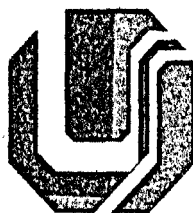


SISBI/UFU



1000205269



Mon
621.3
A229 d
TES/m en

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

DESEMPENHO DE APARELHOS REFRIGERADORES
NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA

Dissertação apresentada por Ana Claudia de Azevedo 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
Paulo César Abreu Leão, Dr. - FUNREI
Kleiber David Rodrigues, Dr. - UFU

Uberlândia, 26 de Julho de 2002.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, João e Laurinda, meu irmão e minhas irmãs, pelo incentivo ao longo de mais esta trajetória na minha vida.

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, **Bismarck Castillo Carvalho, Anderson Villça, Carlos Augusto Medeiros, Fernando Belchior e Marcelo Fandi**, pelo companheirismo 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.

A **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 Refrigerador Doméstico. 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 refrigerator 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 – QUALIDADE DA ENERGIA: CARACTERIZAÇÃO E CONCEITOS.....	05
1.3 – ESTADO DA ARTE.....	08
1.3.1 – Consolidação dos Trabalhos Realizados na Área de Sensibilidade e/ou Suportabilidade de Dispositivos Eletro-Eletrônicos.....	09
1.4 – JUSTIFICATIVA PARA O PRESENTE TRABALHO	16
1.5 – AS CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO.....	18
1.6 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20

CAPÍTULO II

EVOLUÇÃO HISTÓRICA E TECNOLÓGICA DOS DISPOSITIVOS DE REFRIGERAÇÃO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	24
2.2 – HISTÓRICO DA REFRIGERAÇÃO.....	25
2.3 – PARTES COMPONENTES E FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	28
2.3.1 – Ciclo de Refrigeração.....	28
2.3.2 – Gases Refrigerantes.....	30
2.4 – PARTES COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	32
2.4.1 – Componentes Mecânicos.....	32

2.4.2 – Componentes Elétricos.....	35
2.5 – TIPOS DE SISTEMAS DE COMPRESSÃO.....	40
2.5.1 – COMPRESSORES ALTERNATIVOS.....	40
2.5.2 – COMPRESSORES ROTATIVOS.....	42
2.6 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	43
2.7 – CIRCUITOS ELÉTRICOS DE DISPOSITIVOS DE REFRIGERAÇÃO ENCONTRADOS COMERCIALMENTE	44
2.7.1 – Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Resistência.....	46
2.7.2 – Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Capacitor.....	47
2.7.3 – Motor de Indução de Fase Dividida Com Capacitor Permanente.....	49
2.7.4 – Motor de Indução a Duplo Capacitor.....	49
2.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50

CAPÍTULO III

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

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	52
3.2 – MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO: MODELAGEM MATEMÁTICO NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	53
3.2.1 – Desenvolvimento Matemático.....	53
3.2.2 – Equações Elétricas.....	57
3.2.3 – Equação Mecânica.....	59

3.2.4 – Sistemas de Equações dinâmicas que Regem o Comportamento da Máquina de Indução Bifásica Assimétrica.....	60
3.3 – MOTOR ELÉTRICO UTILIZADO NO DISPOSITIVO INVESTIGADO.....	69
3.4 – VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	70
3.4.1 – Ensaios Experimentais.....	70
3.4.2 – Simulação Computacional.....	71
3.4.3 – Operação do Motor com Tensão de Suprimento ideal.....	73
3.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS NO CONTEXTO DA QUALIDADE

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	79
4.2 – CARACTERÍSTICAS E CIRCUITO EQUIVALENTE DO EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	80
4.2.1 – Características Físicas do refrigerador doméstico sob Investigação.....	80
4.2.2 – Arranjo Físico da Unidade Elétrica do Equipamento Ensaiado.....	82
4.3 – ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS.....	83
4.3.1 – Ensaios Experimentais.....	84
4.3.2 – Simulação Computacional.....	86
4.4 – CASOS ESTUDADOS.....	87
4.4.1 – Caso 1: Suprimento com Características Ideais.....	89

4.4.2 – Caso 2: Suprimento Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração	91
4.4.3 – Caso 3: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração	95
4.4.4 – Caso 4: Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica.....	104
4.4.5 – Caso 5: Suprimento Contendo Distorção harmônica de Tensão	106
4.4.6 – Caso 6: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão.....	109
4.5 – SENSIBILIDADE E SUPORTABILIDADE DO EQUIPAMENTO A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO E INTERRUPÇÕES.....	111
4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS.....	115
------------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120
---------------------------------	-----

Anexos

ANEXO A	124
ANEXO B	131

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Considerações Iniciais

A energia elétrica possui características que a diferenciam dos demais insumos industriais. Ela precisa ser gerada concomitantemente com o consumo, não sendo possível seu armazenamento; não podendo ser transportada pelos meios usuais de transporte e; mais importante, sua qualidade depende tanto das concessionárias, que a produzem, transmitem e distribuem, como dos próprios consumidores.

A qualidade da energia elétrica está relacionada, essencialmente, à manutenção da tensão de suprimento próximo às características consideradas ideais. Isto significa que, a qualidade da energia elétrica, pode ser entendida como a qualidade da tensão disponibilizada para os consumidores. Alternativamente, fenômenos que afetam a qualidade da corrente elétrica, podem ser utilizados para explicar muitos dos problemas atuais da qualidade da energia [1].

Equipamentos e dispositivos conectados aos sistemas elétricos, que em décadas passadas eram predominantemente eletromecânicos, estão sendo substituídos, gradativamente, por outros dotados de tecnologia eletrônica e digital. A necessidade de sobreviver num mundo globalizado, tem levado às

indústrias brasileiras a automatizar suas linhas de produção, com o uso de equipamentos mais modernos e eficientes, geralmente controlados por microprocessadores. Esses equipamentos microprocessados provocaram uma verdadeira revolução nos processos industriais, possibilitando um incremento da produção e melhorando a confiabilidade das empresas, portanto, tornando-as mais eficientes e competitivas. Infelizmente, juntamente com o conjunto de vantagens anteriormente mencionadas, estes mesmos dispositivos possuem, geralmente, elevada sensibilidade a suprimentos que se apresentem com a qualidade comprometida.

Desta forma, conclui-se que, os processos de automação, essenciais para o aumento da produtividade e competitividade do setor industrial, contribuíram para que o consumidor de energia, antes mero receptor, se transformasse em cliente das concessionárias de energia. Assim, os consumidores, estão cada vez melhor informados a respeito das questões da qualidade, e cientes de que um fornecimento de energia elétrica com qualidade comprometida afeta a operação de seus equipamentos, com os conseqüentes prejuízos financeiros. Estes prejuízos, podem ser derivados da parada do processo produtivo, assim como também, devido a redução da vida útil dos componente integrantes de determinado sistema, com a conseqüente necessidade de substituição.

Por outro lado, esses mesmos dispositivos, ditos mais modernos, podem por vezes, configurar-se como fontes emissoras de poluição para os sistemas elétricos. Dessa forma, o consumidor, até então considerada vítima dos distúrbios ocorridos nos sistemas da concessionária, torna-se uma fonte de perturbação dos mesmos.

Os fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica são bem conhecidos e fazem parte do cotidiano de consumidores e concessionárias. A título de exemplo, dentre as perturbações mais comumente encontradas em sistemas elétricos, podem ser mencionados: variações de tensão de curta e de longa duração (interrupções, subtensões e sobretensões), desequilíbrios de

tensão, distorções da forma de onda (harmônicas, nível cc, ruídos, notching, etc), flutuações de tensão, causadoras do fenômeno de cintilação luminosa (“flicker”) e variações da frequência do sistema, dentre outros.

As perturbações anteriormente mencionadas, no entanto, na maioria das vezes, são estudadas de forma isolada e não num contexto mais amplo, onde seriam consideradas todas as anormalidades existentes. É importante salientar, que as questões aqui abordadas, seja na condição de receptores ou de produtores de perturbações, poderiam ser minimizadas ou até mesmo eliminadas, se consideradas fossem na fase de projeto e/ou planejamento por parte de fabricantes e concessionárias.

Neste contexto, é importante ressaltar-se que, estudos estão sendo realizados em diversos países do mundo, com o objetivo de investigar o desempenho de equipamentos quando operando com suprimento fora das condições consideradas ideais.

Por outro lado, os órgãos reguladores e de fiscalização do setor elétrico brasileiro, tem procurado acompanhar a modernização do mercado, constituindo grupos de trabalho com a incumbência de normalizar e regulamentar a Qualidade da Energia Elétrica no Brasil. Esses grupos de trabalho têm a participação das concessionárias e consumidores, agentes diretamente afetados, assim como também de setores responsáveis pela elaboração de normativas sobre o assunto, além de instituições de ensino e pesquisa.

Na falta de uma legislação adequada, e devido aos altos investimentos necessários para a solução dos problemas de Qualidade da Energia Elétrica, o que se observa atualmente, são sistemas operando com qualidade comprometida, muitas vezes em grau elevado, que podem comprometer o funcionamento normal de equipamentos [2]. Uma parceria entre concessionárias, fabricantes de dispositivos eletro-eletrônicos e consumidores, objetivando a definição de níveis aceitáveis de qualidade da energia, de maneira a garantir adequado desempenho

destes equipamentos, poderia mitigar ou até mesmo eliminar muitos dos problemas atualmente existentes.

É dentro deste contexto que o presente trabalho encontra-se inserido, objetivando investigar a sensibilidade e/ou suportabilidade de equipamentos elétricos, frente aos aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica fornecida, tema esse, de atualidade incontestável na área da Engenharia Elétrica.

É oportuno ressaltar que, devido à inexistência de uma definição para os termos sensibilidade e suportabilidade, no presente trabalho, sob a designação *sensibilidade*, deve-se entender a continuidade operacional do dispositivo, sem maiores consequências para com o seu desempenho e, sob o título *suportabilidade*, a descontinuidade do funcionamento ou entrada em regiões proibitivas de operação, tais como efeitos térmicos inadmissíveis, etc.

Para tanto, o presente trabalho tem como metas as seguintes:

- ❖ Modelagem matemática, no domínio do tempo, de um motor de indução monofásico, com rotor em gaiola de esquilo, utilizado como máquina motriz do equipamento em estudo, qual seja, um *Refrigerador Doméstico*;
- ❖ Implementação computacional desse modelo;
- ❖ Realização de estudos experimentais e computacionais, comparativamente, para validação do modelo implementado;
- ❖ Realização de estudos de desempenho do dispositivo frente aos diferentes itens de qualidade, utilizando, para tanto, estratégias experimentais e computacionais e;
- ❖ Definição das características de sensibilidade e suportabilidade do equipamento enfocado.

1.2 - Qualidade da Energia Elétrica: Caracterização e Conceitos

Na medida em que, equipamentos em geral, e em particular os de alta tecnologia tornam-se cada vez mais sensíveis, os problemas relacionados à qualidade da energia de suprimento, aumentam e se tornam motivo de constante preocupação por parte de todos os agentes envolvidos, conforme anteriormente mencionado. As concessionárias são responsáveis pelo suprimento de energia elétrica em quantidade suficiente para atendimento da demanda e com a qualidade dentro dos padrões definidos e aceitos pelos órgãos reguladores e de fiscalização do setor. De outro lado, os consumidores ocupam duas posições distintas: podem tanto ser afetados pelos problemas oriundos da qualidade do suprimento ou ainda, podem ser, eles próprios, os agentes causadores de perturbação dos sistemas elétricos. Além disso, não raro, fabricantes de equipamentos estabelecem padrões e limites que ultrapassam aqueles definidos pelos órgãos reguladores da energia elétrica e até mesmo inatingíveis do ponto de vista técnico.

Ressalta-se a importância do conhecimento e compreensão dos fenômenos que podem provocar alterações da energia elétrica de suprimento, afetando o desempenho de todo tipo de cargas, notadamente daquelas consideradas mais sensíveis. Da mesma forma, é também fundamental, conhecer-se as fontes de distúrbios, de maneira a permitir a tomada de decisões objetivando a sua redução a níveis aceitáveis, ou mesmo a completa eliminação.

Para a avaliação do desempenho de um sistema elétrico, comparativamente às condições consideradas ideais, duas grandezas elétricas podem ser utilizadas, são elas: a tensão de suprimento e a frequência. Ressaltando que a variação aceitável para esta última, situa-se na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$. Quanto à tensão de suprimento, três aspectos são considerados para sua avaliação, são eles:

- ❖ A forma de onda da tensão, que deve ser o mais próximo possível de uma senóide;
- ❖ Equilíbrio entre as diferentes fases do sistema elétrico;
- ❖ Magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

De maneira a possibilitar a investigação de quão alteradas encontram-se as grandezas supracitadas, são utilizados os chamados “Indicadores de Qualidade”. Alguns destes indicadores, destacados na literatura, encontram-se listados na Tabela 1.1, conforme orientação da referência [3].

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, 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.

Há várias maneiras de categorizar-se problemas relativos à qualidade de energia. Neste trabalho, contudo, será introduzido aquele relacionado com os fenômenos que ocorrem em regime permanente, como por exemplo, harmônicas (múltiplos inteiros da frequência fundamental) e não aqueles que ocorrem eventualmente, ou uma única vez. A Tabela 1.2 mostra uma classificação dos distúrbios encontrados nos sistemas elétricos, sugerida em [4], ressaltando-se que todos eles são causadores de problemas, de uma forma ou de outra. É importante salientar que esta tabela apresenta uma síntese dos fenômenos nela descritos e que, na referência [1], pode ser encontrada tabela contendo uma classificação mais detalhada dos fenômenos aqui mencionados.

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











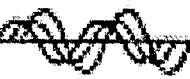
Categoria	Faixa de Frequência	Duração	Magnitude	Formas de onda
Sobretensões transitórias				
impulso	ns a ms	<50ns, >1ms	0 a 10 pu	
Oscilações	1 kHz a 10 MHz	<1us, >50ms	0 a 6 pu	
Variações de Curta duração				
“Interrupções”	Colapso	10ms a 3s	0 a 0.1 pu colapso de tensão	
Afundamentos de tensão (“Voltage 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 a 0.1 pu colapso de tensão	
Subtensões				
Sobretensões	Frequência industrial	> 1 min	0.8 a 0.9 pu	
	Frequência industrial	> 1 min	1.1 a 1.2 pu	
Distorção da forma de onda				
Harmônicos	0 a 10 DTH harmônica	Continua	0 a 25%	
"Notching"	Broad band	Continua	0 a 10%	
Desequilíbrio de tensão	Frequência industrial	Continua	<3%	

1.3 - Estado da Arte

Como resultado da pesquisa bibliográfica realizada, obteve-se significativa quantidade de informações no tocante a trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no contexto aqui enfocado. Nesta linha, a seguir é apresentada uma síntese dos trabalhos encontrados, que conduzem a uma melhor compreensão dos conceitos, terminologias e progressos da área.

1.3.1 - Consolidação de Trabalhos Realizados na Área de Sensibilidade e/ou Suportabilidade de Dispositivos Eletro-Eletrônicos

Nas Tabelas 1.1 e 1.2, foram apresentados os principais indicadores de qualidade, bem como a classificação e a categorização dos tipos de distúrbios, assim como também as suas aplicações em estudos de qualidade.

Na Tabela 1.3, encontram-se descritos, de forma resumida, trabalhos de pesquisa realizados por diversas instituições, sobre 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.

TABELA 1.3: QUADRO RESUMO DE TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA DE SENSIBILIDADE DE EQUIPAMENTOS			
Instituição	Equipamento	Tipo de estudo	Resultados
EPRI [4], [5]	Controladores de resfriamento	Afundamentos de tensão	Afundamentos acima de 20%, independente 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)

EPRI [4], [5]	Robôs	Afundamentos de tensão	Saem de operação a partir de 10% de afundamento ($0.9V_n$).
	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) [6]	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 (0.9 a $0.85 V_n$).
	CLP's utilizados em acionadores CC e CA	Afundamentos de tensão	Operação comprometida a partir de 15% de afundamento ($0.85V_n$)
	Controladores de velocidade	Afundamentos de tensão	Possuem faixa de operação estreita $\pm 10\%$, fora desta faixa começam a apresentar problemas.
	Bobinas de contadores	Afundamentos de tensão	Mostram sensibilidade para afundamentos entre 25 a 50%, com duração de 1 a 5 ciclos (0.75 a $0.5V_n$)
PQTN [7]	CLP's	Afundamentos de tensão	Suportabilidade diferente para cada equipamento testado, variando de 15 a 65% de afundamento (0.85 a $0.35V_n$)
Smith, Lamoree, Vinett, Duffy e Klein [8]	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 [9]	Computadores e equipamentos 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 [10]	Computadores		Modificação das curvas CBEMA, possuindo tolerâncias menos rígidas.
Sekine, Yamamoto, Mori, Saito e Kurokawa [11]	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 [12]	Video 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[13]	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 [14]	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 [15]	Aparelhos de TV	Distorção harmônica e interharmônicos	Apresentaram sensibilidade tanto da qualidade de imagem, como no aquecimento de componentes internos como capacitores, indutores, transformadores, etc.
Daroz, Ana Claudia UFU [5]	Fontes lineares e fontes chaveadas	Afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções	Ambas fontes apresentaram boa suportabilidade aos distúrbios aplicados.

		e flutuações de tensão, distorção harmônica	
Olívio UFU [2]	Motor de indução trifásico	Afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções e flutuações de tensão, desequilíbrio e distorção harmônica	Distorções harmônicas acima de 5% alteram o desempenho do aparelho. Desequilíbrios acima de 2% provocam aumento da 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 deteriorada. Esta, certamente, é uma conclusão equivocada. Equipamentos elétricos de tecnologia não tão recente, a exemplo de transformadores [16], motores de indução [2], cabos de energia [17] 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.

É oportuno salientar aqui, que o componente principal de um equipamento de refrigeração é o compressor. Este tem como força motriz um motor de indução mono ou bifásico. Desta forma, seguir é feito 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 à presença de motores de indução no sistema elétrico. Esta constatação reforça a pertinência e oportunidade da realização de trabalhos envolvendo este tipo de dispositivo.

Com 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 um 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 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 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 abordando suprimento com 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 nesta referência, 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 monofásica, 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, deve-se ressaltar 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 monofásicos, no domínio do tempo, e implementação computacional;
- ❖ Normas de operação aplicáveis a motores de indução monofásicos;
- ❖ Normas técnicas (procedimentos) de testes e medição de distúrbios aplicados a equipamentos;
- ❖ Tecnologia de equipamentos de refrigeração.
- ❖ Estado da arte sobre o desempenho de equipamentos de refrigeração.

1.4 - Justificativa para o Presente Trabalho

Na escolha do tema do presente trabalho, inicialmente foram definidos critérios que permitissem o atendimento às 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 **Refrigeradores Domésticos**, que é utilizado por mais de 82% dos lares brasileiros, segundo o PNAD - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios de 1998 do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. É importante destacar, que a maior parte dos refrigeradores vendidos no Brasil são modelos de uma porta, com um congelador interno pequeno, de volume total 250-340 litros, portanto de porte igual ao equipamento investigado neste trabalho.

Além dos aspectos acima descritos, antes da definição final do tema, foi levantado o estado da arte sobre o assunto, muito pouco tendo sido encontrado.

É nesta óptica que se insere o presente trabalho, cujo objetivo maior, é a realização de trabalhos de investigação a respeito da sensibilidade e suportabilidade de um aparelho **Refrigerador Doméstico**. 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

Do anteriormente exposto, observa-se que pouco existe a respeito de estudos de motores de indução monofásico/bifásicos, menos ainda se atenta-se para aplicações específicas em equipamentos de refrigeração quando relacionados à qualidade de energia de suprimento.

Da mesma forma, modelagens de motores monofásicos/bifásicos, quando encontradas, são no domínio da frequência. Estes modelos, no entanto, não permitem a aplicação de alguns dos itens de qualidade e a observação da resposta transitória do equipamento.

Por outro lado, embora exaustivamente pesquisado, não foram encontrados trabalhos envolvendo equipamentos de refrigeração, menos ainda, para analisar seu desempenho em função da qualidade do suprimento.

É interessante ressaltar que os compressores utilizados nos diferentes equipamentos de refrigeração passaram, na última década, por processo de modernização tecnológica. Esta modernização teve como consequência maior o aumento significativo no rendimento global dos equipamentos e, conseqüentemente, redução do consumo de energia elétrica. Esta redução estima-se atingiu patamares da ordem de 50% nos últimos anos.

A seguir são apresentadas as contribuições julgadas mais importantes desta dissertação, em função da importância que estes equipamentos representam na economia nacional, seja na geração de empregos na produção dos mesmos, seja na utilização como conforto ambiental ou na conservação de alimentos.

a) Estado da Arte

Uma pesquisa bibliográfica minuciosa, sintetizada na tabela 1.3, mostra os principais estudos realizados por pesquisadores do mundo inteiro, com o intuito de investigar os problemas, para os equipamentos, decorrentes do

suprimento de energia elétrica com qualidade comprometida. Todavia, as pesquisas mostraram a quase inexistência de trabalhos relacionados à sensibilidade e suportabilidade dos equipamentos de refrigeração em geral, e em particular refrigeradores domésticos.

b) Modelagem Matemática da Representação do Motor de Indução Monofásico no Domínio do Tempo

Visando a concretização dos objetivos propostos, uma das contribuições relevantes desta dissertação, é a implementação de um programa computacional, no domínio do tempo, para uso no pacote computacional SABER. O desenvolvimento matemático do modelo foi realizado em conformidade com 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 Monofásico no Domínio do Tempo

A modelagem matemática sem a devida implementação computacional, não seria de grande valia. Neste sentido, para propiciar um estudo mais abrangente do equipamento, a modelagem matemática do motor, foi implementada computacionalmente, 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 Diferentes Itens de Qualidade na Análise de Sensibilidade/Suportabilidade 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 disso, não foram encontrados trabalhos que abordassem estudos para os 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 da Dissertação

O presente trabalho apresenta no capítulo I conceitos gerais sobre “*Qualidade de Energia Elétrica*”, justificativa e contribuições do estudo, além de um vasto levantamento bibliográfico entre temas complementares e assuntos correlatos.

Os capítulos posteriores que compõem o corpo da dissertação são relatados a seguir.

CAPÍTULO II - EVOLUÇÃO HISTÓRICA E TECNOLÓGICA DE DISPOSITIVOS DE REFRIGERAÇÃO

Este capítulo faz, inicialmente, uma síntese dos aspectos históricos e tecnológicos da refrigeração, mostrando a sua importância em todos os setores econômicos da sociedade.

A seguir, são descritas as tecnologias utilizadas em aparelhos de refrigeração de pequeno porte, destacando os aspectos de eficiência, economia e agressão ao meio ambiente. Na sequência é feita a descrição de compressores comumente utilizados por este tipo de dispositivo, assim como também os seus componentes elétricos e mecânicos principais.

Encerra-se o Capítulo, descrevendo os esquemas elétricos utilizados em equipamentos de refrigeração comercialmente disponíveis.

CAPÍTULO III - MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO: MODELAGEM MATEMÁTICA, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO DO MODELO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática, no domínio do tempo, do motor de indução monofásico, com rotor em gaiola de esquilo, que se constitui no componente elétrico principal do compressor do refrigerador doméstico. Prosseguindo, é feita a implementação computacional do modelo, de maneira a possibilitar a investigação do dispositivo, também pela metodologia digital. Com este fim, utiliza-se o simulador SABER, cuja escolha deveu-se aos poderosos recursos que o mesmo possui.

Concluídas as fases de modelagem e implementação do modelo, o passo seguinte foi a realização de estudos, experimentais e computacionais, com suprimento ideal, para, através de estudos comparativos, validar o modelo desenvolvido e o programa implementado. A validação do modelo é imperativa, pois, possibilitará, no capítulo seguinte, a sua utilização, desta vez com suprimento contendo perturbações de naturezas diversas.

CAPÍTULO IV - ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REFRIGERADORES NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA

Este capítulo inicia apresentando as normas e procedimentos utilizados para a realização dos estudos experimentais, assim com também, os equipamentos e conexões utilizadas. Todos os casos propostos foram realizados pelos métodos experimental e computacional. Para o método experimental, utilizou-se uma fonte programável, que possibilita a aplicação de todo tipo de perturbação. Para os estudos pelo método computacional, foram reproduzidas as mesmas condições do caso experimental, procedendo, na sequência, com a análise comparativa dos resultados obtidos por ambos métodos.

Concluindo o capítulo, já de posse de todas as respostas obtidas às perturbações aplicadas, são traçadas as curvas de sensibilidade e suportabilidade do refrigerador doméstico.

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES GERAIS

Neste capítulo, são condensadas as conclusões parciais constantes nos capítulos anteriores, salientando os aspectos mais importantes encontrados na realização dos trabalhos.

Finalmente, é feito um breve comentário a respeito das contribuições efetivas deste trabalho e apontados alguns tópicos remanescentes, que podem, por sua importância, constituir-se em temas para trabalhos futuros.

ANEXOS

ANEXO A

Este Anexo apresenta a listagem, documentada, do programa computacional utilizado nos estudos digitais.

ANEXO B

O Anexo B contém as características completas do compressor utilizado pelo refrigerador doméstico, objeto desta dissertação.

CAPÍTULO II

EVOLUÇÃO HISTÓRICA E TECNOLÓGICA DOS DISPOSITIVOS DE REFRIGERAÇÃO

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 circuitos 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]. Assim, o homem ficava na dependência direta da natureza para a obtenção da matéria primordial, o gelo, que só se formava no inverno e nas regiões de clima bastante frio.

Por este motivo, engenheiros e pesquisadores voltaram-se para a busca de meios e processos que permitissem a obtenção artificial de gelo, liberando o homem da dependência da natureza. Em consequência desses estudos, em 1834 foi inventado, nos Estados Unidos, o primeiro sistema mecânico de fabricação de gelo artificial e, que constituiu a base precursora dos atuais sistemas de compressão frigorífica. Em 1855, surgiu na Alemanha um outro tipo de mecanismo para a fabricação do gelo artificial, este, baseado no princípio da absorção, descoberto em 1824 pelo físico e químico inglês Michael Faraday.

Durante cerca de meio século os aperfeiçoamentos nos processos de fabricação de gelo artificial foram se acumulando, surgindo sistematicamente

melhorias nos sistemas, com maiores rendimentos e melhores condições de trabalho.

A fabricação do gelo artificial levou a fabricação das primeiras geladeiras no século XIX, cuja foto está reproduzida na figura 2.1.

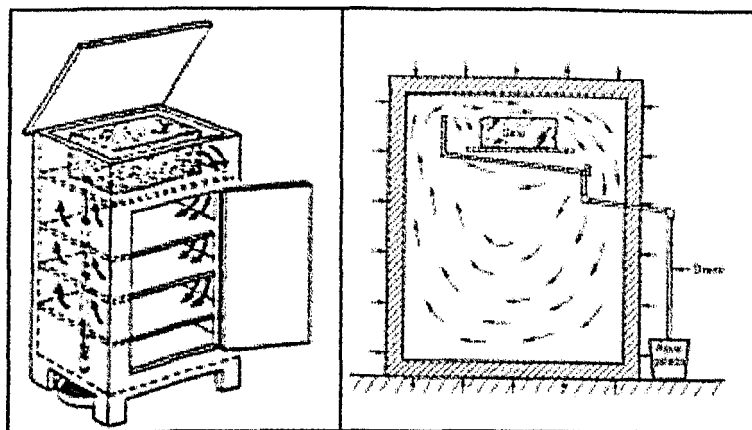


Figura 2.1: Primeira geladeira fabricada no século XIX

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, ambientes 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, no 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 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.

A figura 2.2 mostra os elementos responsáveis pelo fenômeno da refrigeração. Sendo que, um ciclo de refrigeração completo, passa por todos os componentes.

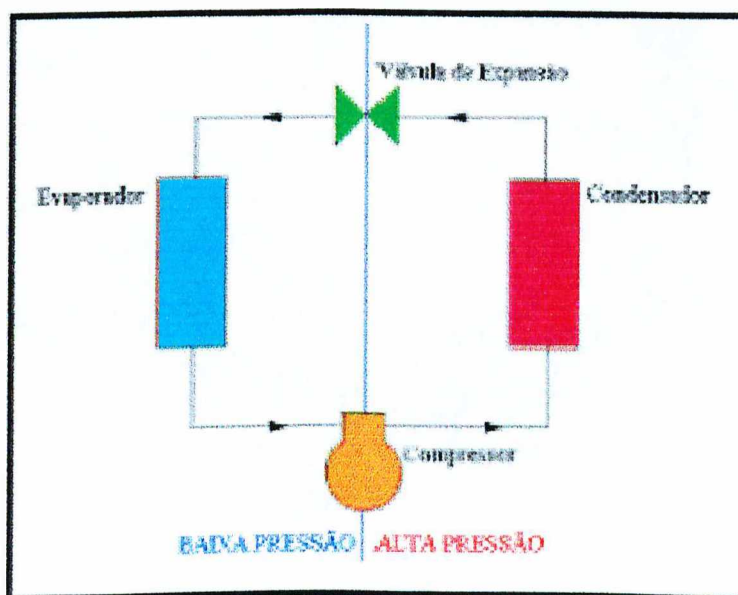


Figura 2.2: Elementos de um sistema de refrigeração, onde ocorre o ciclo de refrigeração.

Na figura 2.3 é possível identificar os componentes responsáveis pelo ciclo de refrigeração dos refrigeradores, bem como o sentido do fluxo do gás refrigerante.

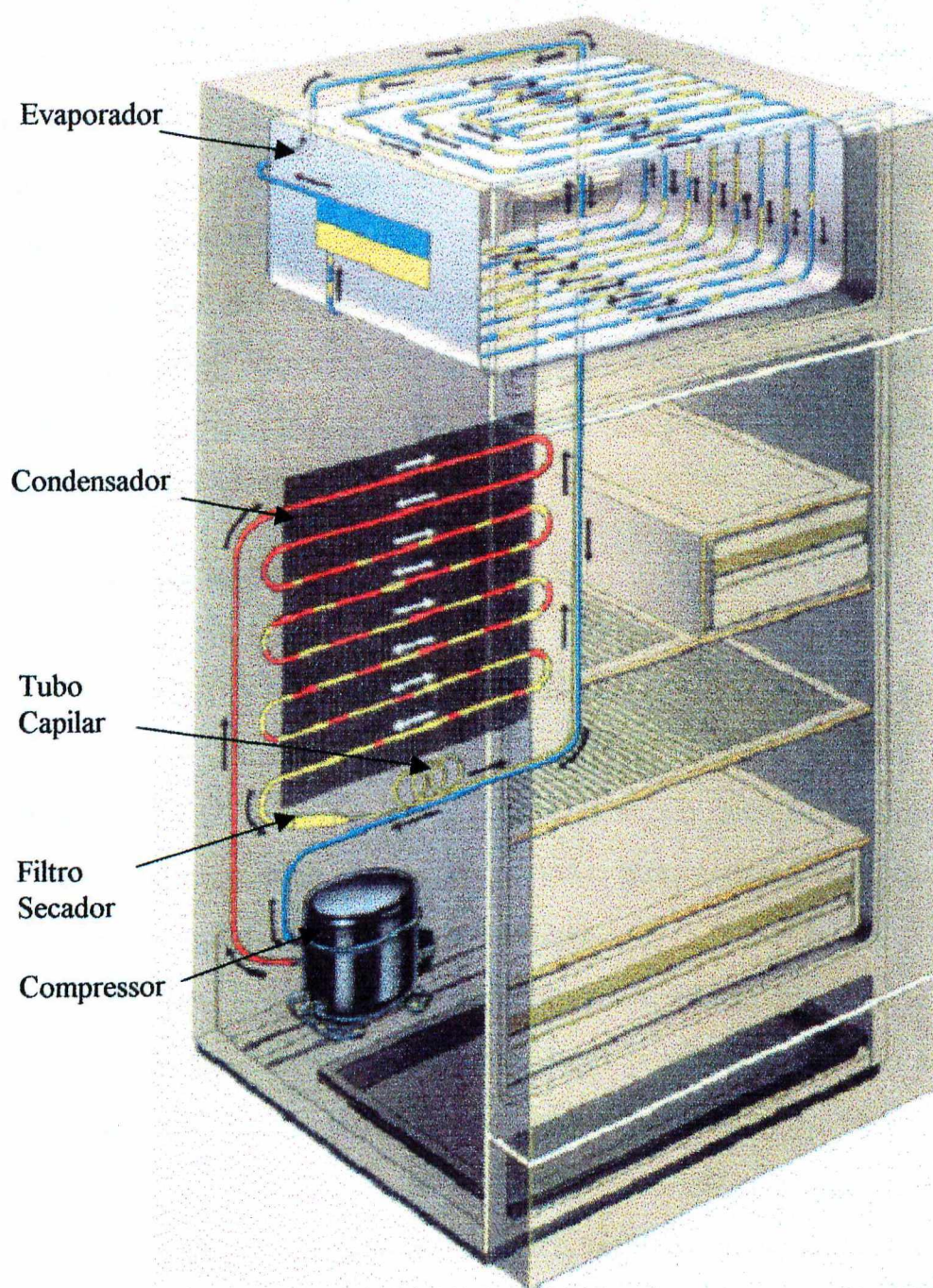


Figura 2.3: Componentes do sistema de refrigeração do refrigerador

Este tem início com o compressor aspirando o vapor refrigerante do evaporador, a baixa pressão, e 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.

2.3.2 – Gases Refrigerantes

A transferência de calor do espaço refrigerado para o condensador, e deste para o meio ambiente exterior, é conseguido 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 frigorigênos apresentem 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 fluorocarboneto 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.

Consequência desta característica negativa dos refrigerantes a base de CFC, foi a 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 condicionadores de ar, são basicamente os mesmos, conforme visto 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. Outros dois componentes importantes são o tubo capilar que, dependendo da aplicação final do equipamento, pode ser substituído por uma válvula de expansão e o filtro secador. Estes componentes, juntamente com uma série de controles (térmicos, de corrente, etc.), constituem o sistema de refrigeração e possibilitam a construção de equipamentos de grande capacidade térmica e também sistemas residenciais.

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 para que seja eliminado, através de troca com o meio ambiente.

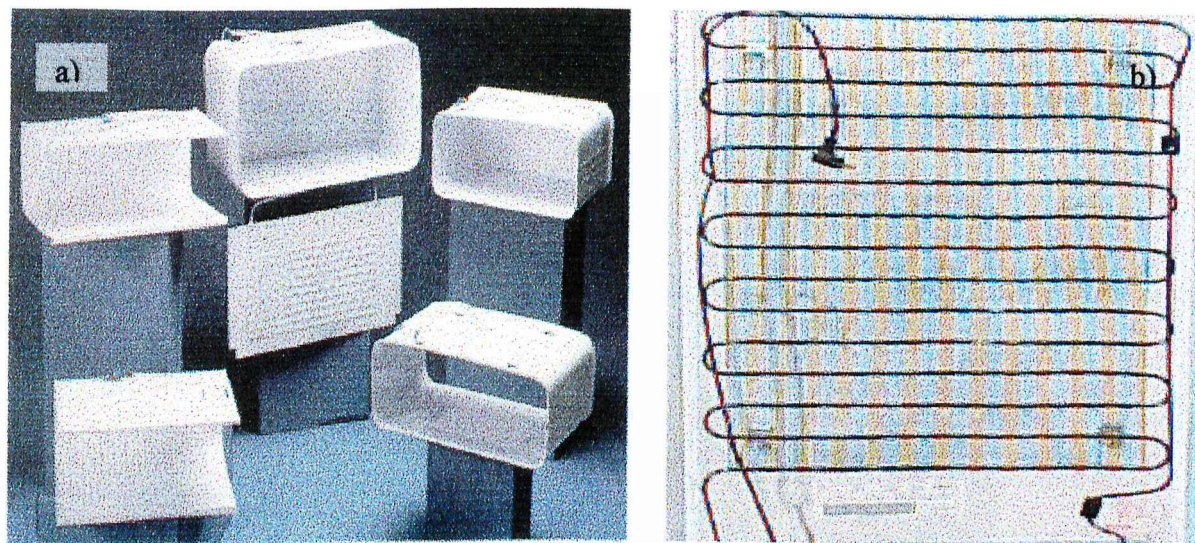


Figura 2.4: Componentes de um Refrigerador: a) Evaporadores e b) Condensador

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.

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.

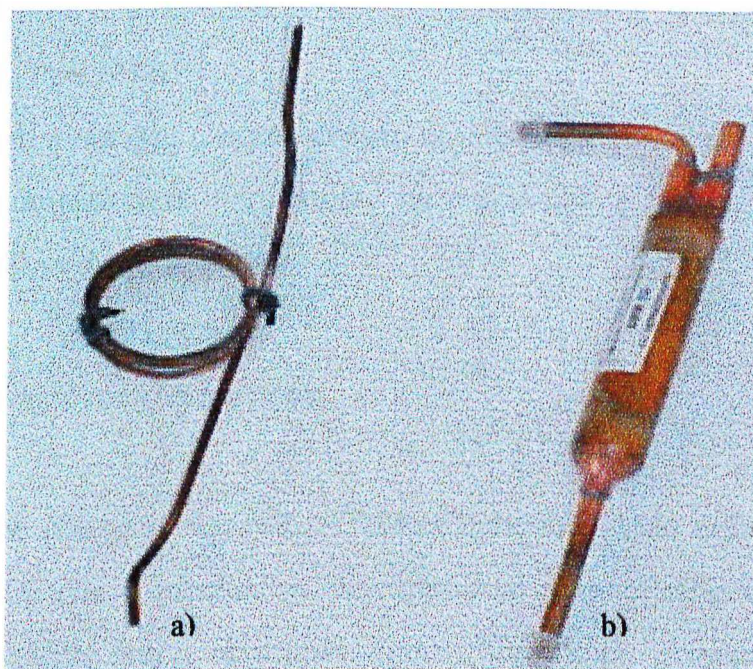


Figura 2.5: a)Tubo capilar e b) filtro secador utilizado em equipamentos de refrigeração

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 ilustrados no próximo item.

2.4.2 - Componentes Elétricos

Neste item são descritos os principais componentes elétricos utilizados em equipamentos de refrigeração de pequeno porte, componentes estes que serão posteriormente identificados nos esquemas elétricos utilizados em dispositivos comercialmente disponíveis.

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 arranjos 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 2.6 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.

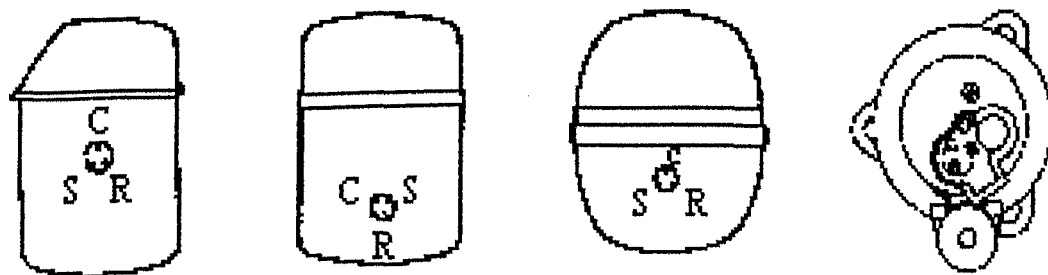


Figura 2.6: Disposição dos terminais de conexão do motor elétrico

C - Terminal comum às duas bobinas

S - Terminal da bobina de partida

R – Terminal da bobina principal

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 e desligando rapidamente o compressor 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 2.7 mostra dois modelos de compressores herméticos utilizados em equipamentos de refrigeração.



Figura 2.7: Compressor hermético alternativo para utilização em: a) aparelhos condicionadores de ar e b) refrigeradores domésticos e comerciais

De maneira a propiciar um melhor entendimento sobre as partes componentes dos compressores herméticos do tipo alternativo, a figura 2.8 mostra um corte deste componente, identificando as suas partes internas, elétricas e mecânicas.

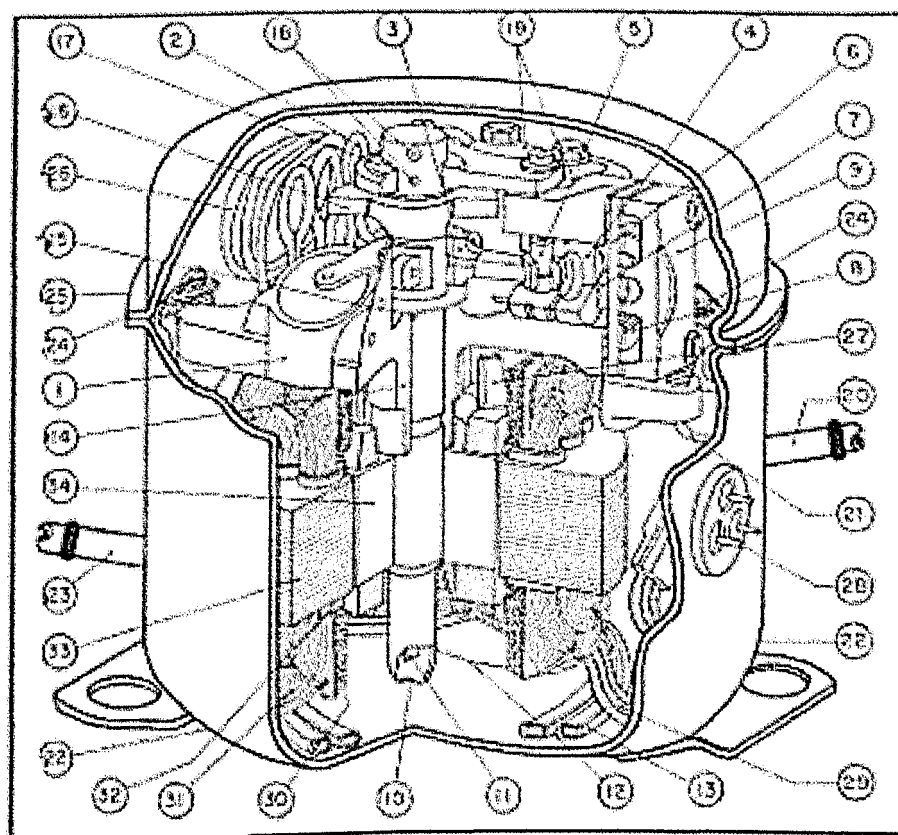


Figura 2.8: Componentes de um compressor hermético

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Corpo | 18. Furos de Lubrificação |
| 2. Eixo | 19. Muflas de Descarga |
| 3. Biela | 20. Cano de Sucção |
| 4. Pistão | 21. Suporte Interno |
| 5. Pino | 22. Carcaça |
| 6. Placa de Válvulas | 23. Cano de Descarga |
| 7. Válvula de Sucção | 24. Molas de Suspensão |
| 8. Válvula de Descarga | 25. Solda |
| 9. Cabeçote | 26. Serpentina de Descarga |
| 10. Pescador de Óleo | 27. Aletas Rotor |
| 11. Divisor | 28. Terminal Hermético |
| 12. Nível de Óleo | 29. Cabos de Ligação |
| 13. Resfriador de Óleo | 30. Bobina de Partida |
| 14. Mancal Principal | 31. Bobina de Trabalho |
| 15. Ranhura de Lubrificação | 32. Isolação |
| 16. Contrapeso | 33. Estator |
| 17. Mancal | 34. Rotor |

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.

Como pode ser observado na figura 2.9, os compressores rotativos são unidades herméticas e compactas, constituídas, fundamentalmente, de: bloco divisor, estator, rotor, eixo e excêntrico, impulsor e cilindros.

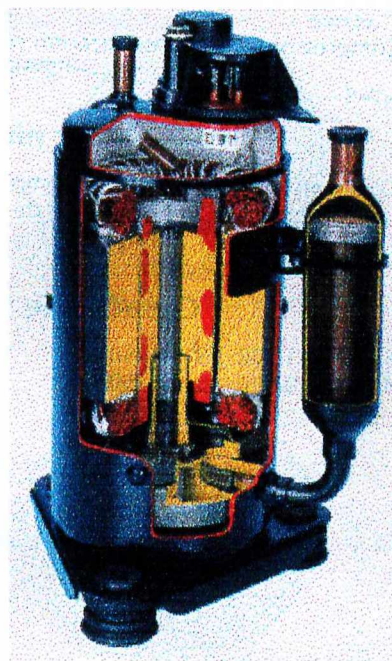


Figura 2.9 Compressor hermético rotativo para utilização em aparelhos condicionadores de ar de diferentes capacidades.

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, como ilustrado na figura 2.10.

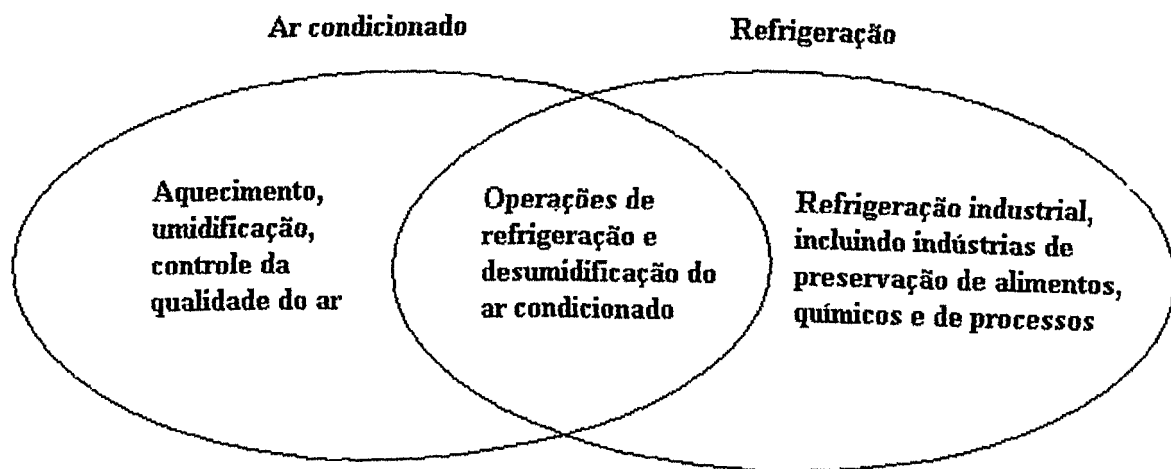


Figura 2.10 Relação entre as áreas de refrigeração e de condicionamento de ar

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 2.10, o aparelho refrigerador doméstico, no contexto da qualidade da energia elétrica de seu suprimento.

2.7 - Circuitos Elétricos de Dispositivos de Refrigeração 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:

- 1) Os dispositivos comercializados, independentemente do fabricante, são semelhantes do ponto de vista técnico, com

diferenças pouco significativas em termos do rendimento elétrico global;

- 2) Os circuitos elétricos, de uma forma geral, não apresentam diferenças significativas de um fabricante para outro e,
- 3) 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 2.11, 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 mesmo, 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.

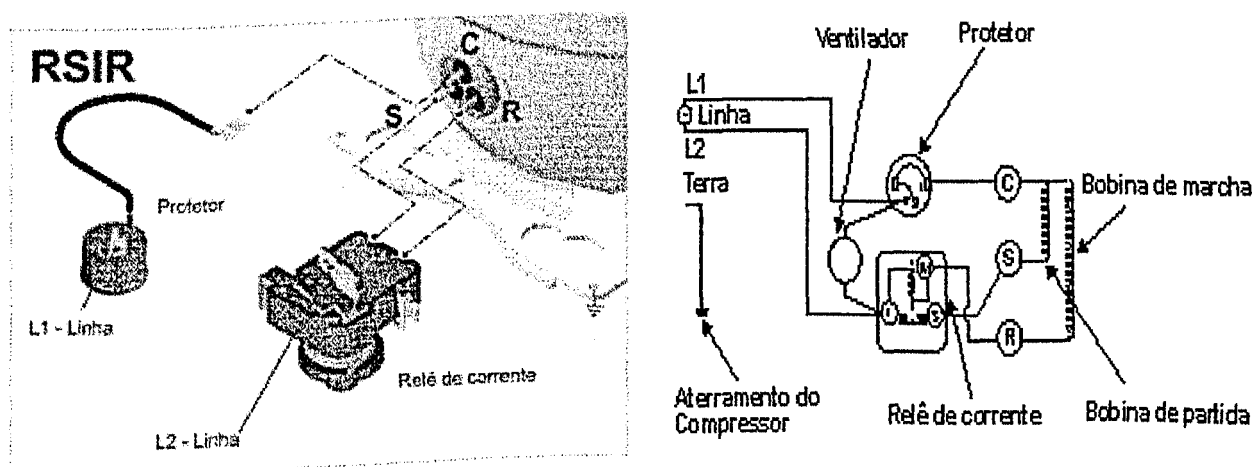


Figura 2.11: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Resistência utilizando relé eletromagnético

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 existente na figura 2.11, RSIR - Resistor Start Induction Run, é utilizada por fabricantes e na literatura técnica, motivo pelo qual foi mantida na figura.

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

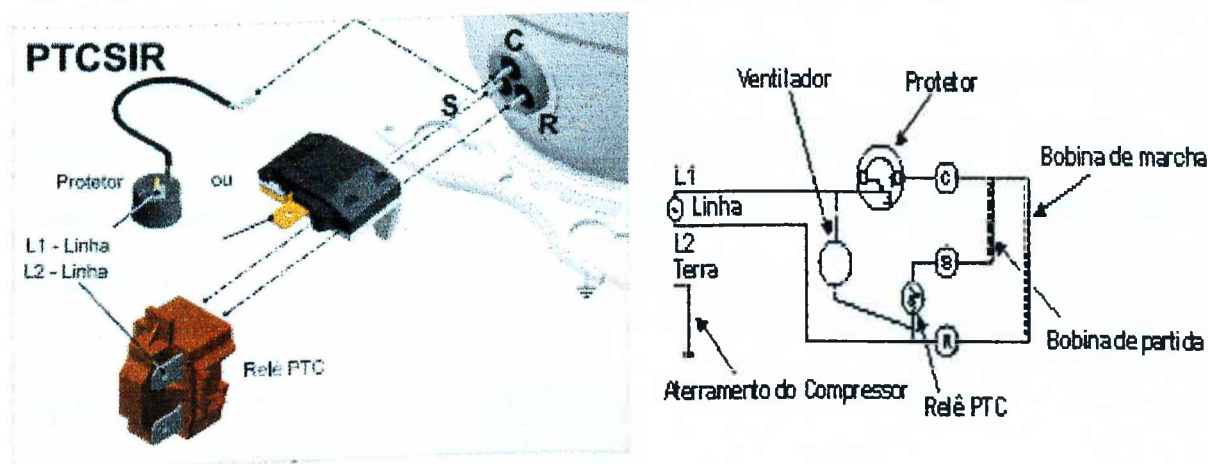


Figura 2.12: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a Resistência utilizando relé PTC

2.7.2 - Motor de indução de fase dividida – Partida a Capacitor

A figura 2.13 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 à sistemas de refrigeração sem auto equalização de pressões.

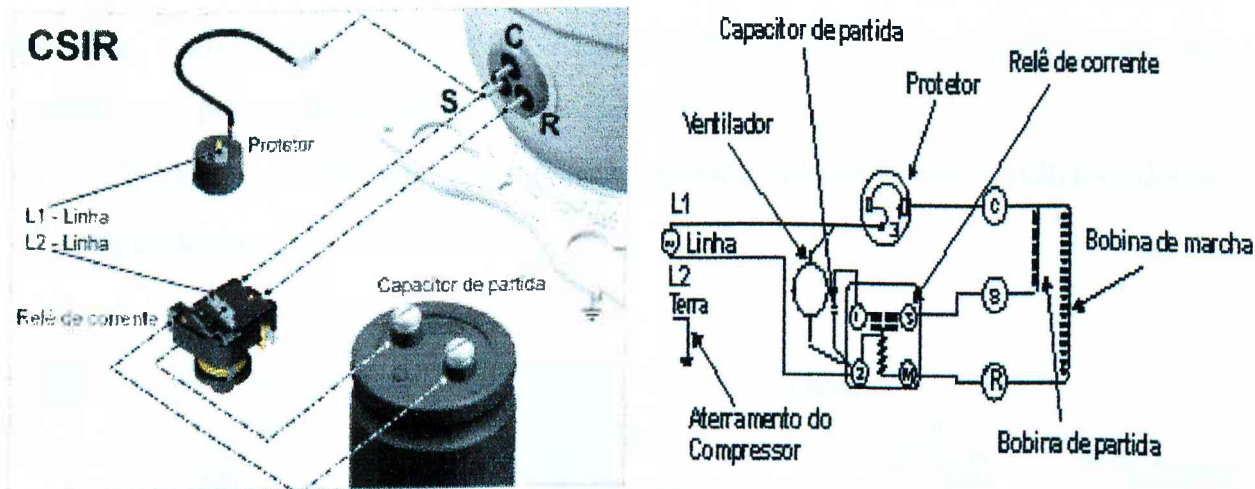


Figura 2.13: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a capacitor utilizando relé Eletromagnético - CSIR - Capacitor Start Induction Run

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 2.14.

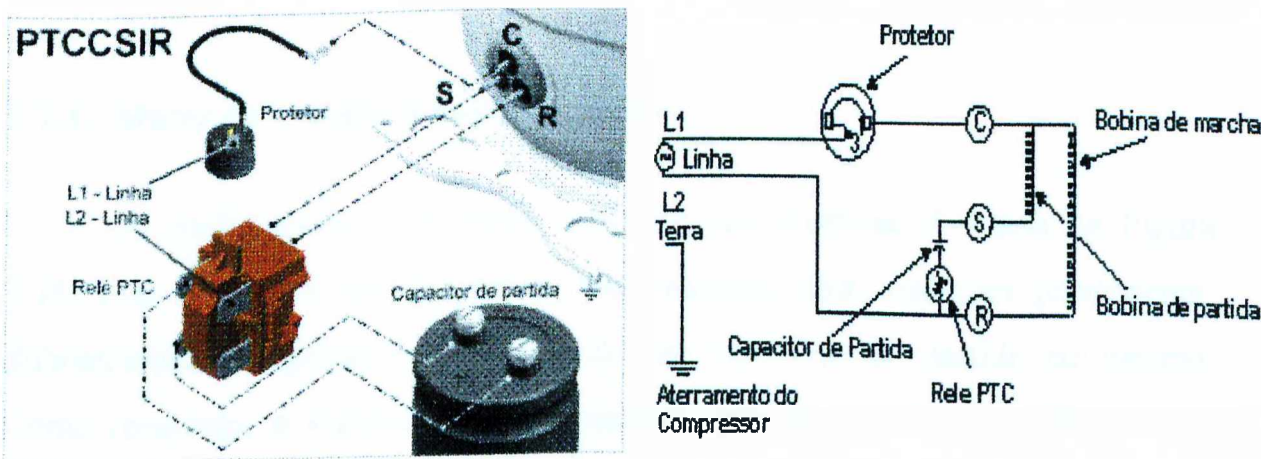


Figura 2.14: Motor de Indução de Fase Dividida – Partida a capacitor utilizando relé PTC. PTCCSIR – PTC / Capacitor Start Induction Run

2.7.3 Motor de indução de fase dividida com capacitor permanente

Equipamentos com esta configuração, figura 2.15, 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.

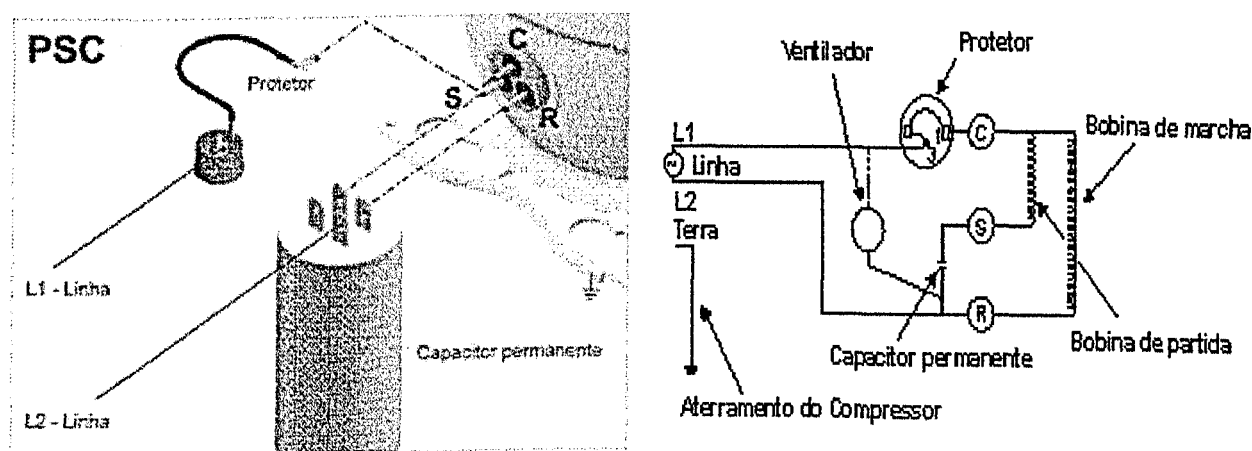


Figura 2.15: Motor de Indução de Fase Dividida – Com Capacitor Permanente.
PSC – Permanente Split Capacitor

2.7.4 - Motor de indução a duplo capacitor

A configuração com duplo capacitor encontram-se ilustrada na Figura 2.16. 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.

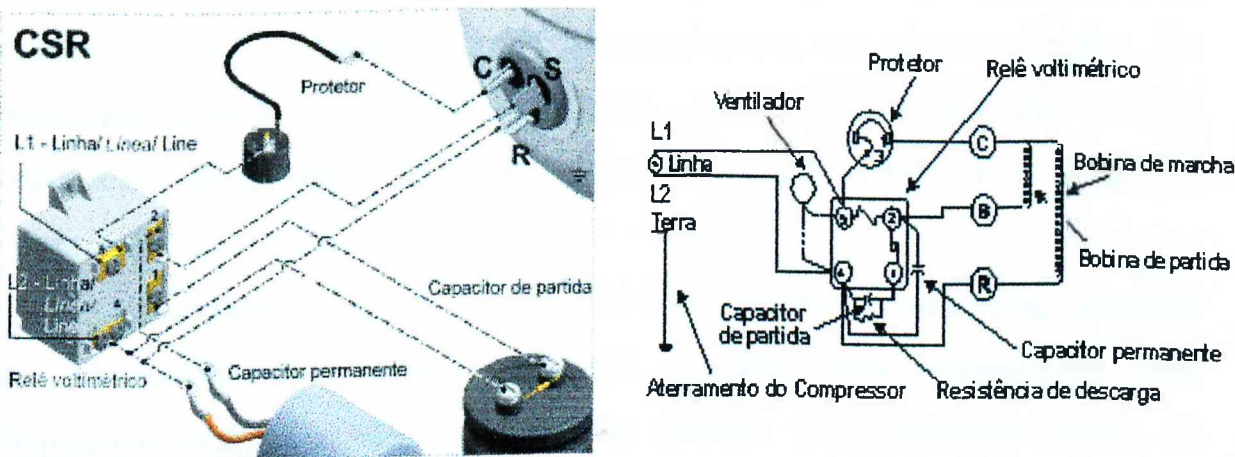


Figura 2.16: Motor de Indução de Fase Dividida – A Duplo Capacitor Utilizando Relé Voltimétrico. CSR – Capacitor Star and Run

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 2.16.

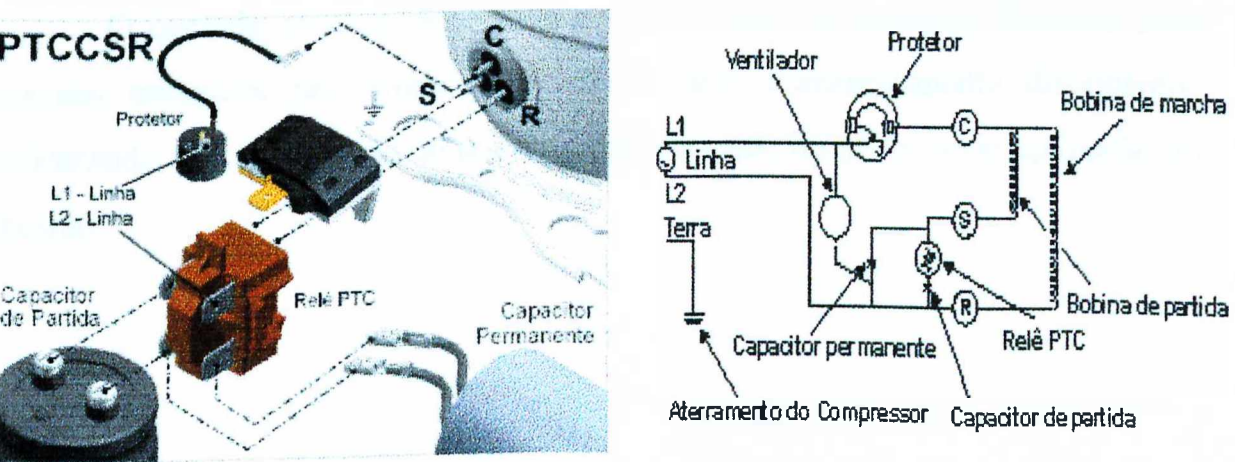


Figura 2.16: Motor de Indução de Fase Dividida – A Duplo Capacitor Utilizando Relé PTC. PTCCSR – Star by PTC / Capacitor and Run

2.8 - Considerações Finais

Este capítulo, inicialmente abordou aspectos gerais da refrigeração, no tocante a grande evolução ocorrida, principalmente, nas últimas décadas. Foi destacada também, a sua utilização cada vez maior por parte das famílias brasileiras, contribuindo, portanto, para um maior conforto e adequada conservação de alimentos.

Na sequência, foram descritas as fases envolvidas num ciclo completo de refrigeração, evidenciando que este é válido para praticamente todo dispositivo deste tipo. Desta forma, foi tomado como exemplo àquele do refrigerador utilizado nas investigações. Prosseguindo, de maneira a possibilitar melhor compreensão sobre o funcionamento de dispositivos de refrigeração, foram apresentados os componentes principais, elétricos e mecânicos, utilizados nestes equipamentos, bem com a função que desempenham nos circuitos em que se encontram inseridos.

A seguir, foram apresentados os tipos de compressores herméticos atualmente encontrados no mercado, descrevendo as suas características construtivas mais importantes.

O capítulo encerra, ilustrando e descrevendo os arranjos elétricos mais comuns utilizados por dispositivos deste tipo, comercialmente disponíveis, salientando que, o emprego de um ou outro, depende do porte e/ou aplicação do mesmo.

CAPÍTULO III

MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO: 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 monofásica, que, conforme apresentado no capítulo anterior, atua como máquina motriz do equipamento refrigerador, 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 computacional 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 Monofásico: 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 monofásica, resultando num conjunto de equações diferenciais, não lineares, que representam a operação da máquina. Para tal, foi utilizado o modelo elementar de uma máquina de indução ideal, bifásica, assimétrica, 2 pólos, [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. Nesta figura, a fase a representa o enrolamento principal ou de regime (marcha) e a fase b o enrolamento auxiliar ou de partida. O rotor, em gaiola de esquilo, é representado por dois enrolamentos idênticos, conforme mencionado, defasados de 90° , representados pelas letras A e B , para os enrolamentos A e B , respectivamente. Os enrolamentos a do estator e A do rotor, estão defasados de θ_e graus elétricos. A posição mecânica do rotor e a sua velocidade são representadas por θ_e e 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.

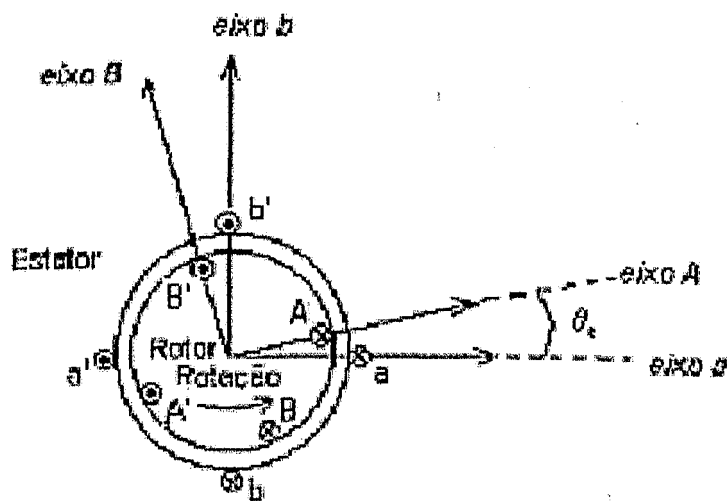


Figura 3.1: Representação do motor de indução bifásico assimétrico

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.

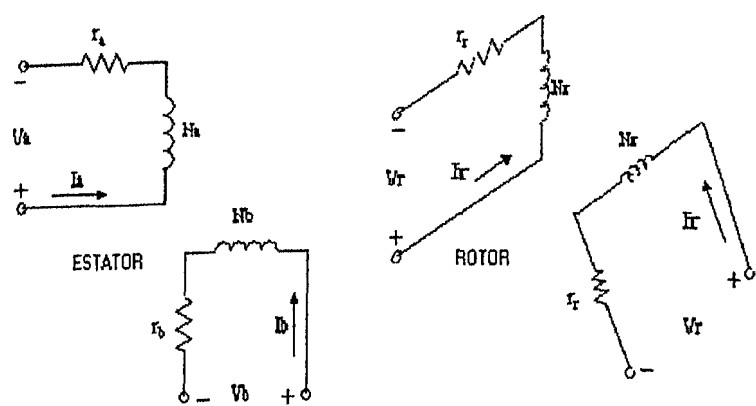


Figura 3.2: Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor

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 do rotor;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

v_a - valor instantâneo de tensão na fase a , do enrolamento principal;
 v_b - valor instantâneo de tensão na fase b , do enrolamento auxiliar;
 v_A - valor instantâneo de tensão na fase A , do rotor;
 v_B - valor instantâneo de tensão na fase B , do rotor;
 i_a - valor instantâneo da corrente na fase a , do enrolamento principal;
 i_b - valor instantâneo da corrente na fase b , do enrolamento auxiliar;
 i_A - valor instantâneo da corrente na fase A , do rotor;
 i_B - valor instantâneo da corrente na fase B , do rotor;
 λ_a - fluxo concatenado na fase a , do enrolamento principal;
 λ_b - fluxo concatenado na fase b , do enrolamento auxiliar;
 λ_A - fluxo concatenado na fase A , do rotor;
 λ_B - fluxo concatenado na fase B , do rotor;
 θ - deslocamento elétrico angular;
 T - conjugado eletromagnético;
 T_c - conjugado da carga;
 J - momento de inércia da carga + inércia do motor;
 J_c - momento de inércia da carga;
 J_m - momento de inércia do motor;
 B - Coeficiente de atrito viscoso;
 ω - 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 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.

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 (3.5), obter-se-á a expressão do conjugado eletromagnético, dada pela equação (3.6):

$$T = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta_{mec}} \quad (3.5)$$

$$T = \frac{p}{2} \sum_i \sum_j i_i i_j \frac{d l_{ij}}{d \theta} \quad (3.6)$$

Onde:

P - é o número de pólos da máquina

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

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

θ - é o deslocamento angular elétrico

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

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:

$$\lambda_a = l_{aa}i_a + l_{aA}i_A + l_{aB}i_B \quad (3.7)$$

$$\lambda_b = l_{bb}i_b + l_{bA}i_A + l_{bB}i_B \quad (3.8)$$

$$\lambda_A = l_{AA}i_A + l_{Aa}i_a + l_{Ab}i_b \quad (3.9)$$

$$\lambda_B = l_{BB}i_B + l_{Ba}i_a + l_{Bb}i_b \quad (3.10)$$

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 , genéricos, são dadas pela expressão:

$$l_{ij} = L_{ij} \cos \theta_e = l_{ji} \quad (3.11)$$

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

❖ Indutâncias Próprias:

Para o dispositivo em estudo, as equações 3.12 a 3.15 representam as indutâncias próprias dos enrolamentos rotóricos e estatóricos. Como os enrolamentos do rotor foram assumidos idênticos, ambos têm o mesmo valor de indutância própria.

$$l_{aa} = L_{aa} \cos 0^\circ = L_{aa} \quad (3.12)$$

$$I_{bb} = L_{bb} \cos 0^\circ = L_{bb} \quad (3.13)$$

$$I_{AA} = L_{AA} \cos 0^\circ = L_{AA} \quad (3.14)$$

$$I_{BB} = L_{BB} \cos 0^\circ = L_{BB} \quad (3.15)$$

❖ Indutâncias Mútuas:

Da forma análoga, as equações de 3.16 a 3.21 permitem obter-se as indutâncias mútuas, sendo, portanto, iguais a:

$$I_{aA} = L_{aA} \cos \theta_e = I_{Aa} \quad (3.16)$$

$$I_{aB} = L_{aB} \cos(\theta_e - 90^\circ) = L_{aB} \sin \theta_e = I_{Ba} \quad (3.17)$$

$$I_{bA} = L_{bA} \cos(\theta_e + 90^\circ) = -L_{bA} \sin \theta_e = I_{Ab} \quad (3.18)$$

$$I_{bB} = L_{bB} \cos(\theta_e) = I_{Bb} \quad (3.19)$$

$$I_{ab} = L_{ab} \cos 90^\circ = I_{ba} = 0 \quad (3.20)$$

$$I_{AB} = L_{AB} \cos 90^\circ = I_{BA} = 0 \quad (3.21)$$

Substituindo as expressões das indutâncias das equações 3.12 a 3.21, nas expressões 3.7 a 3.10, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{aA} \cos \theta_e i_A + L_{aB} \sin(\theta_e) i_B \quad (3.22)$$

$$\lambda_b = L_{bb} i_b - L_{bA} \sin \theta_e i_A + L_{bB} \cos \theta_e i_B \quad (3.23)$$

$$\lambda_A = L_{AA}i_A + L_{aA} \cos \theta_e i_a - L_{bA} \sin \theta_e i_b \quad (3.24)$$

$$\lambda_B = L_{BB}i_B + L_{aB} \sin \theta_e i_a + L_{bB} \cos \theta_e i_b \quad (3.25)$$

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

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_{mec} = \frac{p}{2} \theta \quad (3.26)$$

onde p é o número de pólos.

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

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

Substituindo-se a expressão 3.26 nas equações 3.22 a 3.25, obtém-se:

$$\lambda_a = L_{aa}i_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B \quad (3.27)$$

$$\lambda_b = L_{bb}i_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B \quad (3.28)$$

$$\lambda_A = L_{AA}i_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_a - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_b \quad (3.29)$$

$$\lambda_B = L_{BB} i_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_b \quad (3.30)$$

Partindo das expressões 3.27 a 3.30, que permitem a determinação dos fluxos existentes no dispositivo, obtém-se as equações dinâmicas da máquina, conforme a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Para o enlace de fluxo λ_a no enrolamento principal do estator, a partir da expressão 3.27, obtém-se:

$$\dot{\lambda}_a = L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \dot{\theta} \quad (3.32)$$

Analogamente obtém-se para λ_b , λ_A , λ_B , a partir das expressões 3.28 a 3.30, as expressões 3.33 a 3.35, respectivamente.

$$\dot{\lambda}_b = L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \dot{\theta} \quad (3.33)$$

$$\dot{\lambda}_A = L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} i_b \dot{\theta} \quad (3.34)$$

$$\dot{\lambda}_B = L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_b \dot{\theta} \quad (3.35)$$

Fazendo uso das expressões que fornecem as derivadas dos fluxos concatenados, equações 3.32 a 3.35 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. Salienta-se que, doravante, o símbolo “•” existente sobre alguma variável, representa o operador d/dt .

$$[V] = [R][I] + \left[\dot{\lambda} \right] \quad (3.36)$$

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

$$v = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.37)$$

$$v = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.38)$$

$$v_A = 0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} \dot{\theta} \quad (3.39)$$

$$v_B = 0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{\theta} \quad (3.40)$$

❖ Equação da Co-energia

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

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

Onde:

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

Ou considerando todas as contribuições:

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

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:

$$W' = L_{aa} \frac{i_a^2}{2} + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_a + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_a + L_{bb} \frac{i_b^2}{2} - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A i_b + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B i_b + L_{AA} \frac{i_A^2}{2} + L_{BB} \frac{i_B^2}{2} \quad (3.41)$$

❖ Determinação do Conjugado Eletromagnético

O conjugado eletromagnético é dado pela derivada da co-energia em relação ao deslocamento angular. Assim, partindo da equação 3.41, e encontrando sua derivada em relação ao deslocamento angular, obtém-se a expressão do conjugado eletromagnético, (T), que assume a seguinte forma:

$$T = -\left(\frac{p}{2}\right)\left[L_{aA}\sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + L_{aB}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_a + \left(\frac{p}{2}\right)\left[L_{bA}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A - L_{bB}\sin\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_b \quad (3.42)$$

❖ 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:

$$T = T_C + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3.43)$$

Onde: $J = J_m + J_c$

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

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

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

B - Coeficiente de atrito viscoso da carga.

A velocidade angular e a aceleração angular do rotor da máquina são dadas pela expressão 3.44 e 3.45, respectivamente:

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.44)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.45)$$

Substituindo as expressões 3.44 e 3.45 na equação 3.43, obtêm-se:

$$T = T_C + J \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + B \frac{d\theta}{dt} \quad \text{ou} \quad T = T_C + J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (3.46)$$

Reescrevendo a expressão 3.46, de maneira a explicitar o conjugado da carga, chega-se a seguinte equação:

$$T_C = T - J \dot{\omega} + B \omega \quad (3.47)$$

O resultado do equacionamento matemático acima, é o conjunto de equações, 3.48 a 3.52, que determina o comportamento do motor de indução monofásico:

$$v = r_a i_a + L_{aa} \dot{i}_a + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega \quad (3.48)$$

$$v = r_b i_b + L_{bb} \dot{i}_b - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bA} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_A \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_B \omega \quad (3.49)$$

$$0 = r_A i_A + L_{AA} \dot{i}_A + L_{aA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a - L_{aA} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega - L_{bA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \frac{p}{2} i_b \omega \quad (3.50)$$

$$0 = r_B i_B + L_{BB} \dot{i}_B + L_{aB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_a + L_{aB} \frac{p}{2} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_a \omega + L_{bB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_b - L_{bB} \frac{p}{2} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) i_b \omega \quad (3.51)$$

$$T_C = -\left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{aA} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A + L_{aB} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \right] i_a + \left(\frac{p}{2}\right) \left[L_{bA} \cos\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_A - L_{bB} \sin\left(\frac{p}{2}\theta\right) \dot{i}_B \right] i_b - J \dot{\omega} - B \omega \quad (3.52)$$

3.3 - Motor Elétrico Utilizado no Dispositivo Investigado

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 apenas um enrolamento auxiliar, que é retirado assim que o motor atinge a velocidade de regime, conforme ilustrado na figura 3.3.

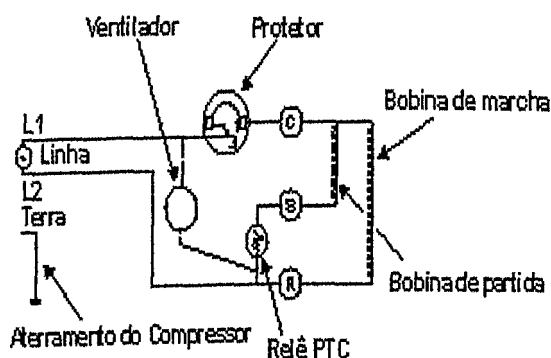


Figura 3.3: Esquema elétrico do motor de indução monofásico utilizado no refrigerador

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

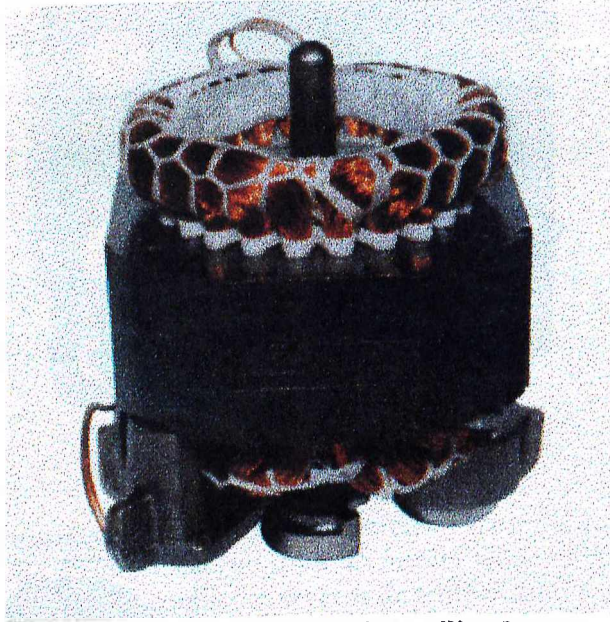


Figura 3.4: Motor elétrico utilizado no acionamento de compressores herméticos

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 monofásico 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 Refrigerador*, é fornecido no Anexo A.

Este template possui por características:

- ❖ **Objetivos:** Representação de um motor de indução monofásico, utilizado no aparelho refrigerador em estudo.
- ❖ **Variáveis de entrada:**
 - *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;

- 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 - inércia da carga + inércia do motor
- N_a - número de espiras do enrolamento principal;
- N_b - número de espiras do enrolamento auxiliar;
- n_p - número de pólos do motor.

❖ Variáveis de saída:

- i_{sa} - corrente do enrolamento principal do estator;
- i_{sb} - corrente do enrolamento auxiliar do estator;
- i_{rA} - Corrente da fase A do rotor;
- i_{rB} - Corrente da fase B do rotor;
- com_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 forças magnetomotrizes do estator e do rotor.

3.4.3 – Operação do Motor com 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 127 [V] - RMS. Por outro lado, o motor encontra-se operando com suas características nominais. Finalmente deve-se destacar que as principais características nominais do motor e do compressor estão descritos no Anexo B.

É importante reforçar que as grandezas monitoradas nos ensaios experimentais limitaram-se a 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, a forma de onda da corrente total se mostra distorcida, fato este que demonstra a natureza não linear da carga estudada. Já no caso computacional, a forma de onda da corrente, não se apresenta distorcida. 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.

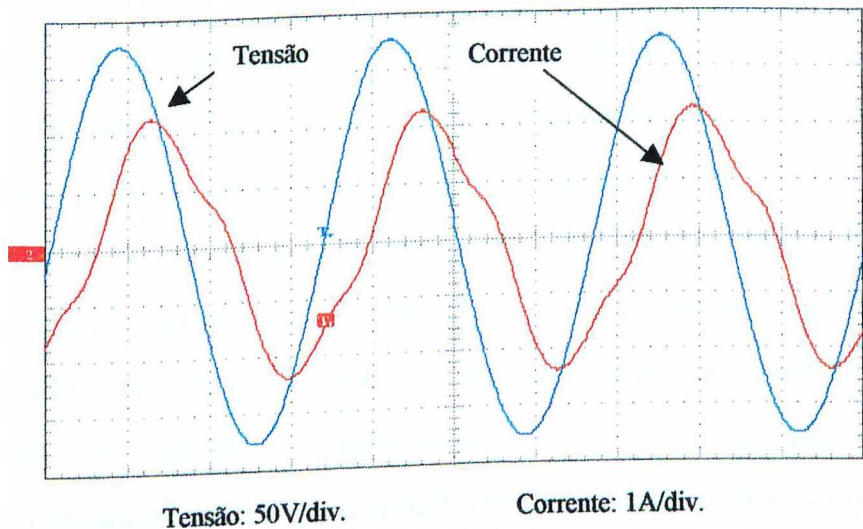


Figura 3.5: Tensão de alimentação e corrente de entrada Experimental

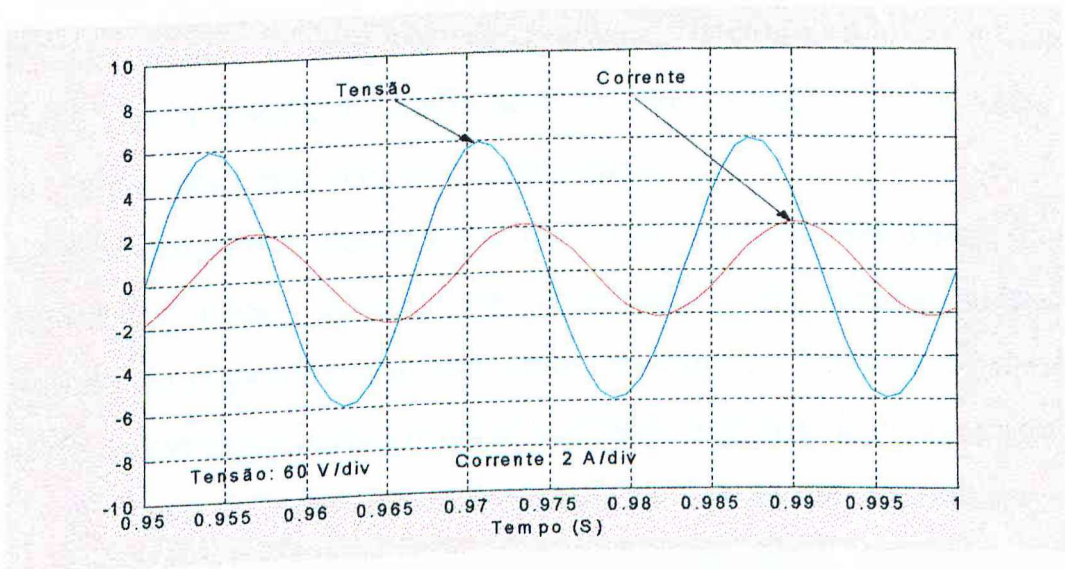


Figura 3.6: Tensão de alimentação e corrente de entrada Computacional

Ainda nas figuras, é importante verificar a defasagem entre a tensão e corrente. Observa-se coerência entre os resultados dos dois tipos de estudos realizados, mostrando a validade do modelo. Devido ao efeito

predominantemente indutivo dos enrolamentos, o motor apresenta uma característica fortemente indutiva, com fator potência na faixa de 0.55, portanto, a corrente encontra-se em atraso em relação à tensão. Conclui-se, do anteriormente dito, que este tipo de dispositivo apresenta uma baixa eficiência. Dependendo da aplicação que se tenha em vista, para motores elétricos do tipo aqui estudado, podem ser utilizados capacitores em série com o enrolamento auxiliar, de forma permanente ou apenas na partida. O primeiro caso, é utilizado para melhorar o desempenho global dos dispositivos, em regime permanente, e o segundo, capacitor em série com o enrolamento auxiliar, é utilizado, principalmente para melhorar as características de partida no equipamento. Exemplo da segunda aplicação mencionada é o arranjo utilizado em aparelhos condicionadores, conforme a referência [29] , onde o fator de potência encontra-se próximo da unidade.

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

Adicionalmente às ilustrações e descrições anteriormente feitas, a seguir, são mostradas novas figuras, que contribuem para melhor entender o desempenho do dispositivo que esta sendo investigado. Deve-se salientar, que aqui serão apresentados apenas resultados obtidos pelo método computacional.

A figura 3.7 mostra oscilogramas da tensão de suprimento e das correntes nos enrolamentos principal e auxiliar. Nesta figura, evidenciam-se dois estágios do motor: a partida e a seguir o regime permanente, sendo que, entre um e outro, ocorre a retirada do enrolamento auxiliar.

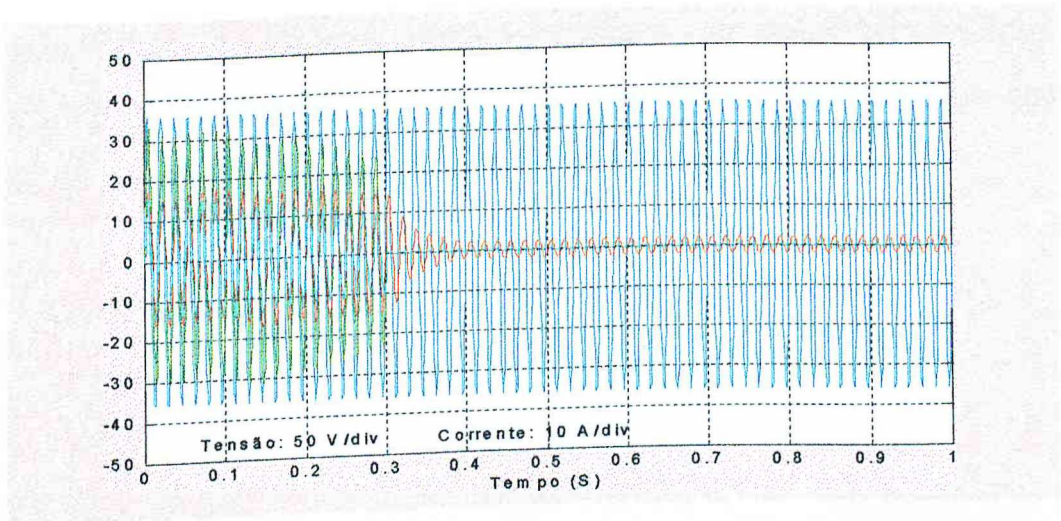


Figura 3.7: Operação completa do motor com seus regimes transitório e permanente *Computacional*

A figura 3.8 ilustra detalhes dos dois estágios de funcionamento anteriormente mencionados. Na partida, a corrente do motor atinge o valor aproximado de 21.5 [A] – RMS, bastante próximo dos dados de placa do dispositivo que é 19.5 [A] – RMS. Após aproximadamente 0.3 segundos, o motor atinge velocidade próxima a nominal, e a corrente estabiliza num valor em torno de 1.5 [A] – RMS.

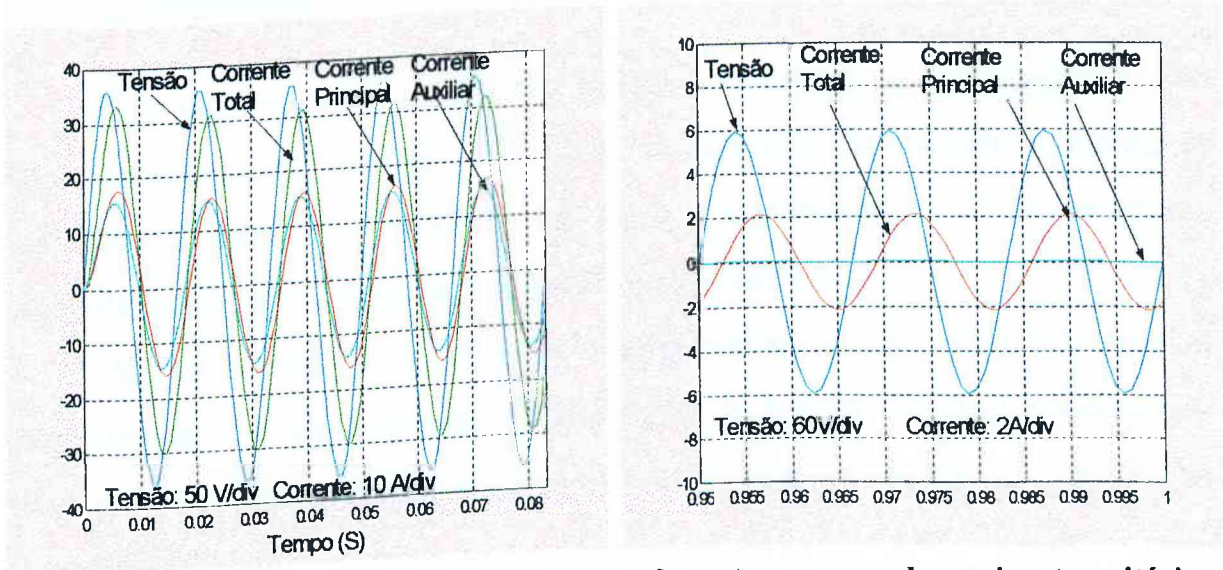
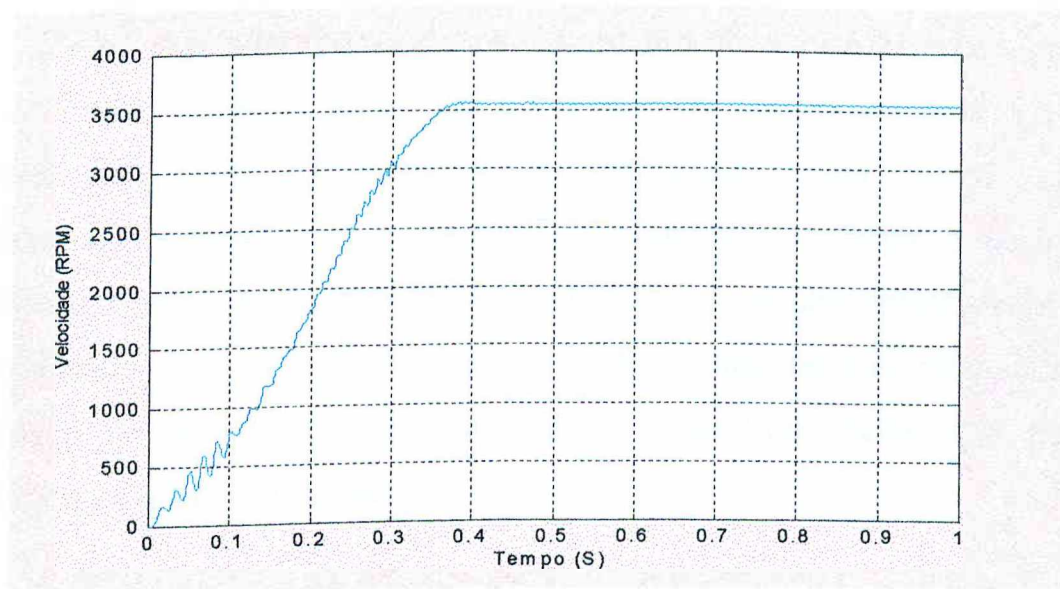


Figura 3.8: Detalhes dos estágios de operação do motor: esquerda: regime transitório, direita: regime permanente - *Computacional*

A curva da velocidade do motor para o caso computacional está ilustrada na figura 3.9. A característica hermética do compressor impossibilitou que se levantasse a correspondente curva para o caso experimental



**Figura 3.9: Velocidade do motor
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 monofásica, 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, foi analisada, ainda, a velocidade do motor. Os comportamentos e valores obtidos para estas grandezas, foram confrontados com valores obtidos teoricamente, apresentando-se compatíveis. Vencida esta etapa, e tendo sido verificada a validade do modelo, a ferramenta de trabalho obtida evidencia a possibilidade da realização de outros estudos, como aqueles relacionados à avaliação de desempenho de refrigeradores domésticos frente aos distintos distúrbios de qualidade de energia.

CAPÍTULO IV

Análise de Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade

4.1 - Considerações Iniciais

O presente capítulo tem por objetivo, investigar o comportamento de um refrigerador doméstico, quando conectado a uma rede com a qualidade de energia comprometida.

Para tanto, serão realizadas investigações diversas, experimentais e computacionais, com o intuito de avaliar o desempenho do refrigerador em estudo, quando o mesmo se encontra operando com um suprimento contendo um ou mais itens de qualidade fora dos padrões considerados aceitáveis. Deste modo, salienta-se que, aqui será avaliado o desempenho do refrigerador, do ponto de vista da qualidade da energia elétrica.

De posse dos dados quantitativos, obtidos experimentalmente, serão identificados pontos que permitam o traçado de curvas de sensibilidade e suportabilidade do dispositivo, resultantes das perturbações aplicadas.

Deste modo, para alcançar os objetivos aqui propostos, este capítulo encontra-se estruturado da forma seguinte:

- ❖ Identificação do dispositivo a ser estudado – Refrigerador Doméstico;
- ❖ 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 de laboratório, destacando-se suas características construtivas e de desempenho mais relevantes, assim como também o circuito elétrico representativo.

4.2.1 - Características Físicas do Refrigerador Doméstico Sob Investigação

O equipamento a ser estudado, de modo experimental e computacional, consiste num refrigerador doméstico, possuindo uma única porta, capacidade de 320 litros, conforme ilustram as figuras 4.1 e 4.2, esta última mostrando,

complementarmente, uma vista posterior do dispositivo, na qual podem ser observados detalhes dos principais componentes do equipamento.



Figura 4.1: Fotos do aparelho refrigerador doméstico sob ensaio

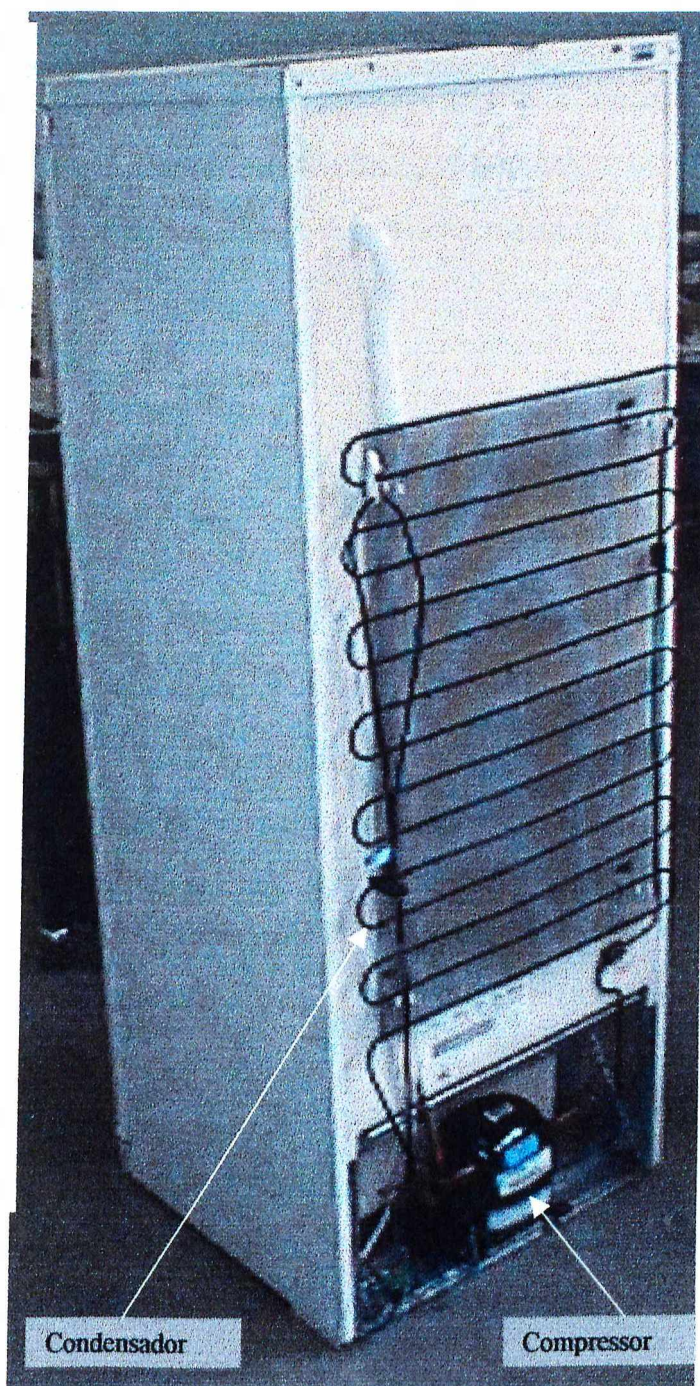


Figura 4.2: Foto da parte posterior do aparelho refrigerador doméstico

4.2.2 - Arranjo Físico da Unidade Elétrica do Equipamento Ensaiado

O motor de indução monofásico estudado no capítulo III, corresponde ao componente elétrico fundamental do refrigerador 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 4.3 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 e o protetor térmico, cujas funções foram descritas no capítulo II.

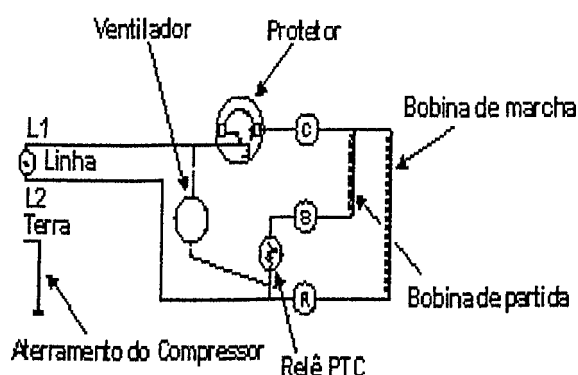


Figura 4.3: Esquema elétrico simplificado do aparelho refrigerador

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 foi omitida a representação do protetor de sobrecorrente.

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 - Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais foram conduzidos com o termostato do dispositivo ajustado em seu valor máximo. Esta condição de operação, entretanto, não pode ser entendida como uma maior demanda de potência por parte do refrigerador, mas sim, da necessidade de funcionamento por tempo adicional, continuamente, de maneira a que o compartimento interno atinja a temperatura ajustada.

Na figura 4.4, encontra-se ilustrado o diagrama esquemático da montagem utilizada nos trabalhos experimentais, identificando as conexões e os diferentes dispositivos utilizados.

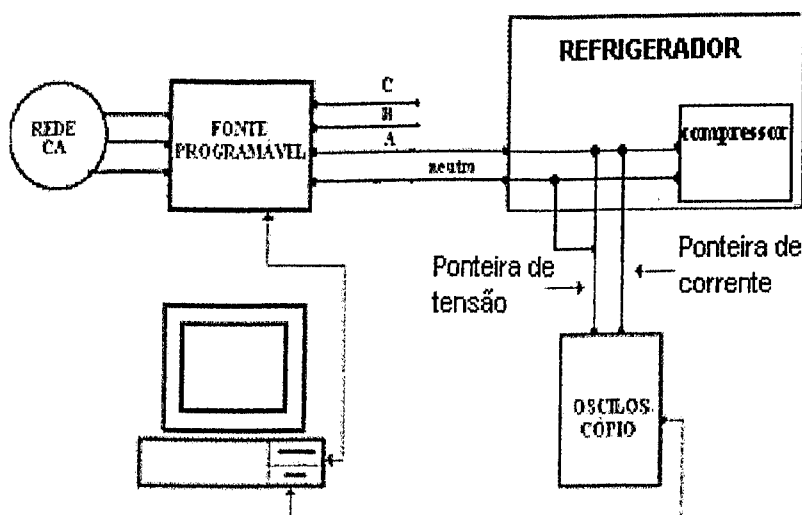


Figura 4.4: Diagrama esquemático utilizado nos trabalhos experimentais

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 refrigerador. 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 4.5, estão mostrados os módulos internos componentes da fonte, que possibilitaram a aplicação dos distúrbios.

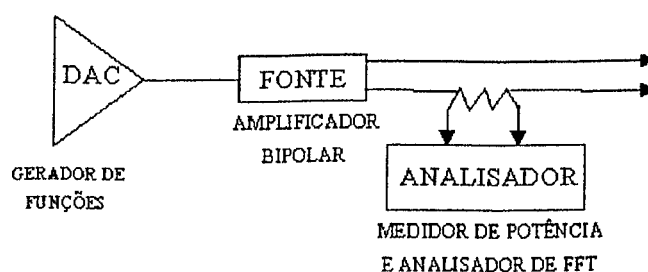


Figura 4.5: Módulos constituintes da fonte HP6834A

- ❖ 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, harmônicos, etc) pode ser feita de forma 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 pelo grupo da qualidade da 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 elétrico, do refrigerador utilizado nos estudos computacionais, está mostrado na figura 4.6. Observa-se da figura, que as diferenças deste para o circuito mostrado na figura 4.3, está na desconsideração do dispositivo de proteção e do ventilador.

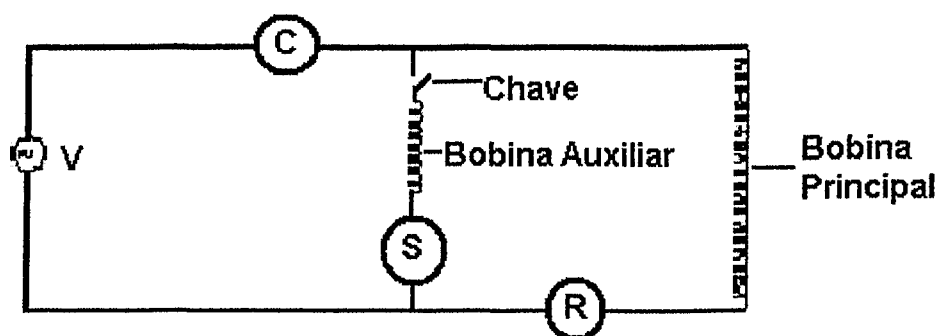


Figura 4.6: Esquema elétrico do refrigerador utilizado nos trabalhos computacionais

A seguir, são descritos os diversos casos estudados e, subseqüentemente, apresentados os resultados decorrentes dos trabalhos práticos e aqueles obtidos digitalmente, sendo realizados todos os comparativos necessários.

4.4 - Casos Estudados

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

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

A Tabela 4.1 apresenta um quadro sintético do alcance deste trabalho. Nele, encontram-se consolidados todos os casos estudados, com breve descrição das condições de operação do aparelho para cada situação.

É oportuno registrar, que os trabalhos foram realizados em observância às normas de procedimentos para aplicação dos itens de qualidade, no tocante a magnitudes e duração das perturbações. Em todos os estudos realizados foram utilizadas 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 (Voltage swell)	<ul style="list-style-type: none">• Experimental• Computacional
3	Afundamento de tensão de curta duração (Voltage sag)	<ul style="list-style-type: none">• Experimental• Computacional

**TABELA 4.1: QUADRO RESUMO DOS CASOS ANALISADOS
CONTINUAÇÃO**

4	Interrupção no fornecimento de energia	<ul style="list-style-type: none">• Experimental• Computacional
5	Suprimento contendo distorção harmônica de tensão	<ul style="list-style-type: none">• Experimental• Computacional
6	Suprimento contendo flutuação de tensão	<ul style="list-style-type: none">• Experimental• Computacional

Dadas às características construtivas do compressor, e principalmente a sua hermeticidade, 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 tão somente a tensão de suprimento e a corrente elétrica. 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.

Nos casos de investigação computacional, analogamente aos estudos experimentais, as mesmas condições de operação às quais o refrigerador foi submetido, foram reproduzidas digitalmente, ou seja, a tensão de alimentação puramente senoidal e livre de distúrbios e, na seqüência aplicação das perturbações anteriormente referenciadas.

Os estudos 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 a avaliação do 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, serão apresentadas 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 são primeiramente apresentados e, na sequência, aqueles obtidos por via computacional.

4.4.1 - CASO 1: Suprimento com Características Ideais

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 anteriormente descrita, ao aparelho refrigerador foi aplicada uma tensão de alimentação com característica muito próxima da ideal, de valor RMS 127V, cujos oscilogramas encontram-se ilustrados na figura 4.7. Destaca-se, que a distorção Harmônica total (DHT) da onda de tensão é inferior a 0.5%, daí porque considera-se como puramente senoidal. Esta mesma figura evidencia a forma de onda da corrente solicitada pelo equipamento, a qual, no entanto, apresenta-se distorcida.

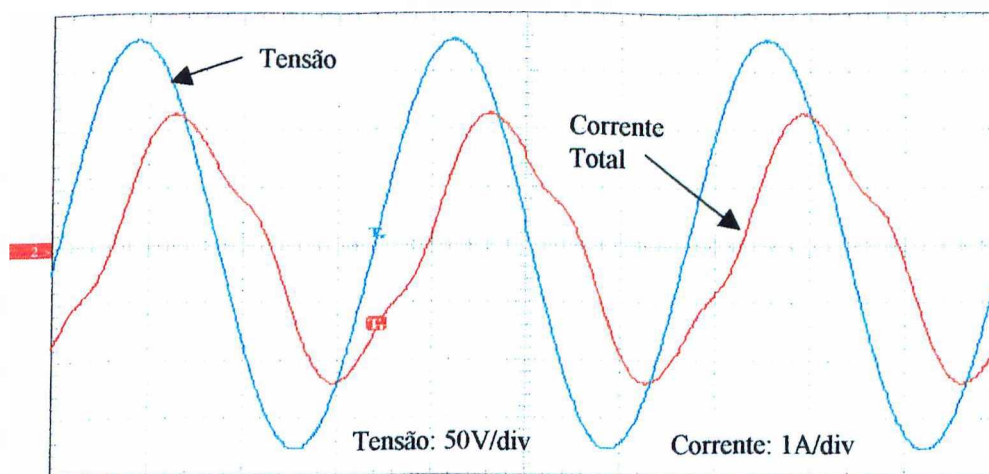


Figura 4.7: Caso 1 - Alimentação Senoidal Experimental

A figura 4.8 mostra os oscilogramas de tensão e corrente obtidas por meio computacional, correspondentes às similares do caso experimental anteriormente analisado. Da figura observa-se, que há uma boa semelhança entre as respostas obtidas por ambos métodos, indicando a validade do modelo e programa utilizados. Deve-se salientar, que as simplificações adotadas por ocasião do desenvolvimento do modelo e do programa computacional, tem como consequência, a obtenção de resultados, para ambos métodos, com alguma diferença, porém plenamente válidos para os objetivos aqui postos.

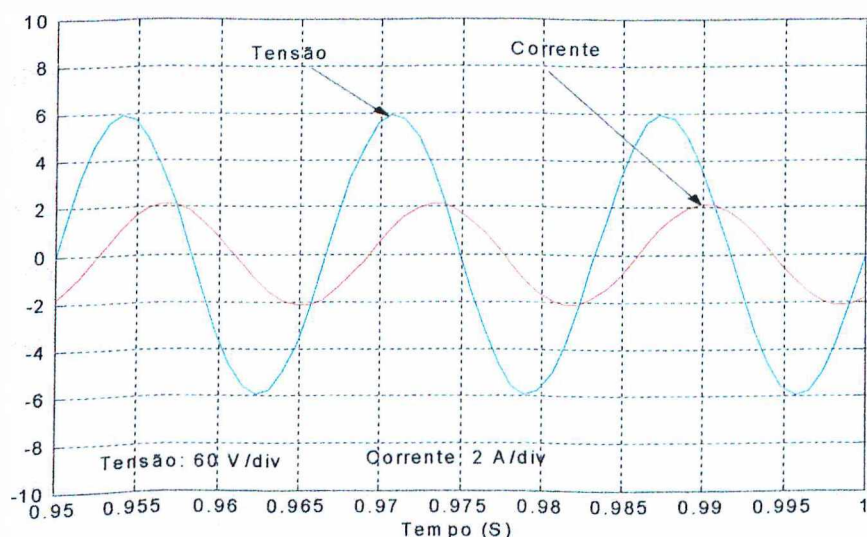


Figura 4.8: Caso 1 - Alimentação senoidal
Computacional

Os resultados anteriormente apresentados esclarecem sobre a similaridade qualitativa das formas de onda. Para maior clareza dos resultados, no entanto, no que tange aos seus aspectos quantitativos, a Tabela 4.2 sintetiza o desempenho das grandezas envolvidas, apresentando seus valores RMS. Este quadro permite uma correlação direta entre os valores obtidos, experimental e computacional, para a tensão de alimentação e a corrente, para o caso de 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]	Fator de Potência
Experimental	127	1.55	0.55
Computacional	127	1.53	0.54
Erro%	0	1.3	1.8

Os resultados constantes da tabela anterior, permitem constatar uma boa correlação entre os resultados experimentais e aqueles obtidos através do modelo computacional implementado. Observa-se da tabela, que a diferença entre os valores obtidos pelos métodos experimental e computacional, para a corrente e a defasagem desta com a tensão de alimentação, são inferiores a 1.3% e 1.8%, respectivamente. Deste modo, verifica-se que os resultados computacionais encontram-se dentro de padrões perfeitamente aceitáveis.

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

Este item tem por objetivo verificar o desempenho do refrigerador, pelos métodos experimental e computacional, quando o dispositivo experimenta uma elevação momentânea de tensão. Para a obtenção dos resultados deste caso e dos posteriores, a estratégia adotada foi a da análise das formas de onda da tensão e corrente, bem como 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 analisadas, em função das perturbações aplicadas, as alterações na velocidade. A figura 4.9 ilustra a forma de onda da tensão de suprimento, contendo uma

elevação temporária de tensão de 20%, com duração de 20 ciclos da frequência fundamental. A respectiva corrente solicitada pelo refrigerador, resultante da alimentação imposta, também é ilustrada.

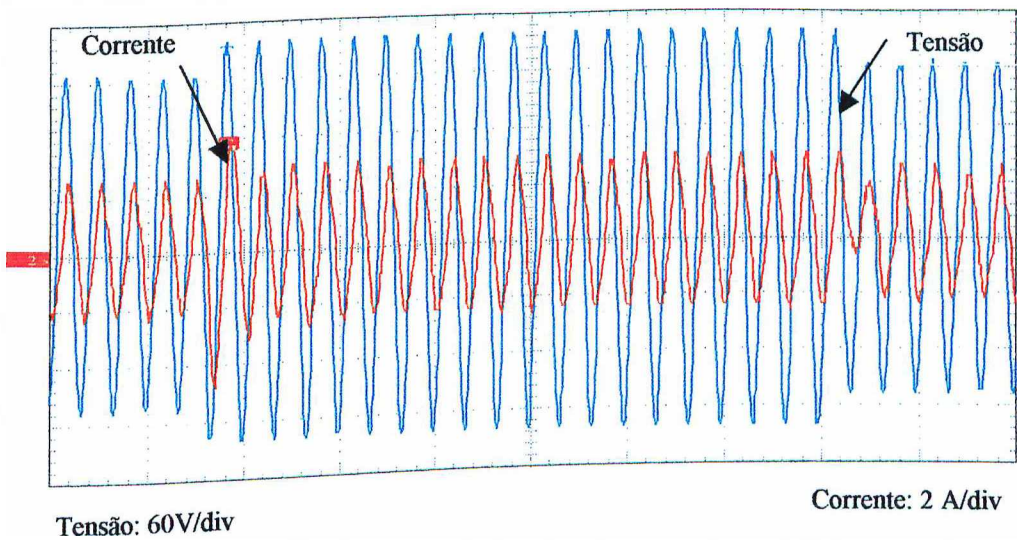


Figura 4.9: Caso 2 - Alimentação contendo elevação temporária de tensão, 20% - 20 ciclos - *Experimental*

A figura 4.10 ilustra as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente do dispositivo, para o caso computacional.

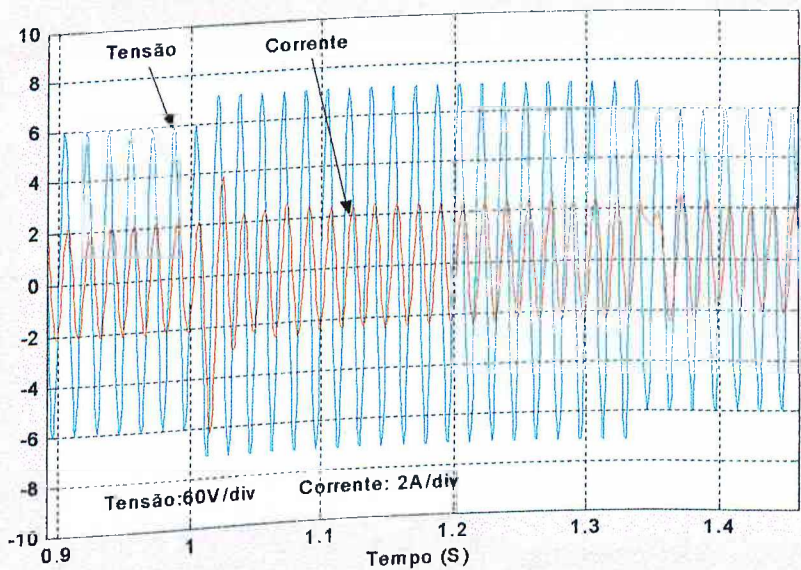


Figura 4.10: Caso 2 - Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 20% 20 ciclos - *Computacional*

Da análise das figuras, verifica-se a pequena influência que este tipo de perturbação tem sobre o desempenho da corrente, salvo nos instantes de início e término do fenômeno, quando ocorre um incremento transitório desta, com duração de meio ciclo. Os resultados mostram-se semelhantes para ambos os métodos utilizados.

De maneira a melhor observar o desempenho transitório da corrente, como resultado à elevação aplicada, as figuras 4.11 e 4.12 ilustram detalhes dos instantes inicial e final do fenômeno, para os estudos experimental e computacional, respectivamente.

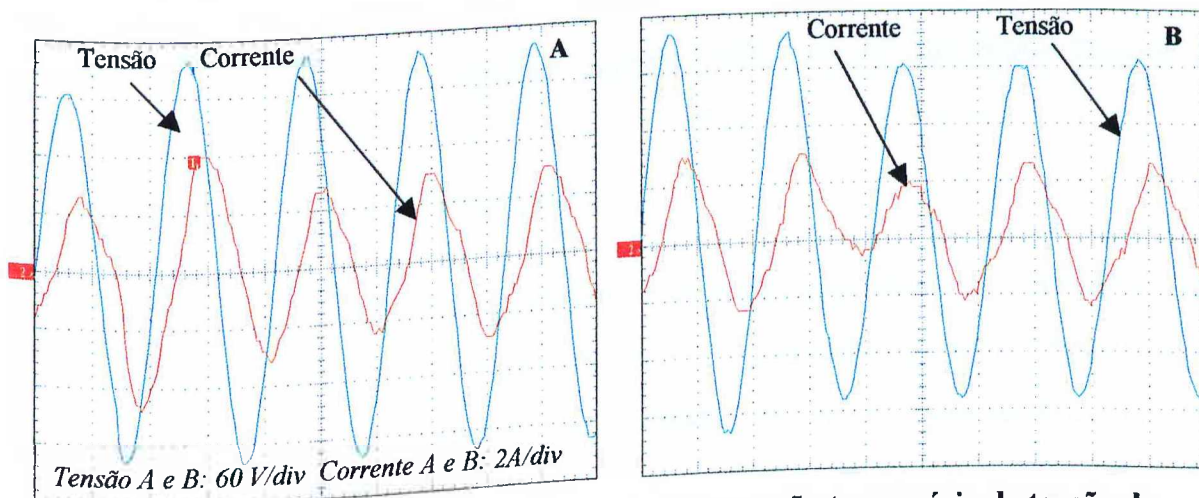


Figura 4.11: Caso 2 - Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 20% - 20 ciclos – Experimental- (A) Instante de aplicação; (B) Instante de retirada

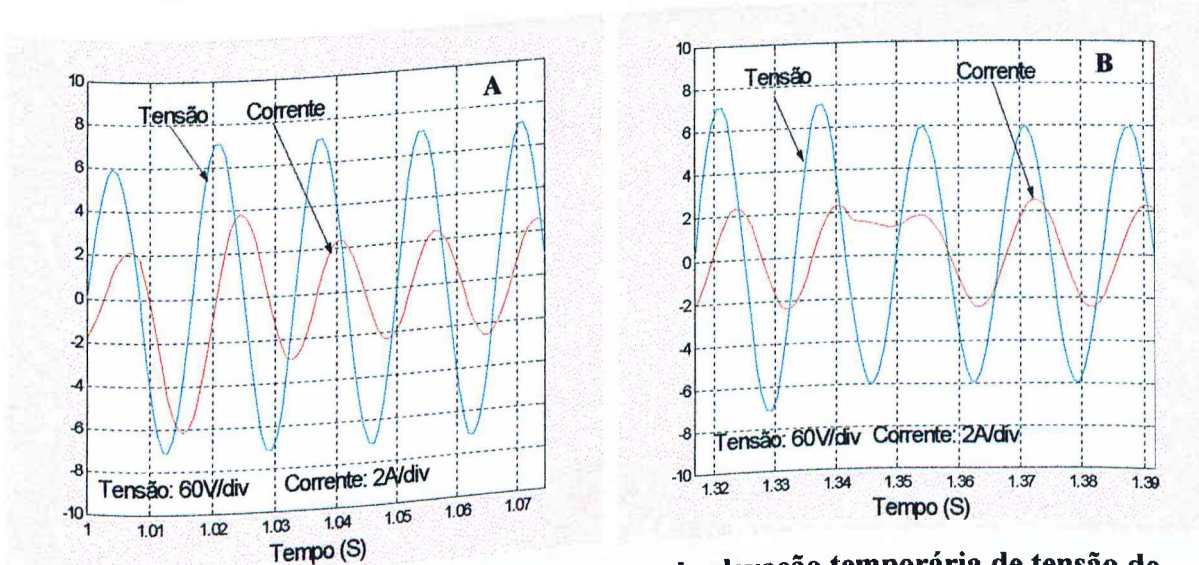


Figura 4.12: Caso 2 - Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 20% - 20 ciclos – Computacional - (A) Instante de aplicação; (B) Instante de retirada

A Tabela 4.3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, experimental e computacionalmente, com o intuito de oferecer, ao leitor, dados que lhe permitam ter uma melhor sensibilidade a respeito do desempenho do equipamento, em seus aspectos quantitativos.

TABELA 4.3: Síntese das Principais Ocorrências Observadas no Caso 3
Elevação de 20% com 20 ciclos de duração

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
127	127	152.4	152	1.55	1.53	2.12	1.9	1.9	2.6	1.7	1.7

*Exp: experimental *Comp: computacional

A figura 4.13, obtida dos estudos computacionais, ilustra a velocidade do motor, observando-se uma pequena alteração, sustentada, enquanto perdurar a perturbação. Passado o fenômeno, a velocidade retorna ao valor anterior ao da manifestação da elevação.

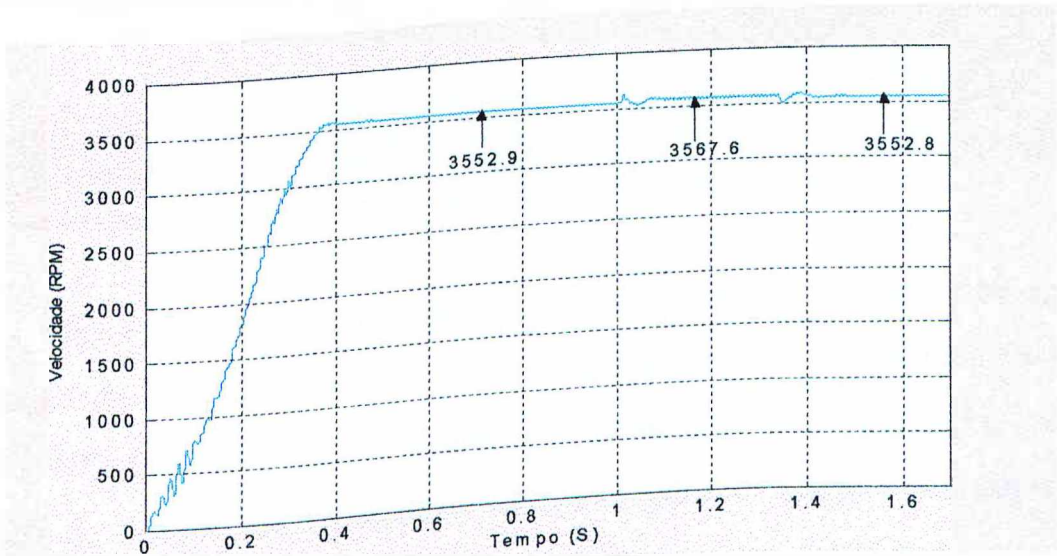


Figura 4.13: Caso 2 - Velocidade do motor submetido à elevação de tensão de 20% com 20 ciclos de duração - Computacional

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

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, na sequência, as quais bem ilustram os efeitos resultantes.

a) Caso 3.1: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de 40% com duração de 10 ciclos

A figura 4.14 ilustra o comportamento experimental do dispositivo, contemplando as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente de regime solicitada pelo refrigerador, quando da aplicação do fenômeno identificado.

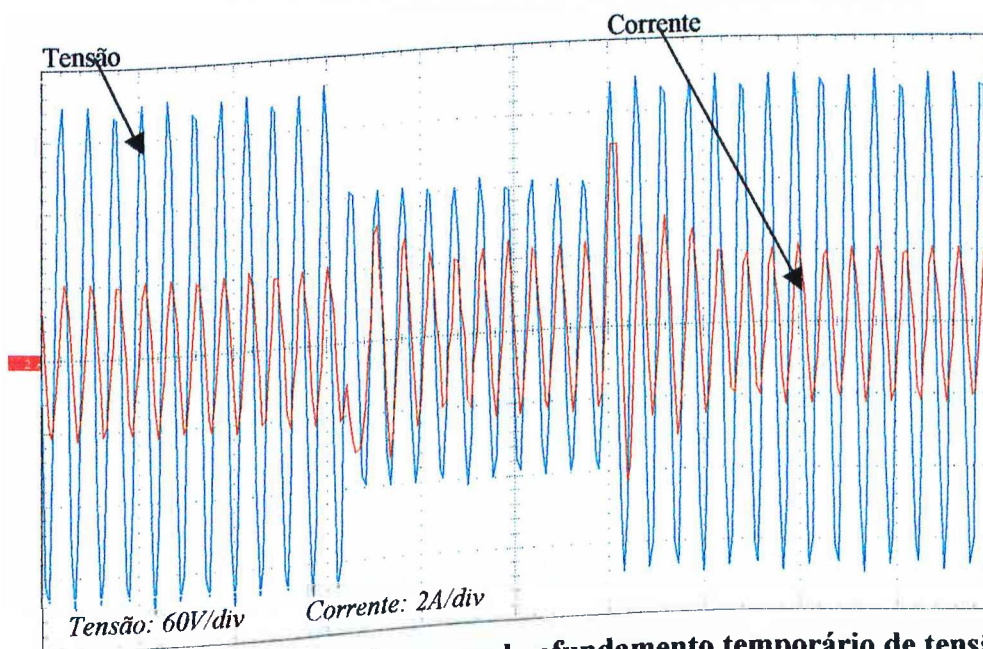


Figura 4.14: Caso 3.1 - Alimentação contendo afundamento temporário de tensão, 40% 10 ciclos - Experimental

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

A figura 4.15 ilustra as formas de onda da tensão de alimentação e da corrente solicitada pelo aparelho, obtidas pelo método computacional, para o correspondente caso de afundamento, analisado neste item.

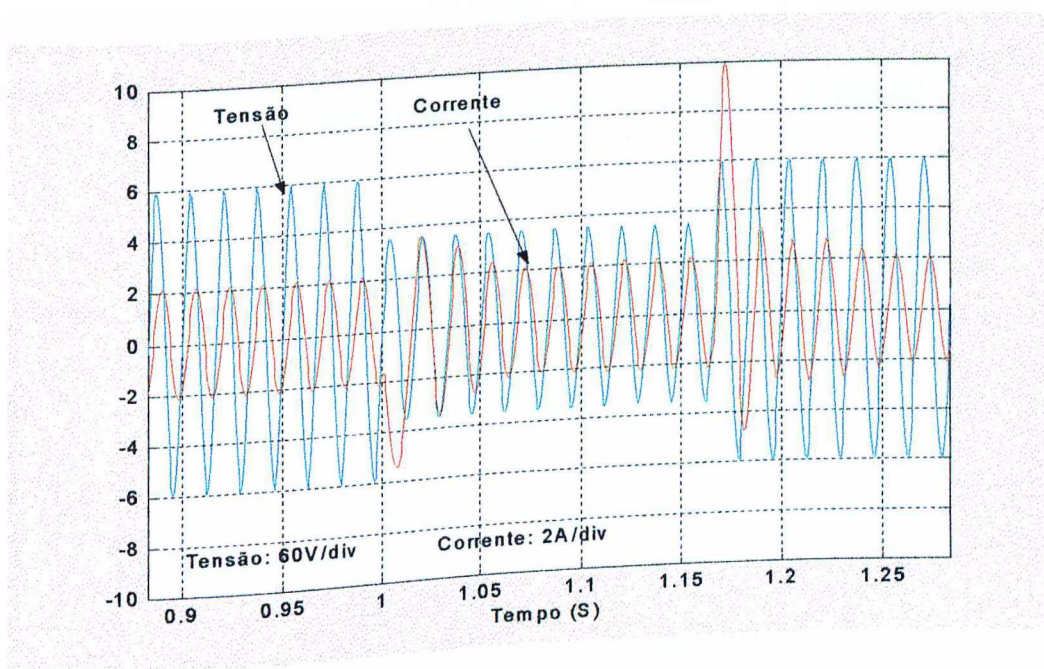


Figura 4.15: Caso 3.1 - Alimentação contendo afundamento temporário de tensão, 40% - 10 ciclos - Computacional

Da análise da figura anterior, obtida pelas duas metodologias adotadas, observa-se, mais uma vez, a concordância dos resultados, tanto qualitativa como quantitativamente. Esta afirmativa encontra sustentação pelo desempenho das grandezas em estudo.

As figuras 4.16 e 4.17 ilustram detalhes do comportamento da tensão de suprimento e da corrente total, experimentais e computacionais, nos instantes da aplicação e retirada do afundamento de tensão, respectivamente.

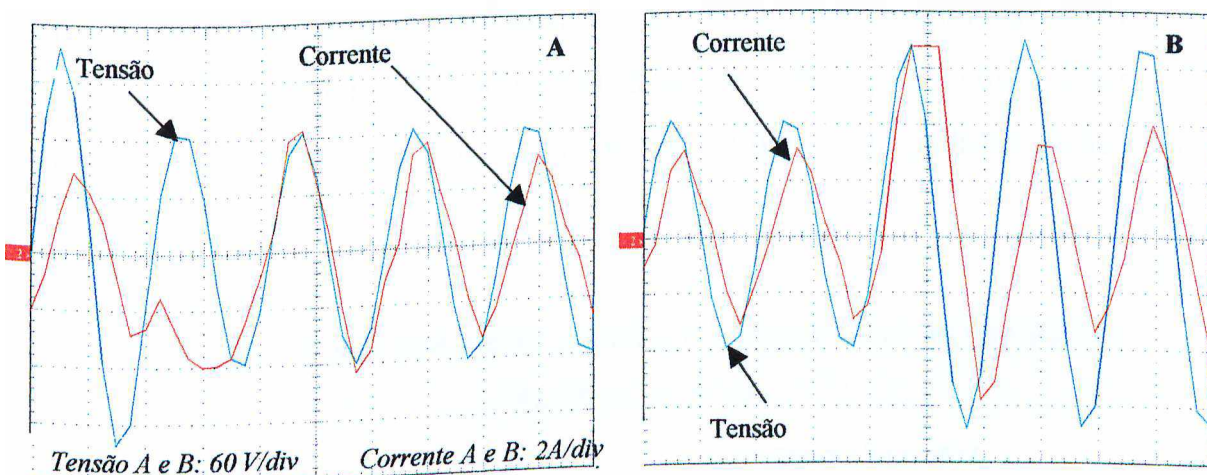


Figura 4.16: Caso 3.1 - Detalhe da tensão e corrente, nos instantes da aplicação e da retirada do afundamento de 40%-10 ciclos - Experimental
(A) Instante da aplicação, (B) Instante da retirada

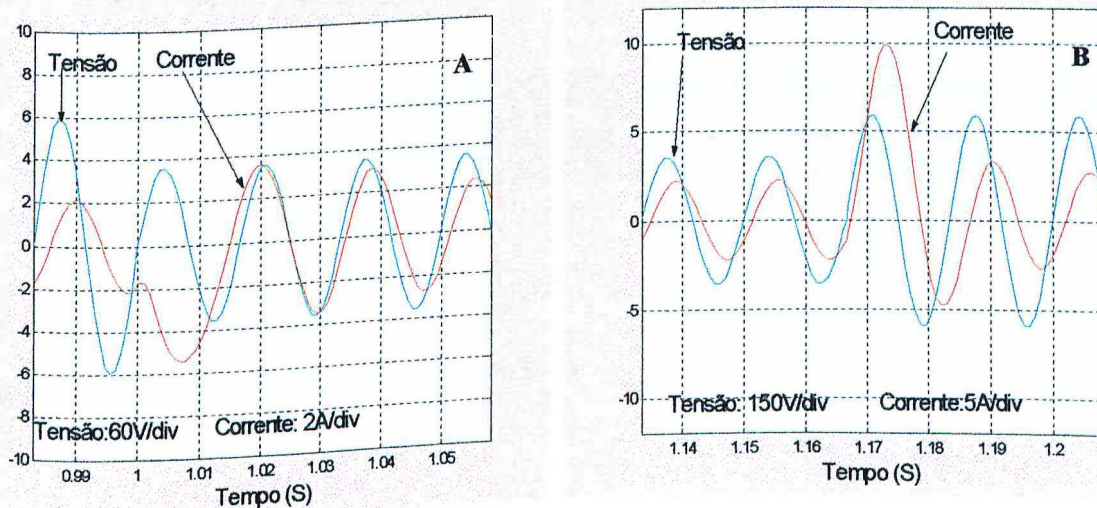


Figura 4.17: Caso 3.1 - Detalhe da tensão e corrente, nos instantes da aplicação e da retirada do afundamento de 40% - 10 ciclos - Computacional
(A) Instante da aplicação, (B) Instante da retirada

Os oscilogramas anteriores permitem uma melhor observação do desempenho das grandezas, nos instantes da ocorrência dos acréscimos

transitórios de corrente, isto é, na aplicação e na retirada do afundamento. Uma vez que restabelecida a tensão, a corrente retorna ao seu valor normal.

A Tabela 4.5 mostra um resumo do desempenho das grandezas anteriormente destacadas, referente aos estudos experimental e computacional, como resposta do aparelho refrigerador ao afundamento aplicado. Como já mencionado os resultados obtidos nas duas estratégias de estudo estão em concordância, desta forma os erros encontram-se dentro de padrões plenamente aceitáveis.

TABELA 4.5: Síntese das Principais Ocorrências Observadas no Caso 3.1											
Sag 0.6 pu 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
127	126.7	76.2	76.2	1.5	1.53	2.5	1.45	6.3	2.5	1.45	6.8

* Exp: experimental Comp.: computacional

A figura 4.18 ilustra a velocidade do motor. Observa-se desta ilustração, 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.

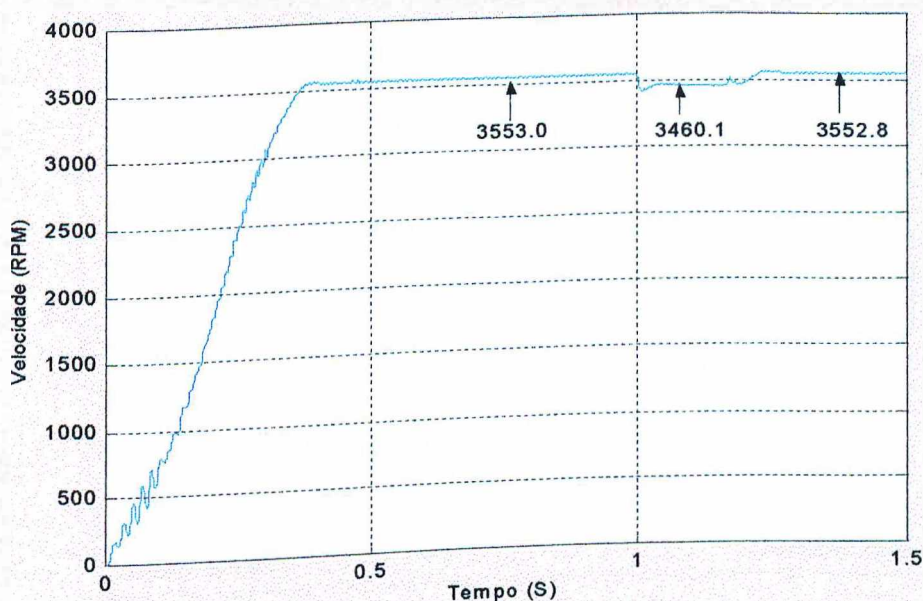


Figura 4.18: Caso 3.1 - Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 40% - 10 ciclos - Computacional
Velocidade do motor

b) Caso 3.2: Suprimento Contendo Afundamento de Tensão de 70% com duração de 1 ciclo

Da análise do caso anterior, vê-se que os afundamentos de tensão são mais nocivos ao funcionamento do dispositivo, quando comparados com os casos de elevação de tensão. Desta forma, para melhor exemplificar a influência dos afundamentos sobre o aparelho em teste, neste item é apresentado uma segunda situação com as seguintes condições: 70% de afundamento com duração de 1 ciclos.

A figura 4.19 ilustra o comportamento experimental do dispositivo, contemplando as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente total solicitada pelo refrigerador, como resposta à perturbação aplicada.

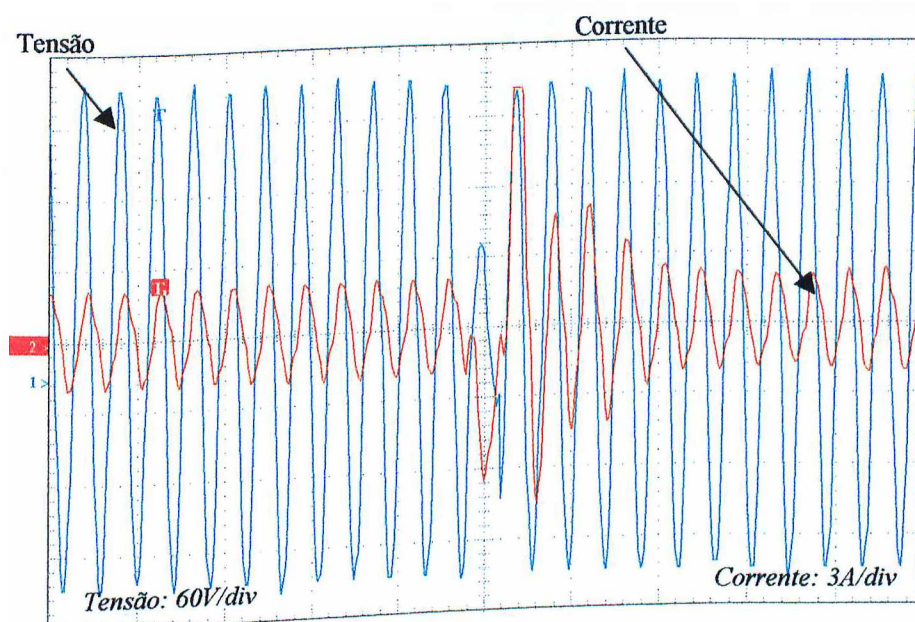


Figura 4.19: Caso 3.2 - Alimentação contendo afundamento temporário de tensão, 70% - 1 ciclo - Experimental

Observa-se na figura anterior que, semelhantemente ao caso precedente, de menor severidade, em termos do nível do afundamento aplicado, ocorre acréscimo da corrente total solicitada pela carga, porém com amplitude intensificada, pois maior foi a perturbação aplicada. Neste estudo, devido ao curto tempo de duração do fenômeno, não é possível observar-se o desempenho da corrente durante a ocorrência do mesmo. Contudo, nos instantes pós-afundamento, verifica-se comportamento semelhante a análise feita para o caso 3.1. Dos oscilogramas deste caso, observa-se, que os acréscimos transitórios da corrente, no início e término do “sag”, atinge valores RMS de 400% e 700% superiores à corrente nominal, aproximadamente. Deve-se salientar que, outros casos experimentais mais severos, envolvendo afundamentos de tensão, causaram a atuação do dispositivo de proteção, desligando o refrigerador. Exemplo da situação mencionada é o caso de 40% de afundamento com 30 ciclos de duração.

A figura 4.20 ilustra os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente total solicitada pelo dispositivo, para esta mesma condição, resultado da investigação computacional.

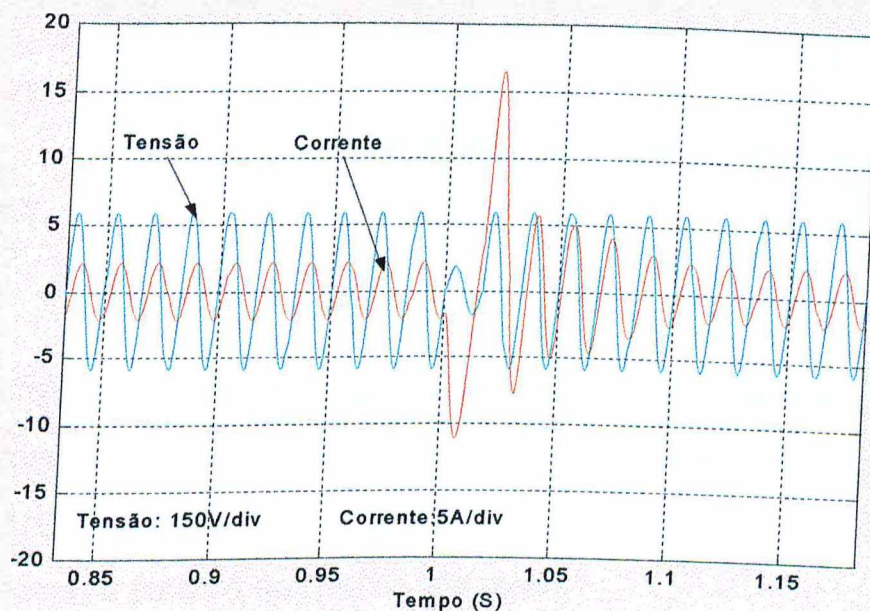


Figura 4.20: Caso 3.2 - Alimentação contendo afundamento temporário de tensão de 70% - 1 ciclo - Computacional

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

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 3.2
Sag 0.3 pu 1 ciclo

Tensões (Volt)				Correntes (Ampère)							
Pré-Distúrbio		Durante o Distúrbio		Pré-Distúrbio		Durante o Distúrbio					
Regime		Regime		Regime		Regime					
Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.		Comp.			
				Regime	Regime	Início	Durante	Fim	Início	Durante	Fim
127	126.8	38	37	1.5	1.5	7.7	10.6	10.6	6.4	11.3	11.3

Na figura 4.21 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.

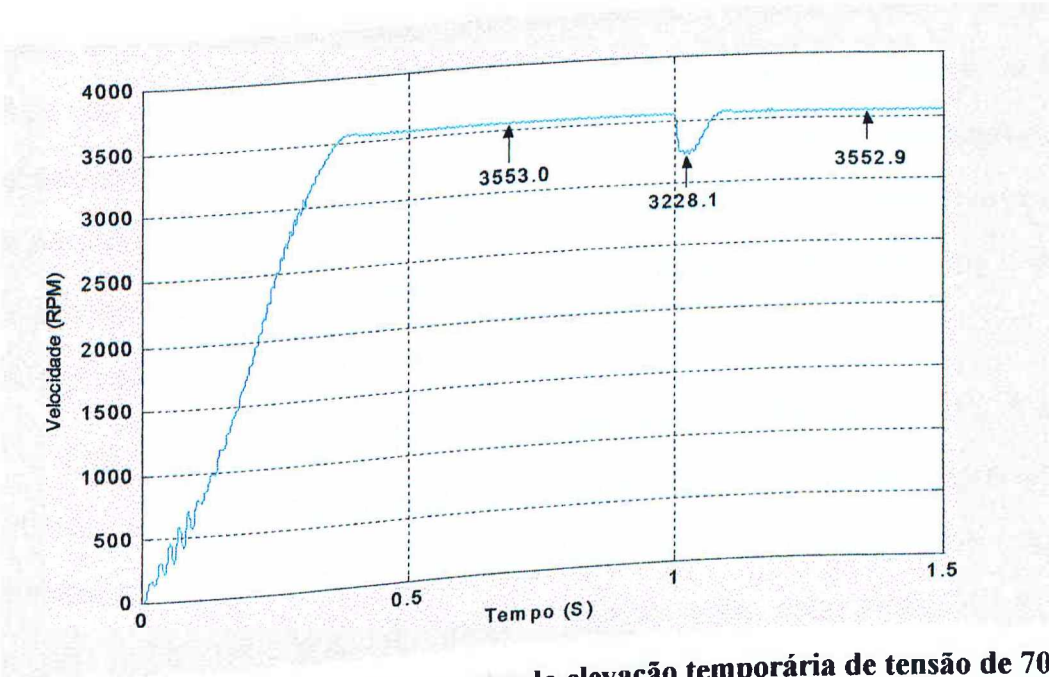


Figura 4.21: Caso 3.2 - Alimentação contendo elevação temporária de tensão de 70% - 1 ciclo - Computacional
Velocidade do motor

4.4.4 - Caso 4: Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica

Os estudos experimentais e computacionais realizados nesta seção buscam estabelecer os limites de vulnerabilidade do refrigerador, 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 elevada, comparativamente a outros dispositivos com tecnologia semelhante, conforme estudos realizados na mesma referência.

A figura 4.22 ilustra os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente solicitada pelo dispositivo, obtidas pelo método experimental, quando aplicada uma interrupção plena, como duração de 7 ciclos. Observa-se que, no instante da aplicação da interrupção, a corrente no dispositivo anula-se, permanecendo nesta situação enquanto perdura a perturbação. Ressalta-se que, neste período, a velocidade do motor também permanece nula, sem que contudo, tenha havido a atuação de qualquer dispositivo de proteção, portanto, o mesmo estando pronto para uma nova partida.

Observa-se ainda da figura que, passada a perturbação, com a tensão retornando ao seu valor normal, a corrente, na tentativa de retornada do funcionamento atinge valor correspondente ao da partida, sem contudo conseguir nova aceleração do motor. Motivo para esta situação, esta no desempenho termodinâmico do sistema de refrigeração, o qual, durante o funcionamento comprime o gás refrigerante, oferecendo um conjugado resistente ao dispositivo elétrico, o motor do compressor. O tempo de duração da

interrupção é insuficiente para que ocorra a equalização das pressões nos lados de alta e baixa pressão no circuito de refrigeração, encontrando-se não equalizados, portanto, oferecendo um conjugado resistente equivalente ao nominal, 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 refrigerador, 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.

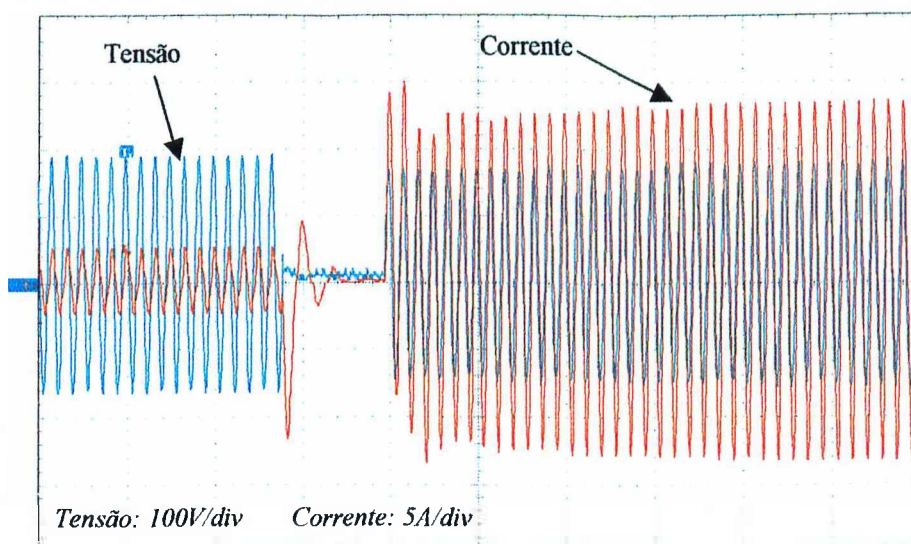


Figura 4.22: Caso 4 - Interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 7 ciclos
Experimental

A figura 4.23 mostra o caso similar analisado, porém, utilizando a estratégia computacional.

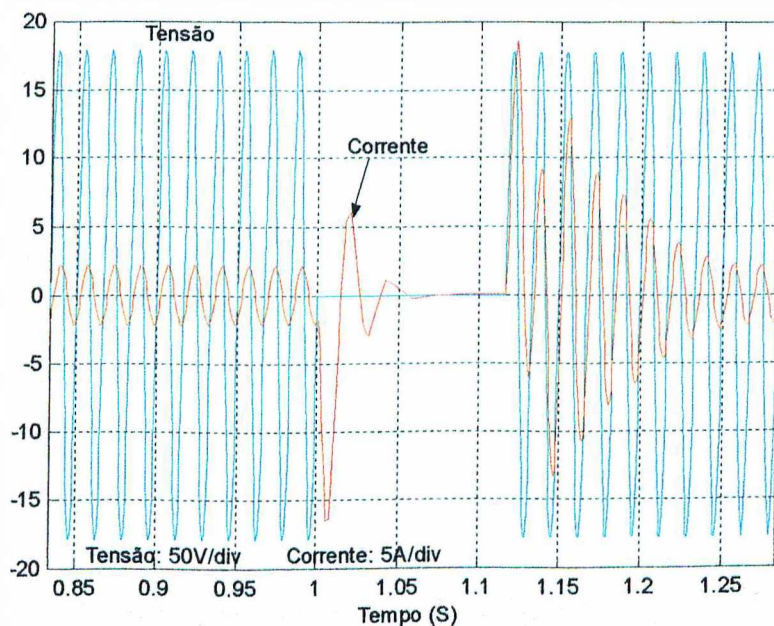


Figura 4.23: Caso 4 - Interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 7 ciclos Computacional

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.

4.4.5 - Caso 5: Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão

Esta seção contempla os resultados de estudos voltados à análise de desempenho do refrigerador submetido a um suprimento de energia elétrica contendo distorções harmônicas, 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 15%.

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.

TABELA 4.7: Distorções Harmônicas Individuais Aplicadas ao Condicionador de Ar			
Distorção Harmônica Individual (DHI)			
DHT	3ª Ordem	5ª Ordem	7ª Ordem
5%	2%	2%	4%
10%	5%	3%	8%
15%	8%	5%	10%

A figura 4.24 mostra os oscilogramas da tensão aplicada e da corrente total consumida pela carga, para um DHT de 15% 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.

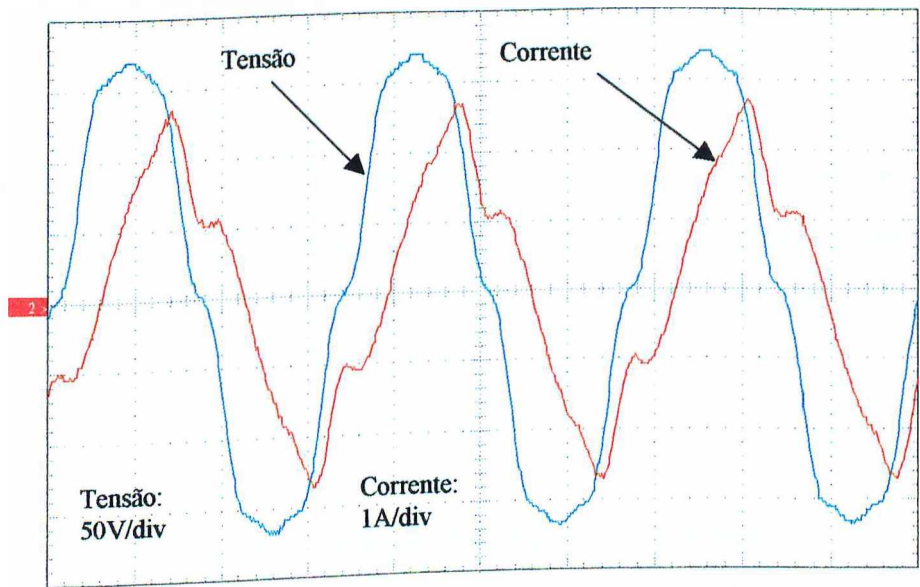


Figura 4.24: Caso 5 - Tensão de alimentação contendo distorção harmônica total (DHT) de 15% - *Experimental*

Na figura 4.25 são apresentados os resultados, pelo método digital, para a mesma condição anterior. Os resultados, conforme pode ser observado, mostram-se compatíveis entre ambos métodos.

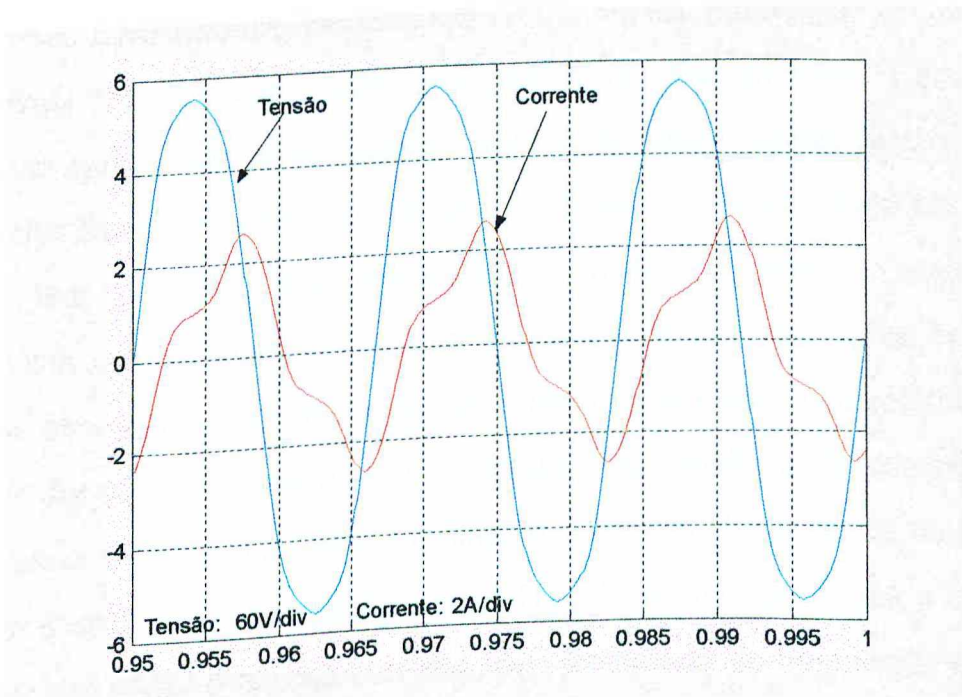


Figura 4.25: Caso 5 - Tensão de alimentação contendo distorção harmônica total (DHT) de 15% - *Computacional*

Observa-se na figura, que a concordância entre as respostas obtidas pelos dois métodos não é exatamente igual. A diferença verificada, nas formas de onda da corrente, pelos métodos experimental e computacional, 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.

4.4.6 - Caso 6: Suprimento Contendo Oscilação de Tensão

Complementarmente aos estudos anteriores, uma outra análise refere-se à resposta do aparelho refrigerador 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 [30] 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 4.26 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, cuja frequência de modulação é igual à da tensão com seus valores de máximos e mínimos em fase.

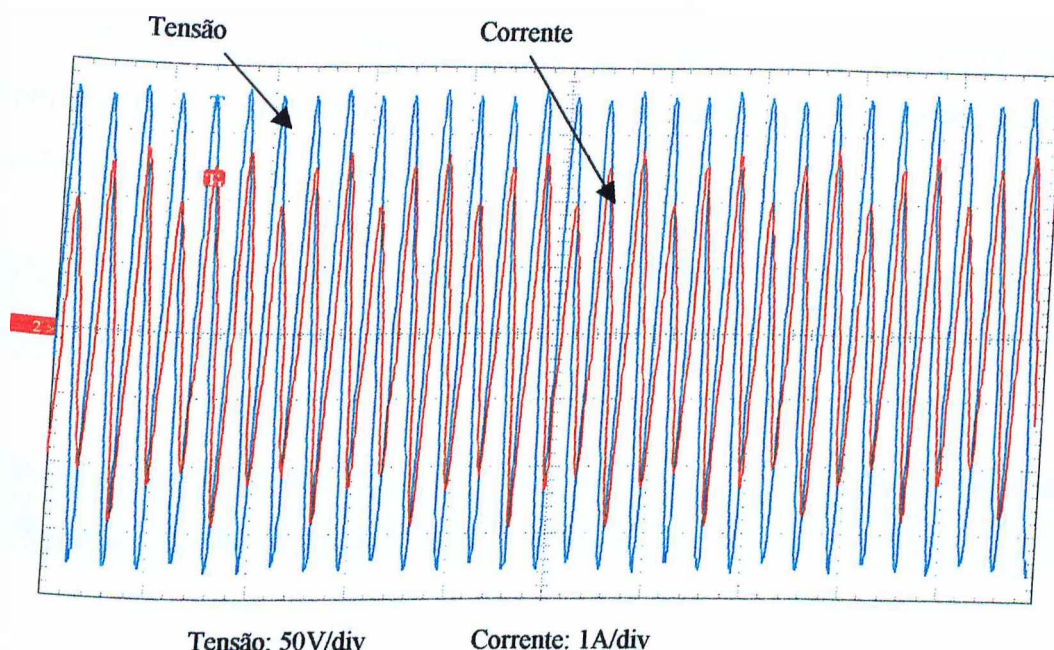


Figura 4.26: Caso 6 - Alimentação contendo flutuação de tensão: PST=3 e Frequência da moduladora de 20 Hz - Experimental

A figura 4.27 apresenta os resultados para este mesmo caso, porém, obtido por meio digital. Nesta figura, a semelhança dos casos anteriores, os oscilogramas apresentam semelhança satisfatória, para dois métodos.

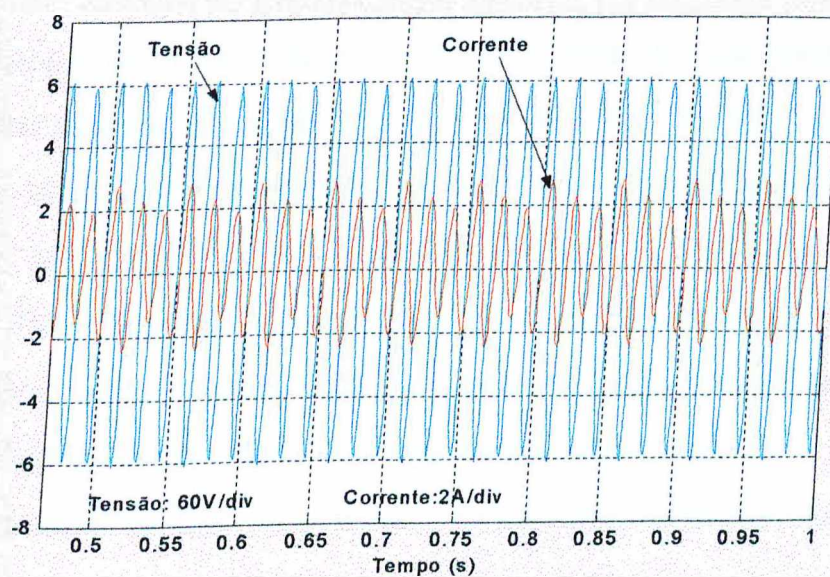


Figura 4.27: Caso 6 - Alimentação contendo flutuação de tensão: PST=3 e Frequência da moduladora de 20 Hz - Computacional

A Tabela 4.8 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.

TABELA 4.8: Síntese das Principais Ocorrências Observadas no Caso 6
Oscilação de tensão para PST=3 e frequência da moduladora de 20Hz

Tensões (Volt)				Correntes (Ampère)					
Pré-Distúrbio		Durante o Distúrbio		Pré-Distúrbio		Durante o Distúrbio			
Regime				Regime					
Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.	Comp.	Exp.	Comp.
				Regime	Regime	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
127	127	120	125	1.55	1.52	1.9	1.76	1.4	1.55

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 refrigerador, 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 4.28, que expressa a sensibilidade e suportabilidade do refrigerador, quando submetido a afundamentos de tensão e interrupções.

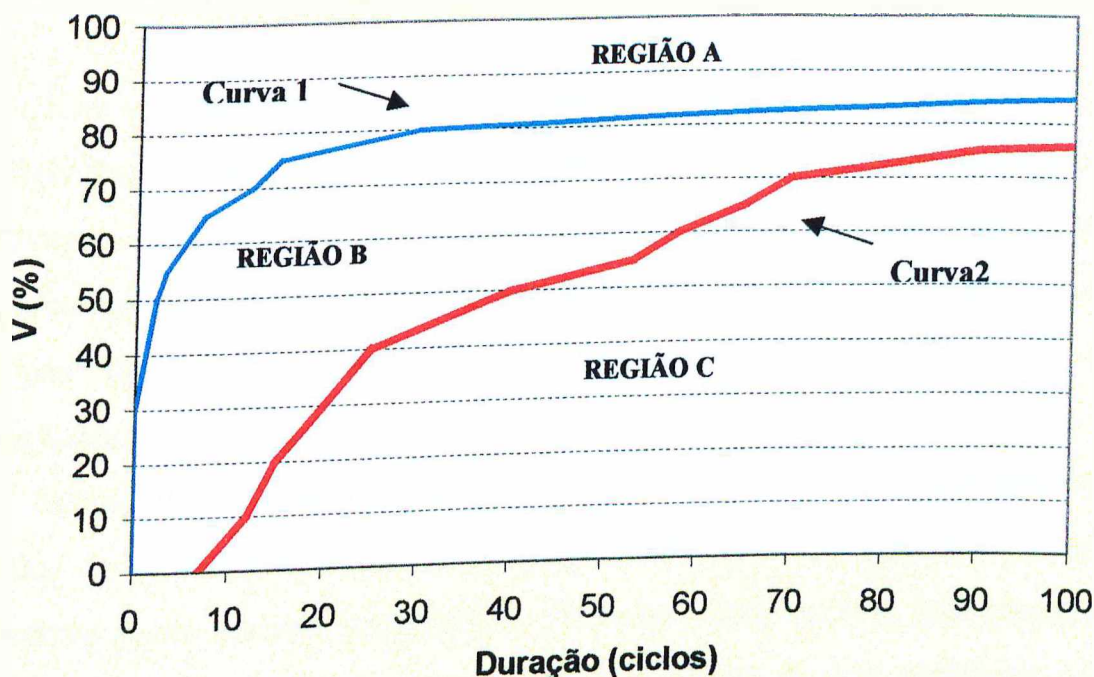


Figura 4.28: Curvas de sensibilidade e suportabilidade a afundamentos temporários de tensão e interrupções do aparelho refrigerador

O gráfico acima apresenta três regiões distintas, delimitadas por 2 curvas. A primeira região, A, está associada ao funcionamento normal do dispositivo, mesmo para valores de tensão abaixo do nominal. Esta região tem como limite inferior a curva 1. A região B, define a operação do refrigerador com algum tipo de anormalidade delimitada pelas curvas 1 e 2, seja pelo surgimento de ruídos audíveis ou algum outro tipo de anormalidade, comparativamente ao caso normal. Essa região pode ser considerada como o limite da sensibilidade do equipamento, seja pelo aumento da vibração do aparelho ou outros tipos de efeitos. 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, inicialmente, abordou os aspectos associados com as características gerais do equipamento em estudo, refrigerador doméstico, descrevendo o seu circuito elétrico equivalente. A seguir foram traçadas as estratégias necessárias para atingir as metas e objetivos propostos, pautadas na realização de estudos experimentais e computacionais. Desta forma, as investigações realizadas permitem extrair as conclusões seguintes:

Submetido a elevações temporárias de tensão de até 20%, com duração variando, de $\frac{1}{2}$ até 100 ciclos, o dispositivo não apresentou nenhum efeito significativo sobre no seu desempenho. Foi observado, apenas, um pequeno acréscimo do valor RMS da corrente, acompanhado de um acréscimo da velocidade durante a ocorrência. Ressalta-se a não realização de estudos com elevações maiores, por motivos de segurança quanto à preservação da integridade do aparelho.

Afundamentos temporários de tensão e interrupções foram caracterizados como as perturbações mais prejudiciais ao desempenho do equipamento. De uma forma geral, o dispositivo estudado demonstrou possuir baixa sensibilidade a estes itens de qualidade, não apresentando, entretanto, anormalidade que pudesse ser percebida fisicamente, mas somente através da variação dos valores RMS da corrente. Através do método computacional observou-se, ainda, redução do valor médio da velocidade, durante a ocorrência do fenômeno.

O refrigerador apresentou suportabilidade a interrupção do fornecimento de até 6 ciclos, após o que retornou a operação normal. Interrupções com duração superior ao período mencionado, provocaram o desligamento do refrigerador.

Distorções harmônicas de tensão nos níveis e ordens aplicadas, não tiveram reflexos perceptíveis no aparelho, entretanto, observou-se forte deformação das formas de onda.

Flutuações de tensão nos níveis aplicados ao dispositivo em estudo, não produziram anormalidades que pudessem ser percebidas fisicamente. Este tipo de perturbação teve reflexo direto nas correntes do equipamento, causando também flutuação da corrente 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

No encerramento de cada um dos capítulos que estruturam 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 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 sequência, 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 inexistência de trabalhos no tocante a avaliação de desempenho de

equipamentos de refrigeração no contexto da qualidade, e em particular do tema desta dissertação: refrigeradores domésticos. Quanto à legislação sobre a matéria, foram apresentadas as principais diretrizes normativas, em vigor desde outubro de 2000, com respectivas alterações. O Capítulo concluiu, descrevendo as contribuições desta dissertação e a estrutura completa da mesma.

O capítulo II, inicialmente, mostrou uma retrospectiva da refrigeração, em seus aspectos tecnológicos e de aplicação e como a relação com o ser humano foi se multiplicando ao longo dos anos, tanto em termos das aplicações hoje existentes como 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 dos refrigeradores domésticos, possui como máquina motriz um motor elétrico de indução, monofásico, com rotor em gaiola de esquilo. Encerra-se o capítulo, mostrando os arranjos elétricos utilizados nos dispositivos comercialmente disponíveis, os quais estão em conformidade com os princípios sobre máquinas girantes, CA, em suas diversas configurações de partida.

No capítulo III, abordam-se aspectos relacionados com a constituição física do motor mencionado no capítulo anterior, efetuando-se o desenvolvimento matemático de um modelo, no domínio do tempo, para dispositivo utilizado nos estudos, o refrigerador. Na seqüência, foi desenvolvido e implementado 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. Dos resultados obtidos, experimentais e computacionais, e estudos comparativos realizados, observou-se uma boa semelhança entre ambos resultados, verificada através das formas de onda e dos valores numéricos obtidos pelos dois métodos, para o caso de desempenho do equipamento enfocado neste trabalho, com suprimento ideal. Portanto, a avaliação do desempenho do equipamento submetido à tensão de suprimento com características não ideais, pode ser realizada também por meios computacionais.

O capítulo IV inicia abordando os aspectos associados às características gerais e circuito equivalente do refrigerador escolhido como equipamento de teste neste trabalho de pesquisa. O equipamento estudado constitui-se em uma aplicação clássica da refrigeração doméstica: a conservação de alimentos. 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 expostos e discutidos os resultados digitais e de laboratório, evidenciando-se o desempenho do equipamento como resposta aos itens de qualidade aplicados. É importante salientar que foi verificada grande semelhança entre os resultados obtidos, experimental e computacionalmente, 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 refrigerador, experimentalmente, quando submetido a afundamentos temporários de tensão.

De modo geral, nos resultados obtidos para o dispositivo, 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, flutuações de tensão e para grande parte os afundamentos de tensão. Os distúrbios foram aplicados seguindo padrões encontrados nos sistemas elétricos. O dispositivo mostrou-se, ainda, bastante tolerante a interrupções do fornecimento de energia, quando de curta duração. Exemplo da suportabilidade do dispositivo, foi a aplicação de uma interrupção, com tensão nula, e 6 ciclos de duração, sem que ocorresse o seu desligamento definitivo. 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 refrigerador mostrou possuir um elevado nível de sensibilidade e, dependendo da perturbação, boa suportabilidade. Para os casos de afundamentos de tensão mais acentuados e interrupções, numa certa região definida pelos seus níveis e duração, o dispositivo mostrou elevada suportabilidade, só desligando para casos de afundamentos de tensão mais severos e duração superior a 6 ciclos, quando ocorreu o colapso total, traduzido no desligamento do equipamento. Estes resultados foram altamente significativos e traduzidos na forma de curvas de sensibilidade e suportabilidade ilustrada e analisada no 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 aos modelos teóricos, ficou claro que, para a maioria dos ensaios e testes, as duas estratégias de simulação conduziram a desempenhos que, tanto qualitativa, como quantitativamente, se mostraram muito próximos.

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 refrigeradores em estudos dinâmicos de sistemas de potência, de maneira a avaliar os impactos no sistema.
- Extensão dos procedimentos para outros tipos de dispositivos residenciais, comerciais e industriais.

Referências Bibliográficas

- [1] Dugan, Roger C. at all, "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] Heydt, G. T., "Power Quality Engineering", IEEE Power Engineering Review, pp 5 - 7, Setembro de 2001.
- [4] 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.
- [5] Santos, A. C. D., "Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia – MG, Setembro, 2001.
- [6] Reid, W. Edward, "Power Quality Issues – Standards Guidelines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, pp 625 – 632, May/June 1996.
- [7] PQTN Brief 39: "Ride-through Performance of Programmable Logic Controllers", EPRI Power Electronics Applications Center, Knoxville, TN, november 1996.
- [8] 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.
- [9] IEEE Recommended for Emergency and Stand-by Power Systems for Industrial and Commercial Applications, Std. 446 IEEE Orange Book, 1995.

Referências Bibliográficas

- [10] Ribeiro, T. N., “Uma Discussão dos Critérios e Normas Relativas à Qualidade da Energia Elétrica”, PUC, Belo Horizonte – MG Dissertação de Mestrado PPGEE, Agosto, 1998.
- [11] 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 Electric Networks (CIGRE), 34th Session 1992, Paris, France.
- [12] Anderson, Lisa M., Northeast Utilits, and Bowes, Kenth B., “The Effects of Power Line Disturbances on Consumer Electronic Equipment”, IEEE Transation on Power Delivery, vol. 5, pp. 1062 – 1065, April 1990.
- [13] Smith, Sthephen B. And Standler, Ronald B., “The Effects of Surges on Electronic Appliances”, IEEE Transation on Power Delivery, vol. 7, pp. 1275 – 1282, July 1992.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Pacheco, Cláudio R., “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.

Referências Bibliográficas

- [18] Neto, Luciano Martins, Avaliação do Desempenho de Motores Monofásicos em Regime de Alimentação Senoidal, Relatório UFU, 1997.
- [19] Mendes, L. M. de Oliveira, "Refrigeração e Ar Condicionado", Editora Tecnoprint S. A., 1984.
- [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 Domiciliar", 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, September, 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, Conversão Eletromecânica de Energia".
- [28] IEC Std. 6100-4-11, Eletromagnetic Compatibility (EMC), part 4-11: Testing and Measurement Techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage immunity tests, Edition 1.1, 2001-03.
- [29] Castillo, Bismarck C., "Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, UFU, Julho de 2002.

Referências Bibliográficas

- [30] Medeiros, Carlos A. G., “Implementação Computacional do Modelo do Medidor de Cintilação Luminosa UIE/IEC para Calibração de Medidores Práticos”, Congresso Brasileiro de Automática – CBA, Natal – RN, setembro 2002.

ANEXO A

Template do Motor de Indução Monofásico

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 (pla , plb) 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

pla [A].

isb (mt_ind_mono.REF) - Corrente de fase do enrolamento auxiliar do estator, associada ao terminal plb [A].

ira (mt_ind_mono.REF) - Corrente de fase, Fase A do rotor, associada ao terminal pla [A]

irb (mt_ind_mono.REF) - Corrente de fase, Fase B do rotor, associada ao terminal plb [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_refri pla plb eixo= rsa , xsa, rsb, xsb, rr, xr, xm, f, vnom, snom, j, np, ic, t_d, K0, 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
    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
    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
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
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=xs*zb
    xrt=xr*zb
    xmt=xm*zb
  }
  else {
    rsat=rsa
    rsbt=rsb
    rrt=rr
    xsat=xsa
    xsbt=xs
    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 pla pla = l=0, r=lp
    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)]
    sw_fandi.c1 pla plc = ton=0.30331
    l.ramo_a pla plax = r=lp, l=0m
    l.ramo_b pla plax1 = r=lp, l=0m
    values {
        va = v(pla) - v(plb)
        vb = v(plc) - v(plb)

        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)
    isb: vb = (rsbt*isb) + d_by_dt(flux_b)
    ira: -rrt*ira = d_by_dt(flux_ra)
    irb: -rrt*irb = d_by_dt(flux_rb)

    i(p1a) += isa
    i(p1b) -= isa

    i(p1c) += isb
    i(p1b) -= 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  
vaux = vb  
vprin = va  
I_total: I_total=isa + isb
```

```
}
```

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

```
}
```

```
vsine.fontel pla 0 = rms=220, f=60, ph=0
```

```
# parâmetros do motor do condicionador de ar:
```

```
mt_ind_refri pla 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="o  
hms",K0=3,Na=1,Nb=1.16,V0=0
```

```
carga.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	THC 1340 YS LM 200AS	
Tensão de Operação:	Nominal - 127 [V]	Faixa de operação 90 - 140 [V]
Corrente:	Nominal - 1,45 [A]	Partida - 19 [A]
Frequência:	60 [Hz]	
Potência (+/-5%):	100 [W]	
Eficiência - EER (- 9,04%/+10,5%):	4,10 [BTU/Wh]	
Capacidade Frigorífica :	410(± 5%) [BTU/h]	
Aplicação:	Baixa pressão de evaporação	
Gás Refrigerante:	R134a (ecológico)	
Ventilação:	Natural	
Tipo de Motor:	PTCSIR	
Resistência dos enrolamentos à 25°C (+/-7%):	Principal: 4,02 [Ω]	Auxiliar: 6,56 [Ω]
Classe de Torque de Partida:	Torque Normal (LST)	
Tipo de Expansão:	Tubo Capilar	
Faixa de Temperatura de Evaporação:	-34,4 a -1,28[°C] (30°F a 10[°F])	
Carga de Óleo:	270 [ml]	
Deslocamento:	3,8 [cc/ver]	
Peso Líquido:	7,3 [Kg]	
Protetor Térmico:	4TM19NFBYY-XX	Ou T25919-XX
Temp. de Abertura (± 5%)	120 [°C]	105 [°C]
Temp. de Fechamento (± 9°C)	61 [°C]	52 [°C]
Corrente de Time Check:	13,50 [A]	9,5 [A]
Time Check à 25°C	5,50- 15 [s]	6,5 - 16 [s]
Corrente de abertura:	2,59 [A] a 90 [°C]	2,10 [A] a 90 [°C]

PARÂMETROS DO EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO						
Vnom (V)	f (Hz)	Snom (CV)	Np	Na	Nb	J (kg*m ²)
127	60	0.14	2	1	1.9	0.0015
Rsa (Ω)	Xsa (Ω)	Rsb (Ω)	Xsb (Ω)	Rr (Ω)	Xr (Ω)	Xm (Ω)
4.07	5.517	6.64	3.52	3.52	2.5	171.7