

ANÁLISE DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DE UMA PLANTA DE LAMINAÇÃO¹

Célio Geraldo Ferreira²
Domingos Sávio Lyrio Simonetti³
Gilberto Costa Drumond Sousa⁴

Resumo

Este trabalho analisa um sistema real de distribuição de energia de um laminador siderúrgico, nas atuais condições de operação e em um panorama de expansão. Foi implementado um modelo de simulação digital envolvendo um filtro ativo em paralelo com filtros passivos, inseridos no sistema de alimentação de energia dos cicloconversores. Seguiu-se um estudo sobre o uso combinado de filtros passivos e ativos, para verificar a operação coordenada destes para a efetiva compensação harmônica do sistema e, conseqüentemente, a melhoria da qualidade de energia elétrica do sistema elétrica da planta.

Palavras-chave: Filtros híbridos de potência; Compensação harmônica; Sistemas elétricos industriais; Qualidade de energia.

SIMULATIONS ANALYSE OF THE HOT STRIP MILL ELECTRICAL SYSTEM

Abstract

This work analyzes a real electrical power supply of a steelmaking rolling mill, in the present conditions, as well as in a scenario of plant expansion. A digital simulation model, consisting of a passive filter, active filter, cycloconverter load and power supply system was developed, followed by a study to investigate the combined use of passive and active filters, mainly to assess their effectiveness to compensate the harmonic components and, consequently, to improve the plant power quality level.

Key words: Hybrid filters; Harmonic compensation; Power electrical systems; Power quality.

¹ Contribuição técnica ao 12º Seminário de Automação de Processos, 1 a 3 de outubro de 2008, Vitória, ES

² Mestre em Engenharia Elétrica, Especialista de Engenharia do Órgão de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Departamento de Manutenção Central da ArcelorMittal Tubarão, Serra – ES. (celio.ferreira@arcelormittal.com)

³ Professor Doutor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (d.simonetti@ele.ufes.br).

⁴ Professor Doutor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (g.souza@ele.ufes.br).

1 INTRODUÇÃO

A qualidade é cada vez mais uma prioridade no tratamento do insumo energia elétrica no segmento industrial, uma vez que pode representar operações da planta sem interrupções, com altos níveis de estabilidade operacional e produtividade. Indústrias siderúrgicas caracterizam-se pela intensiva transformação de energia, com a utilização de cargas não lineares de alta potência em seu processo. Estas cargas podem afetar diretamente a qualidade da energia da planta, caso os problemas não sejam bem caracterizados e medidas de mitigação de seus efeitos adotados.

Neste trabalho, é de interesse avaliar os aspectos relacionados à compensação de distorções harmônicas de corrente e tensão, provocadas principalmente pela aplicação de acionamentos a velocidade ajustável. O trabalho apresentará um estudo de caso, onde o acionamento da carga baseia-se na aplicação de cicloconversores em um Laminador de Tiras a Quente (LTQ).

Medições de campo e análise do espectro harmônico do sistema de distribuição de energia elétrica do laminador serão consideradas, justificadas principalmente pelas seguintes razões pelo plano de expansão do Laminador de Tiras a Quente, com possibilidade de inserção de novas cargas e, demandando uma avaliação do sistema de compensação existente, do seu desempenho atual e futuro, frente a expansão.

As medições de tensão e corrente foram realizadas na barra de alimentação do conjunto de cicloconversores, estando o laminador em diferentes fases de operação, Figura 3. Com base nestas medições, um modelo de simulação pôde ser desenvolvido e validado, com o intuito de realizar avaliações diversas, principalmente com relação ao impacto de alterações da planta com reflexo nos índices de qualidade relacionados às distorções harmônicas do sistema.

O estudo resulta desta forma em uma avaliação da condição atual de operação do sistema, baseada em índices de qualidade propostos por normas brasileiras e normas internacionais, além dos índices estabelecidos em contrato entre a empresa e a concessionária local de distribuição de energia. São propostas alternativas técnicas, avaliadas em simulação, de forma a manter os índices de qualidade de energia elétrica dentro dos limites das normas.

2 AVALIAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR NAS ATUAIS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

2.1 Sistema Elétrico da Indústria

Objetivando atender ao consumo e a geração interna, a ArcelorMittal Tubarão possui um sistema de distribuição de energia em 138 kV e 13,8 kV que atende a todas as áreas produtivas. A habilidade de produzir é dependente da adequação e continuidade do fornecimento de energia e as interrupções deste fornecimento podem ser avaliadas diretamente em termos da perda de produção.

2.2 Avaliação do Sistema Elétrico do Laminador

Através de medições oscilográficas de tensão e corrente, realizadas em diferentes situações de operação do laminador estudado, foram realizadas avaliações sobre algumas das condições nas quais atualmente opera o sistema elétrico em que esta instalação encontra-se inserida. A Figura 3 mostra o unifilar, as variáveis medidas e calculadas (representadas com o índice *) neste sistema elétrico.

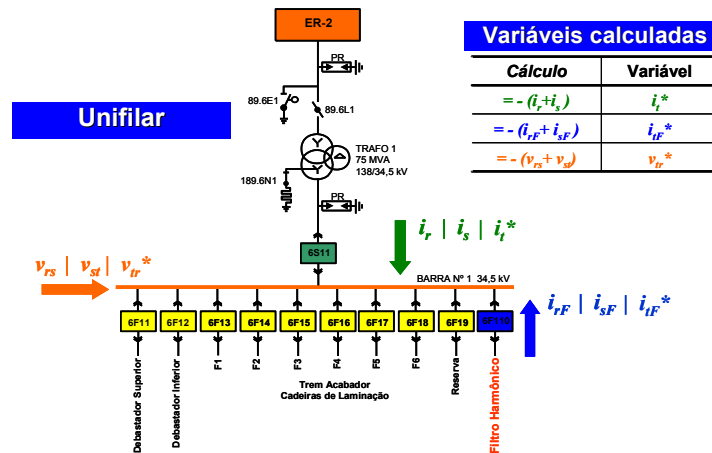


Figura 3. Unifilar do sistema elétrico do laminador e variáveis medidas

As avaliações realizadas foram referenciadas em relação aos limites de distorções harmônicas recomendados por normas e padrões nacionais e internacionais, como o PRODIST - Módulo 8 e o padrão IEEE 519. A análise da situação de operação do sistema elétrico do laminador, principalmente quanto às estratégias de compensação harmônica aplicadas, estudada em Ferreira, Simonetti e Sousa,⁽¹⁾ mostrou que, independentemente das formas de operação do equipamento, os índices relacionados às distorções harmônicas de tensão e corrente mantêm-se sob os limites recomendados pelos padrões citados.

3 SIMULAÇÃO DE EXPANSÃO DO LAMINADOR

É mostrado na Figura 4 o modelo de simulação do sistema elétrico de potência do laminador siderúrgico estudado. O modelo foi implementado com base em levantamentos diversos, realizados na documentação do sistema de distribuição de energia elétrica deste laminador, de suas principais características elétricas, como as impedâncias que compõem o sistema, características técnicas do sistema de filtragem passiva, utilização das medições realizadas no sistema elétrico para a modelagem da carga dos cicloconverters, dentre outras considerações.

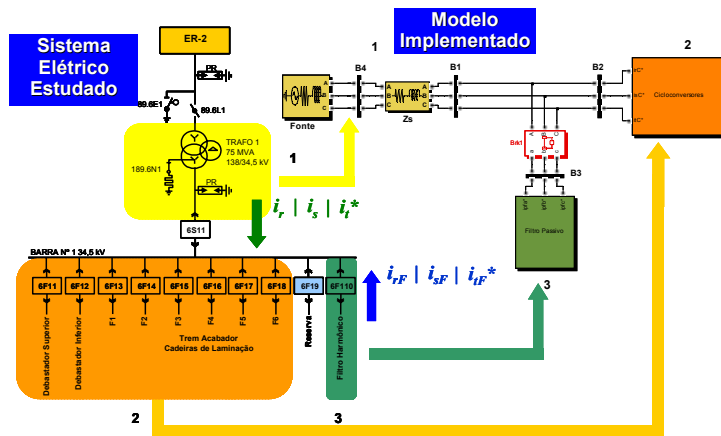


Figura 4. Unificar da Subestação e modelo digital de simulação implementado.

A precisão do modelo do sistema elétrico de potência do laminador depende diretamente da confiabilidade na modelagem da carga dos cicloconversores. Uma das grandes vantagens da simulação do conjunto de cicloconversores, da forma como implementado neste trabalho, é a possibilidade da entrada de dados reais da planta, utilizando-se das medições de corrente realizadas em campo, no barramento de alimentação do conjunto, conforme Figura 3. A simulação da corrente do processo é feita injetando-se através de fontes de correntes controladas a corrente do processo diretamente no modelo. Com isso, a modelagem da carga elétrica do conjunto de cicloconversores é melhor representada, sendo inserida no circuito simulado exatamente da forma como verificadas no barramento da subestação, para os diferentes casos estudados. A Tabela 1 os cálculos simplificados que permitem se conhecer as correntes do conjunto de cicloconversores inseridas no modelo da Figura 4.

Tabela 1. Correntes dos cicloconversores calculadas ($i_r/s/tC^*$).

Cálculo	Variável
$= - (i_r + i_rF)$	i_rC^*
$= - (i_s + i_sF)$	i_sC^*
$= - (i_t^* + i_tF^*)$	i_tC^*

Esta forma de realizar a modelagem de um processo ou de variáveis elétricas de interesse reduz as limitações impostas por modelos teóricos e permite representar de forma mais real o processo em avaliação, além de permitir avaliações de variações diversas do processo em estudo. É necessário, no entanto, para estes casos, a verificação da correta aquisição dos dados e verificação da aderência das medições com o modelo proposto.⁽²⁾

Uma vez obtido e validado o modelo do sistema elétrico do laminador, torna-se possível a caracterização, através de simulações, de situações diversas, ocasionadas por alterações de parâmetros ou formas de operação deste laminador. Estas simulações consideraram situações realistas, a exemplo da possível expansão de suas cargas elétricas, frente a uma expansão da planta para aumentos de produção.

Desta forma, procedeu a simulação de uma expansão da planta do laminador, considerando-se o aumento da carga em 30% do seu valor atual, representando assim a entrada de novos conjuntos de motores e cicloconverters no sistema de laminação.

A Figura 5 mostra a forma de onda da corrente dos cicloconverters já com a simulação de expansão do processo de laminação.

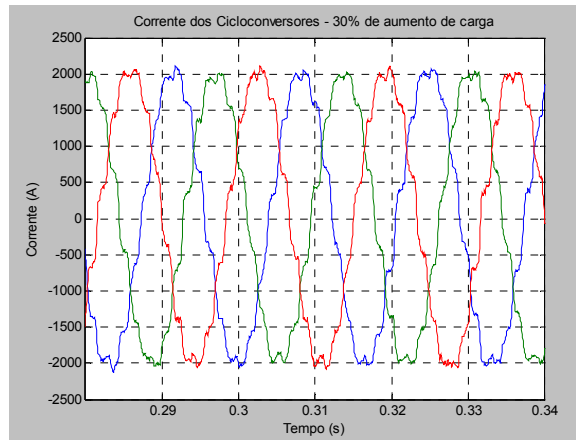


Figura 5. Corrente simulada do conjunto de cicloconverters acrescida de 30% de seu valor original.

Verificam-se pelos resultados de simulação do sistema que as distorções harmônicas de tensão e corrente no barramento têm seus valores alterados, ficando com valores maiores do que aqueles encontrados na situação de operação atual, conforme Figura 8, mas ainda mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas IEEE e PRODIST.

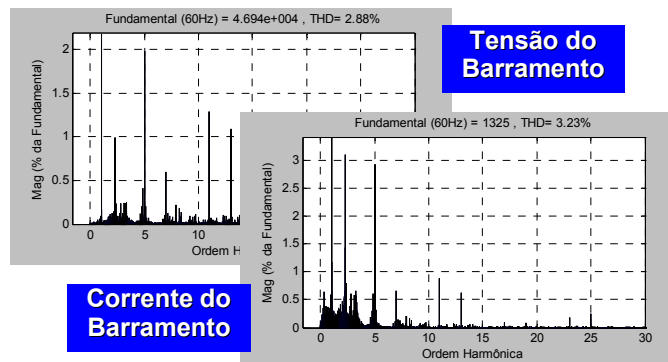


Figura 6. Resultados de simulação, espectro da tensão e corrente de barramentos após expansão da carga.

A Tabela 2 resume os valores de corrente encontrados em simulação para cada um dos ramos do sistema de filtragem passiva existente no sistema. Percebe-se uma elevação nos valores de correntes, acima dos valores nominais.

Tabela 2. Valores nominais de corrente nominais e simuladas nos ramos do sistema de filtragem passiva existente.

Corrente	Corrente Nominal (rms)	Corrente Simulada (rms)
la_B3	-	757,6 A
la_2,6HP	167 A	170,9 A
la_4,08FL	181 A	190,9 A
la_6HP	209 A	219,6 A
la_10HP	206 A	215,6 A

Este aumento no valor das correntes coloca cada ramo, individualmente, mais susceptível a desarmes (*trip*) por proteção de sobrecarga, o que traria sérios prejuízos ao sistema de compensação harmônica. O acréscimo nos valores nominais de alimentação do circuito, nas dimensões verificadas, não deve ultrapassar limites de suportabilidade e reservas de capacidade, adotadas em projetos de filtros. A especificação geral do filtro harmônico existente mostra no seu item de desempenho a suportabilidade do filtro a sobrecargas impostas e o tempo que o equipamento pode suportar esta sobrecarga. Por exemplo, uma sobrecarga de 20% nos valores nominais somente será suportada por um período máximo de 5 minutos. Sobrecargas tendem a degradar os componentes do filtro, diminuindo sua vida útil, com possibilidade de acarretar dano imediato e irreversível ao sistema de filtragem dependendo de sua dimensão.

Diante do panorama verificado, sugere-se o estudo de alternativas que permitam o sistema de filtragem passiva operar com os valores de corrente (fundamental, 3^a, 5^a harmônica, etc.) nas condições atuais, sem expansão do sistema, como a utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido de filtragem.

4 ANÁLISE DE UM FILTRO ATIVO EM PARALELO COM OS CICLOCONVERSORES E FILTRO PASSIVO EXISTENTES

Apesar dos resultados das simulações realizadas, incluindo a expansão da carga do sistema, apontarem para a manutenção dos índices de qualidade de energia dentro dos limites impostos por padrões, cenários de expansão ou alterações das condições operacionais da planta sugerem a necessidade de verificação de estratégias que permitam manter a operação e manutenção do sistema da forma como se encontra atualmente. Frente à necessidade destas investigações, propõe-se que as condições do sistema sejam melhoradas empregando-se outras técnicas, como a utilização de filtragem ativa conjunta à filtragem passiva, formando um sistema híbrido de compensação harmônica.

Filtros híbridos têm se tornado cada vez mais uma solução atraente em ambientes industriais e, sendo assim, várias topologias como as que combinam filtro ativo série com filtro passivo paralelo, filtro ativo em série com o filtro passivo, ou operação paralela de ambos os sistemas, tem sido exploradas, com o intuito de combinar as vantagens dos filtros passivos e filtros ativos.

Como forma de preservar as características de instalação e operação do sistema elétrico estudado neste trabalho, e com o intuito de se verificar os efeitos da inserção de um sistema de filtragem ativa no sistema, foi proposta uma topologia que combinasse as vantagens da atual filtragem passiva com a implantação de filtros ativos,

através da operação paralela destes conjuntos. Esta topologia é atraente para o sistema em questão e possui vantagens várias, como a manutenção de independência de operação do sistema de filtragem passiva, podendo esse operar com ou sem o filtro ativo.

4.1 Topologia Proposta

A Figura 7 ilustra de forma esquemática a configuração de filtragem híbrida proposta, onde o sistema de filtragem ativa é inserido paralelamente ao sistema elétrico fonte e ao conjunto de cicloconversores (carga do sistema elétrico estudado que acionam os motores síncronos (MS) do laminador) e filtragem passiva.

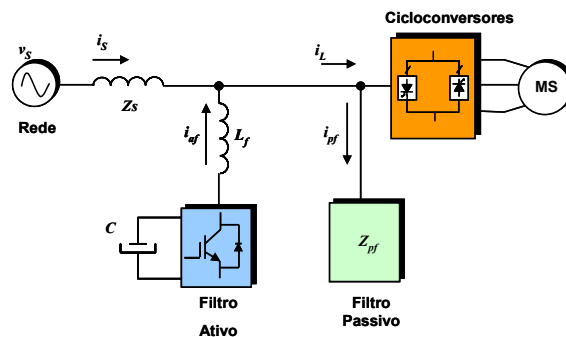


Figura 7. Instalação paralela do filtro ativo aos cicloconversores e sistema existente de filtragem passiva.

O filtro passivo, Z_{pf} , é sintonizado para remover o conjunto de harmônicas principais geradas pelo conjunto cicloconversores. A conexão em paralelo do filtro ativo e o seu controle em corrente permitem injetar correntes harmônicas no sistema local, visando o cancelamento de uma parcela das correntes harmônicas geradas pela carga.

Um filtro ativo conectado em paralelo com a rede e com um filtro passivo irá se comportar como uma fonte de corrente que pode ser controlada em proporção à corrente harmônica i_{Lh} , expressa como $G_A i_{Lh}$, Figura 8. Existirão portanto duas fontes de corrente nesta representação, a fonte de corrente harmônica gerada pela carga não linear e a fonte de corrente da compensação harmônica, gerada e controlada pelo filtro ativo.

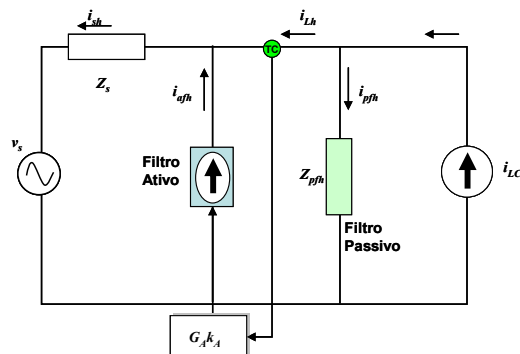


Figura 8. Circuito equivalente do método de compensação harmônica híbrida para a carga dos cicloconversores.

4.2 Controle do Filtro Ativo

A eficácia de compensação harmônica do filtro ativo esta relacionada, dentre outras questões, à sua topologia, que possui efeito direto na sua habilidade de gerar as correntes harmônicas nas faixas desejadas. Assim, dentro das características de topologia do filtro ativo, devem ser avaliados com bastante critério os métodos de detecção e controle da corrente ou tensão, uma vez que estes definem diretamente a eficácia de operação do filtro, principalmente no que concerne à sua precisão, resposta dinâmica e banda de passagem (*bandwidth*).⁽³⁾

Neste trabalho foi utilizado o método SRF (*Synchronous Reference Frame*) que realizará a extração e geração das referências de controle. Um diagrama esquemático com os principais blocos da topologia proposta é mostrado na Figura 9.

O Método SRF é menos susceptível às distorções de tensão uma vez que utiliza sinais sincronizados com a fundamental da fonte, gerados por um *Phase Locked Loop* (PLL),^(2,3) além de proporcionar dinâmica e precisão suficientes⁽³⁾ à aplicação idealizada por este estudo.

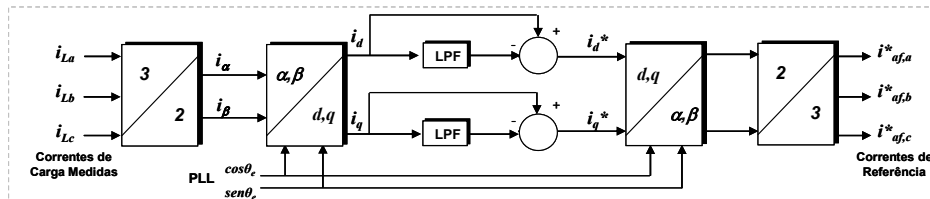


Figura 9. Controle principal do filtro ativo "Synchronous Reference Frame" – SRF

No Controlador SRF da figura 9 a corrente de carga i_L é medida e as correntes harmônicas desta são extraídas no referencial síncrono d-q. Os vetores unitários são gerados por um circuito *Phase Locked Loop* (PLL) através da tensão de rede. No referencial síncrono d-q a componente fundamental da corrente é transformada em grandeza dc, em ambos os eixos, e todas as componentes harmônicas são transformadas para grandezas ac, com uma frequência de deslocamento em 60Hz, dependendo da ordem harmônica a que está associada.⁽²⁾

As componentes dc são extraídas pelo filtro passa-baixa (LPF) implementado em ambos os eixos d-q, detectando, portanto, somente as quantidades alternadas relativas às harmônicas.

4.3 Operação Paralela dos Filtros Ativo e Passivo

É apresentada a seguir uma análise da operação combinada dos sistemas de filtragem, considerando o efeito da compensação harmônica global do sistema, as melhorias da forma de onda impostas pela inserção do filtro ativo, a coordenação da operação dos filtros, o fluxo de corrente entre os sistemas e os níveis de amplitude das principais grandezas envolvidas nos casos que serão simulados.

A análise do circuito baseada no modelo da Figura 8 mostra a representação do filtro ativo como uma fonte de corrente controlada. No controle de corrente do filtro ativo, o símbolo GA representa a função de transferência para o circuito de detecção e o símbolo kA representa o fator de compensação que determina o nível de compensação a ser realizada pelo filtro ativo em cima da corrente detectada.

São implementados e observados os resultados das simulações variando-se os valores do fator de compensação k_A , para valores de $k_A < 1,0$. Todas as simulações foram realizadas modelando-se o sistema de injeção de correntes (simulação da carga) com os cicloconversores na condição medida de demanda máxima, ou seja, todos os motores e cicloconversores operando em uma laminando consecutiva e sistema de filtragem passiva em operação. Além dessa condição, a carga dos cicloconversores é acrescida em 30% com relação à carga medida, modelando assim uma expansão do laminador e as conseqüências advindas desta expansão para o sistema elétrico.

Nas simulações apresentadas a seguir, o filtro ativo inicia sua operação após 0,3s, possibilitando apresentar o panorama anterior e posterior à entrada do filtro ativo.

4.4 Fator de Compensação do Filtro Ativo - $k_A = 1,0$

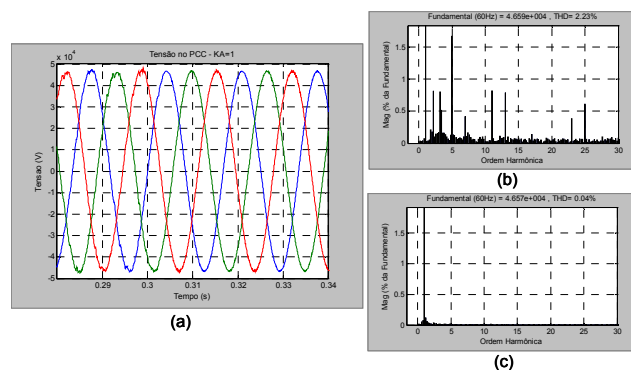


Figura 10. Tensão no Barramento de entrada (PCC): (a) Forma de onda da tensão; Espectros das harmônicas→ (b) Antes da atuação do filtro ativo (c) após atuação do filtro ativo

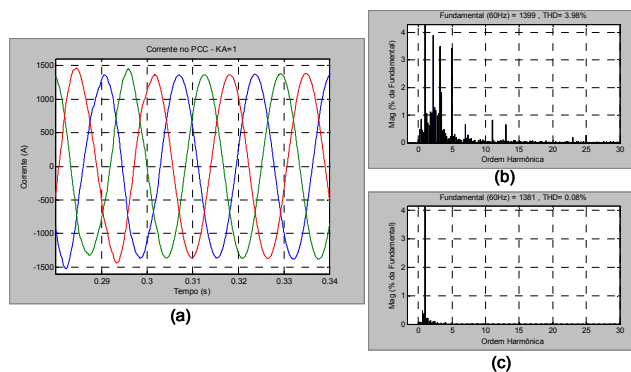


Figura 11. Corrente no barramento de entrada (PCC): (a) Forma de onda da corrente; Espectros das harmônicas (b) Antes da atuação do filtro ativo (c) após atuação do filtro ativo

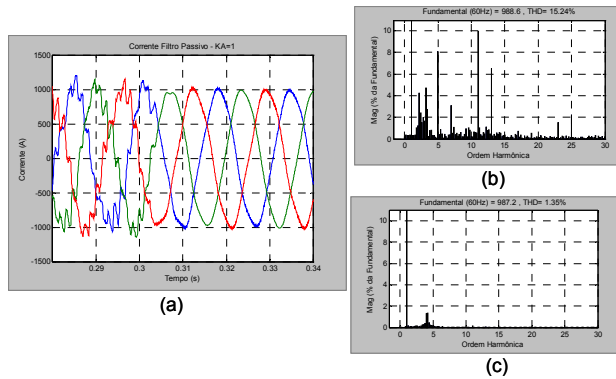


Figura 12. Corrente do filtro passivo

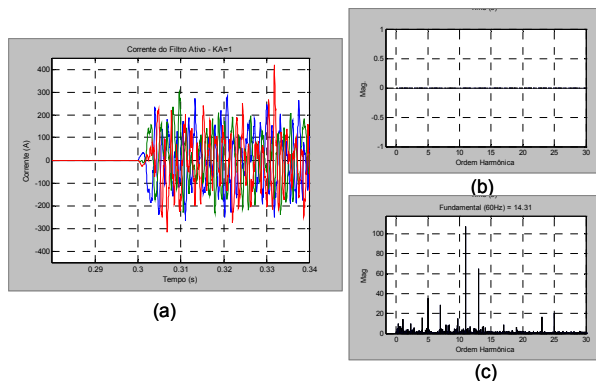


Figura 13. Corrente no filtro ativo

Para o caso simulado verifica-se um alto índice de compensação harmônica da tensão e também da corrente, 98%, como observado nas Figuras 12 e 13. Estes índices indicam uma compensação “perfeita” tanto da tensão quanto da corrente, ou seja, as distorções harmônicas praticamente inexistem.

Com o fator de compensação $kA=1,0$, as correntes harmônica produzidas pelos cicloconverters são absorvidas integralmente pelo sistema de filtragem ativa, não havendo correntes harmônicas fluindo pelo sistema de filtragem passiva e também pelo sistema elétrico. Como resultado, o sistema de filtros passivos trabalha somente como fonte de potência reativa fundamental, fornecendo ao sistema somente corrente em sua frequência fundamental, como visto na Figura 12. O maior esforço de filtragem harmônica passa a ser do filtro ativo, Figura 13.

De acordo com Akagi,⁽³⁾ o dimensionamento do filtro ativo pode ser avaliado pela seguinte formulação (considerando um conversor com chaveamento PWM):

$$P_{AF} = \sqrt{3} \times \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{AF\max}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Onde, $\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} = V_{linha}$ (para um chaveamento SVPWM – *Space Vector PWM*) e $I_{AF\max}$ representa o máximo valor verificado na corrente do filtro ativo.

Para $kA=1,0$, portanto, o filtro deverá ser dimensionado para uma potência maior que:

$$P_{AF} = \sqrt{3} \times 34,5kV \times \frac{400A}{\sqrt{2}} = 17MVA \quad (2)$$

Esta configuração do controle e do fator de compensação para a topologia de operação paralela dos sistemas de filtragem não se mostra interessante para este caso, já que suprime a operação do sistema de filtragem passiva e demanda um filtro ativo com alto dimensionamento em potência. Torna-se interessante, no entanto, nos casos onde o foco baseia-se na filtragem de correntes harmônicas absorvidas por um banco de capacitores, por exemplo, utilizado na compensação de reativos, em sistemas de distribuição de energia não radiais, ponta de linha, etc. Neste panorama, a topologia poderia ser aplicada evitando que o banco absorva as correntes harmônicas, passando a operar apenas na compensação de reativos ou de tensão, para o qual foi dimensionado.

4.5 Fator de Compensação do Filtro Ativo - $k_A = 0,6$

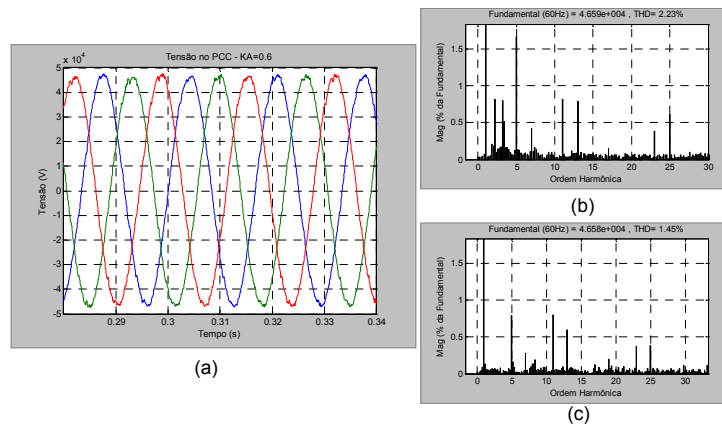


Figura 14. Tensão no barramento de entrada (PCC): (a) Forma de onda da tensão; → Espectros das harmônicas (b) Antes da atuação do filtro ativo, (c) após atuação do filtro ativo

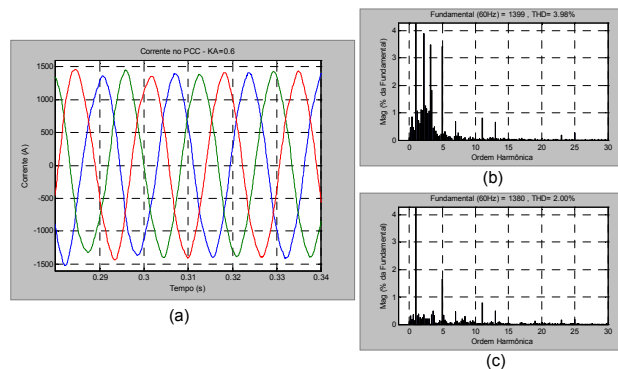


Figura 15 Corrente no barramento de entrada (PCC): (a) Forma de onda da corrente; Espectros de harmônicas → (b) Antes da atuação do filtro ativo , (c) após atuação do filtro ativo.

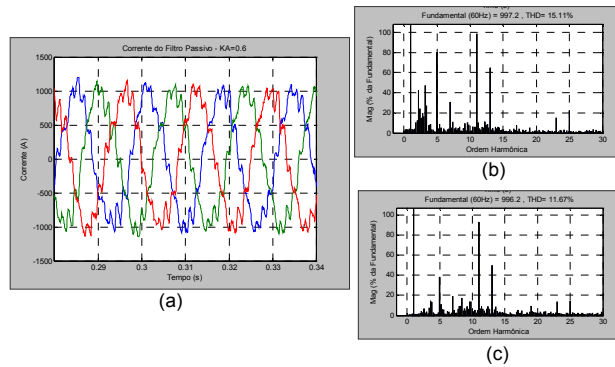


Figura 16 Corrente do filtro passivo

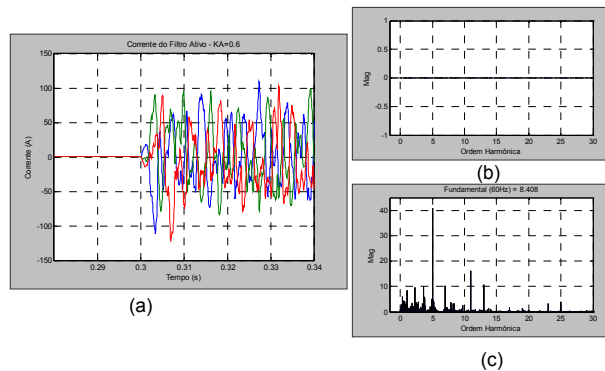


Figura 17 Corrente do filtro ativo

Com $kA = 0,6$ o índice de distorção harmônica da tensão é reduzido em 33% e a distorção harmônica da corrente registra uma redução de 43,83%. Percebe-se desta forma que o esforço de filtragem ativa contribui efetivamente para a redução das distorções harmônicas no sistema.

A redução do fator de compensação kA possibilita que a filtragem passiva atue de forma mais severa sobre as frequências de sintonia, deixando para o filtro ativo a tarefa de compensar apenas uma parcela das correntes harmônicas geradas pela carga, como visualizado nas figuras 18 e 19.

O filtro ativo para este caso deverá possuir um dimensionamento de potência da ordem de:

$$P_{AF} = \sqrt{3} \times 34,5kV \times \frac{100A}{\sqrt{2}} = 4,23MVA \quad (3)$$

4.6 Avaliação do efeito da implantação da topologia híbrida nas correntes dos ramos do filtro passivo

A Tabela 4 mostra os resultados de simulação de corrente por ramo do sistema de filtragem passiva, para o caso expandido do laminador, acoplado ao sistema de filtragem ativa ($kA=0,6$). Note-se que as correntes apresentadas tornam-se menores que aquelas anteriormente verificadas sem o sistema de filtragem híbrida e abaixo dos valores de corrente nominal.

Tabela 4. Valores de corrente nominais e simuladas nos ramos do sistema de filtragem passiva existente – caso expandido e com sistema de filtragem híbrida.

Corrente	Corrente Nominal (rms)	Corrente Simulada (rms)
la_B3	-	709,7 A
la_2,6HP	167 A	154,9 A
la_4,08FL	181 A	171,2 A
la_6HP	209 A	196,7 A
la_10HP	206 A	199,1 A

Estes resultados mostram a efetividade da combinação dos sistemas de filtragem, formando um filtro híbrido, possibilitando que o sistema de compensação atual trabalhe dentro de suas condições nominais, sem riscos de aumento de sua vulnerabilidade, frente a expansões da planta.

Assim, para as condições e premissas estudadas, um sistema de filtragem ativa, acoplado ao sistema existente com as configurações gerais a seguir é apresentado. Este filtro supriria as necessidades de compensação harmônica, em conjunto com o filtro passivo, sem prejuízo da performance do sistema elétrico diante de expansões da planta.

Tabela 5. Características gerais do filtro ativo.

Características gerais do filtro ativo	
Característica	Valor
Tensão	34,5kV rms
Corrente de pico máxima	100A
Potência	4,23MVA
BW	25th

ka=0,6

5 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo sobre o contexto de compensação harmônica, aplicada em um laminador de uma indústria siderúrgica. Uma topologia de filtragem híbrida foi proposta e implementada, mostrando a operação paralela de conjuntos de filtragem ativa e passiva em uma operação coordenada, no sistema elétrico do laminador.

REFERÊNCIAS

- 1 C.G. Ferreira, D.S.L. Simonetti, G.D.C Sousa, “Estudo da Compensação Harmônica na Aplicação de Cicloconversores em uma Planta Siderúrgica”, Anais do VII Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia, Santos-SP, Agosto 2007.
- 2 C.G.Ferreira, “Análise de um Filtro Ativo em Paralelo a Cicloconversores e Filtro Ativo”, Dissertação de Mestrado, PPGEE-UFES, Março 2008.
- 3 H. Akagi. “Active Harmonic Filter”, Proceedings of the IEEE, Vol.93, no. 12, p. 2128-2138, December 2005.