



**GRUPO IV  
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELOS DE AR CONDICIONADO PARA FINS DE ESTUDOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

**Sergio M. R. Sanhueza\***  
UFU

**Geraldo C. Guimarães**  
UFU

**José C. de Oliveira**  
UFU

**Carlos A. G. Medeiros**  
UFU

**Bismarck C. Carvalho**  
UFU

**Fernando L. Tofoli**  
UFU

**Fábio L. Albuquerque**  
UFU

**RESUMO**

A escolha da modelagem adequada para cada carga, ou conjunto de cargas, de um sistema elétrico influi decisivamente nos resultados e conclusões de um estudo de estabilidade e particularmente em estudos de rejeição de carga. Uma modelagem inadequada pode conduzir a conclusões que comprometem a operação dos sistemas, tais como subdimensionamento da compensação capacitiva, definição insuficiente de reserva de potência reativa em geradores e compensadores, definição de esquemas de controle de emergências que não atendem as necessidades dos sistemas, etc. Neste contexto, os aparelhos de ar condicionado merecem uma atenção especial, pois representam uma parcela significativa da carga do sistema elétrico, onde só no setor residencial pode chegar a 25% da demanda, principalmente nas regiões de temperaturas mais elevadas.

Neste artigo serão analisados os modelos matemáticos dos condicionadores tipo janela e verificar, qual deles apresenta melhores resultados para estudos de estabilidade quando comparados com ensaios experimentais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Modelagem de cargas, Condicionador de ar, Afundamento momentâneo de tensão, Variação da frequência.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Um aparelho de ar condicionado utiliza, geralmente, um motor de indução bifásico assimétrico, que é composto por dois enrolamentos, sendo um principal

(operação) e outro auxiliar (partida), conforme mostrado na Figura 1. O capacitor C tem duas funções, auxiliar na partida e corrigir o fator de potência na operação de regime permanente. Como o seu valor é dimensionado para operar na rotação plena do motor, o conjugado de partida é reduzido [1].

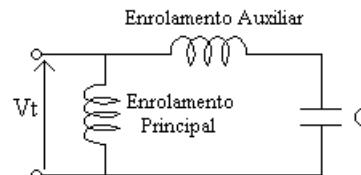


Figura 1: Arranjo do motor utilizado num condicionador de ar tipo janela

Devido a isso, o sistema pode não conseguir reacelerar estes equipamentos após a ocorrência de afundamentos de tensão, pois há uma elevada absorção de corrente de baixo fator de potência, ocasionando acentuada queda de tensão nos alimentadores. Neste contexto diversos trabalhos foram publicados por pesquisadores de várias concessionárias de energia, descrevendo o comportamento do sistema elétrico após as ocorrências de subtensões, sendo que em alguns casos a tensão não pode ser restabelecida, culminando num colapso [2], [3] e [4].

Visando prever estes fenômenos, uma equipe brasileira [5], composta por membros da Eletronorte e da Cemate, sugere a representação da carga do sistema elétrico por uma maior parcela de motores de indução, a fim de estimar com maior fidelidade as variações de tensão e do fluxo de potência na ocorrência de perturbações no sistema elétrico.

## 2.0 - REPRESENTAÇÕES A SEREM ANALISADAS

Para comparar os estudos computacionais com os resultados experimentais, serão analisados três modelos matemáticos no domínio da frequência e um no domínio do tempo que considera o motor de indução bifásico assimétrico com características lineares, sem considerar o efeito da saturação. Os modelos no domínio da frequência consistem na representação por potência constante e de duas representações do EPRI, sendo a polinomial e exponencial.

Tabela 1: Características dos modelos analisados

Modelo	Descrição	Domínio
1	Pot. constante	Frequência
2	Polinomial	Frequência
3	Exponencial	Frequência
4	Dinâmico	Tempo

### 2.1 Representação por potência constante

Para este caso, as potências ativa (P) e reativa (Q) são dadas por:

$$P = P_0 \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \quad (2)$$

onde:

$P_0$  – potência ativa inicial

$Q_0$  – potência reativa inicial

### 2.2 Modelos desenvolvidos pelo EPRI

Estas representações de carga são subdivididas em dois grupos, o polinomial e o exponencial, os quais consideram não somente a variação da tensão, mas também a da frequência.

#### 2.2.1 Exponencial

Nesta representação, as solicitações de potência ativa (P) e reativa (Q) são expressas por:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{pv} \left( \frac{F}{F_0} \right)^{pf} \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{qv} \left( \frac{F}{F_0} \right)^{qf} \quad (4)$$

onde:

V - tensão atual

$V_0$  - tensão nominal

F - frequência atual da tensão da carga

$F_0$  - frequência nominal

pv - sensibilidade de P com a tensão

qv - sensibilidade de Q com a tensão

pf - sensibilidade de P com a frequência

qf - sensibilidade de Q com a frequência

No caso específico dos aparelhos de ar condicionado tipo janela, os parâmetros pv, qv, pf e qf assumem os valores 0,5, 0,6, 2,5 e -2,8 respectivamente [6].

#### 2.2.2 Polinomial

Esta representação foi desenvolvida pelo EPRI em parceria com a *University of Texas at Arlington*, onde as demandas de potências ativa (P) e reativa (Q) são dadas por:

$$P = P_0 [k_1 + k_2(\Delta V) + k_3(\Delta V)^2 + k_4(\Delta V)^3 + k_5(\Delta V)^4 + k_6(\Delta F) + k_7(\Delta V)(\Delta F)] \quad (5)$$

$$Q = Q_0 [x_1 + x_2(\Delta V) + x_3(\Delta V)^2 + x_4(\Delta V)^3 + x_5(\Delta V)^4 + x_6(\Delta F) + x_7(\Delta V)(\Delta F)] \quad (6)$$

onde:

$$\Delta V = \left( \frac{V - V_0}{V_0} \right) \quad (7)$$

$$\Delta F = \left( \frac{F - F_0}{F_0} \right) \quad (8)$$

Os parâmetros dos modelos exponencial e polinomial são encontrados através de ensaios laboratoriais e para os condicionadores tipo janela são indicados os seguintes valores [6]:

Tabela 2: Parâmetros das parcelas ativa e reativa para representação polinomial do EPRI

Pot.	Cte	$\Delta V$	$\Delta V^2$	$\Delta V^3$	$\Delta V^4$	$\Delta F$	$\Delta V \Delta F$
P	0,828	0,3871	1,623	0,000	0,000	0,466	-2,39
Q	0,571	1,4071	3,223	6,340	44,48	-1,60	-3,44

### 2.3 Modelo dinâmico no domínio do tempo

Objetivando investigar o comportamento do condicionador de ar, na referência [7] foi implementado um programa computacional para o motor de indução bifásico assimétrico de dois pólos, no domínio do tempo. O modelo é composto por cinco equações diferenciais e dez algébricas, relacionando o equilíbrio do conjugado e os enlaces de fluxo do circuito da Figura 1.

## 3.0 - CARGA ESTUDADA E METODOLOGIA APLICADA

Os ensaios de laboratório foram realizados com o auxílio de uma fonte especial, programável, da marca HP, modelo 6834A. Esta fonte possibilita o controle da amplitude, frequência e forma de onda da tensão de suprimento. Foram utilizados, ainda, um osciloscópio digital e um PC, conforme pode ser observado na Figura 2.

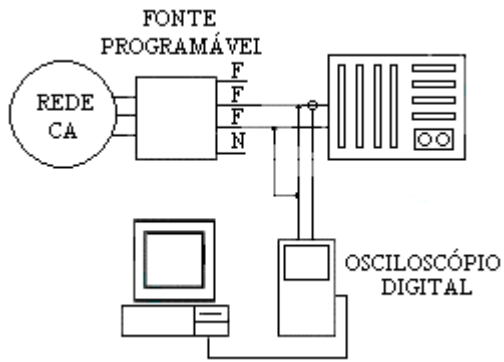


Figura 2 - Diagrama experimental

O aparelho condicionador de ar testado é um equipamento de série, com compressor marca Tecumseh, Modelo AE5470, 220 V. Para calcular os valores instantâneos das potências ativa e reativa, os dados do osciloscópio foram transferidos a um PC e processados por um programa escrito em MATLAB.

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, no caso experimental, foi medida e registrada juntamente com a corrente consumida pelo compressor, portanto apresentando-se maior do que os valores obtidos nas simulações, onde este componente não foi incluído. O compressor e o ventilador consomem juntos 950 W.

Para analisar os modelos descritos anteriormente, utilizou-se o simulador SABER. Este programa possui uma linguagem própria, MAST, e possibilita a inclusão de equações diferenciais para representação de diversos componentes do sistema elétrico.

Para facilitar a análise dos resultados, todas as grandezas são apresentadas em pu, sendo os valores base adotados para tensão e potência 220 V e 950 W, já que estes são as condições nominais de funcionamento da carga.

### 3.1 Casos estudados

Os distúrbios aplicados são similares aos que acontecem no sistema elétrico de potência, principalmente após perda de suprimento de energia e curtos circuitos, sendo distribuídos nos três casos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Casos estudados

Caso	Característica
1	Afundamento de tensão: 10% - 10 ciclos
2	Afundamento de tensão: 30% - 05 ciclos
3	Variação da frequência entre 57 e 63 Hz para as tensões de 0,9, 1,0 e 1,1 pu

#### 3.1.1 Análise do Caso 1

De acordo com a Figura 3, é aplicado um afundamento de tensão de 10% com 10 ciclos de duração. A variação das potências ativa (P) e reativa (Q) em decorrência desta perturbação é mostrada na Figura 4.

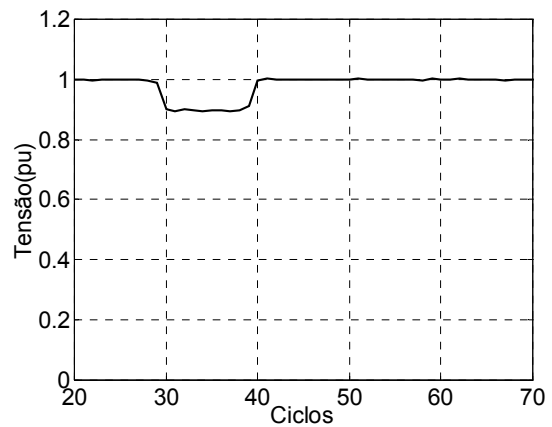


Figura 3: Tensão aplicada ao ar condicionado (caso 1)

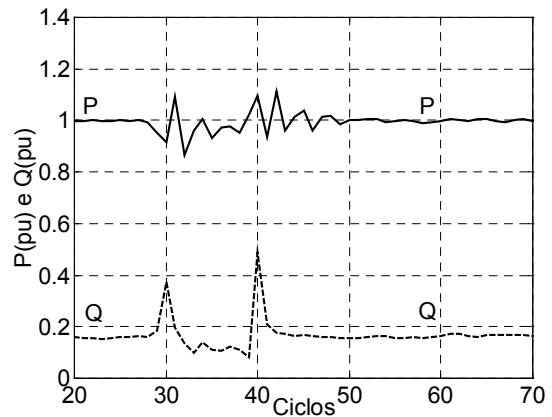


Figura 4: Respostas experimentais de P e Q (caso 1)

É possível observar que a potência ativa é reduzida na ocorrência do afundamento de tensão e em seguida tenta se restaurar apresentando-se bastante oscilatória. E quando a tensão é restabelecida, há um aumento repentino, permanecendo oscilante em torno de dez ciclos.

Já a potência reativa apresenta uma característica mais preocupante, pois no início da perturbação o seu valor atinge 0,37 pu, mais que o dobro do valor nominal, que é de 0,17 pu. Quando a tensão de alimentação é restabelecida, o condicionador de ar chega a solicitar 0,5 pu de potência reativa. Este comportamento é atribuído à redução da rotação do motor, o que exige praticamente uma nova partida e como o torque nestas condições é baixo, há uma elevação da corrente de baixo fator de potência.

Simulando o afundamento de tensão de 10% por 10 ciclos (caso 1), utilizando os modelos estáticos 1, 2 e 3, as potências ativa e reativa se comportam conforme mostrado nas figuras 5 e 6, respectivamente.

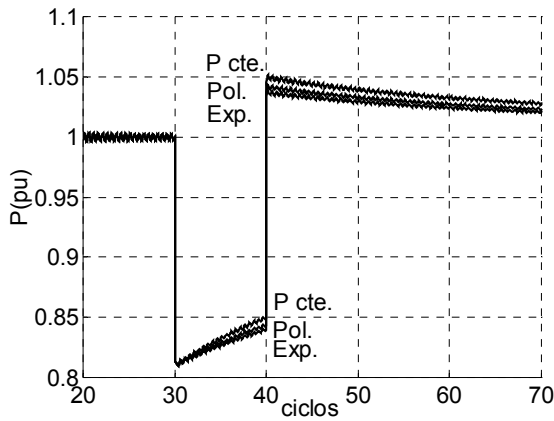


Figura 5: Potência ativa para os modelos estáticos (caso 1)

Pode-se observar na Figura 5, que o comportamento da potência ativa, para os três modelos, não apresentou boa performance, pois mostram uma ligeira tentativa de restauração durante o período do afundamento de tensão, de 0,82 a 0,85 pu. Ainda pode-se observar que mesmo após cessar a perturbação, o valor da potência ativa não consegue voltar ao seu valor inicial em 30 ciclos, sendo que esta restauração demorou cerca de 10 ciclos no ensaio experimental.

A mesma interpretação é válida para a potência reativa, vista na Figura 6, onde também é verificado que os modelos também não responderam bem quantitativamente, pois no ensaio laboratorial foram atingidos picos iniciais de 0,35 e 0,5 pu, enquanto que os três modelo estáticos atingiram valores em torno de 0,23 pu. Assim é possível afirmar que as representações estáticas não são eficientes para analisar a operação simultânea de vários condicionadores de ar.

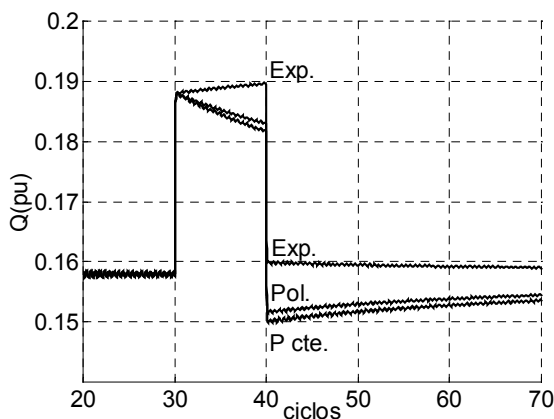


Figura 6: Potência reativa para os modelos estáticos (caso 1)

A Figura 7 mostra o comportamento das potências ativa e reativa para o modelo dinâmico do motor, onde é possível verificar uma melhora na performance destas grandezas. A potência ativa apresentou picos mais altos tanto no início quanto no fim do afundamento de tensão, porém o tempo de

estabilização foi quase igual ao experimental, em torno de dez ciclos.

A potência reativa também apresentou um comportamento parecido com a medição obtida em laboratório, porém os picos atingidos chegaram a 0,35 e 0,3 pu, ficando um pouco abaixo dos valores atingidos no ensaio experimental, que são de 0,37 e 0,5 pu respectivamente. Outra característica a ser observada é o baixo valor atingindo durante o afundamento de tensão, que é de 0,01 pu. Mesmo assim este modelo pode fornecer resultados mais confiáveis para a representação deste tipo de carga no sistema elétrico.

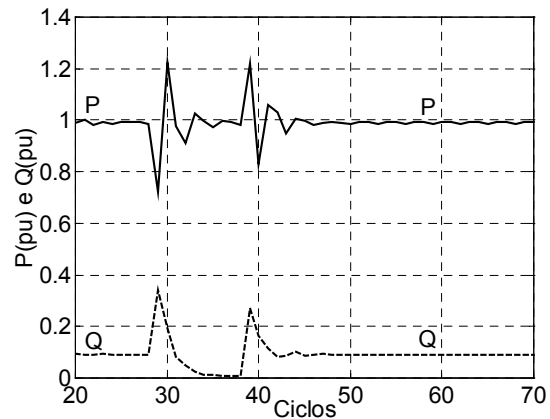


Figura 7: Potências ativa e reativa para o modelo dinâmico (caso 1)

### 3.1.2 Análise do caso 2

A perturbação aplicada agora é bem mais severa que no caso anterior, pois representa uma condição extrema de funcionamento para este tipo de equipamento, pois como verificado na referência [7], aumentando a magnitude, ou a duração da perturbação, a proteção do aparelho o desconecta da rede. A Figura 8 mostra o afundamento de tensão aplicado ao equipamento.

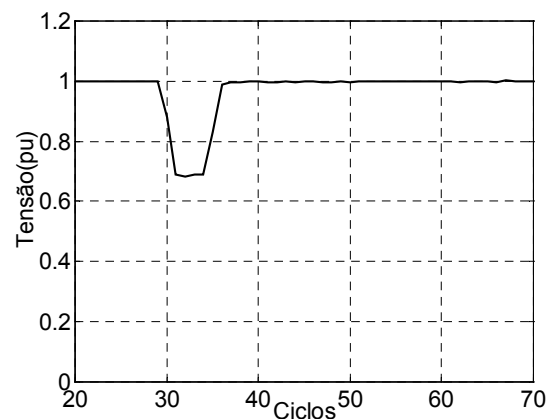


Figura 8: Tensão aplicada ao ar condicionado (caso 2)

É possível ver pela Figura 9 que a potência ativa caiu para 0,52 pu no início do afundamento de tensão e após isso tenta se recuperar. No instante em que a tensão sobe para 1 pu, a potência ativa atinge um pico de 1,85 pu e volta ao seu valor nominal cerca de dez

ciclos após. A potência reativa atinge 0,6 e 0,95 pu no início e no fim da perturbação respectivamente, onde desta vez foram alcançados valores superiores ao triplo do nominal, 0,17 pu.

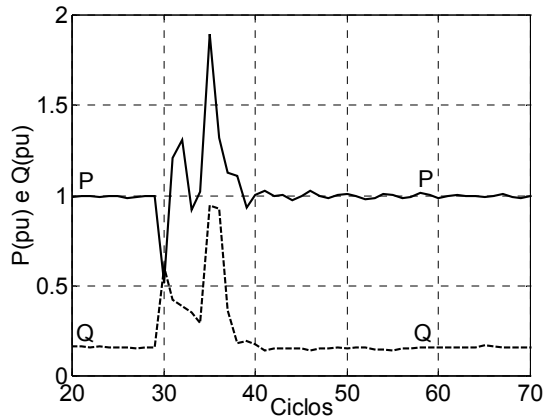


Figura 9: Respostas experimentais de P e Q (caso 2)

Realizando a simulação com as representações estáticas, observa-se na Figura 10 que estes modelos apresentaram praticamente o mesmo comportamento para a potência ativa, não respondendo de acordo com o resultado experimental, principalmente durante e após a perturbação. A mesma análise é válida para o resultado da potência reativa mostrado na Figura 11.

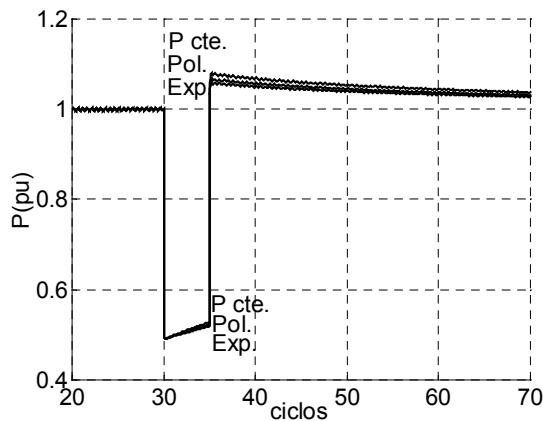


Figura 10: Potência ativa para os modelos estáticos (caso 2)

Analisando o comportamento do modelo dinâmico na Figura 12, a melhora é bastante significativa. Observa-se que o valor da potência ativa foi reduzido para 0,8 pu, enquanto que no resultado experimental este valor atingiu 0,59 pu. Quando a tensão de alimentação retorna o seu valor nominal, foi atingido o valor de 1,82 pu tanto no resultado de simulação como no experimental. O resultado de simulação da potência reativa atingiu valores maiores em relação ao experimental, tanto no início como no fim da perturbação, sendo de 0,9 e 1,2 pu respectivamente, resultando numa diferença de 0,3 pu. Porém a forma com que o seu valor nominal se apresenta é similar ao experimental.

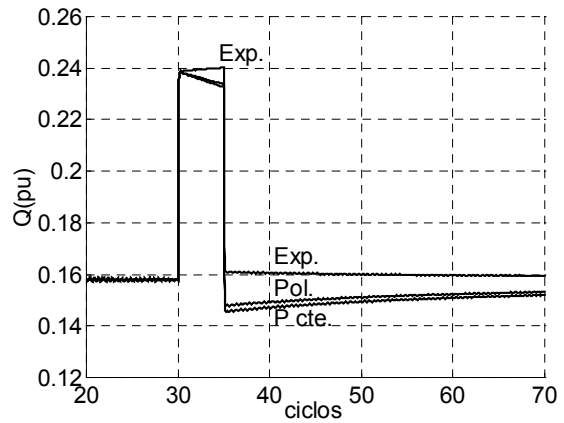


Figura 11: Potência reativa para os modelos estáticos (caso 2)

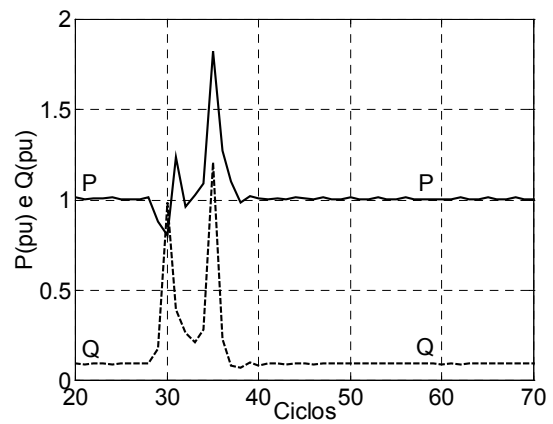


Figura 12: Potências ativa e reativa para o modelo dinâmico (caso 2)

A diferença entre os valores experimentais e os obtidos por simulação através do modelo dinâmico são atribuídos ao motor do ventilador que não está incluído na representação do modelo.

### 3.1.3 Análise do caso 3

Outro fenômeno comum que ocorre na rede elétrica é a variação da frequência, que pode ser originada por faltas, perda de geração ou de carga. Para verificar o comportamento do condicionador perante esta perturbação, fixou-se a tensão nos níveis de 0,9, 1,0 e 1,1 pu e em cada um destes valores, a frequência foi variada de 57 a 63 Hz com o auxílio da fonte programável.

O comportamento das potências ativa e reativa para este caso é comparado somente com o modelo dinâmico, já que este apresentou os melhores resultados para os casos 1 e 2.

De acordo com a Figura 13, as curvas dos três níveis de tensão analisados estão bem próximas uma da outra, evidenciando que a potência ativa apresenta pouca sensibilidade com a tensão, pois nestas condições de funcionamento o torque é diretamente proporcional à potência transferida do estator ao rotor, sendo independente da velocidade, porém é claro que

em níveis mais baixo de tensão estas condições não são válidas, pois haverá travamento do rotor.

A Figura 13 ilustra que a potência ativa é mais sensível com a variação da frequência do que com a tensão, já que a rotação do motor será alterada. O modelo dinâmico apresentou resultados muito próximos dos experimentais, o que mostra que este modelo é válido para analisar o comportamento da potência ativa em função da frequência.

Já a potência reativa apresentou sensibilidade com a tensão e a frequência, porém para a tensão de 0,9 pu, os resultados experimentais foram maiores que os obtidos por simulação. Esta divergência pode ser explicada pela não inclusão do ventilador no modelo dinâmico.

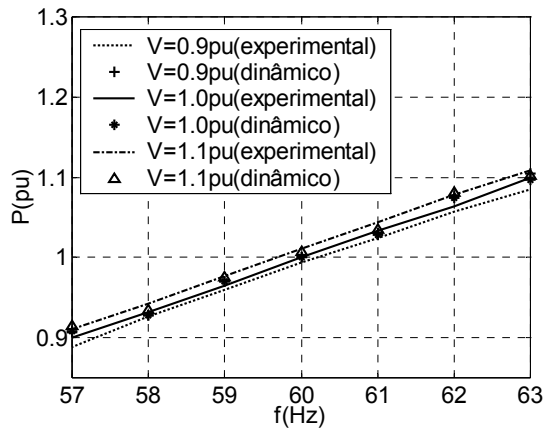


Figura 13: Variação da potência ativa com a frequência para 3 níveis de tensão (caso 3)

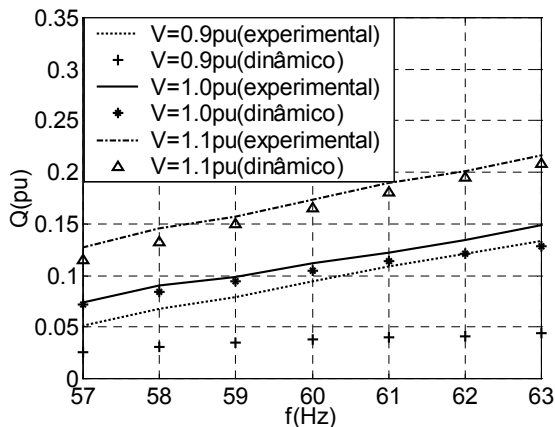


Figura 14: Variação da potência reativa com a frequência para 3 níveis de tensão (caso 3)

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Após os testes experimentais e simulações realizadas com o aparelho condicionador de ar, podem ser extraídas algumas conclusões a respeito do seu impacto no sistema elétrico.

No início e no fim dos afundamentos momentâneos de tensão há uma elevada absorção de potência reativa, chegando ao dobro (caso 1) ou triplo (caso 2) do valor

inicial, principalmente quando a tensão volta ao seu valor nominal. Considerando a operação simultânea de vários equipamentos deste tipo, poderá haver forte sobrecarga no sistema.

Os modelos estáticos de condicionadores de ar não se mostraram eficientes perante afundamentos momentâneos de tensão, tanto de forma qualitativa como quantitativa.

O modelo dinâmico ofereceu boa performance para determinar o comportamento das potências ativa e reativa na ocorrência de afundamentos de tensão, simulando de forma bastante precisa estas variações no decorrer do tempo.

A influencia da frequência do sistema também altera os valores de potência supridos pela rede elétrica. Com a potência ativa, o modelo dinâmico mostrou resultados bem próximos aos experimentais. Já com a potência reativa, houve uma divergência quando o valor da tensão foi de 0,9 pu, porém esta diferença é atribuída a não inclusão do ventilador no modelo dinâmico.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Del Toro, V., Electromechanical Devices for Energy Conversion and Control Systems. Englewood Cliffs, New Jersey, 1968. p. 384;
- [2] Kurita, A.; Sakurai, T., The Power System Failure on July 23, 1987 in Tóquio. Proceedings of the 27<sup>th</sup> Conference on Decision and Control. Austin, Texas, p. 2093-2097, December 1988;
- [3] Williams, B. R.; et al, Transmission Voltage Recovery Delayed by Stalled Air Conditioner Compressors. Transaction on Power Systems, IEEE, vol. 7, No. 3, p. 1173-1179, August 1992;
- [4] Hain, Y. ; Schweitzer, I., Analysis of the Power Blackout of June 8, 1995 in the Israel Electric Corporation. Transaction on Power Systems, Vol. 12, No. 4, p. 1752-1758, November 1997;
- [5] Gerald, W; et al, Modelagem de Cargas a Partir de Testes em Campo, Para Estudos de Desempenho Dinâmico de Sistemas. Anais do III Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, p. 8-14, Brasília, Agosto, 1999;
- [6] Souza, D. R., Análise da Eficácia do Simulador Saber no Estudo da Estabilidade e Colapso de Tensão de um Sistema Elétrico de Potência. Dissertação de Mestrado, Uberlândia-MG, Agosto, 2002;
- [7] Castillo, B. C.; Oliveira, J. C.; Delaiba, A. C., Condicionador de Ar: Impacto da Qualidade da Energia de Suprimento no Desempenho do Equipamento. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática, p.335-340, Natal-RN, Setembro, 2002;