power Electronics", Editora John Wiley & Sons.
- [26] Toro, V. D., "Fundamentos de Máquinas Elétricas", Editora Prentice Hall do Brasil.
- [27] Fitzgerald, A. E., Kingsley, Jr, Kusko, Alexander, "Máquinas Elétricas e Conversão Eletromecânica de Energia, Processos, Dispositivos, e Sistemas", Editora McGraw Hill do Brasil Ltda., 1978.
- [28] IEC Std. 61000-4-11, Eletromagnetic Compatibility (EMC), part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity test, Edition 1.1, 2001-03.
- [29] Azevedo. A. C., "Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, UFU, 2002.
- [30] Medeiros, C. A.G., Oliveira, J. C., "Implementação Computacional do Modelo do Medidor de Cintilação Luminosa UIE/IEC para Calibração de Medidores práticos", Artigo aceito para o CBA2002, a ser realizado em Setembro de 2002.

ANEXO A

Template Condicionador de AR
(Motor de Indução Bifásico Assimétrico)

- Descrição:** Esta template modela um motor de indução bifásico assimétrico utilizando a representação a, b . O desenho ilustra de forma simplificada a template. Ela é composta por dois pontos de conexão elétrica (pl_a, pl_b) e um ponto de conexão mecânica (eixo).
- Variáveis de saída:** isa (mt_ind_mono.REF) - Corrente de fase do enrolamento principal do estator, associada ao terminal pl_a [A].
 isb (mt_ind_mono.REF) - Corrente de fase do enrolamento auxiliar do estator, associada ao terminal pl_b [A].
 ira (mt_ind_mono.REF) - Corrente de fase, Fase A do rotor, associada ao terminal pl_a [A]
 irb (mt_ind_mono.REF) - Corrente de fase, Fase B do rotor, associada ao terminal pl_b [A]
 con_elmag (mt_ind_mono.REF) - Conjugado eletromagnético do motor [N.m]
 con_eixo (mt_ind_mono.REF) - Conjugado mecânico no eixo do motor [N.m]
 con_carga (mt_ind_mono.REF) - Conjugado mecânico solicitado pela carga no eixo do motor [N.m]
 vel_motor (mt_ind_mono.REF) - Velocidade angular do rotor do motor [rad/s]
 vel_eletr (mt_ind_mono.REF) - Velocidade angular do campo girante do motor [rad/s]
 $teta$ (mt_ind_mono.REF) - Ângulo espacial entre as forças magnetomotrizes do estator e do rotor

element template mt_ind_aper35 plaa plb eixo= rsa , xsa, rsb, xsb, rr, xr, xm, f, vnom, snom, j, np, ic, t_d, V0, K0, ccap, Na, Nb

electrical plaa,plb

rotational_vel eixo

string t_d=undef t_d = unidade dos parâmetros externos (ohms ou pu)
 number rsa, # resistência do enrolamento principal do estator, fase a
 xsa, # reatância do enrolamento principal do estator, fase a
 rsb, # resistência do enrolamento auxiliar do estator, fase b

Anexo A

```

xsb,      # reatância do enrolamento auxiliar do estator, fase b
rr,       # resistência do rotor, por fase
xr,       # reatância do rotor, por fase
xm,       # reatância de magnetização
K0,       # Porcentagem da potencia nominal representativa das
          # perdas rotacionais - Default=3%
f,        # frequência com que os dados sao fornecidos [Hz]
vnom,     # Tensão eficaz fase-fase em [V]
snom,     # Potência nominal do motor [cv]
j,        # inércia da carga + inércia do motor
ccap,     # capacitor de partida [uF]
V0        # condição inicial do capacitor de partida
Na,       # número de espiras do enrolamento principal
Nb,       # número de espiras do enrolamento auxiliar
np,       # número de polos do motor
ic[7]=[0, #Vetor de condições iniciais - 1 elem.: var. teta - ângulo
          # espacial entre as forcas magnetomotrizes do estator e do
          # rotor [rad]
0,        # Vetor de cond. iniciais - 2 elem.: var. isa - corrente
          # do enrolamento principal do estator -a [A]
0,        # Vetor de cond. iniciais - 3 elem.: var. ira - corrente
          # do rotor associada ao enrolamento principal - [A]
0,        # Vetor de cond. iniciais - 4 elem.: var. isb - corrente
          # do enrolamento auxiliar do estator - b [A]
0,        # Vetor de cond. iniciais - 5 elem.: var. irb - corrente
          # do rotor assoc. ao enrol. auxiliar [A]
0,        # Vetor de cond. iniciais - 6 elem.: var. vel_eletr -
          # velocidade angular eletrica [rad/s]
0]        #Vetor de cond. iniciais - 7 elem.: var. vel_motor -
          #velocidade angular do rotor [rad/s]

```

```

{
electrical plc
<consts.sin
number lsa,      # Indutância dispersão do estator enrol. principal
lsb,            # Indutância dispersão do estator enrol. auxiliar
lr,            # Indutância de dispersão do rotor
m,            # Indutância mútua máxima entre estator e rotor
ws,           # Velocidade síncrona
Nn,          # Rotação nominal em rad/s.
lsasa,       # indutância própria do enrolamento principal do estator
lsasb,       # indutância mútua dos enrolamentos principal e auxiliar do
          # estator

```

Anexo A

```
lsbsa,      # indutância mútua dos enrolamentos principal e auxiliar do
            # estator
lsbsb,      # indutância própria do enrolamento auxiliar do estator
lrArA,      # indutância própria do enrolamento do rotor
lrArB,      # indutância mútua dos enrolamentos do rotor
lrBrA,      # indutância mútua dos enrolamentos do rotor
lrBrB      # indutância própria do enrolamento do rotor
var i       isa, isb, ira, irb, I_total # Correntes do estator e do rotor
var rad     teta # Ângulo espacial entre as forças magnetomotrizes do estator e
            do rotor
var w_radps vel_motor, vel_eletr # vel_eletr => velocidade angular
            elétrica; vel_motor => Velocidade angular mecânica
var w_rpm   n_rpm # rotação do motor em revoluções por minuto
var tq_Nm   con_elmag, con_carga, # Conjugados eletromagnéticos, da
            con_eixo # carga e no eixo do motor
val v       va, vb, vc # Cálculo das tensões aplicadas as fases dos
            enrolamentos
val nu      Crot, # Perdas rotacionais
            lsarA, # indutância mútua enrolamentos principal e
            rotor
            lsarB, # indutância mútua enrolamentos principal e
            rotor
            lsbrA, # indutância mútua enrolamentos auxiliar e rotor
            lsbrB, # indutância mútua enrolamentos auxiliar e rotor
            lrAsa, # indutância mútua enrolamentos do rotor e
            principal
            lrAsb, # indutância mútua enrolamentos do rotor e
            auxiliar
            lrBsa, # indutância mútua enrolamentos do rotor e
            principal
            lrBsb # indutância mútua enrolamentos do rotor e
            auxiliar

val w_radps vel_aux
number      zb, rsat, xsat, rsbt, xsbt, # Variáveis que recebem os valores
            rrt, xrt, xmt, Krot, ccapt, a, b # das impedâncias
number      pi=3.141592654

val f       flux_a, flux_b, # Cálculo dos fluxos do estator
            flux_ra, flux_rb # Cálculo dos fluxos no rotor

var f       flux_a, flux_b
            flux_ra, flux_rb
```

Anexo A

```
var v vcap, vaux, vprin, v_b, va1, va2, vb1, vb2
parameters {
  if (j==undef) {
    saber_message("TMPL_S_ILL_VALUE",instance(),"O parametro j
não foi definido ")
  }
  if(t_d=="pu") {
    zb=(vnom**2)/(snom*1000)
    rsat=rsa*zb
    rsbt=rsb*zb
    rrt=rr*zb
    xsat=xsa*zb
    xsbt=xsb*zb
    xrt=xr*zb
    xmt=xm*zb
  }
  else {
    rsat=rsa
    rsbt=rsb
    rrt=rr
    xsat=xsa
    xsbt=xsb
    xrt=xr
    xmt=xm
  }
  Nn = (4*pi*f)/np
  Krot=((K0/100)*snom*736)/(Nn*Nn)
  ws = 2*pi*f
  m = xmt/ws
  lsa = xsat/ws
  lsb = xsbt/ws
  lr = xrt/ws
  lsasa=m+lsa
  lsasb=0
  lsbsa=0
  lsbsb=m+lsb
  lrArA=m+lr
  lrArB=0
  lrBrA=0
  lrBrB=m+lr
}
l.Itotal p1aa p1a = l=0, r=1p
```

Anexo A

```
values{
    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)

    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
}
struc {number bp,inc;} steta[*]=\
    [(-100k,0.01),(0,0.01),(1k,0.01),(100k,0)]
l.ramo_a p1a p1ax = r=1p, l=0m
l.ramo_b p1a p1ax1 = r=1p, l=0m
c.cp p1c p1b = c=ccapt, ic=V0
ccapt=ccap
values {
    va = v(p1ax) - v(p1b)
    vb = (v(p1ax1) - v(p1c))
    vc = v(p1c) - v(p1b)
    Crot=Krot*vel_motor
    vel_aux = w_radps(eixo)
}
# A control_section estabelece as condições iniciais para as correntes ângulo e
# velocidade
control_section {
    initial_condition (teta,ic[1])
    initial_condition (isa,ic[2])
    initial_condition (ira,ic[3])
    initial_condition (isb,ic[4])
    initial_condition (irb,ic[5])
    initial_condition (vel_eletr,ic[6])
    initial_condition (vel_motor,ic[7])
    sample_points(teta,steta)
}
equations {
    isa: va = (rsat*isa) + d_by_dt(flux_a)
```

Anexo A

```
isb: va = (rsbt*isb) + d_by_dt(flux_b) + vc
ira: -rrt*ira = d_by_dt(flux_ra)
irb: -rrt*irb = d_by_dt(flux_rb)
    i(plax) += isa
    i(plb) -= isa
    i(plax1) += isb
    i(plc) -= isb
```

```
# Equação do conjugado eletromagnético do motor (con_elmag)
```

```
con_elmag: con_elmag = (np)*(isa*(-m*ira*sin(teta)+ m*irb*cos(teta))+
    isb*(-m*irb*sin(teta)-m*ira*cos(teta)))
```

```
# Cálculos das equações de velocidade mecânica, velocidade elétrica, ângulo
    espacial teta, conjugado no eixo
```

```
# J=jm + jc => Representa a inércia (motor + carga) das partes girantes
```

```
vel_motor : (1/j)*(con_elmag - con_carga - Crot)= d_by_dt(vel_motor)
con_carga : vel_aux = vel_motor
vel_eletr : vel_eletr = (vel_motor*np)/2
teta      : vel_eletr = d_by_dt(teta)
con_eixo  : con_eixo = con_elmag - Crot
tq_Nm(eixo) -= con_carga
n_rpm : n_rpm = (vel_motor)*30/pi
```

```
# Fluxo magnético
```

```
fluxo_a : fluxo_a = flux_a
fluxo_b : fluxo_b = flux_b
fluxo_ra: fluxo_ra = flux_ra
fluxo_rb: fluxo_rb = flux_rb
    vcap = vc
    vaux = vb
    vprin = va
    v_b : v_b = vb + vc
    I_total: I_total=isa + isb
```

```
}
```

```
# Final do corpo do template
```

```
}
```

```
vsine.fontel plaa 0 = rms=220, f=60, ph=0
# parâmetros do motor do condicionador de ar:
```

Anexo A

mt_ind_aper35.motor p1aa 0 eixo =
rsa=3.86,xsa=5.44,rsb=11.49,xsb=3.44,rr=4.5,xr=2.5,xm=102.8,f=60,vnom=220
Snom=1.0,j=0.0015,np=2,t_d="ohms",K0=3,ccap=17.5u,Na=1,Nb=1.16,V0=0

carga_arco.load eixo = Pnom=0.736, k1=0, k2=0.0000153, k0=0, Nnom=3600

ANEXO B

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO COMPRESSOR UTILIZADO NOS TRABALHOS
EXPERIMENTAIS**

Modelo: AE5470ES LM AE240ES

Tensão de Operação:	Nominal - 220 [V]	Faixa de operação 198 - 242 [A]
Corrente:	Nominal - 4,3 [A]	Partida - 19,5 [A]
Frequência:	60 [Hz]	
Potência (+/-5%):	903 [W]	
Eficiência - EER (-9.04%/+10.5%):	7,75 [BTU/Wh]	
Capacidade Frigorífica :	7000 ±5% [BTU/h]	
Aplicação:	Alta pressão e ar condicionado	
Gás Refrigerante:	R134a (ecológico)	
Ventilação:	Forçada	
Tipo de Motor:	PSC	
Resistência dos enrolamentos à 25°C (+/-7%):	Principal: 3,86 [Ω]	Auxiliar: 11,49 [Ω]
Classe de Torque de Partida:	Torque Normal (LST)	
Tipo de Expansão:	Tubo Capilar	
Faixa de Temperatura de Evaporação:	0 a +12.8[°C] 32°F a 55[°F]	
Carga de Óleo:	383 [ml] - Sintético	
Deslocamento:	13,24 [cc/ver]	
Peso Líquido:	12,6 [Kg]	
Protetor Térmico:	MRA58113-XXXX	Ou T24932-XX
Temp. de Abertura ± 5%)	105 [°C]	115 [°C]
Temp. de Fechamento (+/-9°C)	52 [°C]	52 [°C]
Corrente de Time Check:	12..50 [A]	12.10 [A]
Time Check à 25°C	5.5 - 17 [s]	6.5 - 16 [s]
Corrente de abertura:	4.53 [A] a 90 [°C]	3.90 [A] a 90 [°C]