



## V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 136

Tópico: Modelagens e Simulações

### DESEMPENHO DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS E CONDICIONADORES DE AR NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Bismarck C. Castillo\* Ana C. de Azevedo  
Universidade Federal de Mato Grosso

José C. de Oliveira Antônio C. Delaiba  
Universidade Federal de Uberlândia

#### RESUMO

Este artigo apresenta estudos de desempenho de dois tipos de equipamentos, refrigeradores e condicionadores de ar tipo janela, quando submetidos a suprimentos contendo distúrbios do tipo afundamentos temporários de tensão e interrupções. Os trabalhos são dirigidos para o estabelecimento de modelos no domínio do tempo, implementação computacional e estudos de avaliação utilizando os resultados obtidos através do simulador SABER. Com vistas a validação da estratégia, as investigações são corroboradas por ensaios laboratoriais que ratificam o desempenho e atestam a qualidade dos modelos teóricos propostos. Dentre os fenômenos pesquisados, apenas aqueles associados com afundamentos e interrupções serão enfocados nesta contribuição técnica.

#### PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de energia; Suportabilidade; Refrigeradores, Condicionadores de ar; Motor de indução.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Qualidade de Energia é um tema atual, que faz parte do cotidiano de engenheiros, concessionárias de energia e consumidores. Preocupação maior tem sido avaliar o desempenho de equipamentos considerados sensíveis, principalmente aqueles dotados de tecnologia mais recente, frente à degradação da

energia de suprimento [1]. Exemplos de trabalhos realizados na área de dispositivos eletrônicos encontram-se avaliados em [2].

O presente trabalho, no entanto, tem como objetos de estudo refrigeradores domésticos e aparelhos condicionadores de ar, tipo janela. Ambos produtos são construtivamente robustos e de utilização massiva.

Aparelhos de refrigeração, de um modo geral, tem como componente eletromecânico principal um compressor, do tipo hermético. A característica hermética dos compressores limita a observação apenas às grandezas tensão e corrente de suprimento. Parte fundamental do compressor é o motor elétrico de indução. Para os equipamentos sob estudo, o acionamento elétrico é proporcionado por máquinas de indução monofásica e bifásica assimétrica, para o refrigerador e o condicionador de ar, respectivamente.

No trabalho são apresentados, ainda, os circuitos elétricos equivalentes, a modelagem matemática e a implementação computacional dos dois motores, já mencionados, os quais, são utilizados nos estudos de desempenho dos equipamentos.

Desta forma, o artigo tem por objetivo investigar, experimental e computacionalmente, o comportamento dos citados produtos, determinando o grau de suportabilidade, quando submetidos a afundamentos de tensão e interrupções. Os trabalhos experimentais foram conduzidos seguindo procedimentos estabelecidos nas normas IEC, série 61000 [3].

Nos ensaios experimentais utilizou-se uma fonte especial, computadorizada, que possibilita a aplicação de distúrbios utilizados em estudos de

desempenho de equipamentos. Os estudos computacionais foram realizados com o pacote de simulação Saber.

## 2.0 - DISPOSITIVOS INVESTIGADOS E METODOLOGIA ADOTADA

Neste item, são descritas as características dos equipamentos utilizados nos trabalhos de investigação. São apresentados os circuitos elétricos equivalentes e a metodologia adotada na execução dos trabalhos experimentais e computacionais. Mostra-se, também, o desenvolvimento matemático do motor de indução bifásico assimétrico assim como as necessárias adequações no equacionamento matemático, de maneira a obter-se também o modelo para o motor de indução monofásico.

### 2.1 Estudos Experimentais

Os ensaios de laboratório foram realizados com o auxílio de uma fonte programável, da marca HP, modelo 6834A. Esta fonte possibilita o controle da amplitude, frequência e forma de onda da tensão de suprimento. Utilizaram-se, ainda, instrumentos de medição e um PC, conforme pode ser observado na Fig. 1.

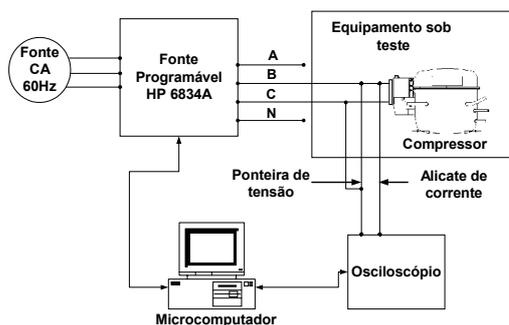


Figura 1 – Conexões utilizadas nos estudos experimentais.

Ambos aparelhos sob teste possuem compressores Modelos AE5470ES LM AE240ES, 220V para o condicionador de ar e THC 1340 YS LM 200AS, 127V, para o refrigerador. Características mais detalhadas destes componentes podem ser encontradas nas referências [4]-[6]. A tensão e corrente nos enrolamentos do equipamento foram medidas e registradas através de um osciloscópio digital de memória. Os distúrbios foram aplicados, variando-se o módulo e a duração.

É importante ressaltar que um dos componentes do condicionador de ar é um pequeno ventilador, destinado a auxiliar no resfriamento do condensador e ao mesmo tempo insuflar o ar refrigerado para dentro do recinto. Seu funcionamento é contínuo, solicitando uma corrente de aproximadamente 0.6 A. Esta

corrente, não é considerada nos estudos realizados.

De maneira a obter dados a respeito do comportamento do condicionador de ar e do refrigerador, foram estudados dois conjuntos de casos, experimentais e computacionais, um para cada equipamento. Os estudos consistiram na aplicação de perturbações (afundamentos de tensão) com magnitudes e durações variáveis. A duração dos distúrbios aplicados foi de: 0,5; 1; 10; 25 e 50 ciclos, ou até o instante em que a proteção atuasse, desligando o equipamento.

Aqui são apresentados apenas dois casos representativos, um para cada equipamento, que se encontram resumidos na tabela 1.

Tabela 1. Casos estudados experimental e computacionalmente

Equipamento	Tensão aplicada* (% $V_{nom}$ )	Duração* (ciclos)
Refrigerador	60	10
Condicionador de ar	70	10

(\*) De acordo com as normas IEC 61000-4-11, Edição 03/2001.

### 2.2 Estudos Computacionais

Para realizar os estudos computacionais se necessário faz a modelagem matemática e posteriormente a implementação computacional dos modelos dos dispositivos, no domínio do tempo. Todavia, tendo em vista a semelhança dos princípios básicos que regem o funcionamento das máquinas elétricas que acionam ambos equipamentos, inicialmente, proceder-se-á com a modelagem do motor de indução bifásico assimétrico, que aciona o condicionador de ar. Na seqüência, são feitas as modificações necessárias naquele modelo, de maneira a torná-lo representativo do motor monofásico que aciona o outro aparelho, o refrigerador doméstico.

Para tal finalidade, utiliza-se o modelo elementar de uma máquina de indução ideal, bifásica, assimétrica, 2 pólos [4], [6], [7] e [8], mostrado na figura 2.

O modelo utilizado nas simulações computacionais foi desenvolvido com base nas equações dos enlaces de fluxo e a equação de equilíbrio do conjugado. As equações são escritas para uma máquina bifásica assimétrica, com capacitor permanente, resultando num conjunto de equações diferenciais, não lineares, que representam a operação da máquina.

No desenvolvimento do modelo matemática do motor bifásico, foram adotadas as simplificações sugeridas em [7].

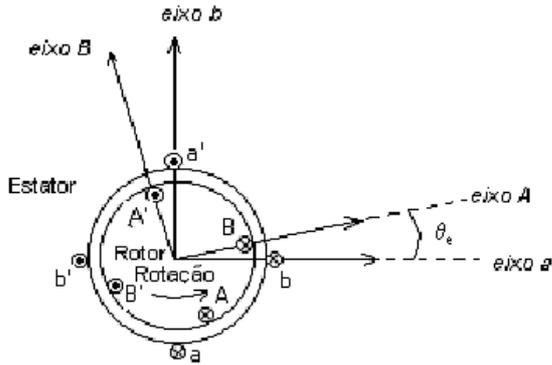


Figura 2 – Representação do motor de indução bifásico assimétrico.

A figura 3 mostra o circuito equivalente do motor de indução bifásico assimétrico.

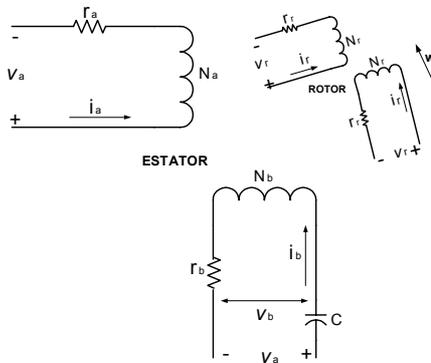


Figura 3 – Representação dos circuitos equivalentes dos enrolamentos monofásicos do motor.

Adotando as denominações “a, b” para as grandezas do estator e “A,B” para as grandezas do rotor, podem ser determinadas as equações de tensão, genericamente tendo-se:

- Tensões no Estator

$$v_a = r_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (1)$$

$$v_b = r_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} + \dot{v}_{cap} \quad (2)$$

- Tensões no Rotor

$$v_A = r_A i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad (3)$$

$$v_B = r_B i_B + \frac{d\lambda_B}{dt} \quad (4)$$

Onde:

$v_i i_i$  - valores instantâneos da tensão e corrente na fase “i”.

$\lambda_i$  - fluxo concatenado na fase “i”.

- Tensão no capacitor

$$\dot{v}_{cap} - \frac{1}{C} i_b = 0 \quad (5)$$

- Equação Mecânica

O valor instantâneo do conjugado eletromagnético T pode ser obtido através da variação da co-energia magnética em relação aos deslocamentos angulares do rotor. Desta forma, obtêm-se como resultado a expressão:

$$T = \frac{p}{2} \sum_i \sum_j i_i i_j \frac{dL_{ij}}{d\theta} \quad (6)$$

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.

$\theta$  - é o deslocamento angular elétrico

- Sistemas de Equações Dinâmicas para a Máquina de Indução Bifásica Assimétrica

Fazendo-se “i” e “j” assumir a, b, A, B, obtêm-se as equações dos fluxos de concatenamento, descritas a seguir:

$$\lambda_a = L_{aa} i_a + L_{aA} i_A + L_{aB} i_B \quad (7)$$

$$\lambda_b = L_{bb} i_b + L_{bA} i_A + L_{bB} i_B \quad (8)$$

$$\lambda_A = L_{AA} i_A + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b \quad (9)$$

$$\lambda_B = L_{BB} i_B + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b \quad (10)$$

As indutâncias entre os enrolamentos “i” e “j” são dados por:

$$L_{aA} = L_{aA} \cos \theta_e = L_{Aa} \quad (11)$$

$$L_{aB} = L_{aB} \cos(\theta_e - 90^\circ) = L_{aB} \sin \theta_e = \quad (12)$$

$$L_{bA} = L_{bA} \cos(\theta_e + 90^\circ) = -L_{bA} \sin \theta_e = \quad (13)$$

$$L_{bB} = L_{bB} \cos(\theta_e) = L_{Bb} \quad (14)$$

A relação entre o ângulo elétrico  $\theta_e$  e o ângulo mecânico  $\theta_{mec} = \theta$  é dado pela equação:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_{mec} = \frac{P}{2} \theta \quad (15)$$

Realizado o modelo matemático do motor bifásico, cabe agora evidenciar as diferenças existentes entre este e o motor monofásico utilizado pelo refrigerador doméstico.

Na operação do motor monofásico não é utilizado o capacitor representado na figura 3 e na expressão 2, portanto, é retirado neste caso. Por outro lado, como o enrolamento auxiliar do motor monofásico permanece conectado somente durante o instante da partida do motor, no programa computacional é introduzida uma chave, que retira este enrolamento assim que o motor atinge velocidade próxima a nominal.

Do ponto de vista construtivo, o motor monofásico estudado apresenta também diferenças. Estas são consideradas nas novas expressões para as indutâncias constantes nas expressões 16 a 19, em substituição às expressões 11 a 14.

$$L_{aA} = L_{aA} \cos \theta_e = L_{Aa} \quad (16)$$

$$L_{aB} = L_{aB} \cos(\theta_e + 90^\circ) = -L_{aB} \sin \theta_e = L_{Ba} \quad (17)$$

$$L_{bA} = L_{bA} \cos(\theta_e + 90^\circ) = -L_{bA} \sin \theta_e = L_{Ab} \quad (18)$$

$$L_{bB} = -L_{bB} \cos(\theta_e) = L_{Bb} \quad (19)$$

### 3.0 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS DISPOSITIVOS SOB ESTUDO

Esta seção é dedicada aos estudos de desempenho do refrigerador e do condicionador de ar, sob o enfoque dos afundamentos de tensão. Para compatibilizar os trabalhos computacionais com os experimentais, no que tange à operação laboratorial, após ligar o aparelho, este permaneceu funcionando por aproximadamente 5 minutos de maneira a que o gás refrigerante fosse comprimido e conseqüentemente o aparelho se encontrasse funcionando com carga plena. Empregando-se as duas estratégias mencionadas, apresenta-se, neste artigo, apenas um dos casos estudados, para cada um dos equipamentos.

#### 3.1 Desempenho do condicionador de ar perante afundamentos temporários de tensão e interrupções

Em todos os casos estudados, as respostas do condicionador aos afundamentos aplicados foram similares, alterando-se apenas as magnitudes das correntes envolvidas, proporcionalmente à severidade da perturbação.

Os efeitos perceptíveis foram, um aumento da corrente durante e após os afundamentos de tensão.

N figura 4, apresenta-se os oscilogramas de tensão e de corrente do condicionador de ar, obtidas em laboratório, quando o aparelho é submetido a suprimento contendo afundamento temporário de tensão de 30% (70% Vnom), com duração de 10 ciclos.

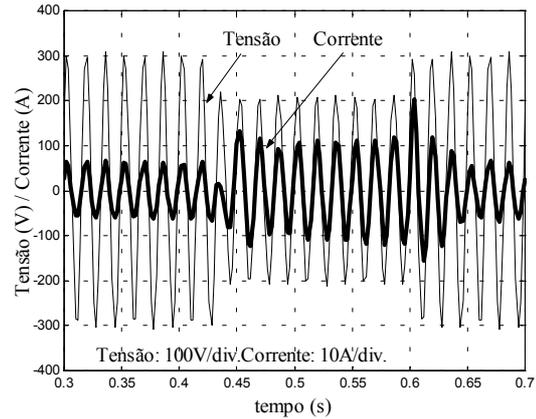


Figura 4 – Tensão e corrente no condicionador de ar. Suprimento contendo afundamento temporário de tensão de 30% - 10 ciclos – Experimental.

A figura 5 é correspondente à anterior, obtida através de simulação computacional. Destaca-se a grande semelhança entre as formas de onda constantes nas duas figuras mencionadas anteriormente.

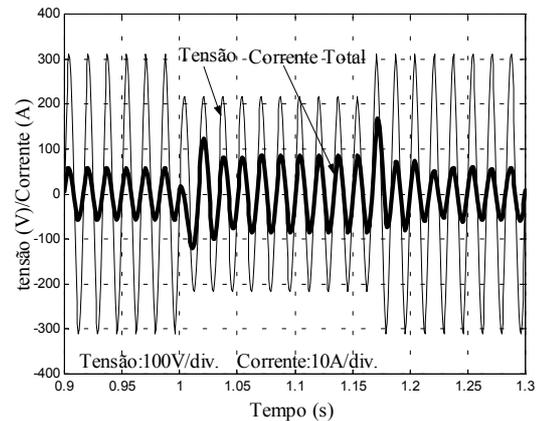


Figura 5: Tensão e corrente no condicionador de ar. Suprimento contendo afundamento temporário de tensão de 30% - 10 ciclos – Computacional.

Observa-se na figura acima que, passado o período transitório, a corrente permanece num patamar superior ao do pré-afundamento, enquanto perdurar o fenômeno. Uma vez normalizada a tensão de suprimento, e passados alguns ciclos, a corrente volta ao nível anterior ao fenômeno. Observam-se, também, os “picos” de corrente com duração de  $\frac{1}{2}$  ciclo, no início e no término do afundamento, com valores RMS 250% e 300% superiores à nominal, aproximadamente. Deve-se salientar que, outros casos experimentais mais severos, envolvendo distintos afundamentos de tensão, podem provocar a atuação do dispositivo de proteção, desligando o condicionador de ar. Exemplo da situação mencionada é o caso de 40% de afundamento com 10 ciclos de duração. A situação anteriormente descrita, forte elevação da

corrente, e a lenta recuperação do dispositivo, constituem um caso crítico para o equipamento, pois pode haver comprometimento da vida útil do mesmo. Além disso, considerando-se que é grande o número de dispositivos operando simultaneamente, deve atentar-se para o impacto que o conjunto pode trazer junto ao sistema de suprimento. No instante do restabelecimento da tensão, a corrente (pós-afundamento) atinge valores superiores aos da partida direta e com duração também superior ao da partida normal.

É importante registrar que, para afundamentos a partir de 40%, ocorre um sensível aumento da vibração do aparelho, o que é indicativo de funcionamento anormal. O desligamento do dispositivo se deu para períodos de 10, 5 e 1 ciclos, correspondentes a 40%, 60% e 70% de afundamento, pela atuação do dispositivo de proteção.

As figuras 7 e 8, ilustrando somente as correntes solicitadas pelo dispositivo, permitem uma melhor visualização do desempenho deste, durante a ocorrência da perturbação sob consideração.

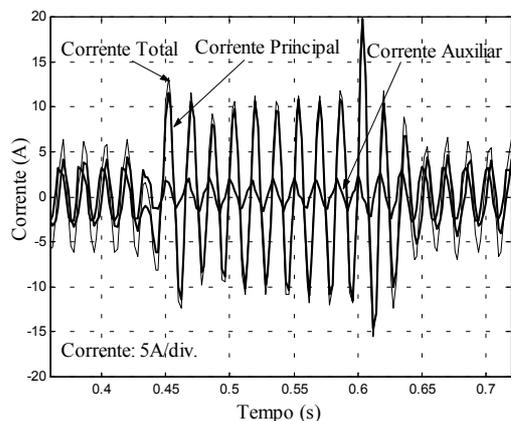


Figura 6: Correntes no condicionador de ar. Suprimento contendo afundamento temporário de tensão de 30% - 10 ciclos – Experimental.

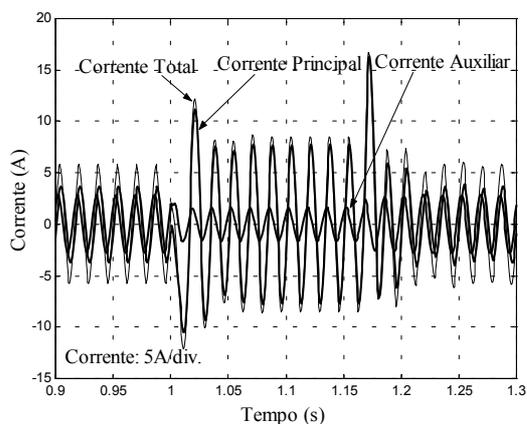


Figura 7: Correntes no condicionador de ar. Suprimento contendo afundamento temporário de tensão de 30% - 10 ciclos – Computacional.

A Tabela 2 sintetiza os resultados experimentais e computacionais decorrentes das investigações realizadas neste caso e serve como base para validação da modelagem.

Tabela 2. Síntese das principais ocorrências observadas sob afundamento de Tensão de 30%, duração de 10 ciclos - Condicionador de ar

Tipo de Estudo	Tensão (V)		Corrente (A)			
	Pré-Distúrbio	Durante o Distúrbio	Pré-Distúrbio o Regime	Durante o Distúrbio		
				Início	Durante	Fim
Experim.	219.2	153.4	4.2	8.9	5.7	13.9
Comput.	220.9	153.9	4.3	8.6	6.06	12.6

### 3.2 Desempenho do refrigerador perante afundamentos temporários de tensão

Analogamente ao condicionador de ar, o refrigerador doméstico foi também submetido a uma série de testes com suprimento contendo afundamentos temporários de tensão, com intensidades e durações diversas.

Na figura 8, podem observar-se os oscilogramas de tensão e corrente do dispositivo, obtidos em laboratório, para um suprimento contendo afundamento de tensão de 40% (60%  $V_{nom}$ ) e 10 ciclos de duração.

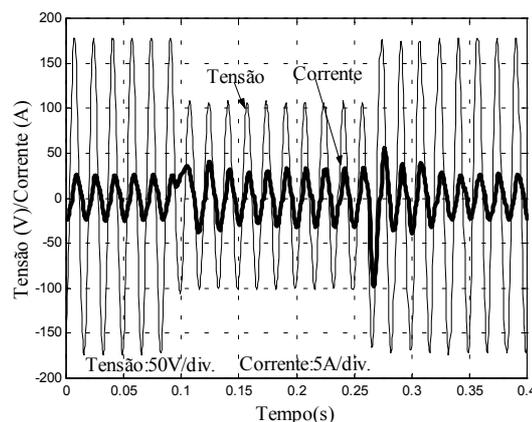


Figura 8: Tensão e corrente no refrigerador. Suprimento contendo afundamento temporário de tensão de 40% - 10 ciclos – Experimental.

Os oscilogramas de tensão e corrente computacionais, correspondentes aos mostrados na figura 8, já referenciada, estão mostrados na figura 9.

As figuras 8 e 9 traduzem o desempenho do refrigerador doméstico perante afundamentos de tensão. Dessas figuras, nota-se que este dispositivo, apesar das significativas diferenças de natureza construtiva e de operação, apresenta uma resposta similar ao condicionador de ar, motivo pelo qual considera-se dispensável uma análise mais detalhada das mesmas. Contudo, o

refrigerador mostra-se menos sensível, em termos das magnitudes de correntes alcançadas.

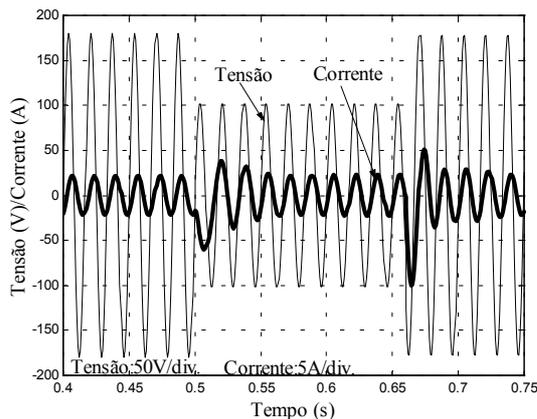


Figura 9 Tensão e corrente no refrigerador. Suprimento contendo afundamento temporário de tensão de 40% - 10 ciclos – Computacional.

Outrossim, estudos laboratoriais realizados, aplicando-se interrupções de tensão de 6 até ciclos, não provocaram o desligamento do aparelho. Já o Condicionador de ar, por ação da proteção interna, é desligado para interrupções superiores a  $\frac{1}{2}$  ciclo.

A Tabela 3 mostra, de forma sintética, os resultados decorrentes das investigações realizadas neste caso, experimentais e computacionais. A correspondência entre os mesmos pode ser prontamente vista, o que serve para validação da ferramenta computacional.

Tabela 3. Síntese das principais ocorrências observadas sob afundamento de tensão de 40%, duração de 10 ciclos - refrigerador

Tipo de Estudo	Tensão (V)		Corrente (A)			
	Pré-Distúrbio	Durante o Distúrbio	Pré Distúrbio	Início	Durante	Fim
Experim.	127	76.2	1.5	2.5	1.45	6.3
Comput.	127	76.2	1.5	2.5	1.45	6.8

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Dos estudos experimentais e computacionais realizados com o refrigerador e condicionador de ar, com respeito a suportabilidade do equipamento, podem ser tiradas as conclusões seguintes:

- As correntes durante e após a aplicação dos afundamentos, sofreram acréscimos. Na situação pós-afundamento, podem atingir-se valores da ordem de grandeza da corrente de partida direta, com duração equivalente a duas vezes o tempo de partida normal do equipamento (amortecimento lento).
- O Condicionador de ar praticamente não possui suportabilidade a interrupções com duração superior a  $\frac{1}{2}$  ciclo.

- O refrigerador, no entanto, apresenta uma suportabilidade bem maior, até mesmo a interrupções. Manteve-se funcionando mesmo para interrupções com duração de até 6 ciclos.
- Para os dois dispositivos estudados, ocorre uma redução da velocidade das máquinas, tanto maior, quanto maior o afundamento aplicado. Restabelecida a tensão a velocidade retorna aos valores pré-distúrbio.
- Observou-se boa correlação física e numérica, entre os estudos experimentais e computacionais, fato este que comprova a eficiência da metodologia computacional implementada.
- Por último, os elevados valores e a lenta recuperação da corrente, no caso de pós-afundamento, indicam a necessidade de estudos voltados a avaliar o impacto do fenômeno dentro do sistema no qual estão interligados.
- Outros testes conduziram a curvas de suportabilidade dos equipamentos testados, as quais são omitidas por questões de espaço. As mesmas podem ser encontradas nas referências [3] e [5].

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dugan, R. et al., "Electrical Power System Quality", McGraw-Hill, USA, 1996.
- [2] Smith, Stephen B. and Standler, Ronald B., "The Effect of Surges on Electronic Appliances", IEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, pp. 1275-1282, 1992.
- [3] Azevedo, A. C., "Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, julho de 2003.
- [4] Manuais da Empresa Tecumseh do Brasil, São Carlos - SP, disponível em [www.tecumseh.com.br](http://www.tecumseh.com.br).
- [5] Castillo, B. C., "Desempenho de Condicionadores de A no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, julho de 2003.
- [6] Krause, P. C., "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-84, No. 11, pp. 1025-1037, 1965.
- [7] Martins, L. Neto, "Avaliação do Desempenho de Motores Monofásicos em Regime de Alimentação Senoidal, Relatório UFU" 1998.