



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

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR CONVENCIONAIS E  
INTELIGENTES NO SISTEMA DE POTÊNCIA**

<b>Sergio M. R. Sanhueza *</b>	<b>Geraldo C. Guimarães</b>	<b>José C. Oliveira</b>	<b>Fábio L. Albuquerque</b>
<b>ETF Palmas</b>	<b>UFU</b>	<b>UFU</b>	<b>ETF Palmas</b>

**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 informe técnico são analisados os desempenhos individuais dos condicionadores tipo convencional e inteligente para prever o comportamento de um sistema de potência contendo este tipo de carga durante perturbações.

**PALAVRAS-CHAVE**

Condicionadores de ar, Modelagem de Carga, Desempenho dinâmico.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O impacto dos condicionadores de ar convencionais em sistemas elétricos foi abordado anteriormente em uma análise enfocando afundamentos de tensão e variação de frequência (1). Este tipo de aparelho emprega um motor bifásico assimétrico com um capacitor de partida. Estes funcionam na mesma potência, independente da temperatura do recinto, pois não existe controle de velocidade para o compressor, o qual é simplesmente ligado e desligado pela atuação de um termostato. Isto não acontece com os inteligentes, que alimentados através de conversores de frequência, aumentam ou diminuem a velocidade do compressor automaticamente de acordo com a temperatura desejada. Desta forma, quando a temperatura está alta, a velocidade aumenta, aumentando o consumo de energia elétrica. Por outro lado quando a temperatura atinge valores mais baixos, a velocidade diminui, contribuindo assim para a redução do desperdício de energia. Alguns fabricantes conseguem uma economia de energia de 13% ao ano em relação aos equipamentos de mesma capacidade. Isto porque a partida é feita com apenas 30% da capacidade nominal do equipamento, uma partida por dia e o compressor só vai atingir 100% do consumo caso haja necessidade. A regulagem da velocidade em função da temperatura é realizada muitas vezes através de lógica fuzzy (2). Este trabalho visa realizar uma comparação quantitativa e qualitativa entre as performances dos condicionadores convencionais e inteligentes, cujos resultados servem para prever qual tipo de aparelho afetaria mais o sistema de potência em caso de alguma perturbação.

## 2.0 - ASPECTOS GERAIS SOBRE CONDICIONADORES DE AR

Dois aspectos importantes sobre os condicionadores de ar são as características do compressor e da temperatura interna do ambiente. Estes são tratados a seguir.

### 2.1 Compressor

Corresponde ao elemento principal destes equipamentos, pois comprime o gás refrigerante responsável pela troca de calor. Para o motor, este tipo de carga apresenta comportamento diferente durante a partida e em regime permanente.

Na partida a característica torque x velocidade é quadrática com um torque inicial de 30%. Porém quando o equipamento já está em seu funcionamento nominal, o torque resistente se apresenta constante em relação à velocidade, devido à compressão do gás refrigerante.

Os compressores apresentam baixa inércia e como o torque resistente é constante, em regime permanente, estes equipamentos tendem a solicitar mais potência do sistema durante as perturbações.

### 2.2 Temperatura interna

O modelo matemático que representa o funcionamento deste tipo de equipamento (3) é descrito pela seguinte equação.

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\frac{1}{C_t R_t} \left[ \theta(t) - \theta_a + W(t) R_t P_{\text{comp}} \right] \quad (1)$$

onde:

- $\theta(t)$ : Temperatura interna do recinto [°C];
- $\theta_a$ : Temperatura ambiente [°C];
- $t$ : Tempo [h];
- $C_t$ : Capacidade térmica [kWh/°C];
- $R_t$ : Resistência térmica;
- $W(t)$ : Estado do termostato (0→desligado ou 1→ligado)
- $P_{\text{comp}}$ : Potência do compressor [kW].

Para implementar esta equação nos modelos de motores existentes, basta escrever a potência do compressor como o produto do torque e velocidade do eixo.

O produto  $C_t R_t$  é a constante de tempo térmica, que neste caso é dada em horas, pois o seu valor é sempre alto.

## 3.0 - CONDICIONADOR DE AR TIPO CONVENCIONAL

Este aparelho apresenta o seguinte circuito equivalente (1):

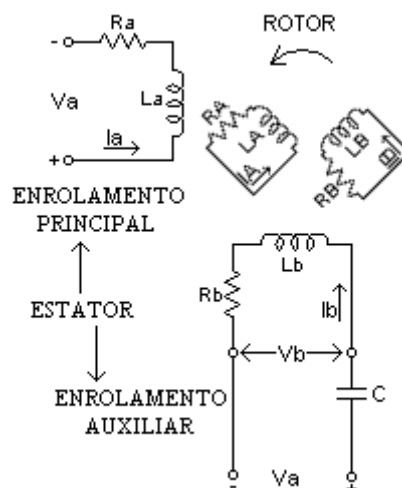


FIGURA 1 – Circuito equivalente do condicionador de ar tipo convencional

Conforme mostrado na Figura, o estator é composto por dois enrolamentos, sendo um principal para operação e outro auxiliar para partida. 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. Na seqüência estão descritos os parâmetros do circuito equivalente:

Motor de indução bifásico assimétrico:  $V_a=220V$ ,  $P=1CV$ , 2 pólos,  $r_a=3,86\Omega$ ,  $x_a=5,44\Omega$ ,  $r_b=11,49\Omega$ ,  $x_b=3,44\Omega$ ,  $r_r=4,5$ ,  $x_r=2,5\Omega$ ,  $J=0,0015kg.m^2$ ,  $C=17,5\mu F$ .

#### 4.0 - CONDICIONADOR DE AR TIPO INTELIGENTE

Corresponde a um melhoramento do modelo anterior, sendo usado um motor de indução trifásico de 3 CV, alimentado por um conversor de frequência com entrada monofásica.

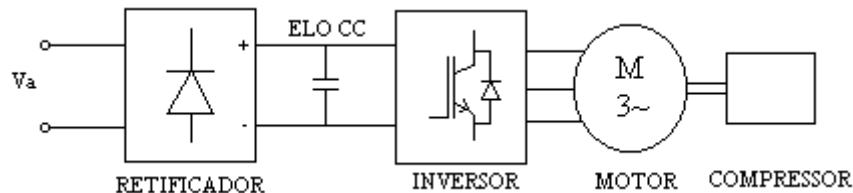


FIGURA 2 – Estrutura do condicionador de ar tipo inteligente

No Brasil, ainda não um levantamento do percentual deste tipo de aparelho, mas obteve mais destaque na crise energética do ano de 2001, pois os consumidores passaram a ver uma alternativa de economia no consumo de energia. No entanto há uma dificuldade destes equipamentos liderarem as vendas no mercado brasileiro em função de terem um custo maior em relação ao convencional. No entanto, uma pesquisa realizada em 1999 constatou que no mercado japonês já havia 86% deste tipo de condicionador (4).

Para este trabalho serão analisados dois tipos deste condicionador, o primeiro apenas realiza as funções comuns de um conversor de frequência com comutação PWM, enquanto que o segundo produzido na Ásia pela Keling Electric (2) tem uma estratégia de proteção contra subtensões ocorridas na rede elétrica.

Esta proteção consiste em diminuir a frequência de operação do motor na ocorrência de uma redução da tensão do elo CC. Com isto a relação Volts/Hertz é mantida constante, o que por sua vez preserva o torque eletromagnético no motor de indução. Além disso, com a diminuição da frequência, há redução na velocidade do motor, o que ocasiona a diminuição da potência mecânica. Isto representa um alívio para o sistema, visto que o equipamento diminui a potência quando o nível de tensão da rede elétrica está debilitado.

De forma a facilitar a análise dos resultados, o primeiro tipo receberá a denominação normal, enquanto que o segundo recebe a denominação de adaptado.

Os parâmetros do conversor e do motor de indução utilizados nas simulações estão descritos a seguir:

Conversor de frequência: controle PWM senoidal, frequência de chaveamento de 2 kHz e capacitor do elo CC de  $1470\mu F$ ;

Motor de indução:  $V_a=220V$ ,  $P=3CV$ , 4 pólos,  $r_s=2,3191\Omega$ ,  $x_s=2,3487\Omega$ ,  $r_r=2,29\Omega$ ,  $x_r=3,5086\Omega$ ,  $x_m=83,1814\Omega$ ,  $J=0,0067kg.m^2$ .

#### 5.0 - METODOLOGIA E ANÁLISE

A análise e comparação do desempenho dos dois tipos de condicionadores de ar são realizadas através dos resultados de simulação computacional utilizando a plataforma SABER<sup>®</sup>, onde os respectivos modelos de motores e conversor de frequência já foram validados em trabalhos anteriores (5,6).

Embora as potências dos condicionadores sejam diferentes, a análise comparativa é realizada com as unidades em pu, considerando as respectivas potências nominais como valores base.

Para o cálculo das potências ativa e reativa utiliza-se o método de Budeanu, pois o conversor de frequência é uma carga não linear. Assim as componentes das potências aparente, ativa e reativa são dadas por:

$$S = \sum_{i=1}^N V_i I_i \quad (2)$$

$$P = \sum_{i=1}^N V_i I_i \cos \phi_i \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N V_i I_i \sin \phi_i \quad (4)$$

onde:

$V_i$ : i-ésima componente harmônica de tensão;

$I_i$ : i-ésima componente harmônica de corrente;

$\phi_i$ : defasagem entre as i-ésimas componentes de tensão e corrente.

Estes valores são obtidos aplicando o algoritmo da FFT (Fast Fourier Transformer) a cada ciclo. Desta forma realizou-se um roteiro de cálculo em MATLAB<sup>®</sup>, que possui como dados de entrada os valores instantâneos de tensão e corrente, extraídas do simulador SABER<sup>®</sup>, e como resultados são obtidos os valores das potências ativa, reativa e aparente. O fator de potência é dado por:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Desenvolvendo esta expressão para cargas lineares, o fator de potência resulta em  $\cos \phi_1$ , que também é chamado de fator de deslocamento. Para cargas não lineares, onde há distorção de corrente e que a tensão seja perfeitamente senoidal, o fator de potência é dado por:

$$FP = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cos \phi_1 \quad (6)$$

onde:

$I_1$ : Componente fundamental da corrente;

$I_{RMS}$ : Corrente em valor eficaz;

$\phi_1$ : Defasagem entre as componentes fundamentais de tensão e corrente;

Os casos escolhidos para comparação compreendem: regime permanente, um afundamento temporário de tensão e uma interrupção, descritos na tabela a seguir:

TABELA 1 – Casos estudados

Caso	Descrição
1	Regime permanente
2	Afundamento de tensão: 30% - 30 ciclos
3	Interrupção: 100% - 05 ciclos

A norma IEC 61000-4-11, edição 03/2001, estabelece o nível das perturbações a serem aplicadas em ensaios experimentais para fins de suportabilidade, o que não é o objetivo deste estudo. Assim decidiu-se neste trabalho submeter os equipamentos aos distúrbios da tabela anterior, pois os casos 2 e 3 são comuns de ocorrer no sistema elétrico, devido às faltas e outros problemas inerentes.

O primeiro caso analisa o comportamento dos condicionadores sob o enfoque da qualidade da energia elétrica comparando a distorção harmônica e o fator de potência. Os dois casos seguintes retratam o comportamento das cargas do ponto de vista da dinâmica do sistema de potência, aplicando perturbações na tensão de suprimento. Em todos os casos, cada aparelho é analisado individualmente e para obter conclusões do comportamento em um sistema de potência serão analisadas as variações das potências ativa e reativa, pois são estas que contribuem para um resultado global.

## 6.0 - RESULTADOS E COMENTÁRIOS

### 6.1 Análise do Caso 1 - Regime Permanente

Antes de verificar o comportamento de cada equipamento perante perturbações é interessante observá-lo em regime permanente.

A principal diferença entre os equipamentos é a distorção harmônica na corrente de alimentação, pois o condicionador inteligente tem um retificador na entrada, que por sua vez produz várias componentes harmônicas, resultando assim numa distorção de 114,14%, enquanto que o condicionador convencional apresenta uma distorção de 0,39%. Cabe ressaltar que na modelagem deste aparelho não foram considerados os efeitos de saturação e a não linearidade do entreferro, porém a diferença não é grande em comparação com valores experimentais (5).

Em função da elevada distorção de corrente, o fator de potência do condicionador equipado com conversor de frequência é muito baixo, ficando em 0,59, ao contrário do condicionador convencional, que é de 0,99. Porém o fator de deslocamento é alto para ambos, ficando praticamente unitário. Estes resultados estão resumidos na Tabela 2.

TABELA 2 - Análise em regime permanente

	DHT(%)	FP	$\cos\phi_1$
<b>CONVENCIONAL</b>	0,39	0,99	0,99
<b>INTELIGENTE</b>	114,14	0,59	0,99

Analisando esses valores, observa-se que o condicionador convencional é mais vantajoso no que se refere à distorção harmônica e fator de potência.

### 6.2 Análise do Caso 2 – Afundamento de Tensão

A Figura 3(a) mostra o afundamento de 30% com duração de 30 ciclos, que é aplicado aos equipamentos.

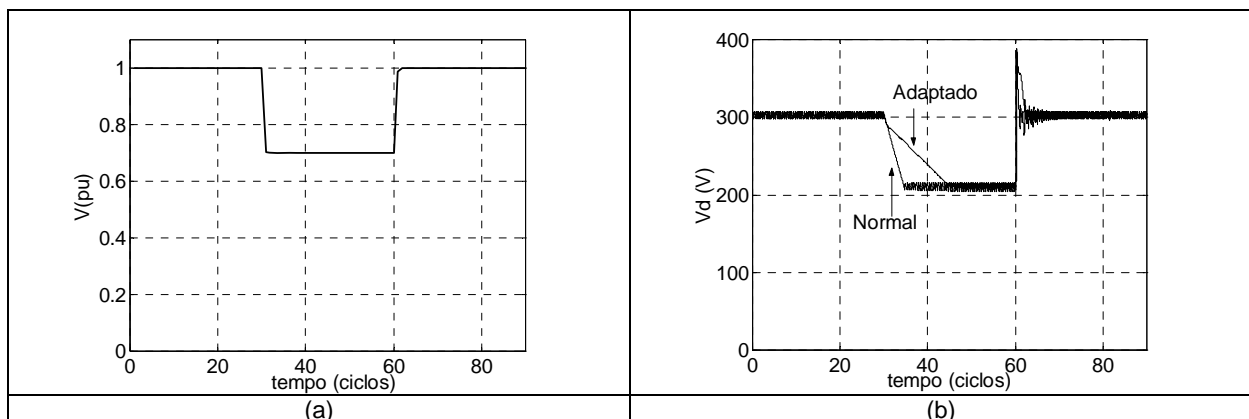


FIGURA 3 - (a) Perturbação aplicada (b) Tensão no elo CC do condicionador tipo inteligente - caso 2

A Figura 3 (b) mostra o comportamento da tensão do elo CC dos condicionadores tipo inteligente, onde se verifica que no modo adaptado a descarga do capacitor é mais lenta, pois durante a perturbação há redução da potência mecânica no eixo do motor. Isto também influi no comportamento das potências ativa e reativa, conforme mostra a Figura 4.

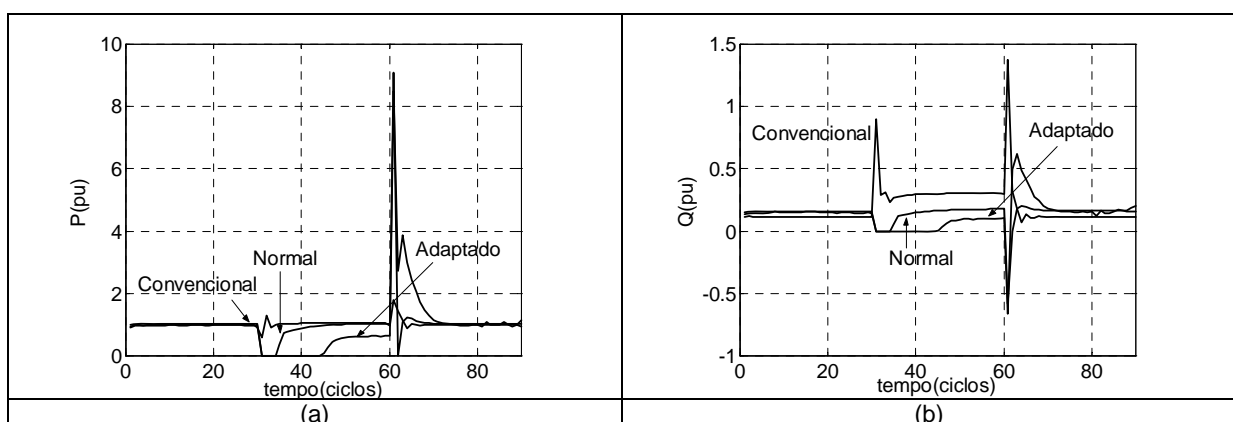


FIGURA 4 - Comparação entre os três condicionadores: (a) Potência ativa (b) Potência reativa - caso 2

Após a perturbação, o condicionador convencional continua a solicitar praticamente a mesma potência ativa da rede elétrica para manter o seu funcionamento. Deve-se ressaltar que a carga tipo motor tende a se comportar como potência constante.

Para o condicionador tipo inteligente, verifica-se que no início da perturbação que a solicitação de potência ativa é nula. Isto ocorre porque o capacitor sustenta a tensão momentaneamente, fazendo com que esta fique com valor mais alto que a da rede elétrica, fazendo com que os diodos do retificador fique polarizados reversamente, o que resulta numa corrente nula.

Com relação ao modo normal, o tempo de polarização reversa é menor, pois a descarga do capacitor é mais rápida. Quando o tempo de descarga é superado, a solicitação de potência ativa da rede elétrica volta a ser praticamente de 1pu.

No modo adaptado a descarga do capacitor é mais lenta, o que leva a um tempo maior de em que a solicitação de potência ativa é nula. Quando termina a polarização reversa, o sistema alimenta o aparelho com potência abaixo de 1pu, pois enquanto dura a perturbação a potência solicitada pelo compressor é menor.

No final da perturbação, os três equipamentos têm um aumento súbito na potência ativa. No caso do condicionador convencional, isto ocorre devido ao restabelecimento da tensão de alimentação, porém este efeito é bem mais acentuado para o condicionador inteligente, pois além do motor voltar a funcionar com tensão plena, ocorre a recarga do capacitor do elo CC, cujo fenômeno se assemelha a um curto circuito, o que faz com que o pico ultrapasse 8pu.

Analisando a potência reativa, verifica-se que o condicionador convencional aumenta a solicitação durante a toda perturbação e além disso ocorrem elevados picos tanto no início quanto no fim. 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.

No caso do condicionador inteligente, no início da perturbação a solicitação é nula pelas mesmas razões ditas anteriormente, para os modos normal e adaptado.

É interessante observar que no final da perturbação o fluxo de reativos é negativo, o que é atribuído à recarga do capacitor.

### 6.3 Análise do Caso 3 - Interrupção

A Figura 5 (a) mostra uma interrupção no fornecimento de energia com duração de 5 ciclos, que foi aplicada neste caso de estudo.

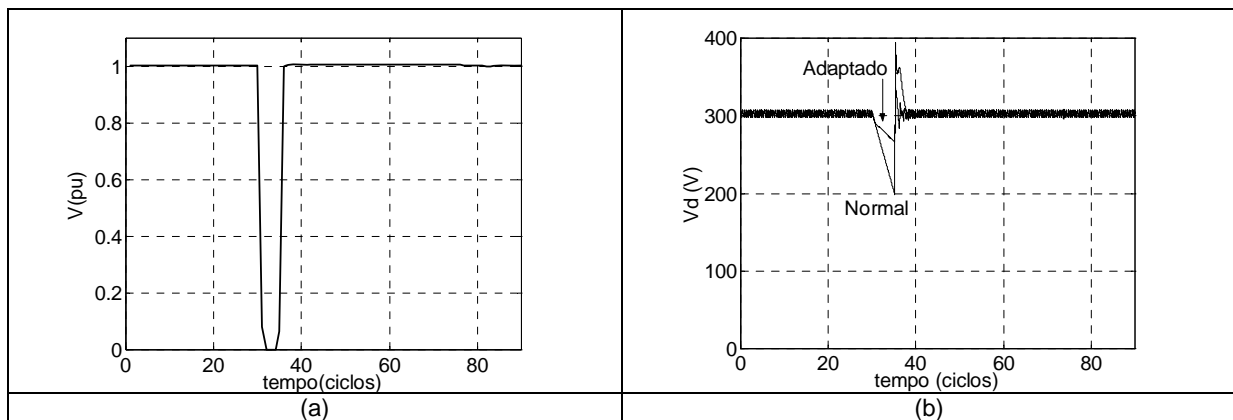


FIGURA 5 – (a) Perturbação aplicada (b) Tensão no elo CC do condicionador tipo inteligente - caso 3

A Figura 5 (b) mostra que como no caso anterior, a tensão do elo CC diminui mais lentamente, pois com a redução da carga mecânica, a solicitação da energia acumulada no capacitor é menor e isto reflete no comportamento das potências ativa e reativa, mostradas na Figura 6.

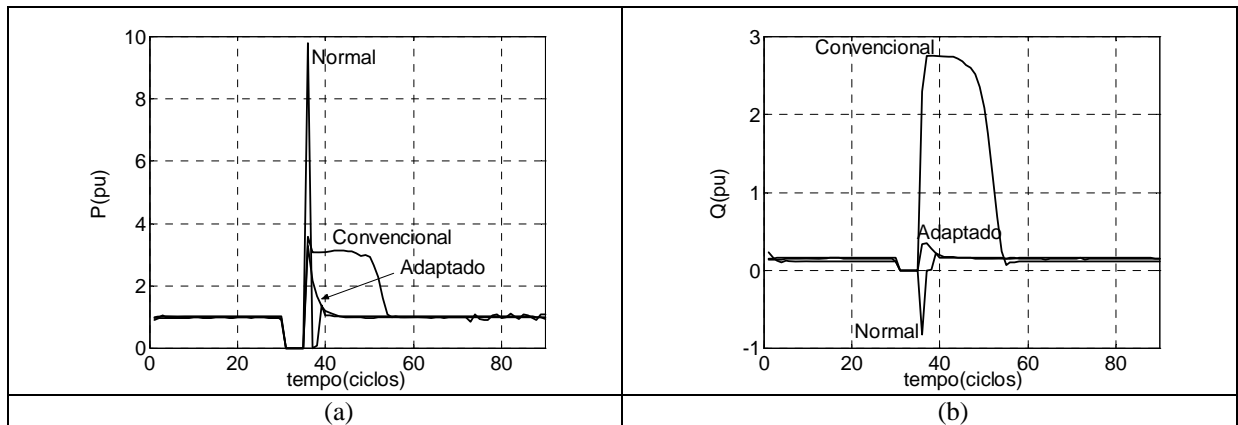


FIGURA 6 - Comparação entre os três condicionadores: (a) Potência ativa (b) Potência reativa – caso 3

Analisando a potência ativa do condicionador tipo convencional, observa-se que no restabelecimento da tensão de suprimento, há uma elevada sollicitação que supera 3pu por mais de 20 ciclos. Este tempo de restauração é mais longo que o do condicionador inteligente por causa da baixa inércia e assim o comportamento é semelhante a uma nova partida.

O condicionador inteligente operando no modo normal apresenta um alto pico, que supera 9pu no fim da perturbação devido a recarga do capacitor. Já no modo adaptado, o pico alcançado é menor, em função da redução da potência mecânica que, conseqüentemente, sollicita menos energia acumulada no capacitor.

O processo é semelhante ao se analisar o comportamento da potência reativa. O condicionador tipo convencional sollicita uma grande quantidade de reativos e por um longo tempo, pois após este tipo de perturbação, o comportamento é semelhante ao de uma partida.

O condicionador inteligente, operando no modo normal, passa a fornecer reativos ao sistema em função da recarga do capacitor.

Para a operação adaptada, não há inversão do fluxo de reativos, pois além da descarga do capacitor ser menor, o sistema precisa restaurar a velocidade do motor, como se houvesse uma nova partida, assim o sistema precisa fornecer potência reativa adicional, que neste caso é de 0,35pu, representando 1,25 vezes o valor nominal.

#### 7.0 - INFLUENCIA NA TEMPERATURA AMBIENTE

Considerando um recinto, cuja temperatura inicial seja de 30°C, com constante de tempo de 3h e no qual está instalado um condicionador de 2CV, a temperatura interna se comporta de acordo com a equação (1), cujo resultado está na Figura 7 (a). Observa-se que a temperatura cai exponencialmente.

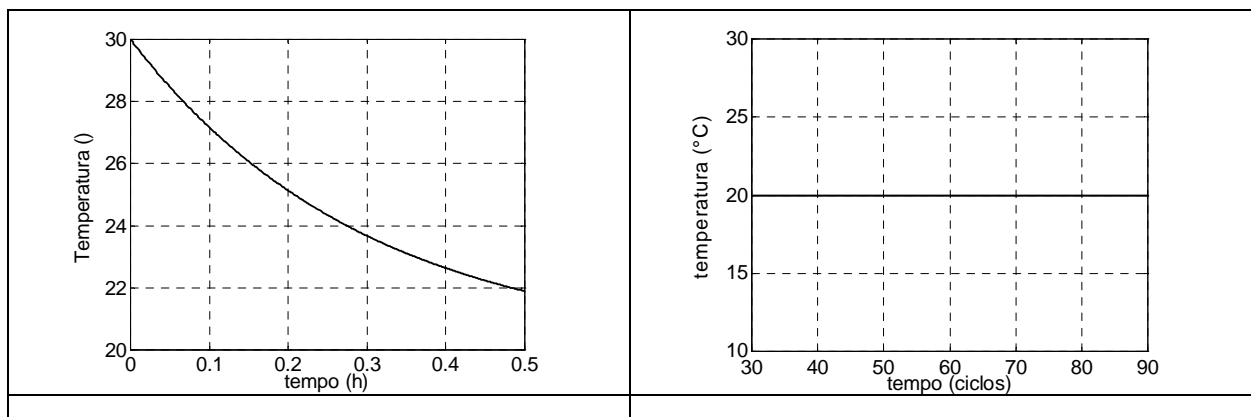


FIGURA 7 – (a) Temperatura após a partida (b) Temperatura durante os casos 2 e 3.

Nos casos 2 e 3 foi considerada uma temperatura inicial de 20°C e como estes tipos de perturbações são de curta duração a temperatura interna do recinto não sofre alteração, conforme mostra a Figura 7 (b). Isto ocorre porque além da potência de suprimento voltar ao valor nominal, a constante de tempo térmica é muito alta, que neste caso é de 3h.

## 8.0 - CONCLUSÃO

Através dos resultados das potências ativa e reativa é possível concluir que um sistema estaria menos debilitado na presença de condicionadores convencionais, enquanto que com os convencionais oferecem um prejuízo maior. Conforme apresentado anteriormente, o condicionador de ar tipo inteligente é atrativo para o controle de temperatura e também para o uso racional de energia, pois a partida não precisa ser feita a plena carga e também há o ajuste da potência necessária de acordo com a temperatura do ambiente. As suas únicas desvantagens, perante o condicionador do tipo convencional, são a elevada distorção harmônica e um custo maior para o usuário.

Outra melhoria apresentada pelo condicionador inteligente em relação ao convencional é o comportamento durante um afundamento de tensão, pois o convencional absorve elevada quantidade de potência ativa e reativa, enquanto que o inteligente mantém o fluxo de potência estabilizado em função do elo CC. Porém quando a tensão da rede elétrica se normaliza, há um elevado pico de potência ativa devido à recarga do capacitor. Estes equipamentos utilizam um conversor de frequência com modulação de largura de pulsos senoidal e o estudo envolveu a análise de dois tipos, sendo um desprovido de proteção contra subtensões, já amplamente estudado em trabalhos anteriores e outro que realiza esta função mantendo a relação VOLTS/HERTZ constante para o motor. Isto é feito monitorando a tensão do elo CC de tal forma que se calcule o valor da frequência de operação, mantendo assim o torque constante.

Este equipamento operando no modo adaptado tem a vantagem de reduzir a potência transferida à carga quando a tensão do elo CC é reduzida. Entretanto, um condicionador de ar, que utilize esta técnica, absorve maior potência do sistema quando a tensão da rede elétrica é restaurada, pois se trata de um efeito similar de uma nova partida. Mesmo assim o seu uso é recomendado, pois no momento em que o sistema está debilitado a potência demandada é menor.

Para um trabalho posterior é conveniente representar um sistema de potência composto por vários tipos de carga, entre as quais os condicionadores analisados aqui e analisar o comportamento de geradores e linhas na ocorrência de perturbações.

## 9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Sanhueza, S.M.R. et alli, "Análise de Modelo de Ar Condicionado para Fins de Estudos de Sistemas Elétricos", Anais do XVII SNPTEE, 2003.
- (2) Sheng, S. G. et alli "Advanced and Economical Household Inverter Air Conditioner Controller Solution" Proceedings of the International IC'99, pp. 83-92
- (3) UÇAK, C, et alli. "The effects of Load Parameter Dispersion and Direct Load Control Actions on Aggregate Load". Proceedings of International Conference on Power System Technology POWERCON'98, p. 280-284, Vol. 1. August 1998
- (4) DONLON, J. et alli "Power Modules for Appliance Motor Control" New York Industry Applications, 2002. 26-34p.
- (5) Castillo, B. C. et alli "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-2002.
- (6) Leão P. C. et alli "A computational and Practical Analysis of VSI-PWM Frequency Converter under Balanced and Unbalanced Voltage Sag" Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Harmonic and Power Quality, 2002. Rio de Janeiro-RJ.

## 10.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.