



**8º CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA**

**10 - 14 de setembro de 1990  
Belém-PA, Brasil**

Belém, 15 de maio de 1990

CODIGO DO TRABALHO : 4C-001  
INFLUENCIA DE CONVERSORES ESTATICOS EM FORNOS A CANAL

AUTOR : WILSON KOMATSU

Prezado autor,

Temos a satisfação de informar que a Comissão Técnica se pronunciou favorável à inclusão do seu trabalho no 8º CBA, condicionado à execução das modificações:

- propostas pelos revisores (detalhes anexo)
- de forma (detalhes anexo)

Solicitamos, assim, que nos envie o original do seu trabalho, já com as modificações requeridas, até a data limite de 10 de junho de 1990 para que seja exequível a inclusão nos Anais do Congresso.

Em vista de decisão tomada pela Diretoria, Conselho Técnico Administrativo da SBA e Comissão Organizadora do 8º CBA, somente serão incluídos nos Anais aqueles trabalhos aceitos que possuírem um dos autores inscritos no Congresso até 30 de junho de 1990.

Informaremos, oportunamente, o aceite definitivo.

Cordialmente,

  
Prof. Jurandy N. Garcez  
Presidente Comissão Organizadora 8º CBA

INFLUÊNCIA DE CONVERSORES ESTÁTICOS EM FORNOS A CANAL

Kaiser, Walter  
Komatsu, Wilson  
Matakas Jr., Lourenço  
Pó, Waldir  
Rossi, Luís Natal

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Eletricidade  
Caixa Postal 8174 - CEP 05508 - São Paulo - SP

RESUMO

Analisa-se uma instalação típica que utiliza ambos os tipos de fornos de indução, com e sem canal. São estudados os problemas provocados pela geração de harmônicas pelos retificadores dos fornos sem canal no sistema. É feita uma análise do comportamento em função da frequência de um circuito típico de alimentação e balanceamento de fornos a canal. Para tornar possível a operação do forno com canal a plena carga, é proposta uma solução com filtro indutivo simples e econômico. Desenvolveu-se um programa dedicado para simular o circuito proposto com os parâmetros da instalação. Os resultados da simulação demonstram a viabilidade da solução proposta que foi então implementada. As formas de onda de corrente registradas no circuito sem e com filtro são comparadas com aquelas obtidas por simulação.

ABSTRACT

A typical installation using channel and coreless type induction furnaces is analyzed. The problems caused by harmonic generation in this system are studied. The analysis of frequency function behavior of a typical feed and balance circuit of channel induction furnace is done. To get possible the operation of the channel furnace at full load, is adopted a solution using a simple and economic inductive filter. It was developed a dedicated program for the simulation of the proposed circuit with the installation parameters. The simulation results demonstrate the feasibility of the proposed solution which was implemented. Current waveforms registered with and without the filter on the circuit are compared with the simulation results.

Keywords: Power electronics; static converters; induction furnaces; power filters; harmonic instability.

1. Introdução

Dentre os fornos elétricos usados em fusão de metais, destacam-se os fornos de indução. O princípio de funcionamento desses fornos é o aquecimento da carga por correntes de Foucault, e no caso de materiais ferromagnéticos com temperaturas a-

baixo do ponto Curie, por perdas histeréticas. Eletricamente a energia é fornecida à carga por meio de uma bobina que age como o primário de um transformador, agindo a carga como o secundário (uma espira em curto-circuito), fechando-se o fluxo magnético pelo ar ou através de um núcleo de aço silício. No caso de fechamento do fluxo magnético pelo

ar o forno é chamado sem canal ("coreless"), e quando possui núcleo é chamado a canal ("channel"). Devido ao fraco acoplamento magnético e à baixa potência específica em frequências de rede (50/60 Hz), os fornos sem canal são geralmente alimentados via inversores eletrônicos (ou também conversores de frequência eletrônicos), em frequências que variam de centenas de Hz a dezenas de kHz ou mais.

Embora também sejam usados para fundir carga sólida, os fornos a canal têm sua aplicação ideal na manutenção do metal fundido em outros tipos de fornos, tais como os de indução a cadinho. Esse procedimento, também chamado "duplex", aumenta a produtividade em uma fundição, pois torna um setor como o de moldagem de metal independente do de fusão, e melhora a qualidade, pois é possível maior precisão na análise e acerto da liga, além do forno a canal ser energeticamente mais eficiente que o sem canal neste trabalho, economizando energia.

A operação conjunta dos dois tipos de forno de indução, com canal e sem canal, é portanto atraente e utilizada por vários fundidores, mas dela podem surgir problemas associados a harmônicas. Os inversores eletrônicos de fornos sem canal são alimentados por conversores estáticos, cujas correntes absorvidas da rede apresentam grande conteúdo harmônico que pode comprometer a operação de toda a instalação. Este problema é apresentado fazendo-se uma análise da instalação elétrica do forno de indução a canal.

## 2. O FORNO A CANAL EM UMA INSTALAÇÃO TÍPICA

A bobina indutora do forno a canal e sua carga (o anel de metal fundido) têm uma impedância equivalente indutiva e constituem uma carga monofásica de baixo fator de potência. Logo, existem o problema da compensação do fator de potência e o do balanceamento do forno em uma rede trifásica. A correção do fator de potência é obtida através de um banco de capacitores, e para se obter um circuito trifásico equilibrado utilizam-se um indutor e um banco de capacitores. Os capacitores e o indutor têm a possibilidade de variarem seus valores, adaptando-se às variações de parâmetros da carga, pois a resistência do anel de metal fundido aumenta com a temperatura de

operação e diâmetro do canal aumenta com o tempo, com o desgaste do refratário que o reveste. A Figura 1 ilustra um circuito típico de forno a canal.

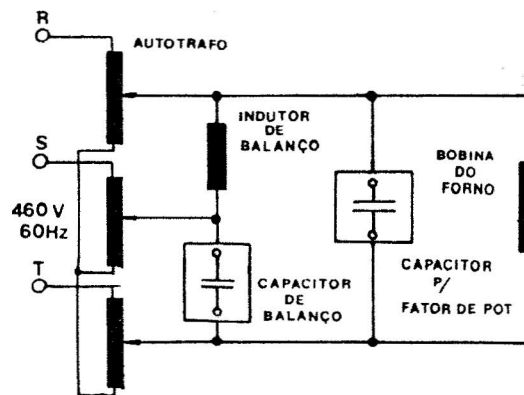


FIGURA 1: Circuito elétrico típico de um forno de indução a canal.

Na Figura 2 tem-se o diagrama de blocos típico de uma instalação utilizando fornos de indução de canal e sem canal.

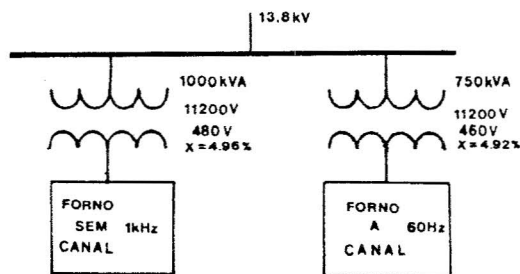


FIGURA 2: Diagrama de blocos de uma instalação típica com fornos de indução a canal e sem canal.

Os conversores eletrônicos usados nos fornos sem canal absorvem

correntes da rede com grande conteúdo harmônico. Tais correntes têm caminhos de baixa impedância através dos ramos capacitivos de balanceamento e correção de fator de potência dos fornos a canal, encontrando no caminho de volta pela rede uma impedância indutiva crescente para as harmônicas crescentes, constituídas pelas reatância de dispersão dos transformadores e impedância da linha de alimentação. O problema pode se agravar se a potência de curto-circuito no local da instalação não é alta, como em uma ponta de linha. Bancos de capacitores de correção de fator de potência que porventura estejam na instalação também podem vir a ser afetados.

### 3. GERAÇÃO E REDUÇÃO DE HARMÔNICAS

As harmônicas características de um retificador são de ordem  $np \pm 1$  onde  $n$  é inteiro e  $p$  é o número de pulsos. Portanto as harmônicas presentes são de ordem 5, 7, 11, 13..., de vez que os retificadores são de 6 pulsos.

A figura 3 mostra o circuito equivalente por fase no qual estão representadas a fonte de correntes harmônicas  $I_{HARM}$ , a impedância de linha  $Z_{Linha}$  e a impedância de carga  $Z_{forno}$  do forno a canal.

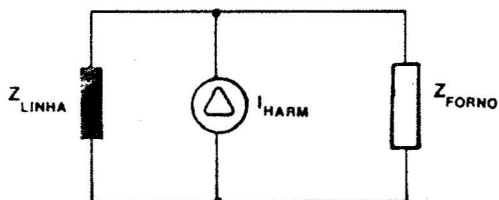


FIGURA 3: Circuito equivalente por fase representando a geração de correntes harmônicas ( $I_{HARM}$ ) que alimentam a linha ( $Z_{Linha}$ ) e o forno a canal ( $Z_{forno}$ ).

A análise por simulação foi realizada através do circuito da figura 4, onde os geradores de corrente ( $I_{HR}$ ,  $I_{HS}$ ,  $I_{HT}$ ) representam as harmônicas geradas pelos retificadores.

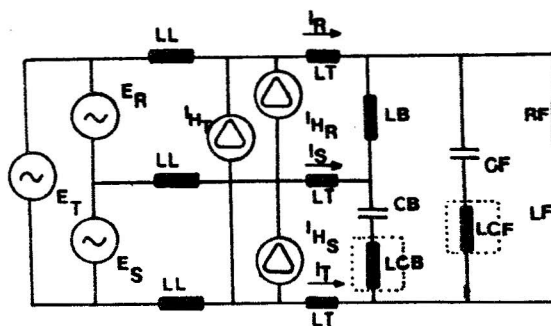


FIGURA 4: Circuito usado na simulação do forno a canal com presença de harmônicas.

As harmônicas que encontram nos ramos capacitivos caminhos de baixa impedância provocam correntes de amplitudes proibitivas, conforme se pode verificar nas figuras 5a, 5b e 5c. Tais correntes harmônicas provocam aquecimento excessivo nos cabos alimentadores, bancos de capacitores CB e CF e no indutor LB do forno a canal. As figuras 5d, 5e e 5f mostram o resultado da simulação realizada.

A solução mais econômica é aquela em que se alteram as frequências próprias e se impede a amplificação harmônica das frequências mais elevadas. Isto se consegue mediante a inclusão de indutores nos ramos capacitivos, o que caracteriza a solução proposta. Estes indutores são LCB e LCF na figura 4.

### 4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

A inclusão dos indutores LCB e LCF efetivamente impediu a amplificação harmônica, conforme se verifica nas figuras 6a, 6b e 6c. A comparação com os resultados do programa de simulação (figuras 6d, 6e e 6f) mostra que o modelo adotado na figura 4 é representativo do circuito do forno a canal afetado por harmônicas. As diferenças que aparecem entre as correntes medidas e as simuladas, nas figuras 5 e 6, são o reflexo da incerteza na obtenção dos parâmetros usados na simulação. As medidas foram realizadas na instalação em plena operação, dificultando o trabalho sob pena de prejudicar

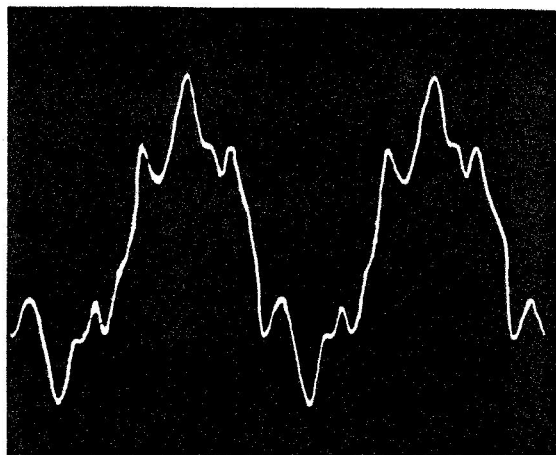


FIGURA 5a: Fotografia da corrente IR (circuito da figura 4) sem os indutores LCB e LCF.

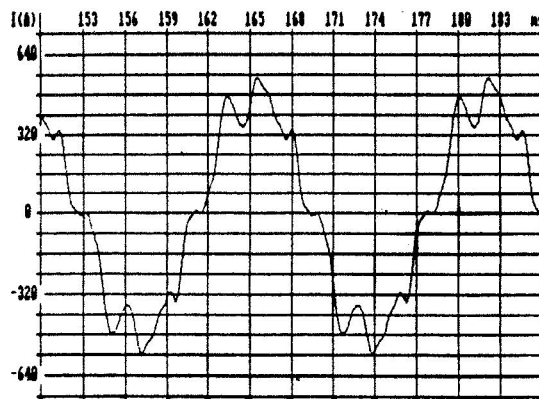


FIGURA 5d: Gráfico da corrente IR obtida por simulação do circuito da figura 4, sem os indutores LCB e LCF.

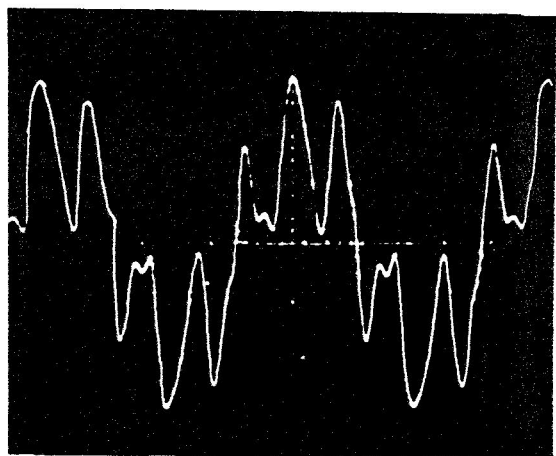


FIGURA 5b: Fotografia da corrente IS (circuito da figura 4) sem os indutores LCB e LCF.

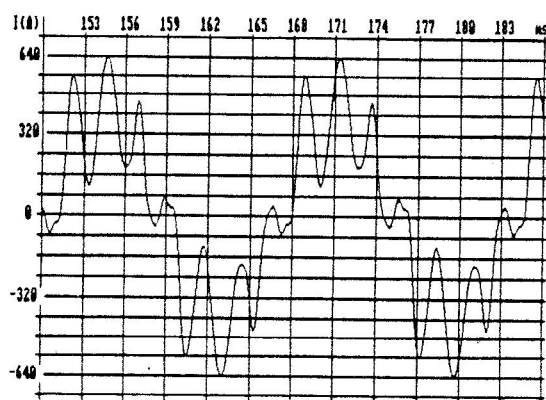


FIGURA 5e: Gráfico da corrente IS obtida por simulação do circuito da figura 4, sem os indutores LCB e LCF.

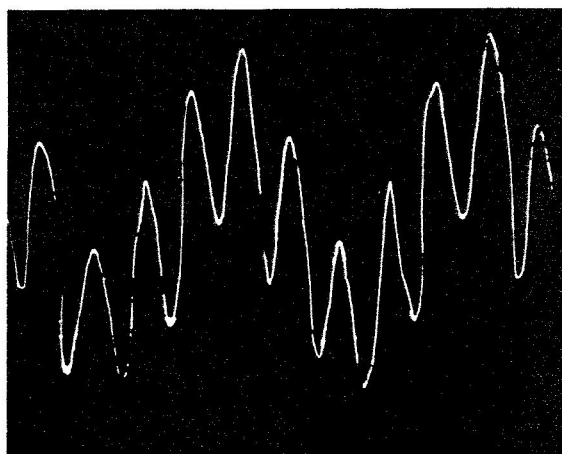


FIGURA 5c: Fotografia da corrente IT (circuito da figura 4) sem os indutores LCB e LCF.

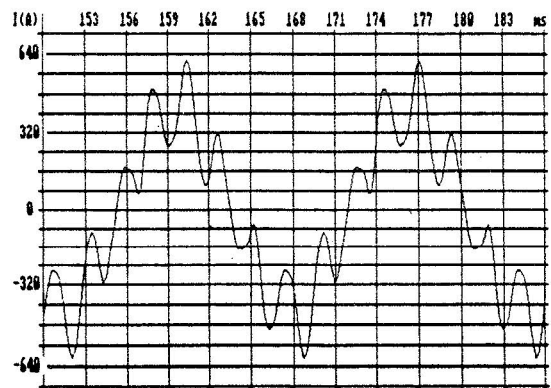


FIGURA 5f: Gráfico da corrente IT obtida por simulação do circuito da figura 4, sem os indutores LCB e LCF.

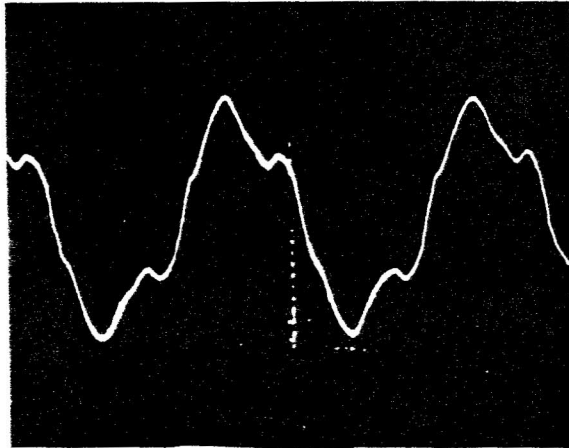


FIGURA 6a: Fotografia da corrente IR (circuito da figura 4) com os indutores LCB e LCF.

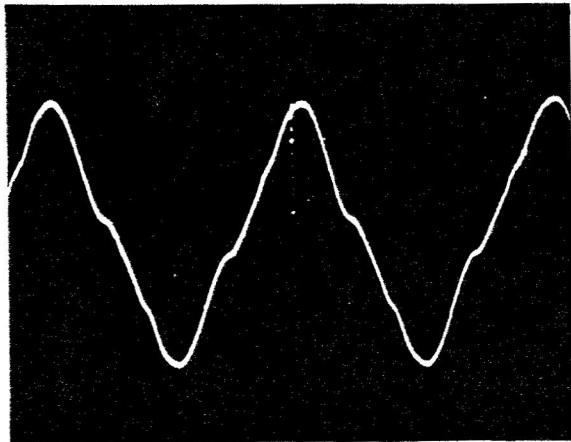


FIGURA 6b: Fotografia da corrente IS (circuito da figura 4) com os indutores LCB e LCF.

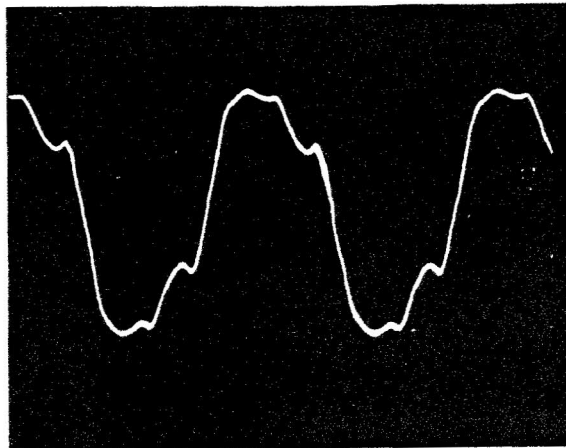


FIGURA 6c: Fotografia da corrente IT (circuito da figura 4) com os indutores LCB e LCF.

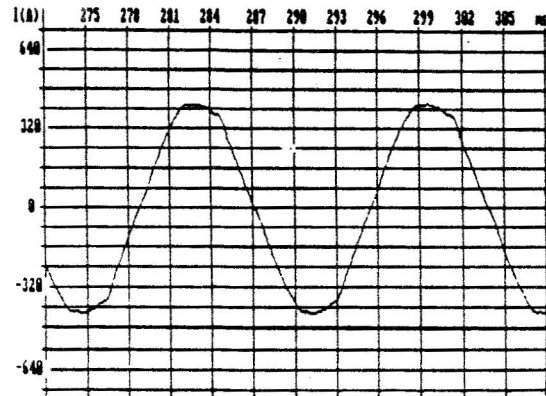


FIGURA 6d: Gráfico da corrente IR obtida por simulação do circuito da figura 4, com os indutores LCB e LCF.

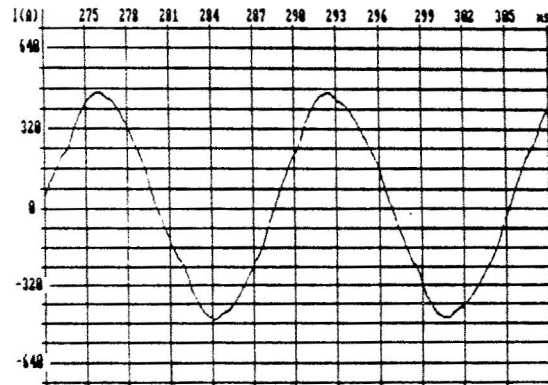


FIGURA 6e: Gráfico da corrente IS obtida por simulação do circuito da figura 4, com os indutores LCB e LCF.

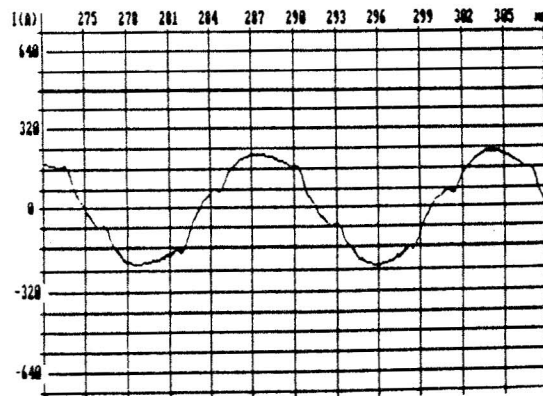


FIGURA 6f: Gráfico da corrente IT obtida por simulação do circuito da figura 4, com os indutores LCB e LCF.

a produção. Parâmetros como a resistência e indutância do forno (RF e LF na figura 4) foram obtidos dessas medidas e sofrem dessa incerteza, afetando o resultado da simulação. Com isso, as medições de campo não permitiram avaliar o grau de desequilíbrio na situação de operação, ficando difícil isolar causa e efeito no problema.

No modelamento dos geradores de corrente IHR, IHS e IHT, como o problema ocorre com potências elevadas, não foi necessário levar em conta a variação do ângulo de comutação para o cálculo das harmônicas.

Na simulação, foram consideradas as perdas nos indutores LL. Assim, os geradores de tensão ER, ES e ET e as impedâncias (a valores fixos) representam o sistema CA de forma adequada para as frequências envolvidas. As indutâncias LT representam as impedâncias de curto-circuito dos transformadores.

Da mesma forma, nos indutores LCB e LCF foram incluídas perdas, mas as não linearidades são de 2ª ordem devido aos entreferros existentes. Eles são percorridos por níveis elevados de corrente, e por limitação de espaço foram construídos de forma a utilizar o menor volume possível do painel do forno. São feitos com núcleo de chapas de ferro-silício com entreferro para regulação fina da indutância e utilizam como enrolamento condutores vazados resfriados a água. A vazão de água para cada indutor é da ordem de 4 litros por minuto e a pressão de trabalho de cerca de 1 quilograma-força por centímetro quadrado.

A proposta de utilização de filtros indutivos simples se mostrou efetiva, tornando-se possível descartar alternativas muito mais dispendiosas como filtros de potência na linha de média tensão. Outro aspecto validado foi a metodologia de abordagem do problema utilizando programa dedicado para simulação do circuito, assim como os modelos adotados na simulação.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROKMEIER, K.H., (1966). Induktives Schmelzen, Mannheim, Brown, Boveri & Cie Aktiengesellschaft.

- FERNANDES JR., L., (1986). Operação de fornos de indução, São Paulo, ABM-Associação Brasileira de Metais, 539 p.
- KAISER, W. & KOMATSU, W. & MATAKAS JR., L. & PÓ, W. & ROSSI, L.N. (1988). "Comparação entre Configurações de Inversores para Fusão e Aquecimento por Indução", Seminário de Eletrônica de Potência (anais), Florianópolis, UFSC, 119-125.
- MARTINS, W. W. & TOLEDO, E.D. (1980). Aquecimento elétrico: fornos e soldas, São Paulo, DEE-EPUSP, capítulo 4: 122-198.
- STRATFORD, R.P. et alli. (1981). IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters (IEEE Std 519-1981), IEEE Inc., 51 p.
- KIMBARK, E. W. (1971). Direct Current Transmission (Volume I), New York, John Wiley & Sons, Inc., capítulo 8: 295-386.