

XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS EM CIRCUITOS SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO

ENG. JOSÉ RUBENS MACEDO JUNIOR

ENERSUL - EMPRESA ENERGÉTICA DE MATO GROSSO DO SUL S.A.

Palavras-chave: harmônicas, filtros sintonizados, circuitos secundários

Foz do Iguaçu, 19 a 23 de novembro de 2000

1) INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, as unidades consumidoras conectadas aos circuitos secundários de distribuição possuem um caráter fortemente indutivo e de características não-lineares. Este fato se deve aos avanços tecnológicos verificados nos últimos anos, a partir dos quais surgiram equipamentos como lâmpadas fluorescentes compactas, reatores eletrônicos, aparelhos de aquecimento com controle estático de temperatura, microcomputadores, televisores com modernas fontes de alimentação a estado sólido, dentre outros. Todos estes equipamentos possuem características não-lineares ou, em outras palavras, “injetam” nos circuitos secundários de distribuição das concessionárias de energia correntes com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. São as chamadas frequências harmônicas.

Em linhas gerais, com a proliferação destas cargas geradoras de harmônicas, os sistemas elétricos, tanto das concessionárias de energia como das unidades consumidoras, passaram a conviver com o problema da distorção da onda de tensão e suas consequências.

Os efeitos da distorção da forma de onda de tensão podem ser os mais variados possíveis como, por exemplo, comprometimento da precisão de medidores de energia do tipo Watt-hora indutivos, ressonâncias paralelas entre capacitores de potência e a indutância do sistema elétrico equivalente, mal funcionamento de relés microprocessados, assim como, de relés que dependem de valores de pico ou passagem por zero das ondas de tensão ou corrente para operação, acarretando em interrupção de fornecimento de energia elétrica em alimentadores de distribuição. Dentre outros efeitos, podem-se citar também as interferências em sistemas de telecomunicação, perda da vida útil de transformadores e motores elétricos, etc.

Para a mitigação do problema relacionado a harmônicas, uma das práticas mais usuais em termos de Brasil é a aplicação de filtros harmônicos passivos. Essa solução vem ocupando cada vez mais espaço em grandes instalações industriais ou, ainda, em subestações conversoras para transmissão em corrente contínua. Nos sistemas de distribuição (média e baixa tensão), entretanto, praticamente não existem instalações de filtros passivos visando-se o controle de harmônicas.

Nesse sentido, o presente trabalho propõe uma solução inovadora no contexto nacional para a melhoria dos níveis da qualidade da energia elétrica em circuitos secundários de distribuição.

2) ASPECTOS GERAIS

Nos sistemas elétricos de distribuição, particularmente nos circuitos secundários de baixa tensão, é cada vez maior o número de problemas relacionados às frequências harmônicas. Os problemas vão desde de pequenas interferências em sinais de comunicação até ressonâncias paralelas entre capacitores de baixa tensão e a indutância equivalente da rede. Nos parágrafos seguintes serão apresentadas algumas situações nas quais as frequências harmônicas comprometem o bom desempenho das cargas conectadas à rede de energia das concessionárias.

Atualmente, algumas concessionárias brasileiras estão instalando capacitores de baixa tensão em circuitos secundários de distribuição. Esta medida, sem dúvida alguma, traz vários benefícios ao circuito como, por exemplo, diminuição do carregamento dos transformadores de distribuição, diminuição das perdas técnicas no segmento considerado, aumento do nível de tensão, melhoria do fator de potência, entre outros. Entretanto, todos estes benefícios se relacionam somente à frequência fundamental do sistema elétrico. Sob o ponto de vista harmônico, esta técnica pode se mostrar muito insatisfatória, principalmente, quando da ocorrência de ressonância paralela entre o capacitor instalado na baixa tensão e a indutância equivalente do sistema elétrico a montante, no caso, o transformador de distribuição.

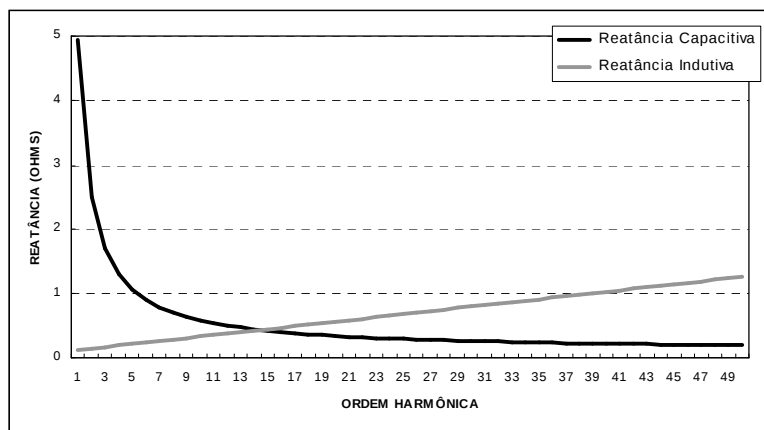


Figura 1 – Reatâncias do transformador e do capacitor em função da frequência.

Considerando-se um determinado circuito secundário do sistema de distribuição da Enersul, ao qual se encontra instalado um capacitor de baixa tensão (220 V) com uma potência de 10 kVAr, tem-se uma frequência de ressonância paralela em torno da harmônica de ordem 15, conforme pode ser observado pela figura 1. Isto equivale a dizer que a impedância equivalente, considerando-se o capacitor e

o transformador de distribuição, terá um máximo nesta frequência. Dessa forma, se a ordem de uma corrente harmônica injetada por um equipamento perturbador corresponder à ordem da ressonância paralela, há risco de sobretensões harmônicas, especialmente quando a rede opera com pouca carga. Estas sobretensões poderiam danificar os capacitores, assim como, cargas sensíveis conectadas ao circuito. Para o caso de circuitos secundários de distribuição, os riscos se tornam ainda maiores quando a frequência de ressonância paralela se encontra entre 180 e 420 Hz.

Para o caso específico de circuitos aos quais se encontram instalados capacitores de baixa tensão, verificam-se, ainda, outros problemas decorrentes do avanço tecnológico presente nestes sistemas. Exemplo disso, são os circuitos aos quais se encontram acoplados modernos sistemas baseados em transmissão de dados como, por exemplo, medidores de dupla tarifação para implantação da Tarifa Amarela. A leitura desses medidores é realizada a partir de qualquer ponto do circuito secundário (inclusive através de uma tomada comum no interior de uma determinada residência) pela leitura de sinais de alta frequência. Nesse sentido, os capacitores de potência instalados no mesmo circuito apresentam, para altas frequências, valores muito pequenos de reatância capacitiva - conforme pode ser observado na figura 1 - se comportando, portanto, como verdadeiros filtros para os sinais de alta frequência utilizados nos modernos sistemas exemplificados acima.

Conforme pode-se verificar na figura 1, para valores elevados de frequência a reatância capacitiva do capacitor é praticamente nula, comportando-se, portanto, como um filtro passivo para os sinais (da ordem de kHz) transmitidos por equipamentos com tecnologias avançadas de transmissão de dados, impossibilitando o correto funcionamento dos mesmos.

Em linhas gerais, a presença de correntes harmônicas em circuitos secundários de distribuição emitidas por equipamentos perturbadores, vêm se tornando cada vez mais acentuada. Paralelamente a este fato, os equipamentos utilizados em residências, instalações comerciais e até mesmo em pequenas indústrias conectadas à baixa tensão, passam a exigir uma qualidade da energia elétrica cada vez maior para o seu correto funcionamento.

Sob o ponto de vista harmônico, os circuitos secundários típicos dos sistemas de distribuição apresentam um espectro rico em 5^a harmônica. Apenas a título de ilustração, a figura 2 apresenta o espectro de tensão medido no barramento secundário (220 V) de um transformador de distribuição de 112,5 kVA, com predominância de unidades consumidoras residenciais.

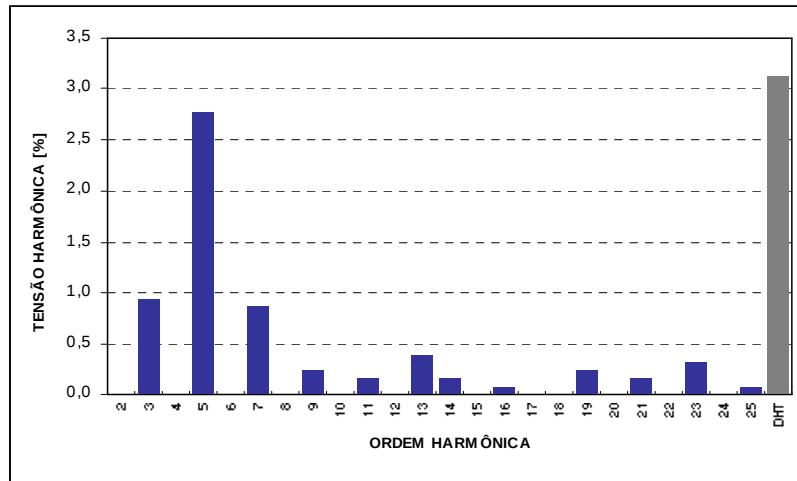


Figura 2 – Espectro harmônico de tensão típico dos circuitos secundários de distribuição.

No Brasil, ainda não existe uma legislação específica acerca dos limites para frequências harmônicas nos sistemas de energia elétrica. Desse modo, as concessionárias, de um modo geral, vêm praticando alguns limites, cuja tendência, de acordo com a referência [1] é apresentada nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental.

V < 69kV				V ≥ 69kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR
3,5,7	5%	2,4,6	2%	3,5,7	2%	2,4,6	1%
9,11,13	3%			9,11,13	1,5%		
15 a 25	2%	8, ...	1%	15 a 25	1%	8, ...	1%
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
DHT = 6%				DHT = 3%			

Tabela 2 – Limites de tensão por consumidor expressos em porcentagem da tensão fundamental.

V < 69kV				V ≥ 69kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR
3 a 25	1,5%	TODOS	0,6%	3 a 25	0,6%	TODOS	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DHT = 3%				DHT = 1.5%			

Em geral, os limites globais estabelecidos pelas recomendações do GCOI/GCPS, tabelas 1 e 2, são ultrapassados apenas em circuitos secundários onde se verificam unidades consumidoras possuidoras de equipamentos de elevado caráter não-linear, como por exemplo, grandes motores com sistemas de partida suaves, máquinas de solda, grande quantidade de lâmpadas fluorescentes compactas ou fluorescentes

convencionais com reatores eletrônicos e, mais raramente, chuveiros e torneiras com controles estáticos de temperatura.

A partir desse momento, serão mostrados os fundamentos teóricos básicos que permitiram o desenvolvimento de um equipamento de mitigação dos problemas referentes às frequências harmônicas em circuitos secundários de baixa tensão. Trata-se de um filtro harmônico passivo para instalação junto aos circuitos secundários de distribuição. Para análise do comportamento do equipamento escolheu-se um circuito secundário ao qual se encontra conectada uma unidade consumidora cujo barramento de conexão à rede apresenta tensões harmônicas superiores aos limites estabelecidos pela tabela 2. Neste sentido, foram realizadas diversas medições, antes e após a instalação do equipamento, em diversos pontos do circuito.

3) FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O projeto piloto desenvolvido pela Enersul constitui-se, basicamente, na construção de um filtro passivo e sua conexão a um circuito secundário de baixa tensão. O equipamento é composto pela ligação de reatores [L] em série com capacitores [C] de baixa tensão, conforme ilustra a figura 3.

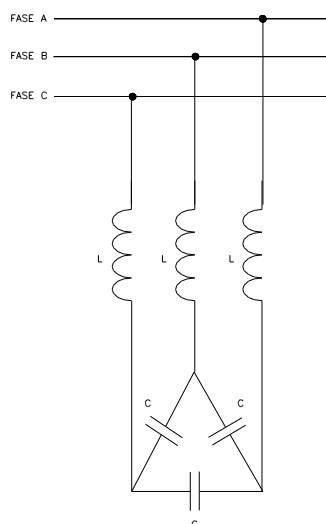


Figura 3 – Diagrama trifilar simplificado do filtro passivo sintonizado de baixa tensão.

O reator [L] pode ser conectado ao capacitor de duas maneiras diferentes, dependendo da posição da frequência de sintonia do ramo LC [1]. As duas formas são:

- sintonizando o ramo LC em frequências fracionárias, fora das linhas do espectro harmônico;
- sintonizando do ramo LC em uma frequência múltipla inteira da fundamental para a qual se deseja filtrar as correntes harmônicas.

Para a sintonização em frequências fracionárias, a seleção de [L] é tal que o ramo LC se comporta indutivamente para as frequências harmônicas superiores à frequência de sintonia. Dessa forma, por exemplo, para um filtro sintonizado em uma ordem harmônica de 4,8 (288 Hz), considerando-se frequências iguais ou superiores à 5^a harmônica, o sistema “perceberá” apenas um reator conectado ao circuito, não existindo, desse modo, nenhum risco de ocorrência de ressonâncias paralelas nessa faixa de frequências.

A utilização desta forma de sintonização do ramo LC, oferece duas vantagens, a saber [1]:

- elimina o perigo de ressonâncias paralelas entre os capacitores e o equivalente do sistema para correntes com frequências superiores à frequência de sintonia;
- elimina correlativamente as altas distorções da tensão da rede, sem, entretanto, reduzir as mesmas a um valor especificado.

Considerando-se, agora, a sintonização do ramo LC em uma frequência múltipla inteira da fundamental, tem-se dois tipos distintos de filtros: *filtros sintonizados* e *filtros amortecidos*.

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância (praticamente igual à resistência do circuito). Para frequências menores que a frequência de sintonia são capacitivos, e para as frequências superiores àquela frequência, são indutivos. Portanto, para a frequência fundamental, estes filtros funcionam como compensadores de reativos.

Os filtros amortecidos são circuitos formados por capacitores, indutores e resistores em diferentes combinações, e que oferecem baixa impedância sobre uma larga faixa de frequência. Na frequência

fundamental, a exemplo dos filtros sintonizados, os filtros amortecidos também apresentam impedância predominantemente capacitiva. Já nas frequências superiores, eles são essencialmente resistivos [3].

Para o presente projeto, optou-se por motivos de segurança, devido principalmente à inconstância das características de topologia dos circuitos secundários de baixa tensão, a sintonização do ramo LC em frequências fracionárias, mais especificamente, em 288 Hz.

A nível de comparação, a figura 4 ilustra a variação do ângulo da impedância equivalente do ramo LC em função da frequência, para sintonização em frequências fracionárias e inteiras.

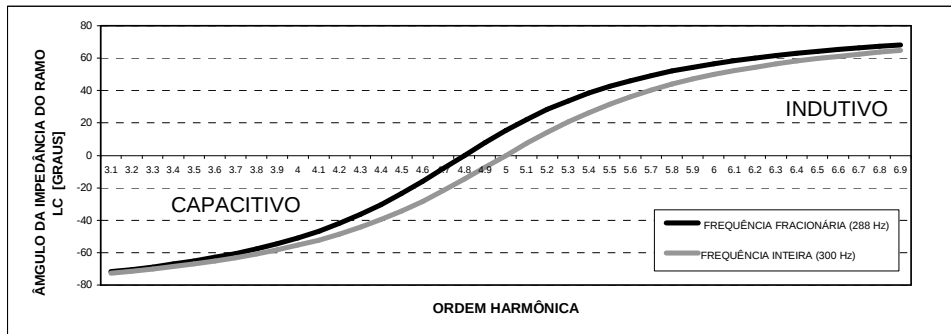


Figura 4 – Variação do ângulo da impedância do ramo LC em função da frequência.

Conforme observado na figura 4, para a sintonização do ramo LC na frequência de 288 Hz, o mesmo se comporta de forma indutiva para as frequências do espectro típico iguais ou superiores a 300 Hz (5^a harmônica).

A seguir, para um melhor posicionamento do leitor ao longo deste trabalho, apresentam-se os equacionamentos básicos relativos à sintonização entre capacitores e indutores para a composição de filtros harmônicos passivos. Este processo se baseia tão somente nos conceitos de ressonância série.

A ressonância série é uma condição na qual um circuito contendo pelo menos um capacitor e um indutor, apresentará uma impedância de entrada puramente resistiva. Aplicando-se este conceito ao circuito ressonante série do equipamento, figura 5, cuja impedância complexa é dada pela equação (1), observa-se que com a variação da frequência sobre o ramo LC existirá um valor de frequência f_r em que esta impedância será puramente resistiva.

$$Z(\omega) = R + j.(X_L - X_C) \quad (1)$$

Na figura 5, assim como em (1), o valor de $[R]$ representa a resistência intrínseca do reator e dos cabos de conexão do equipamento à rede. Considerando-se que o capacitor é trifásico e ligado em delta, a capacitância $[C]$ considerada nos cálculos é a capacitância da conexão equivalente em estrela das unidades capacitivas monofásicas que compõem o capacitor.

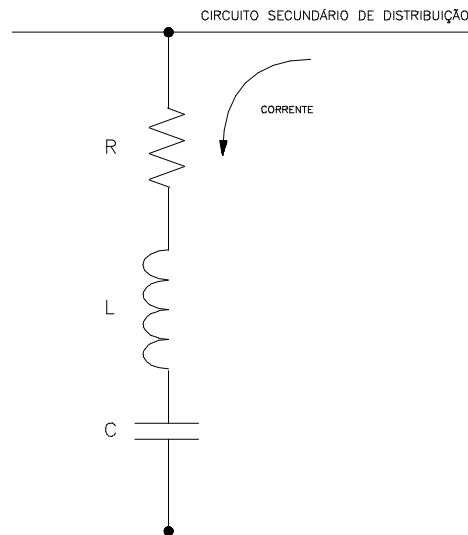


Figura 5 – Representação monofásica do ramo LC.

Considerando-se a frequência de sintonia utilizada no desenvolvimento do equipamento como sendo 288 Hz (harmônica fracionária de ordem 4,8) e a aplicação do mesmo junto ao circuito secundário de um transformador de 45 kVA / 220 Volts fase-fase, tem-se como parâmetros fixos os seguintes valores:

- Potência do capacitor = 10 kVA (conforme tabela 3);
- Frequência de sintonia = 4,8 p.u.;
- Tensão nominal = 220 Volts.

O processo de sintonia do filtro é simplesmente o cálculo da frequência para ressonância série entre o capacitor e o indutor do ramo LC. A variável fixa no caso, é a capacitância do capacitor, que não deve ser superior à potência reativa mínima requerida pelo transformador de distribuição ao longo do dia. Após análises e medições do carregamento reativo de vários transformadores, obteve-se a tabela 3 na qual estão relacionadas as potências de capacitores para utilização em transformadores de diferentes potências.

Tabela 3 – Potências de capacitores para diferentes transformadores.

POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR [kVA]	TENSÃO [V]	POTÊNCIA DO CAPACITOR [kVar]
30	220	7,5
45	220	10
75	220	15
112,5	220	20

Considerando-se o transformador de distribuição de 45 kVA (com aproximadamente 90% de carregamento) utilizado no projeto em estudo, tem-se que a variação entre a potência reativa do capacitor a ser utilizado no filtro e o fator de potência do circuito na frequência fundamental obedece à curva da figura 6.

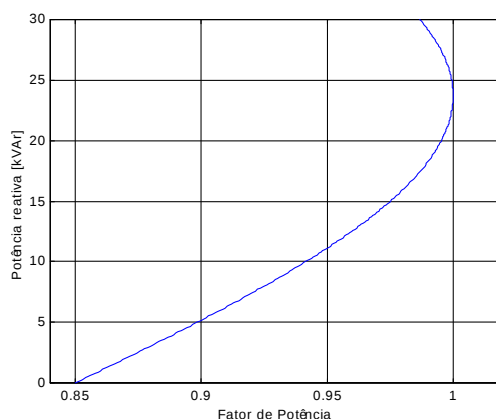


Figura 6 – Variação do fator de potência com a potência do capacitor.

Pela análise da figura, pode-se verificar que a máxima potência capacitiva possível de se utilizar no filtro, sem que o circuito secundário torne-se capacitivo, é de aproximadamente 25 kVar. Em termos práticos, considerou-se como padrão um fator de potência de 0,95, o que equivale a um capacitor de 10 kVar para utilização junto a um transformador de 45 kVA.

Um outro aspecto a ser considerado no desenvolvimento do filtro de baixa tensão diz respeito ao indutor. Nesse sentido, optou-se por indutores com núcleo de ferro. O dimensionamento dos reatores se relaciona com a frequência de sintonia desejada, com a corrente total que circulará pelo ramo e, também, com a tensão aplicada entre seus terminais.

Em geral, a grande particularidade dos circuitos secundários de distribuição diz respeito à impedância percentual dos transformadores de distribuição, a qual tem o valor de aproximadamente 3,5% para diferentes tipos, potências e fabricantes. A seguir, considerando-se diferentes transformadores de

distribuição de 45 kVA, inclusive de diferentes fabricantes, traçou-se, conforme indica a figura 7, a impedância equivalente entre o ramo LC e o respectivo transformador. Para tanto, considerou-se uma variação da impedância percentual do transformador entre 3,30% e 3,70%. Vale ressaltar que a impedância do sistema tem pouca influência frente à impedância do transformador, que é cerca de 30 vezes maior.

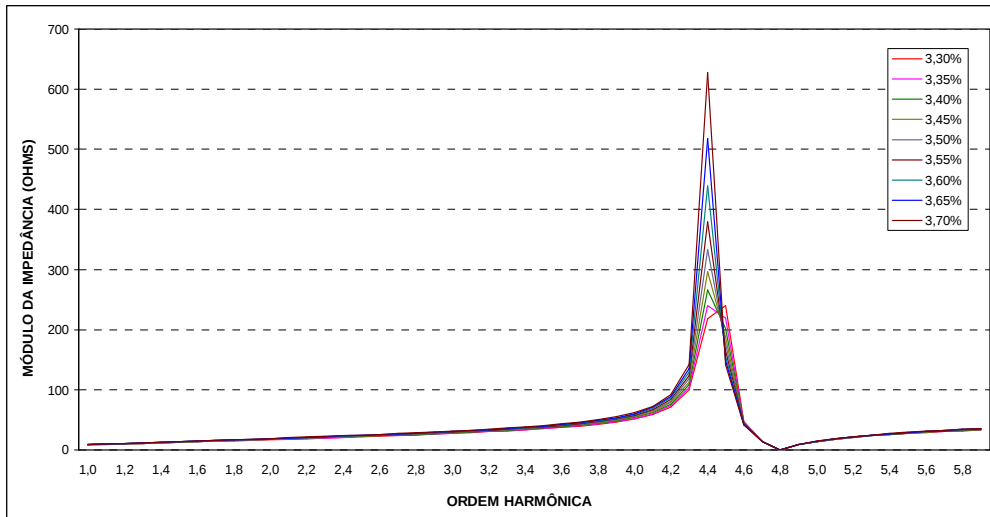


Figura 7 – Impedância equivalente entre o transformador de distribuição e o ramo LC.

Como pode ser observado pela figura 7, a resposta em frequência da impedância equivalente entre o transformador e o ramo LC varia muito pouco em função das impedâncias percentuais típicas dos transformadores de distribuição, o que permite o desenvolvimento de configurações únicas de filtro para todos os transformadores de distribuição, respeitando-se apenas a potência capacitiva mínima para cada potência de transformador.

Considerando-se um capacitor trifásico de 10 kVAr, para composição do filtro a ser aplicado a um transformador de 45 kVA, tem-se que a reatância capacitiva equivalente para a conexão em estrela das unidades capacitivas que compõem o capacitor trifásico em delta é exatamente igual a 1/3 (um terço) da reatância capacitiva entre fases do capacitor em questão. Dessa forma, tem-se:

$$X_{C\Delta} = \frac{V^2}{Q_C} = \frac{(220)^2}{10 \cdot 10^3} = 4,84 \, \Omega \quad (2)$$

$$X_{CY} = \frac{1}{3} \cdot X_{C\Delta} = \frac{4,84}{3} = 1,61 \Omega \quad (3)$$

onde:

$X_{C\Delta}$ = Reatância capacitiva para ligação em delta [Ω];

X_{CY} = Reatância capacitiva para ligação equivalente em estrela [Ω];

V = tensão entre fases no capacitor [Volts];

Q_C = potência reativa do capacitor [Var].

A ressonância série do circuito LC a ser constituído se dará quando $X_C = X_L$ na equação (1).

Assim, tem-se:

$$\omega.L = \frac{1}{\omega.C} \quad (4)$$

Onde: $\omega = 2.\pi.f_r$

Rescrevendo-se a equação (4), resulta a frequência de sintonia do ramo LC.

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Considerando-se os parâmetros fixos citados anteriormente, tem-se o cálculo da indutância do reator que irá compor o equipamento. Assim, isolando-se a variável [L] na equação (5), resulta:

$$L = \frac{1}{4.\pi^2.f_r^2.C} \quad (6)$$

As variáveis fixas na equação (6) são:

$$C = \frac{Q_C}{\omega V^2} = \frac{10000}{2\pi \cdot 60 \cdot 220^2} = 0,000548 \text{ Farad} \quad (7)$$

$$f_r = 4,8 \text{ p.u} = 288 \text{ Hz} \quad (8)$$

Substituindo-se as variáveis fixas em (6), resulta finalmente em $L = 0,000557 \text{ Henrys}$.

Considerando-se, ainda, que a resistência total do ramo LC (resistência intrínseca do reator + condutores) é $R = 0,4\Omega$, tem-se a topologia final do filtro passivo aplicado ao transformador de 45 kVA, conforme mostrado na tabela 4.

Tabela 4 – Valores de R,L e C para o filtro desenvolvido.

PARÂMETEOS DO FILTRO		
R [Ω]	L [μ H]	C [μ F]
0,4	557	548

A figura 8, a seguir, ilustra o comportamento da magnitude e do ângulo da impedância do ramo LC, constituinte do filtro desenvolvido, em função da frequência.

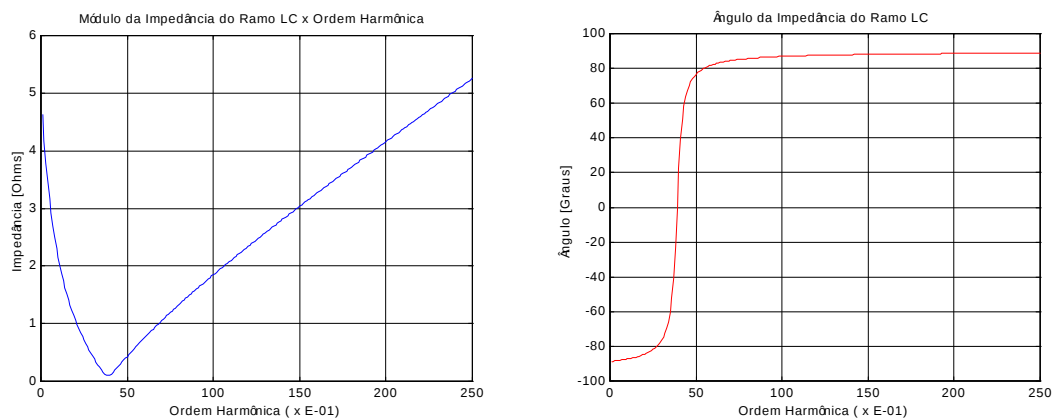


Figura 8 – Módulo e ângulo da impedância do ramo LC em função da frequência.

O tópico seguinte apresentará os resultados obtidos quando da conexão do equipamento a um circuito secundário de distribuição com um determinado nível de distorção harmônica.

4) RESULTADOS

Para a verificação prática do comportamento do filtro, conectou-se o equipamento junto a um determinado circuito secundário aéreo de distribuição. O diagrama unifilar simplificado do circuito em análise é mostrado na figura 9, a seguir.

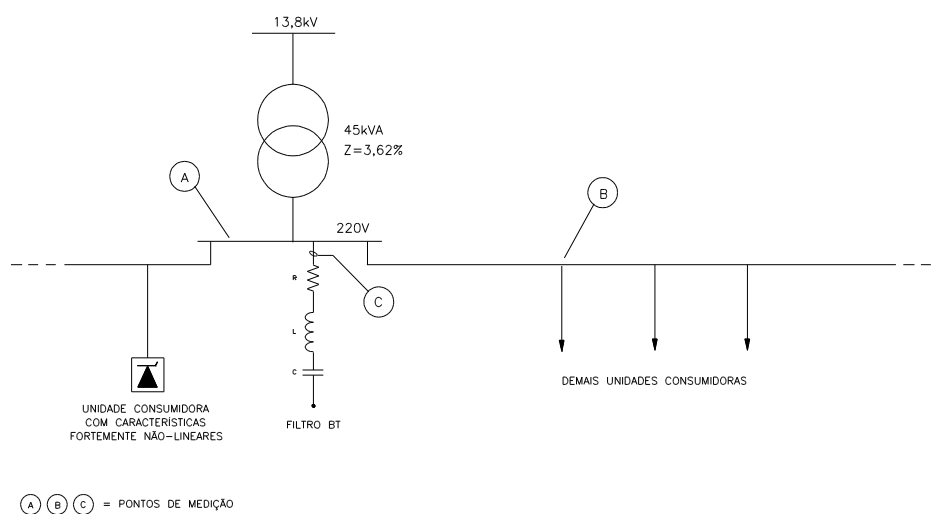


Figura 9 – Diagrama unifilar simplificado do circuito secundário aéreo em análise.

Medições realizadas nos pontos A, B e C, antes e após a alocação do equipamento ao barramento secundário do transformador de distribuição, indicaram uma significativa redução nas distorções harmônicas individuais, assim como, na distorção harmônica total de tensão, conforme pode ser observado pela figura 10.

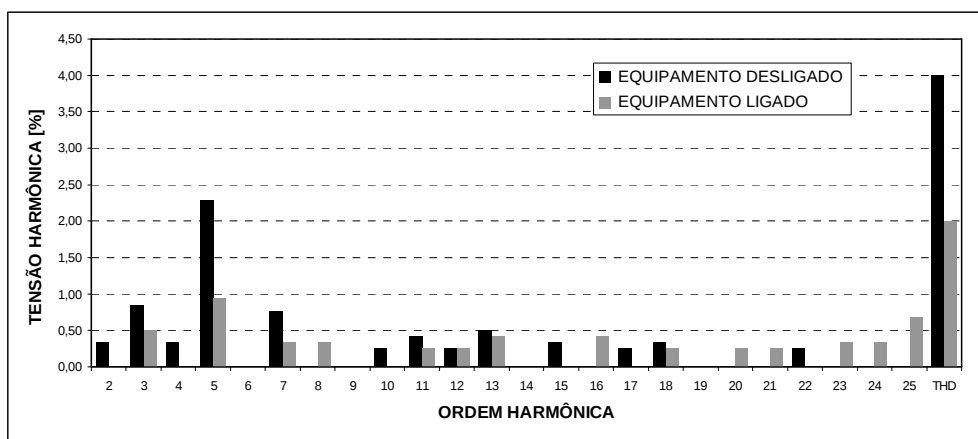


Figura 10 – Distorções harmônicas de tensão individuais e totais, antes e após a conexão do filtro (ponto A).

Da análise da figura 10, pode-se observar uma redução da tensão de quinta harmônica, assim como, das tensões de ordens adjacentes (3^a e 7^a harmônicas de tensão). Verifica-se, ainda, uma redução de 50% no valor da distorção harmônica total de tensão (DHT_V).

Considerando-se que a frequência de sintonia do filtro de baixa tensão foi de 288 Hz (Harmônica de ordem 4,8), realizou-se a verificação da corrente absorvida pelo ramo RLC (ponto C da figura 9). Como resultado, obteve-se a forma de onda indicada na figura 11.

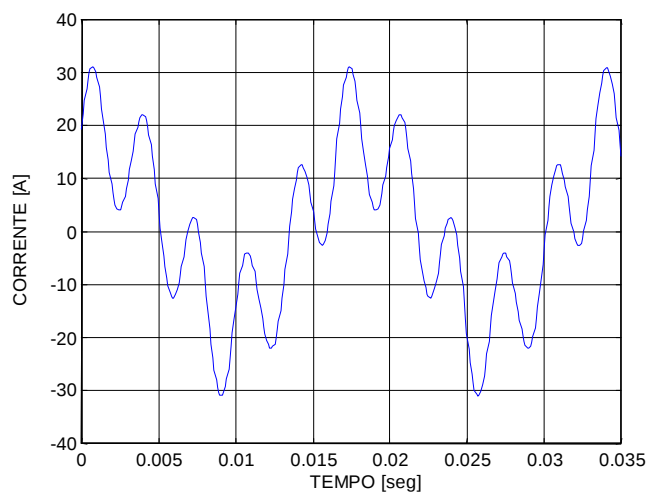


Figura 11 – Forma de onda da corrente absorvida pelo filtro.

O valor eficaz da corrente absorvida pelo filtro foi, em média, igual a 17,93 Amperes com uma grande predominância da componente de 5^a harmônica, conforme mostra o espectro harmônico indicado na figura 12.

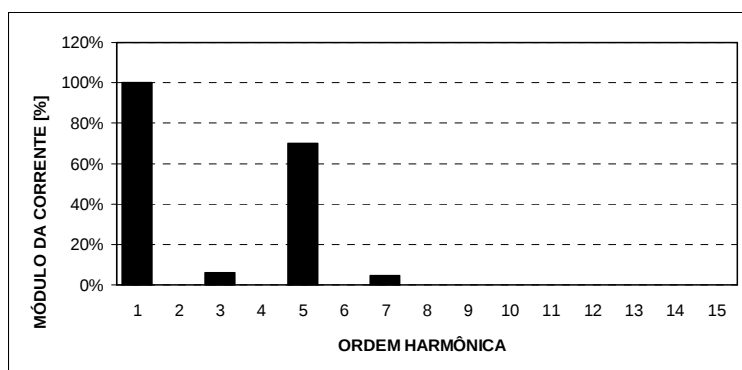


Figura 12 – Espectro harmônico da forma de onda da corrente absorvida pelo filtro.

Um outro parâmetro analisado foi a tensão fundamental no ponto B (ver figura 9). Em média, obteve-se um aumento de 2,28% na tensão eficaz fase-neutro ao longo do circuito. Para o ponto B especificamente, o valor médio da tensão eficaz, anteriormente igual a 118,4 Volts, assumiu valores em torno de 121,0 Volts. O fator de potência médio do circuito, em horários fora de ponta, que anteriormente era de 0,85, assumiu valores em torno de 0,93. Estes benefícios se devem à compensação reativa na frequência fundamental proporcionada pelo capacitor de 10 kVAr.

5) CONCLUSÕES

O desenvolvimento e a aplicação de filtros sintonizados passivos em circuitos secundários de distribuição apresenta grandes benefícios não somente pela redução da distorção harmônica total, como também pela compensação reativa na frequência fundamental proporcionada pelo capacitor que integra o equipamento. Em linha gerais, pode-se, a um custo muito baixo, aumentar o nível da qualidade da energia elétrica para clientes atendidos em baixa tensão, assim como, evitar problemas maiores, como interrupção em alimentadores decorrentes da operação indevida de elementos de proteção localizados nas subestações de distribuição.

6) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – ROCCIA, Pierre, et ali, “*Harmônicas em redes industriais: causas, efeitos e soluções*”, Revista Eletricidade Moderna , outubro 1997.
- [2] – ALVES, Mário Fabiano, “*Crítérios para especificação e projeto de filtros de harmônicas*”, Revista Eletricidade Moderna , junho 1994.
- [3] – DIAS, Guilherme A. D., “*Harmônicas em sistemas industriais*”, Coleção Engenharia, EDIPUCRS, Porto Alegre 1998
- [4] – DUGAN, Roger C., et ali, “*Electrical Power Systems Quality*”, McGraw-Hill – 1996.
- [5] – ALVES, Antônio C. Baleeiro, “*Análise de problemas e procedimentos na determinação de filtros harmônicos*”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG

ANEXOS

FOTOGRAFIAS DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

