



## **Efeito de Bancos de Capacitores na Amplificação de Harmônicos em Sistema de Distribuição**

**Msc. Nelson Clodoaldo de Jesus**  
AES Sul - Planejamento e Engenharia  
[nelson.jesus@aes.com](mailto:nelson.jesus@aes.com)

**Msc. Hermes R.P.M. de Oliveira**  
AES Sul - Planejamento e Engenharia  
[hermes.oliveira@aes.com](mailto:hermes.oliveira@aes.com)

### **RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise do monitoramento e influência de bancos de capacitores em derivação na degradação da forma de onda da tensão devido à presença de harmônicos. Serão apresentados resultados de simulação e de medições com instrumentos específicos da qualidade de energia. Descrevem-se também as etapas de investigação do caso com problemas de amplificação harmônica em um sistema industrial, com as respectivas alternativas de solução para as distorções harmônicas significativas.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Harmônicos, Redes de Distribuição, Ressonância, Banco de Capacitores.

### **1. INTRODUÇÃO**

É notório o elevado crescimento de cargas controladas que solicitam correntes não lineares, as quais circulam pelo sistema elétrico, resultando em distorções nas formas de onda. Nos USA, estima-se que num período de 10 anos as cargas eletrônicas foram duplicadas com previsão de 90% no ano de 2010. Devido as vantagens de conforto, racionamento e entretenimento, o desenvolvimento de técnicas controladas em diversos modelos de cargas, tornam-se cada vez mais atraentes. Sabe-se que devido à proliferação destas cargas, há tendência de crescimento do impacto harmônico de um modo geral. Este trabalho se refere a um estudo de caso em um sistema industrial com problemas em máquinas sensíveis e bancos de capacitores devido às distorções harmônicas. Apresentam-se os resultados obtidos com a proposta de alteração no sistema quanto à conformidade da onda de tensão, especialmente sobre o aspecto de harmônicos, conjuntamente a recomendações visando à redução dos níveis de distorção. Com o objetivo de redução das tensões harmônicas no sistema que atende a uma indústria do setor de borrachas, realizou-se o estudo tomando como base diversas medições tanto no sistema de média tensão, quanto no lado da baixa tensão, junto aos secundários dos transformadores e principais cargas da planta industrial. Após a avaliação dos resultados das medições preliminares e estudo detalhado do sistema por meio de sua modelagem e simulações, foi proposta a alteração na operação do sistema de distribuição, com o desligamento de um dos bancos de capacitores do sistema.

Com essa alternativa, obteve-se uma atenuação da interação entre as correntes harmônicas demandadas pelo conjunto de cargas e as impedâncias do sistema. Deste modo, considera-se a intervenção e ação efetiva no sistema por meio de resultados finais de monitoramento.

## 2. HARMÔNICOS

Harmônicos são componentes de frequências adicionais presentes nas tensões ou correntes, sendo múltiplos da frequência fundamental. Componentes cujas frequências não são múltiplas inteiras da fundamental são denominados de inter-harmônicos. A distorção de corrente é resultado da característica não-linear da carga. Já a distorção harmônica de tensão é um resultado da interação de correntes distorcidas com a impedância do sistema. A figura 1 mostra este conceito de modo simplificado.

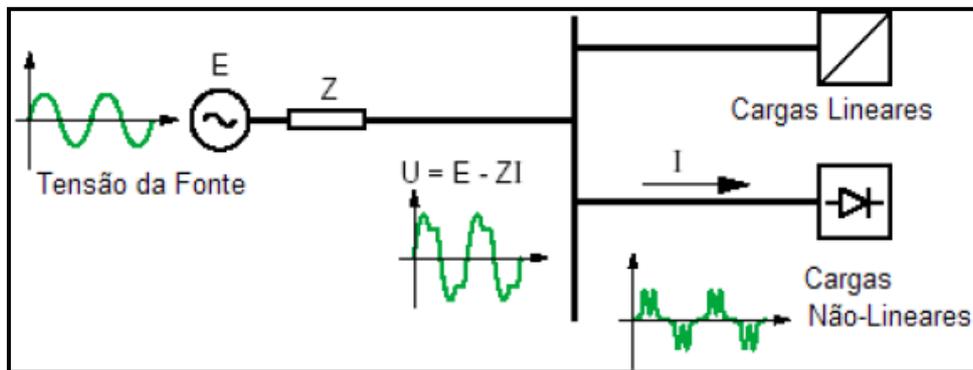


Figura 1 - Degradação da tensão por injeção de harmônicos (carga não-linear)

As expressões para o cálculo das grandezas de distorção harmônica total e individual da tensão são apresentadas como se segue. De maneira análoga, pode-se determinar as distorções de corrente usando as mesmas relações.

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

$DIT_h\%$  - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

$V_h$  - Tensão harmônica de ordem h

$V_1$  - Tensão fundamental

DTT - Distorção harmônica total de tensão

h - Ordem harmônica

### 3. LIMITES RECOMENDADOS

Os procedimentos de distribuição (ProDist)<sup>1</sup> estão em fase final de elaboração para encaminhamento a audiência pública, tratando da qualidade de energia no que tange ao serviço e produto. Sob o aspecto de distorção harmônica, os valores globais de referência que estão sendo recomendados (minuta do procedimento) são mostrados a seguir. Segundo o mesmo procedimento, devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais<sup>1</sup>. Em função deste trabalho, apresentam-se em conjunto na tabela 1, somente os limites individuais para o quinto harmônico, componente de maior interesse e relacionada a amplificação dos níveis de distorção total no caso estudado.

**Tabela 1 - Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais e Valores Individuais para o Harmônico de Quinta Ordem (Em Porcentagem da Fundamental)**

<i>Tensão nominal do Barramento</i>	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i>	<i>Distorção Harmônica Individual (DIT<sub>5H</sub>) [%]</i>
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10	7,5
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8	6
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6	4,5
$69 \text{ kV} < V_N \leq 138 \text{ kV}$	3	2,5

Em relação aos limites internacionais, os valores que estão sendo propostos são ligeiramente superiores. Como exemplo, no documento atual do Prodist, a distorção limite para a baixa-tensão é de 10%, superiores aos valores de 5% e 8%, respectivamente indicados nas normas do IEEE e IEC<sup>2,3,5</sup>. Por outro lado, não se tem referência sobre limites de distorção de corrente, o que induz a considerar que para limitação das tensões harmônicas, as concessionárias devem verificar as características e influência dos harmônicos, acompanhando a injeção e penetração das correntes, bem como a evolução dos harmônicos em seu sistema, na solução de alternativas para a manutenção da compatibilidade da operação. Este caso é um exemplo de alternativas para melhoria da qualidade de energia. A seguir, apresentam-se algumas considerações básicas sobre o fenômeno de ressonância, dando ênfase ao comportamento da impedância do sistema em função da frequência, ou seja, a impedância harmônica.

### 4. RESSONÂNCIA

O fenômeno da ressonância é definido como uma amplificação da resposta de um sistema de potência para uma excitação periódica, quando a frequência de excitação é igual a frequência natural do sistema. Em função da necessidade de compensação do fator de potência em sistemas elétricos, a aplicação de bancos de capacitores aumentou significativamente, em proporção ao aumento das cargas não-lineares. Neste universo, aumenta a probabilidade de ocorrências de ressonâncias em função da poluição harmônica, a qual pode afetar demasiadamente os equipamentos do sistema por sobretensões ou sobrecorrentes impostas. As solicitações em bancos de capacitores na presença de harmônicos, por si só, já é uma preocupação constante, pois a reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência. Em termos de definição, a ressonância pode ser série ou paralela. A ressonância série resulta em uma baixa impedância para o fluxo de harmônicos de corrente, enquanto a ressonância paralela implica em alta impedância para o fluxo de harmônicos de corrente. A título de análise, apresenta-se um resumo da ressonância paralela, por ser a mais comum de ocorrer no sistema de um modo geral.

#### 4.1 Ressonância Paralela

A ressonância paralela é similar à série, na qual, na frequência equivalente, a reatância capacitiva se iguala à indutiva. Entretanto, a sua impedância em paralelo é totalmente diferente, naturalmente, com um comportamento oposto. A figura 2 mostra um circuito paralelo e as condições de ocorrência em relação aos harmônicos injetados no sistema por cargas não-lineares.

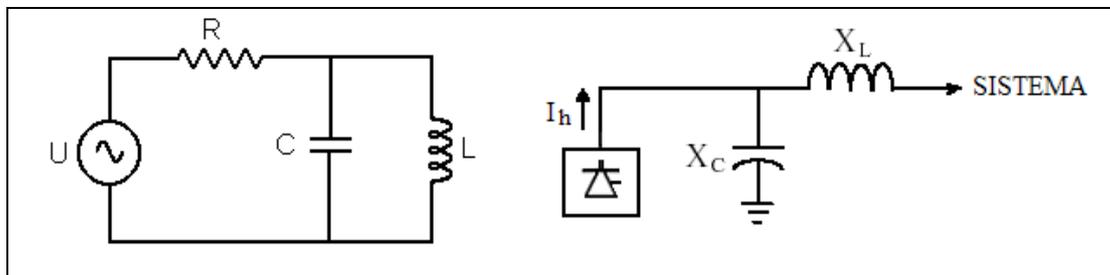


Figura 2 - Circuito paralelo ressonante

A admitância equivalente será:

$$Y = \frac{1}{R} + j \cdot \frac{1}{X_C} - j \cdot \frac{1}{X_L} \quad (1)$$

A impedância é obtida através do valor inverso de admitância, sendo:

$$Z = R + j \cdot \frac{\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (2)$$

A corrente e o fator de deslocamento podem ser determinados da seguinte maneira:

$$I = U / Z = \frac{V \cdot e^{j(\omega t - \phi)}}{\sqrt{R^2 + \left[ \omega L / (1 - \omega^2 LC) \right]^2}} \quad (3)$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{(X_L)}{R(1 - \omega^2 LC)} \quad (4)$$

A ressonância paralela ocorre quando  $X_L = X_C$ , neste caso, a admitância tende a zero, portanto, tem-se uma impedância bastante elevada. Deste modo, as seguintes relações são estabelecidas:

$$\omega_L = \frac{1}{\omega_C} \text{ e } \omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (5)$$

Logo, a frequência de ressonância é determinada pela expressão geral:

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ ou } f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Onde:

$\omega_R$  - Frequência de ressonância (rad/seg);

$f_R$  - Frequência de ressonância (Hz);

$L$  - Indutância em paralelo (H);

$C$  - Capacitância em paralelo (F).

A figura a seguir, mostra o comportamento da admitância e tensão em um circuito paralelo ressonante.

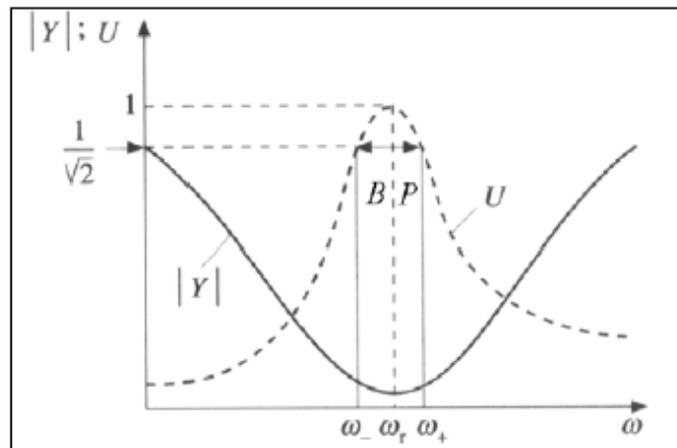


Figura 3 - Admitância e tensão por frequência em um circuito paralelo ressonante

A largura de banda da ressonância, ou banda passante (BP), é definida como:

$$BP = \Delta\omega = (\omega_+) - (\omega_-) = \frac{1}{RC} \quad (7)$$

De modo análogo, a frequência de ressonância para sistemas industriais pode ser determinada como se segue<sup>5</sup>.

$$h_p = \sqrt{\frac{S_{CC}}{S_{BC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR_{BC}}} \cong \sqrt{\frac{MVA_{TR}}{MVAR_{BC} \cdot Z_{TR}}} \quad (8)$$

Onde:

$h_p$  - Ponto de ressonância paralela;

$MVA_{CC}$  - Potência de curto-circuito;

$MVA_{TR}$  - Potência do transformador;

$MVAR_{BC}$  - Potência do banco de capacitores;

$Z_{TR}$  - Impedância percentual do transformador em p.u.

## 5. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A figura 4 apresenta a configuração do Al 18 que atende a unidade principal do cliente. Os bancos de capacitores (BC) incluídos no sistema original possuem cada um uma potência nominal de 600 kVAR. Foram feitas inúmeras simulações do sistema para avaliação da penetração harmônica e influência do sistema/carga na qualidade de energia. Entretanto, o fator principal da análise refere-se à retirada de operação dos bancos, com efetiva mudança na impedância harmônica, que teve como consequência a melhoria global em termos da conformidade das tensões sob o aspecto de harmônicos. Salienta-se que o componente harmônico principal em termos de distorção para todas as medições refere-se ao característico de quinta ordem<sup>6</sup>.

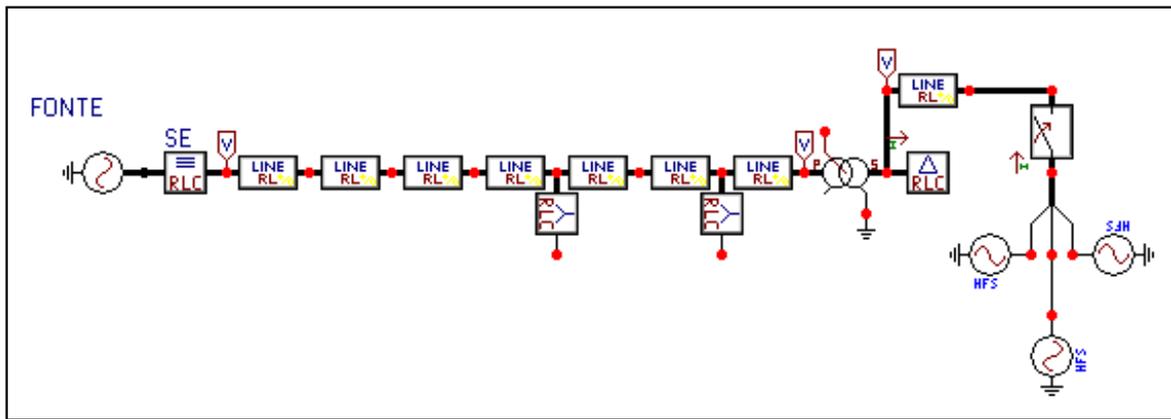


Figura 4 - Modelagem equivalente do sistema

A comparação dos resultados das impedâncias harmônicas no ponto de fornecimento mostra que a redução da magnitude objetiva a obtenção de tensões com valores reduzidos de distorção<sup>4</sup>. Esta análise foi fundamental à efetiva alteração do sistema com os respectivos resultados obtidos<sup>6</sup>.

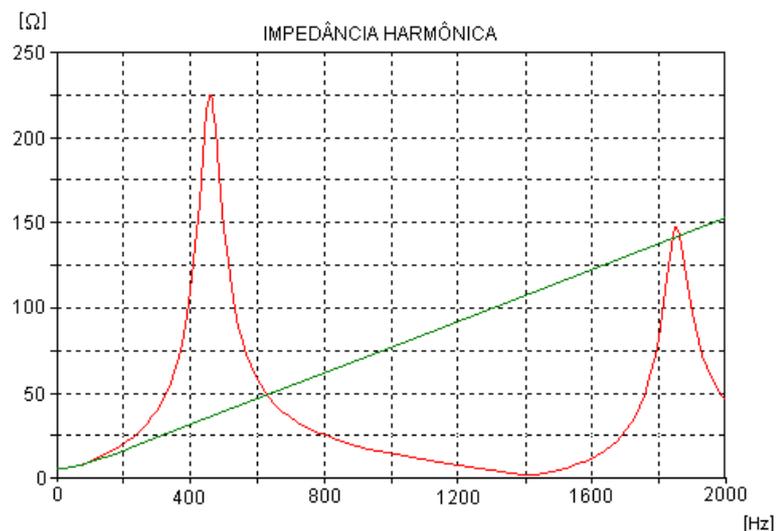


Figura 5 - Impedância do sistema com e sem banco de capacitores

## 6. RESULTADOS OBTIDOS

De modo a resumir a seqüência da análise, tem-se a seguir os principais resultados obtidos antes e após a alternativa no sistema de distribuição<sup>6</sup>.

### 6.1. Medições Preliminares

A figura 6 mostra as medições no sistema de média tensão durante a fase inicial da verificação, realizada no período final de 2004. Como se observa, em determinados instantes a distorção foi superior ao valor de 8%, referência adotada para esta classe de tensão.

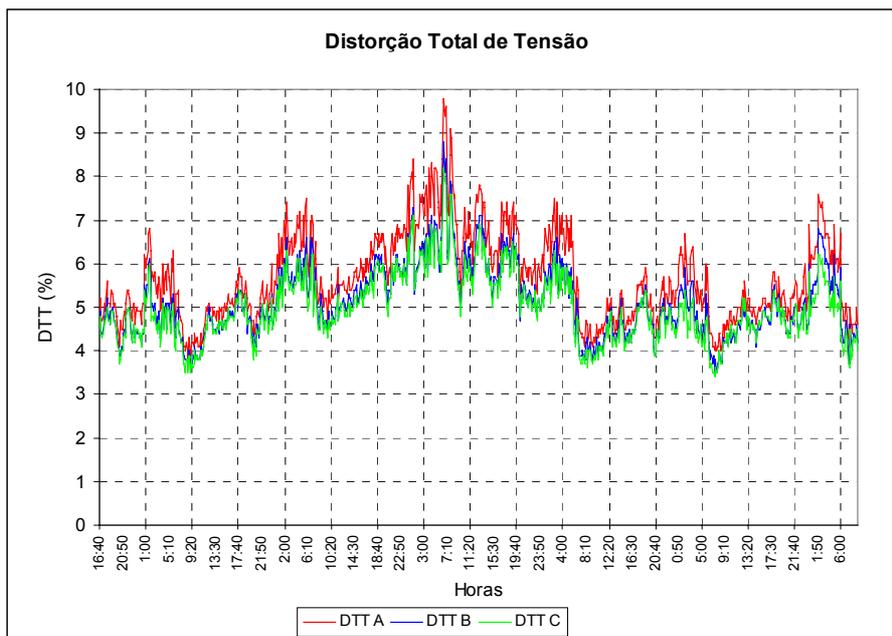


Figura 6 - Distorção harmônica de tensão (MT)

A título de complementação apresentam-se os resultados das medições na baixa tensão, realizadas no período intermediário do estudo. A figuras 7 ilustra as distorções das correntes de um dos transformadores da planta. Medições adicionais também foram realizadas nas instalações da indústria, mas esses resultados mostram o comportamento típico observado nesta fase do monitoramento, de acordo com o propósito e diagnóstico deste trabalho. As tensões na baixa tensão apresentaram valores médios próximos a 6% no mesmo período de monitoramento.

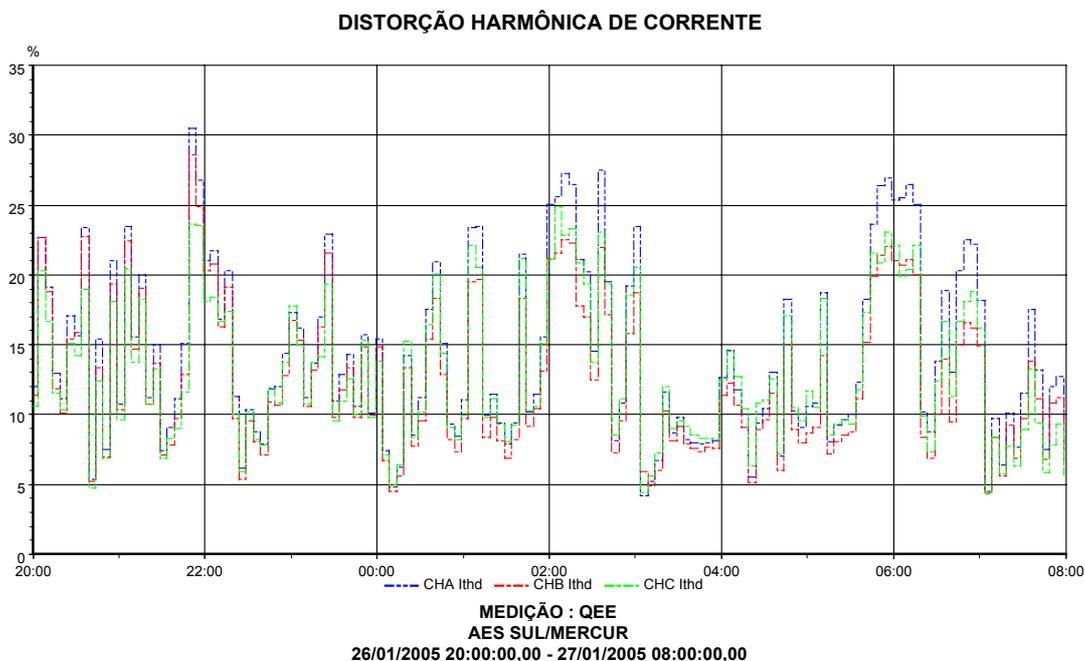


Figura 7 - Distorção harmônica de corrente no sistema industrial (BT)

As tensões e correntes instantâneas durante certo período da medição na baixa tensão são apresentadas como se segue.

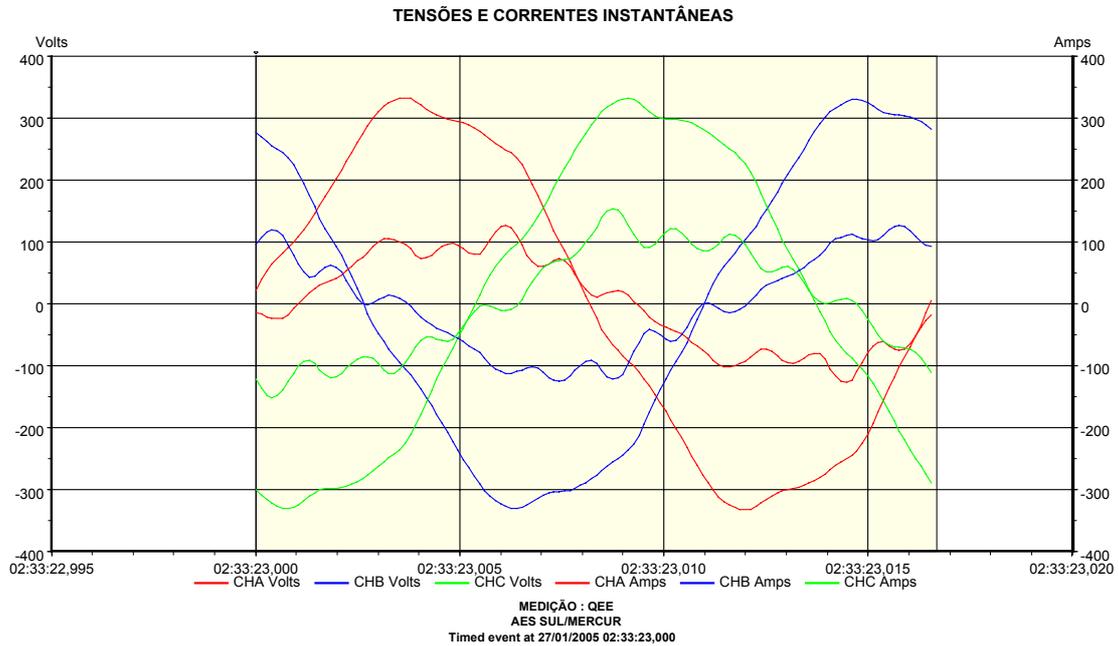


Figura 8 - Tensões e correntes instantâneas (BT)

Como salientado, o componente harmônico preponderante refere-se ao característico de quinta ordem, como pode ser comprovado pelo espectro harmônico da tensão da fase A, como mostrado na figura 9. As demais fases apresentam valores semelhantes e, para o respectivo instante, uma distorção próxima a 6%.

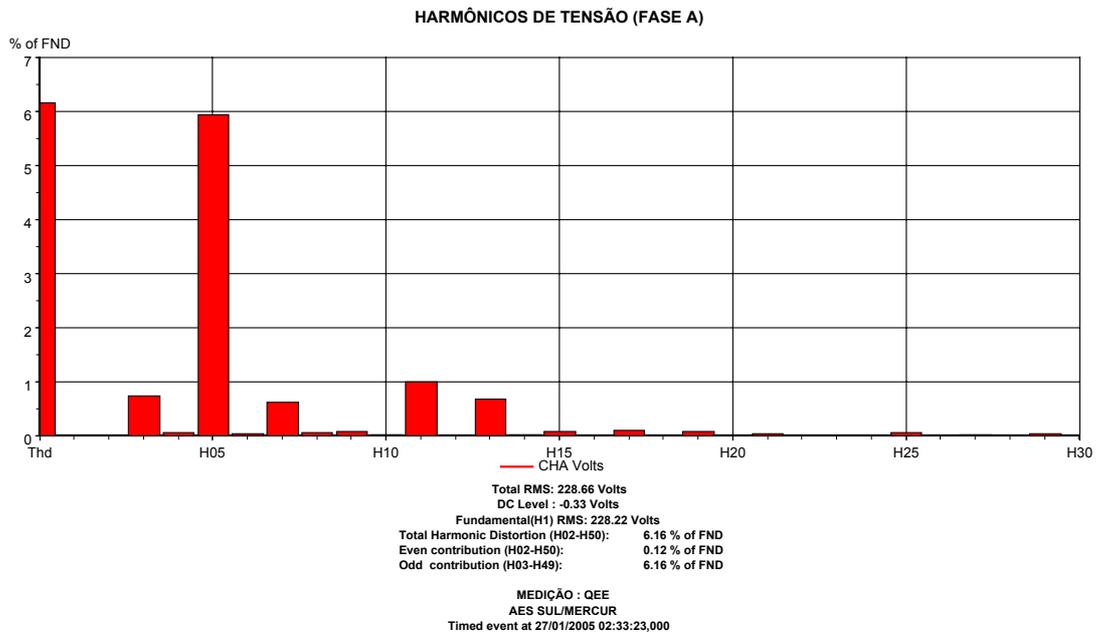


Figura 9 - Espectro harmônico da tensão (BT)

A análise harmônica das correntes é realizada em seguida, considerando a mesma fase da tensão. No instante equivalente, a distorção é de aproximadamente 20%, com um acentuado conteúdo harmônico, tipicamente de sistemas conversores. Neste caso, destacam-se respectivamente os componentes de 5° e 11° ordens, como visto na figura 10.

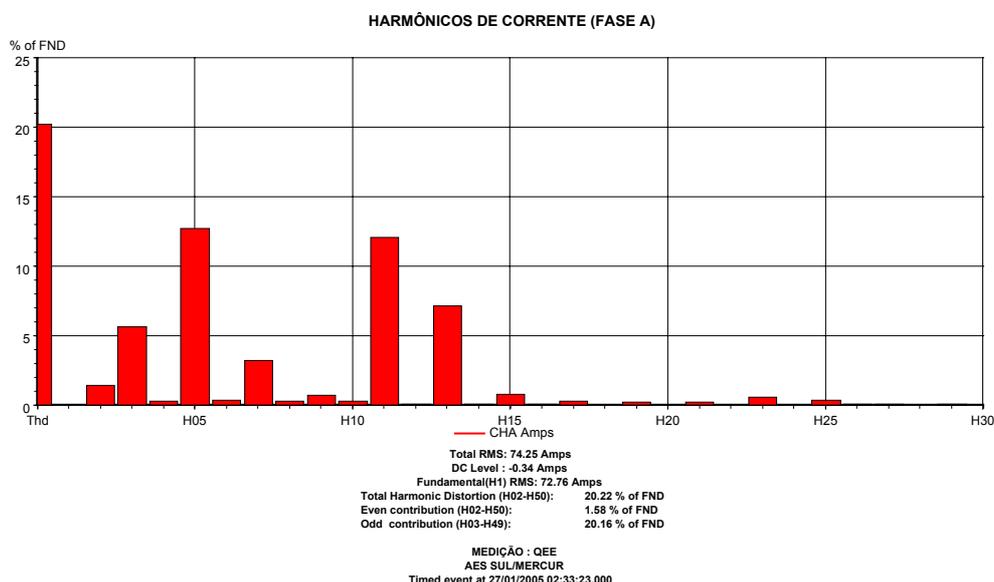


Figura 10 - Espectro harmônico da corrente (BT)

## 6.2. Resultados das Medições após a Desconexão dos Bancos de Capacitores

Foram realizados testes no período de 09 a 13/06/05, com a retirada e inserção dos bancos de capacitores para avaliação dos resultados. Como se observa na figura 11, até o momento de inserção completa dos bancos, a distorção resultava em valores inferiores a 5%, após a manobra e colocação em operação dos bancos (especialmente no domingo 12/06/05), as distorções sofreram aumento, com valores máximos próximos a 8%.

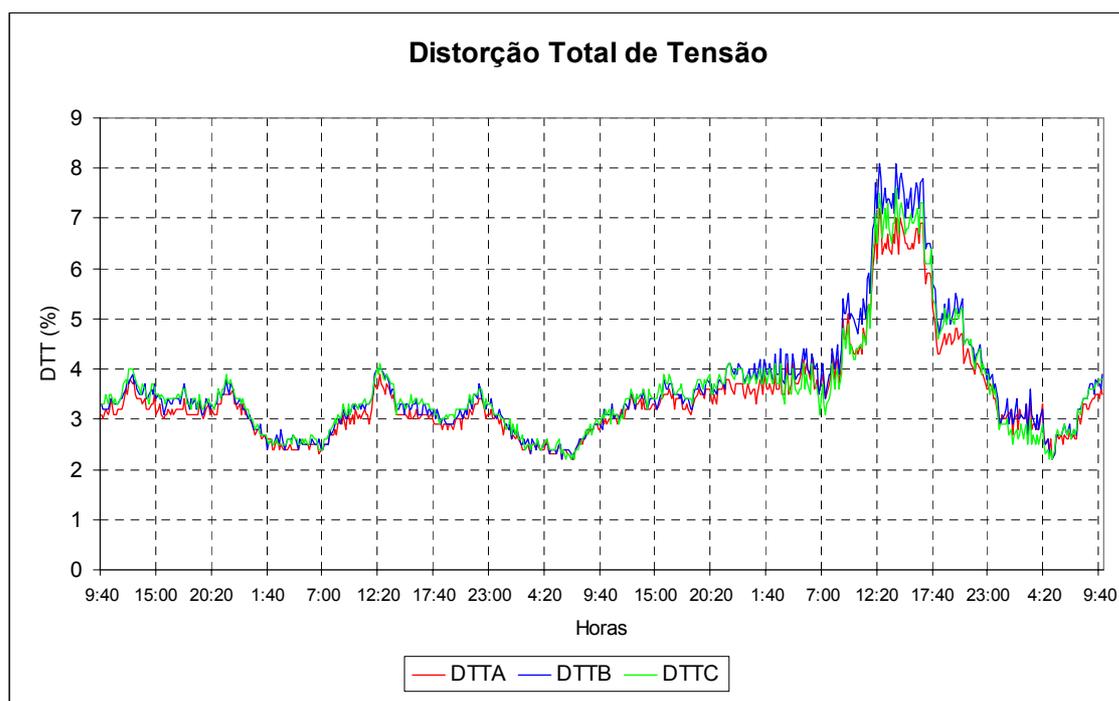


Figura 11 - Distorção harmônica de tensão (MT)

Para mostrar a real contribuição do componente de quinta ordem, a figura 12 mostra os harmônicos individuais que correspondem a distorção total apresentada anteriormente para a Fase B, a que apresentou os maiores valores de distorções. O segundo harmônico preponderante é o de sétima ordem.

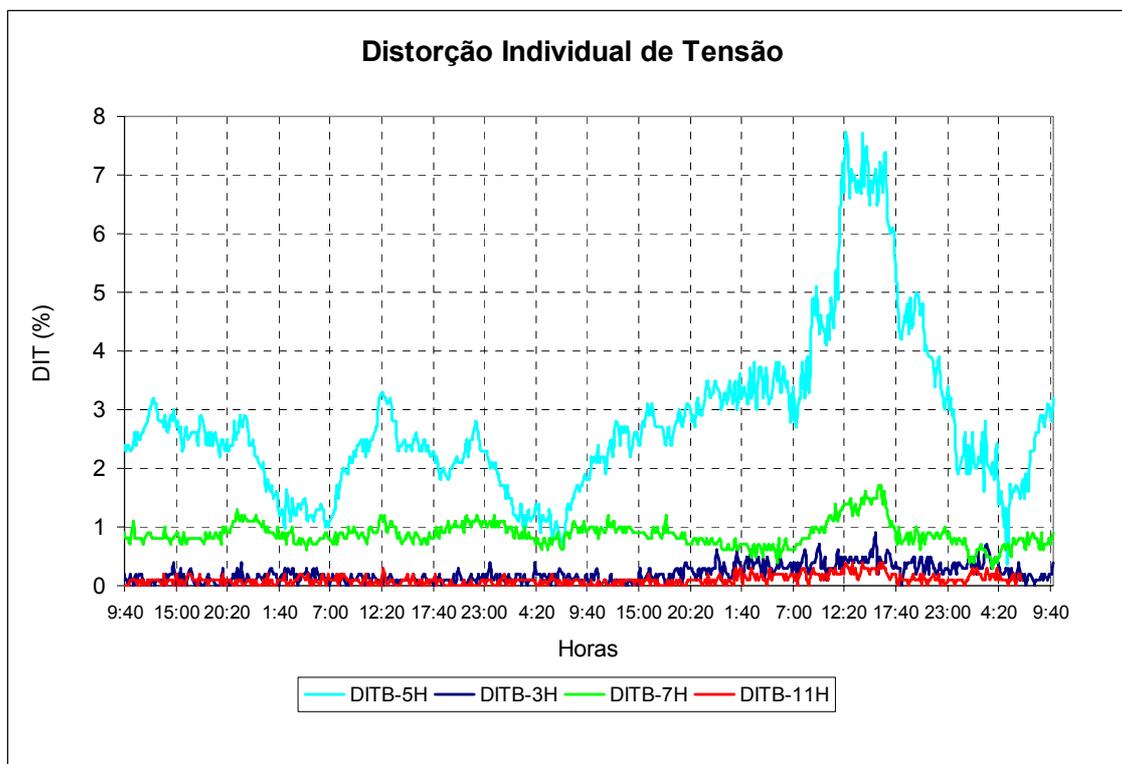


Figura 12 - Distorção individual de tensão (MT)

Para uma melhor comparação, divide-se os resultados obtidos de acordo com a operação do sistema. A primeira parte envolve os dias 09 e 10/06, sendo que a figura 13 mostra os resultados durante esse intervalo, com a presença somente do primeiro banco de capacitores.

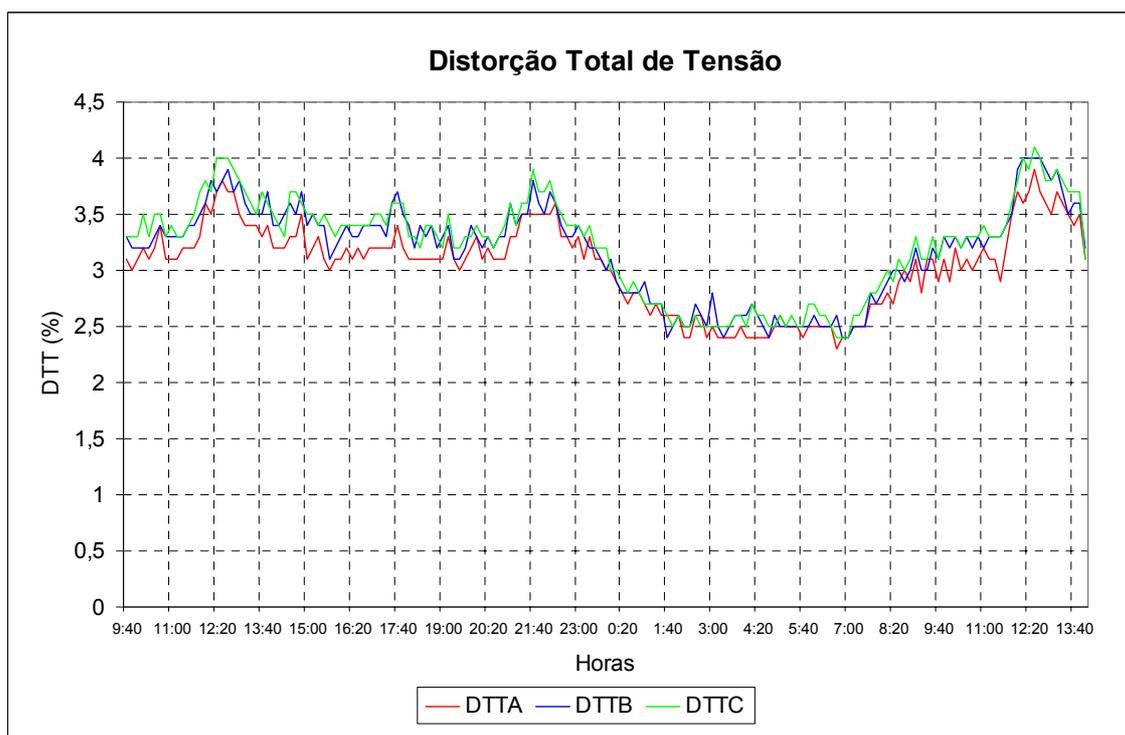


Figura 13 - Distorção harmônica de tensão com um dos bancos de capacitores (MT)

A figura 14 mostra os dados obtidos com a inserção dos dois bancos, inseridos em operação respectivamente as 8:42 hs e 08:50 hs do dia 12/06. Neste caso, verificou um aumento da distorção, com valor próximo a 8%, durante parte do período de domingo, sendo que esta situação corresponde à configuração original do sistema.

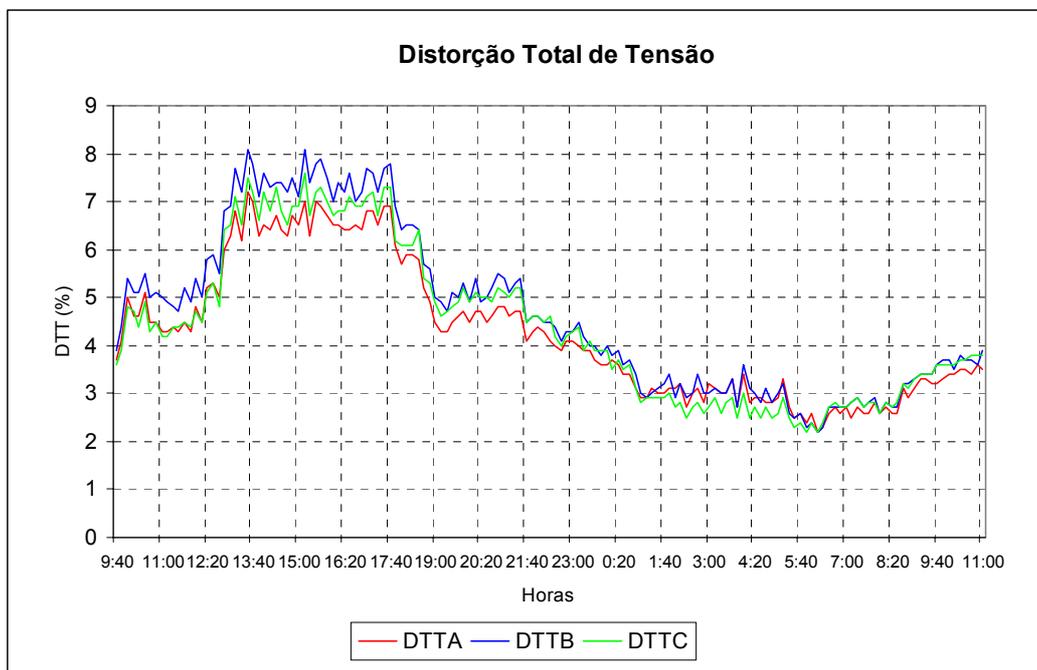


Figura 14 - Distorção harmônica de tensão com dois bancos de capacitores (MT)

Para a comprovação final, foram medidas as distorções durante uma semana consecutiva (14/06 a 22/06), como mostra a figura 15. De um modo geral, os valores permaneceram abaixo de 4% durante os dias úteis, aumentando no final de semana, especialmente no domingo. Mesmo nestas condições, os valores permaneceram inferiores a 6% e, portanto, podem ser considerados como plenamente satisfatórios em relação à conformidade do fornecimento.

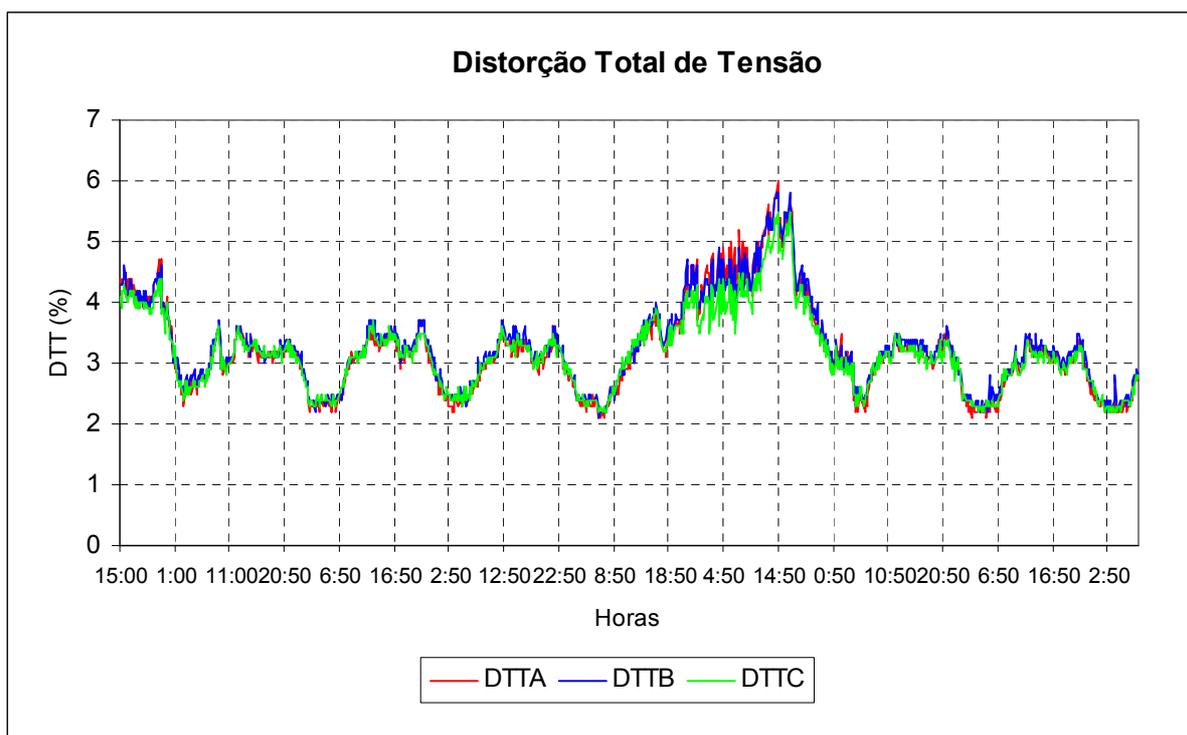


Figura 15 - Distorção harmônica de tensão sem os bancos de capacitores (MT)

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou os principais resultados da análise de harmônicos no sistema elétrico que alimenta uma indústria com problemas de harmônicos devido a sua amplificação no sistema. Da avaliação dos resultados e após a medida de desconexão de um dos bancos de capacitores que estavam inseridos no lado de média tensão, tem-se as seguintes conclusões:

- A mudança na configuração do sistema com a desconexão dos bancos de capacitores resultou em benefícios consideráveis em termos das distorções das tensões do sistema.
- Os resultados comprovaram distorções inferiores a 6% durante as medições finais, sendo que em dias úteis as distorções permaneceram abaixo de 4%.
- Considera-se com a configuração atual (alimentador sem um dos bancos de capacitores) que o sistema se encontra em conformidade quanto à qualidade do fornecimento.

Para a manutenção dos níveis de distorção e operação adequada da própria planta industrial, tem-se as seguintes recomendações:

- Estudo de fluxo harmônico interno as instalações para análise da influência nos sistemas de compensação de reativos das máquinas.
- Redimensionamento dos bancos de capacitores em termos de potência/tensão, considerando as possíveis frequências de ressonâncias.
- Redução das correntes harmônicas injetadas no sistema através da inclusão de filtros de harmônicos.
- Verificação das condições de aterramento do sistema industrial, especialmente quanto à influência de terras isolados e eliminação de referências com relação ao neutro.

## 8. REFERÊNCIAS

1 ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 - Qualidade da Energia, março/2006.

2 IEEE Std 519. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, New York, NY 10017, USA, abril/1993.

3 PROCOBRE - Instituto Brasileiro do Cobre. *Harmônicas nas Instalações – Causas, Efeitos e Soluções*. São Paulo, novembro/2001.

4 MANUAL EMTP/ATPDraw - Alternative Transients Program, versão 3.5, agosto/2002

5 JESUS, C. Nelson. RELATÓRIO TÉCNICO RT VIPAL - *Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica - Análise de Harmônicos* - SE VIPAL /NOVA PRATA. LAQUEE-UNIJUÍ. Ijuí/RS, abril/2004.

6 JESUS, C. Nelson., RELATÓRIO TÉCNICO RT AES SUL-MERCUR - *Análise da Qualidade de Energia e Desempenho do Sistema de Distribuição*. SE SCR 1 - AL 18, junho/2005.