

Análise Técnico/Financeira para Correção de Fator de Potência em Planta Industrial com Fornos de Indução.

Jeremias Wolff e Guilherme Schallenger
Electric Consultoria e Serviços

Resumo — Este trabalho tem como objetivo apresentar considerações sobre a utilização de capacitores para correção do fator de potência em plantas industriais com cargas perturbadoras. A utilização de capacitores para correção do fator de potência em média tensão, associada a cargas não lineares como grandes fornos de indução, podem provocar: problemas de ressonância, determinando a redução da vida útil e/ou queima de capacitores; aumento de correntes harmônicas nos transformadores; e redução considerável da qualidade de energia interna. Para solucionar esses efeitos, propõem-se substituir os capacitores por filtros. Esta opção tem demonstrado resultados satisfatórios, corrigindo o fator de potência, drenando harmônicas de corrente e corrigindo distorções em frequências elevadas.

Palavras-chaves — Capacitores, Filtros, Fornos Indução, Ressonância, Fator de Potência.

I. INTRODUÇÃO

A correção do fator de potência em plantas industriais de médio e grande porte, normalmente é feita por capacitores fixos na média tensão e por capacitores com controle automático ligados na baixa tensão. Porém, inúmeras vezes a análise da qualidade de energia é deixada de lado, o que pode provocar sérios problemas tanto para a indústria como para a concessionária que atende o cliente.

Dentro do contexto geral de correção do fator de potência, o limite mínimo exigido é de 0,92. Em alguns casos, este valor poderá ser elevado: caso o cliente tenha contratos especiais, ou seja atendido com tensão acima de 230 kV. Ao optar pela correção de fator de potência em ambientes onde existem grandes cargas não lineares, justifica-se um estudo de qualidade de energia, projetando a melhor configuração da correção do fator de potência e, associado a isto, a filtragem de harmônicas. As vantagens apresentadas são: melhora da qualidade da energia, redução do custo com a queima de capacitores associada ao aumento da vida útil, redução de paradas de produção e multas por reativo excedente.

Este é um estudo técnico/financeiro sobre a correção de fator de potência em plantas industriais na fase de projeto do sistema elétrico. Neste contexto, será apresentado o impacto da instalação de bancos de capacitores em 13,8 kV em uma indústria conectada em 230 kV.

II. ANÁLISE ATUAL DO SISTEMA ELÉTRICO DA PLANTA INDUSTRIAL

O sistema elétrico em análise, conforme Fig. 1, é conectado em 230 kV com um transformador de 20/25 MVA. Esse transformador alimenta a barra em 13,8 kV, onde existe a planta industrial com diversos transformadores. Os capacitores BC 1, 2 e 3 de 1,62 MVAR são conectados na entrada de cada transformador que alimenta os fornos de indução (todos com 12 pulsos). Outro capacitor de 2,4 MVAR é conectado diretamente na barra principal da saída do transformador de 20/25 MVA. Os capacitores da baixa tensão têm controle automático e são instalados nos transformadores com saída em 380 Volts.

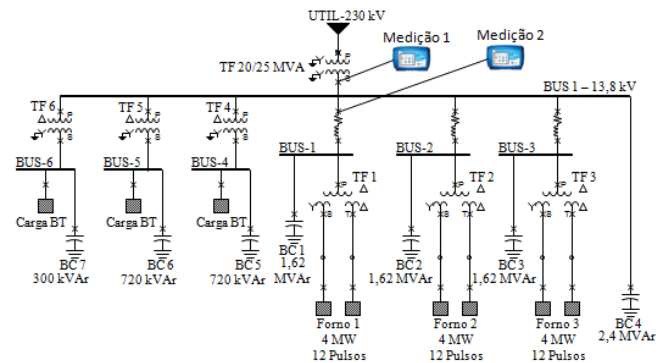


Fig. 1. Diagrama Unifilar Geral.

Os capacitores ligados em 13,8 kV não têm controle automático. O capacitor de 2,4 MVAR tem alimentador específico com disjuntor, e os capacitores de 1,62 MVAR são manobrados juntamente com os transformadores dos fornos de indução.

Foram realizadas medições de qualidade de energia com dois equipamentos DRANETZ – PX5 simultaneamente na barra principal de 13,8 kV, e na entrada do forno 1, conforme Fig. 1. Durante as medições foram feitas manobras nos capacitores para verificação de pontos de ressonância.

Os capacitores de 1,62 MVAR foram sugeridos pelo fabricante do forno de indução. Eles estão instalados na entrada de cada transformador que alimenta os fornos, corrigindo o fator de potência do conjunto (transformador + forno indução) para 0,98 indutivo, nos três patamares de potência dos fornos, leve, média e pesada. Este capacitor também tem a função de mitigar os harmônicos de alta frequência (entre 6 e 7 kHz) geradas pelo forno de 12 pulsos.

O capacitor de 2,4 MVAR, que fica instalado na barra principal de 13,8 kV, tem a função de corrigir os reativos que não são corrigidos nos transformadores da fábrica e na correção do fator de potência dos transformadores.

Os capacitores instalados na baixa tensão atendem as cargas restantes da planta, que em sua maioria são lineares. Eles são divididos em módulos de 25 kVAr até 75 kVAr com controle automático.

A instalação dos capacitores não levou em consideração a análise harmônica de ressonância com o impacto dos três fornos de indução ligados ou com funcionamento alternado, que juntos somam 12 MW em cargas não lineares.

Ocorreram problemas no banco de 2,4 MVar instalado na barra do secundário do transformador de 20/25 MVA e no banco de 1,62 MVar instalado junto ao forno 03, que foram o principal motivo da realização deste trabalho.

III. CUSTO ESTIMADO DO SISTEMA ATUAL DE CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

O sistema atual de correção de fator de potência teve os seguintes custos aproximados:

TABELA I. CUSTO ESTIMADO DA INSTALAÇÃO BANCOS CAPACITORES.

Local Instalação	Potência e Tensão [MVar/kV]	Custo [R\$]
Forno 1	1.62 / 13.8	30.000
Forno 2	1.62 / 13.8	30.000
Forno 3	1.62 / 13.8	30.000
Barra 13.8 kV	2.4 / 13.8	120.000
Baixa Tensão	1.74 / 0.38	108.000
Total	-----	328.000

IV. QUALIDADE DE ENERGIA COM A CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA SEM ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA

O sistema de correção de fator de potência apresenta problemas de qualidade de energia. Existem vários pontos de ressonância no sistema devido à manobra dos capacitores na baixa tensão e dos capacitores em 13,8 kV, instalados junto aos transformadores que alimentam os fornos.

V. ANÁLISE DA RESSONÂNCIA ENTRE CAPACITORES E TRANSFORMADOR.

Sendo a potência de curto circuito no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) muito elevada, a mesma não foi utilizada no modelo para análise de ressonância paralela.

Do ponto de vista da ressonância, consideramos a interação dos capacitores instalados na média tensão com o transformador de 20/25 MVA em diversas configurações.

Os modelos de carga não linear – Carga Pesada (Fig. 2 e Fig. 3), Carga Média (Fig. 4 e Fig. 5) e Carga Leve (Fig. 6 e Fig. 7), foram retirados da medição de corrente harmônica feita na entrada do alimentador do forno 1 conforme Fig. 1.

Na Tabela II são apresentados as respectivas potências e fator de potência para cada patamar de carga.

TABELA II. RELAÇÃO POTÊNCIA POR PATAMARES.

Carga	Leve [kW]/FP	Média [kW]/FP	Pesada [kW]/FP
Potência Forno [kW]	213/0.3 i	2830/0.6 i	4000/0.9 i
Potência Cargas [kW]	250/0.85 i	1020/0.85 i	2930/0.85 i

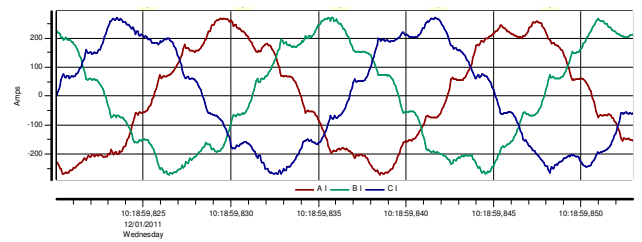


Fig. 2. Forma de Onda de Corrente - Carga Pesada - Forno 1.

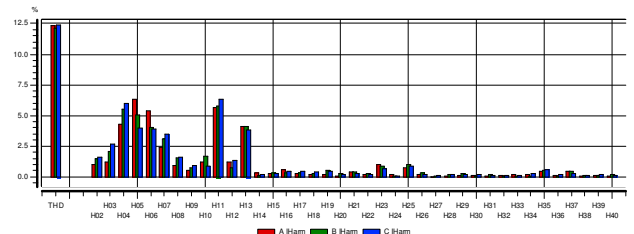


Fig. 3. Harmônicas de Corrente referente à Fig. 2 - Carga Pesada - Forno 1.

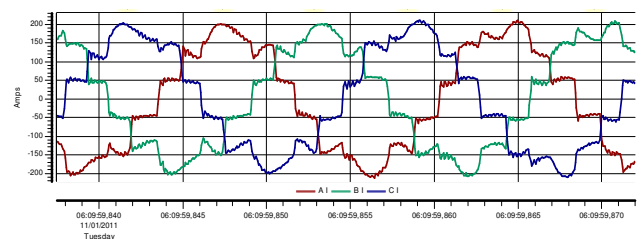


Fig. 4. Forma de Onda e Harmônicas de Corrente - Carga Média - Forno 1.

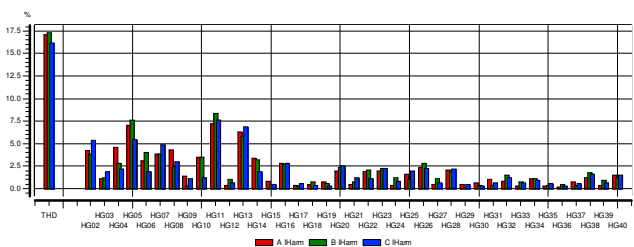


Fig. 5. Forma de Corrente referente à Fig. 4 - Carga Média - Forno 1.

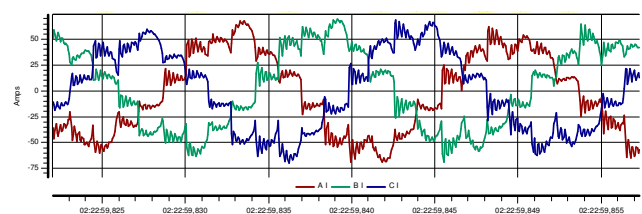


Fig. 6. Forma de Onda de Corrente - Carga Leve - Forno 1.

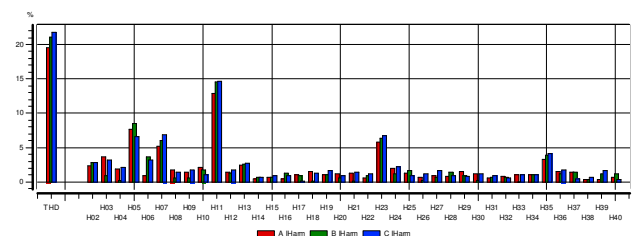


Fig. 7. Harmônicas de Corrente referente à Fig. 6 - Carga Leve - Forno 1.

Os fornos de indução são representados como cargas não lineares, com suas respectivas formas de onda e harmônicas

de corrente para os diferentes níveis de potência em leve, média e pesada conforme Tabela II.

Para as simulações de ressonância, representamos para cada situação o módulo da impedância da resposta em frequência, forma de onda de tensão e o espectro harmônico da tensão para a barra de 13,8 kV na saída do TF 20/25 MVA.

As cargas de baixa tensão serão representadas como cargas lineares com seus respectivos patamares de potência conforme Tabela II.

Casos Estudados	TR-01			TR-02			TR-03			Fábrica (Cargas BT)		Capacitor 2,4MVAR
	Forno	Carga	Capacitor	Forno	Carga	Capacitor	Forno	Carga	Capacitor	TR's	Carga	
Caso A	ON	Pesada	ON	ON	Pesada	ON	ON	Pesada	ON	ON	Pesada	ON
Caso B	ON	Pesada	ON	OFF	-	OFF	ON	Pesada	ON	ON	Pesada	ON
Caso C	ON	Pesada	OFF	ON	Leve	ON	ON	Pesada	ON	ON	Pesada	OFF
Caso D	ON	Leve	OFF	OFF	-	OFF	ON	Leve	ON	ON	Pesada	OFF
Caso E	ON	Leve	OFF	OFF	-	OFF	ON	Leve	ON	ON	Leve	OFF

Fig. 8. Configuração elétrica para cada caso

A. Módulo da Resposta em Frequência, Formas de Onda e Espectro Harmônico da Tensão

Para cada um dos casos da Fig. 8, temos o respectivo módulo da resposta em frequência, forma de onda de tensão e espectro harmônico da tensão.

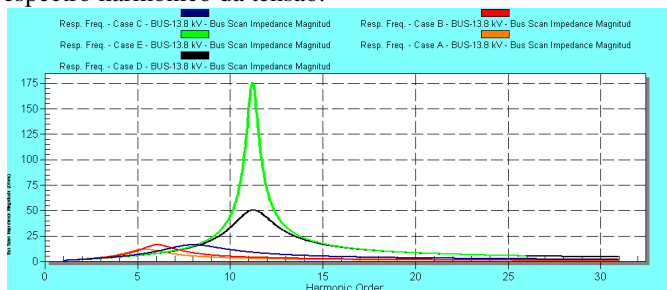


Fig. 9. Módulo da Impedância Simulada BUS-13,8 kV.

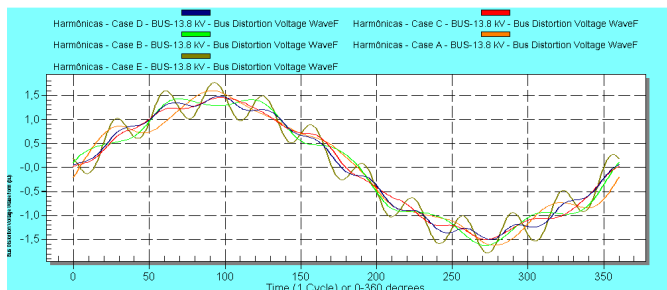


Fig. 10. Forma de Onda da Tensão Simulada BUS-13,8 kV.

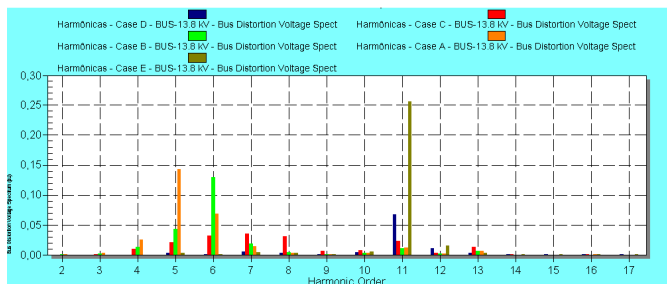


Fig. 11. Espectro Harmônico da Tensão Simulada BUS-13,8 kV.

B. Discussão dos Casos

i. Caso A

Esta configuração apresenta frequência de ressonância próxima de 300 Hz, e, como é uma frequência típica (presente na maioria das cargas não lineares), uma possível ressonância certamente provocaria esforços elevados nos capacitores que estivessem operando nesta configuração.

A fábrica nunca operou nesta configuração, pois tem contrato de demanda limitando a utilização de no máximo 2 fornos em carga pesada.

ii. Caso B

Esta configuração apresenta uma particularidade que já provocou a queima do capacitor de BC4-2,4 MVar conforme Fig.1 da planta estudada.

Por apresentar frequência de ressonância entre a 5ª e 6ª harmônicas, e esta ser também uma frequência típica de cargas não lineares, esta configuração não pode ser medida (somente simulação), pois ocorreu a queima do capacitor BC4, conforme Fig. 1, por duas vezes, em um evento de ressonância paralela no primeiro ano de operação da planta.

Desde a última queima do capacitor, a planta opera sem o mesmo, e sente sensível melhora na qualidade de energia.

iii. Caso C

Este é o caso mais típico de operação da fábrica com produtividade máxima, respeitando seu atual contrato de demanda com a concessionária.

Por apresentar frequência de ressonância entre a 7ª e 8ª harmônicas, e esta ser também uma frequência típica de cargas não lineares, esta configuração já apresenta problemas, pois, além da queima do capacitor de 2,4 MVar, um dos capacitores dos fornos também já queimou em um evento de ressonância.

A planta continua operando nesta configuração, pois também precisa atender os limites de fator de potência.

iv. Caso D

O espectro da distorção harmônica de tensão, conforme a Fig. 11, mostra uma grande amplificação na 11ª harmônica. É nesta ordem que temos a maior amplitude de corrente harmônica gerada pelos fornos.

Este caso ocorre seguidamente durante o horário de ponta, tempo em que o cliente por necessidade de contrato, reduz sua potência para adequar-se ao seu contrato de demanda e evitar custos maiores de energia durante determinado horário.

v. Caso E

Este caso é uma variação do Caso D, onde é reduzida a potência das outras cargas lineares da fábrica.

A redução do amortecimento das cargas lineares torna-se visível na Fig. 9, onde é mostrado o gráfico de resposta em frequência.

Este caso ocorre seguidamente durante o horário de ponta, tempo em que o cliente por necessidade de contrato, reduz sua potência para adequar-se ao seu contrato de demanda e evitar custos maiores de energia durante determinado horário.

VI. ANÁLISE MEDIÇÕES REALIZADAS NO SECUNDÁRIO TRANSFORMADOR.

As medições de qualidade de energia foram realizadas no secundário do transformador de 20/25 MVA conforme Fig. 1. Os resultados da medição são apresentados abaixo, conforme as configurações que se apresentaram possíveis:

i. Caso E

Durante esse intervalo da medição, a configuração da planta era a do (Caso E) (Fig. 8). A ordem da ressonância paralela simplificada para o TF de 20/25 MVA e somente o BC1 1,62 MVar ligado é:

$$nr \cong \sqrt{\frac{S_{cc} \left(\frac{MVA}{z\%} \right)}{MVAR}} \cong \frac{20}{\frac{0.1}{1.62}} \cong \frac{200}{1.62} \cong 11.11 \quad (1)$$

$$R_{Trafo} = 0 \text{ e } R_{carga} = 0 \quad (2)$$

Na Fig. 12 e Fig. 13 existe uma grande elevação da 11ª harmônica de tensão medida. Esse evento acontece quando temos uma manobra interna, onde o conjunto, capacitor, transformador e forno são desligados, ficando somente dois fornos e um capacitor de 1,62 MVar. Neste momento/configuração temos o pior caso da distorção harmônica.

A elevação da 11ª harmônica pode ser verificada na resposta em frequência da Fig. 9 (Caso E), na análise simplificada da ressonância paralela conforme (1) e na medição realizada no secundário do TF 20/25 MVA (Fig. 12 e Fig. 13), com a configuração de carga apresentada na Fig. 8 (Caso E).

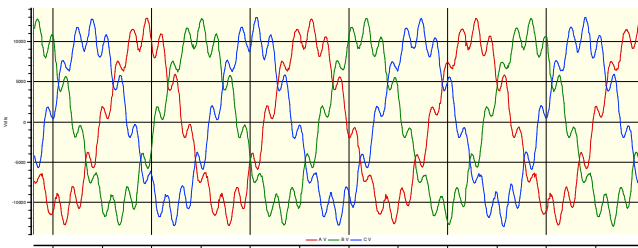


Fig. 12. Tensão Medida com configuração do Caso E BUS-13.8 kV.

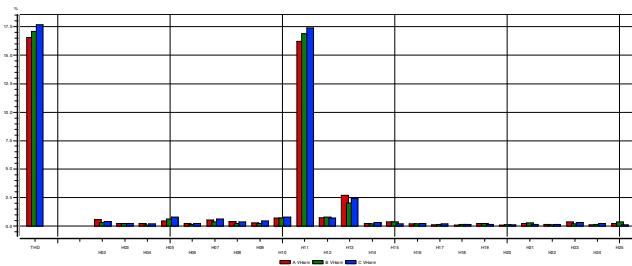


Fig. 13. Harmônicas de Tensão referente à Fig. 12. BUS-13.8 kV.

ii. Caso C

Durante este intervalo de medição a configuração da planta era a do “Caso C” (Fig. 8). A ordem da ressonância paralela

simplificada para o TF de 20/25 MVA, com BC1 e BC2 ambos de 1,62 MVar ligados, é:

$$nr \cong \sqrt{\frac{S_{cc} \left(\frac{MVA}{z\%} \right)}{MVAR}} \cong \frac{20}{\frac{0.1}{1.62+1.62}} \cong \frac{200}{3.24} \cong 7.85 \quad (3)$$

$$R_{Trafo} = 0 \text{ e } R_{carga} = 0 \quad (4)$$

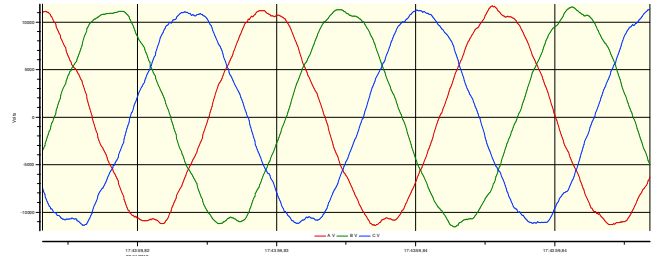


Fig. 14. Tensão Medida com configuração do Caso C BUS-13.8 kV.

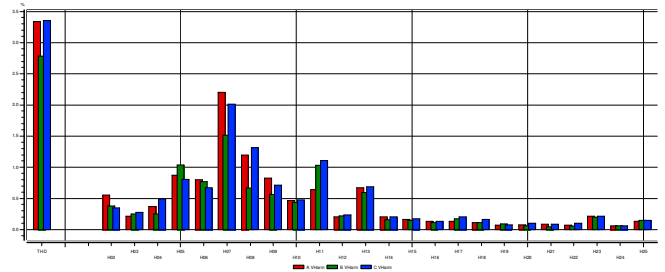


Fig. 15. Harmônicas de Tensão referente à Fig. 14 BUS-13.8 kV.

Na Fig. 14 e Fig. 15 mostramos a tensão harmônica registrada na barra de saída do transformador de 20/25 MVA. Neste momento estavam ligados os três fornos, conforme o Caso C da Fig. 8, e dois capacitores de 1,62 MVar. A ordem harmônica da ressonância paralela entre o transformador e os bancos de capacitores foi calculada de maneira simplificada, conforme (3) e confirmada através da medição. Além da 11ª e 13ª ordens geradas pelos fornos, a 7ª ordem também se sobressai confirmando a ressonância próxima a está frequência harmônica.

iii. Sem Capacitores

Outro ponto importante da medição realizada do secundário do transformador diz respeito ao desligamento total dos capacitores em média tensão.

Durante esta configuração da planta, surgiram componentes na tensão de alta frequência (Fig. 16). Estas componentes de alta frequência são função da frequência de chaveamento dos fornos de 12 pulsos.

Neste caso, os capacitores dimensionados para os fornos cumprem duas funções, a saber: correção do fator de potência e atenuar as componentes de alta frequência.

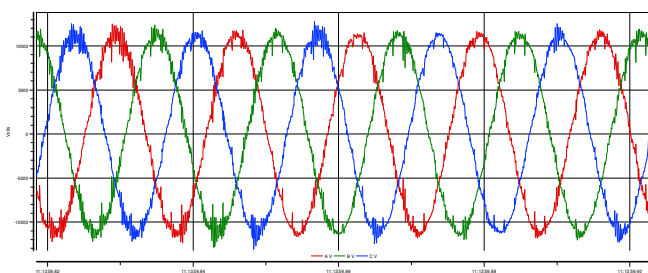


Fig. 16. Tensão Medida Sem Capacitores BUS-13,8 kV.

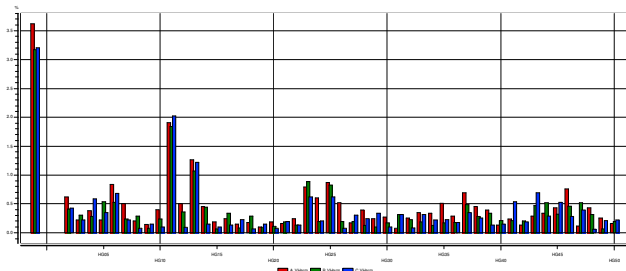


Fig. 17. Harmônicas de Tensão referente à Fig. 16. BUS-13,8 kV.

VII. MITIGAÇÃO E CUSTO DA IMPLANTAÇÃO DA FILTRAGEM HARMÔNICAS.

A solução final será a troca da correção do fator de potência convencional para filtros passivos sintonizados em 13,8 kV.

Abaixo temos o custo estimado para tal aplicação, tendo em vista a correção do (a) fator de potência, (b) atenuação das componentes de alta frequência, (c) redução das correntes e tensões harmônicas, (d) elevação da vida útil dos componentes elétricos ligados ao sistema e (e) a redução das paradas de produção e problemas de qualidade de energia.

TABELA III. CUSTO ESTIMADO DOS FILTROS E INSTALAÇÃO.

Local Instalação	Potência e Tensão [MVar/kV]	Custo [R\$]
Forno 1	1.62 MVar / 13.8 / 11ª ordem	90.000
Forno 2	1.62 MVar / 13.8 / 11ª ordem	90.000
Forno 3	1.62 MVar / 13.8 / 11ª ordem	90.000
Barra 13.8 kV	1.2 MVar / 13.8 / 7ª ordem	100.000
Barra 13.8 kV	1.2 MVar / 13.8 / 5ª ordem	100.000
Adicionais	Instalação / Manobra / Extras	150.000
Total	-----	620.000

Para casos futuros, deve-se analisar a instalação de filtros de harmônicos que, apesar de terem custo de instalação mais elevado (Tabela III), justificam os investimentos devido à redução do número de paradas por queima de capacitores e a melhora considerável na qualidade de energia da instalação, com redução dos níveis de harmônicos gerados e das ocorrências de ressonâncias harmônicas indesejadas.

VIII. CONCLUSÃO

Nesse estudo verificamos que as cargas não lineares de grande porte, que necessitam de grandes quantidades de reativo capacitivo para correção do fator de potência, demandam um estudo mais completo, considerando os efeitos

das múltiplas frequências de ressonância para cada configuração elétrica e para cada patamar de carga.

Conclui-se também que a falta de especificação completa do espectro harmônico de corrente dos fornos em diferentes patamares de carga pode comprometer o projeto de correção de fator de potência, visto que alguns fenômenos só foram observados através de medições.

Determinados fabricantes de fornos de indução utilizam capacitores para correção do fator de potência em fornos de 12 pulsos, não colocando claramente que, além da função de correção de fator de potência, os mesmos trabalham para redução de componentes em alta frequência. Entretanto como foi observado nas simulações e medições, este tipo de correção provoca ressonância em baixas frequências, onde as amplitudes das correntes harmônicas são maiores e exigem maiores esforços elétricos, resultando na queima prematura dos capacitores. Portanto, casos onde os fornos de indução tenham componentes de alta frequência, além de seus harmônicos característicos, uma análise técnico/financeira deverá ser feita levando em conta os níveis de distorção harmônica para diferentes configurações. Nestes casos, o filtro de mais alta ordem deverá manter a impedância do sistema para a enésima frequência da corrente harmônica em um nível que não comprometa o funcionamento de equipamentos sensíveis ligados na planta.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. Granaghan, S. Santoso e H. W. Beaty. Electrical Power System Quality, McGraw-Hill. 2003.
- [2] J. Arrilaga, B.C. Smith, N. R. Watson and A. R. Wood. Power System Harmonic Analysis, John Wiley. 1997.
- [3] C. Sankaran, Power Quality, CRC Press. 2002.
- [4] Dranetz, Dran-View 6 User's Guide.