

DEFINIÇÃO DE FILTROS DE HARMÔNICOS

João Roberto Cogo
Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Av. BPS, 1303 - Caixa Postal 50 - 37500-000 - Itajubá - MG - Brasil
Fone: (035)622-1613 - Fax: (035)622-2337

RESUMO

A nova portaria do DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) nº 1569 de 23/12/93 estabeleceu que o fator de potência de referência, a partir de março de 1994, seria de, no mínimo, 0,92.

Assim, pode-se prever que a instalação de bancos de capacitores no sistema elétrico Brasileiro deverá ser da ordem de 6 [GVar], principalmente, ao se verificar que a partir de 01 de Abril de 1996, o fator de potência de referência será medido através de uma média hora a hora ao invés da média mensal atual. Logo, os problemas devido ao impacto da instalação destas unidades capacitivas nos sistemas elétricos industriais se caracterizam por ressonâncias, sobre tensões e sobrecargas e, para evitá-las, os filtros de harmônicos aparecem como candidatos naturais nos locais onde cargas elétricas especiais se fazem presentes.

Assim, o objetivo deste trabalho é de apresentar os critérios para a definição dos filtros de harmônicos, para a correção do fator de potência, no sentido de evitar ressonâncias em frequências múltiplas da fundamental desenvolvendo-se, para tal finalidade, expressões específicas.

1 - INTRODUÇÃO

Para a caracterização do problema relativo às cargas elétricas especiais junto a bancos de capacitores considera-se o sistema elétrico apresentado na FIGURA 1 a seguir.

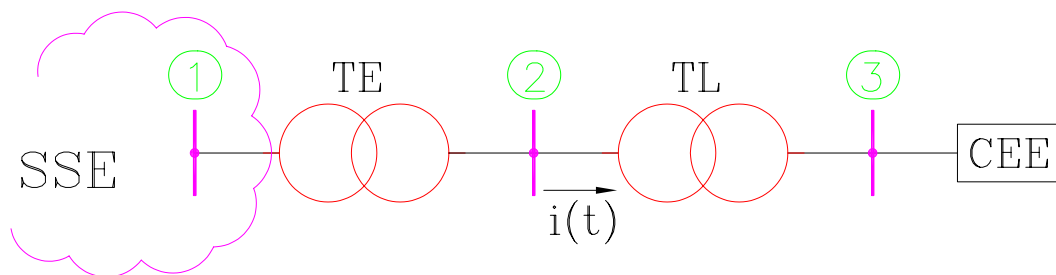


FIGURA 1 - SISTEMA EM ANÁLISE.

Na FIGURA 1 tem-se:

SSE - Sistema de suprimento de energia (da concessionária ou da própria indústria);

TE - Transformador de entrada do sistema que contem a carga elétrica especial;

TL - Transformador do alimentador da carga elétrica especial;

CEE - Carga Elétrica Especial;

$i(t)$ - Corrente no primário de TL.

O diagrama unifilar de impedâncias para a análise do efeito dos harmônicos de corrente provenientes das cargas elétricas especiais para o sistema da FIGURA 1 está mostrado na FIGURA 2 com banco de capacitores e com filtros instalados na barra 2. Admite-se que o sistema de suprimento de energia foi substituído por uma reatância indutiva conectada entre a referência e a barra 1. A carga elétrica especial foi substituída por uma fonte de corrente.

Caso na barra 2 não existam bancos de capacitores ou mesmo filtros de harmônicos, a tensão RMS em módulo devido aos harmônicos de corrente pode ser obtida a partir da FIGURA 2.a, da seguinte forma:

$$U_{2n} = n \cdot X_{S1} \cdot I_n$$

Note que:

$$X_{S1} = X_{EQ1} + X_{TE1} \quad e \quad X_{sn} = X_{EQn} + X_{TEn} = n \cdot X_{S1}$$

Fazendo-se I_n igual a 1[pu], na base de cada harmônico tem-se:

$$U_{2n} = n \cdot X_{S1}$$

ou seja, o valor da impedância é equivalente a tensão na base do harmônico de corrente.

2 - EFEITO DA INSTALAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

Caso seja colocado na barra 2 um banco de capacitores para a correção do fator de potência, tem-se como diagrama de impedâncias para o harmônico de ordem n aquele mostrado na FIGURA 2.b. Da FIGURA 2.b pode-se escrever:

$$\dot{U}_{2n} = \frac{(jX_{Sn})(-jX_{Cn})}{(jX_{Sn} - jX_{Cn})} \cdot \dot{I}_n = \dot{Z}_{2n} \cdot \dot{I}_n \quad (1)$$

Calculando-se a tensão e ainda considerando-se I_n igual a 1[pu] na base de cada harmônico tem-se (em módulo):

$$U_{2n} = Z_{2n} \quad (2)$$

onde:

$$\dot{Z}_{2n} = j \cdot \left(\frac{X_{Sn} \cdot X_{Cn}}{X_{Cn} - X_{Sn}} \right) = j \cdot \left(\frac{n \cdot X_{S1} \cdot X_{C1}}{X_{C1} - n^2 \cdot X_{S1}} \right) \quad (3)$$

Na expressão anterior considerou-se:

$$X_{Sn} = n \cdot X_{S1} \text{ e } X_{Cn} = \frac{X_{C1}}{n} \quad (4)$$

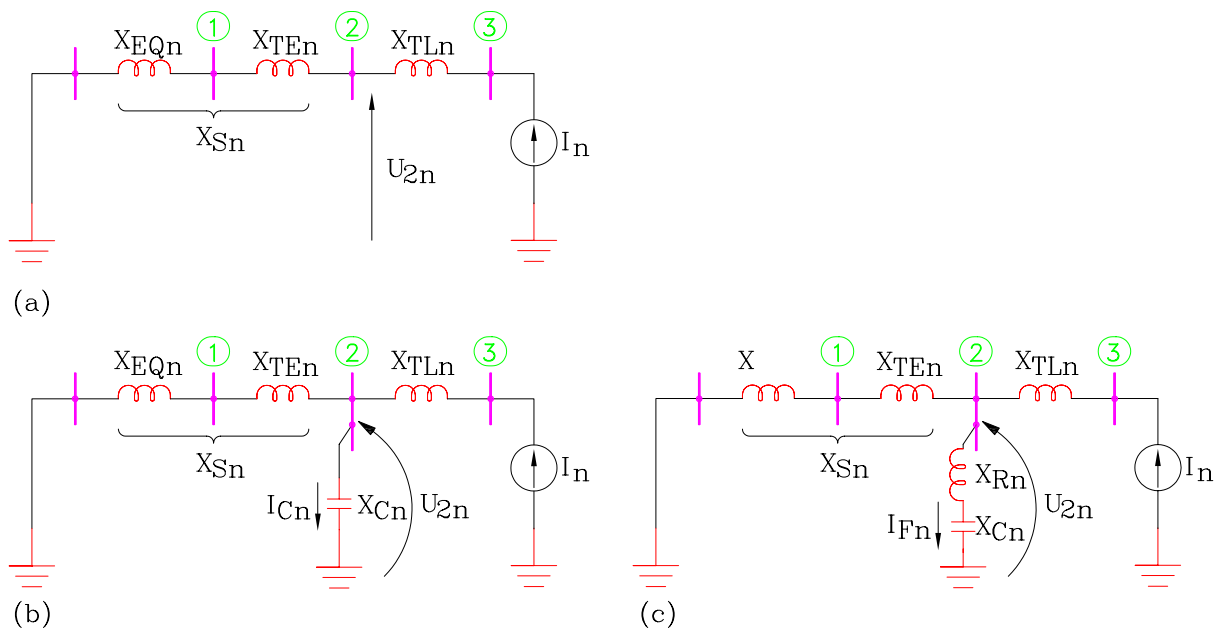


FIGURA 2 - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA PARA O HARMÔNICO DE CORRENTE DE ORDEM N.

- a - SEM BANCO DE CAPACITORES E REATORES NA BARRA 2;
- b - COM BANCO DE CAPACITORES NA BARRA 2;
- c - COM FILTROS DE HARMÔNICOS NA BARRA 2.

Por outro lado, o valor da reatância capacitiva na frequência fundamental, para a condição de ressonância, poderá ser relacionado com a reatância indutiva do sistema através de:

$$X_{C1} = n_S^2 \cdot X_{S1} \quad (5)$$

Levando-se a expressão (5) na (3) tem-se:

$$\dot{Z}_{2n} = jX_{S1} \cdot \left[\frac{n \cdot n_S^2}{n_S^2 - n^2} \right] \quad (6)$$

O valor da corrente no ramal do banco de capacitores (tomando por base que $I_n = 1$ [pu] para cada harmônico, FIGURA 2.b), é dado por:

$$I_{cn} = \frac{n^2}{(n^2 - n_s^2)} \quad (7)$$

De acordo com a expressão (5), caso o valor de n_s seja 5 ($n_s = 5$) significa que a potência do banco de capacitores é 25 vezes inferior a potência de curto na barra onde o mesmo será instalado e, se existir um harmônico de corrente de quinta ordem ($n = 5$) haverá uma ressonância, ou seja, o valor da corrente (vide equação (7)) será infinito.

Ou por outro lado, caso o banco de capacitores entre em ressonância com o sistema para o harmônico de ordem $n = n_s$ implica, neste caso, que a tensão na barra 2 poderá ser infinita (vide equações (2) e (6)).

A corrente que passa pelo banco de capacitores está ilustrada na FIGURA 3 para diversos valores de n_s .

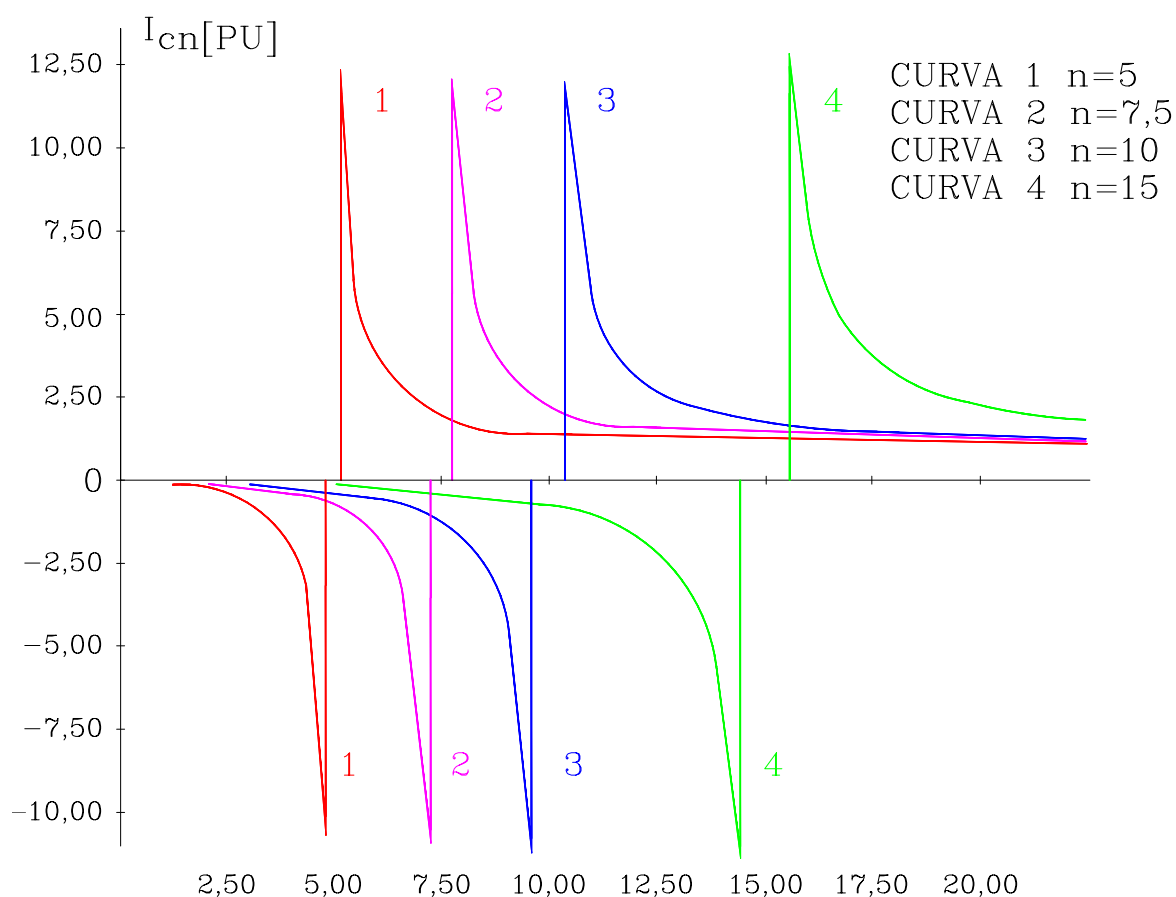


FIGURA 3 - CURVA CARACTERÍSTICA DE CORRENTE NO CAPACITOR EM FUNÇÃO DA ORDEM DO HARMÔNICO EXISTENTE TOMADO COMO SENDO DE 1 [PU].

3 - INSTALAÇÃO DE FILTROS

Caso no lugar do banco de capacitores se instale filtro sintonizado tem-se, para o harmônico de ordem n , o diagrama de impedâncias mostrado na FIGURA 2.c, onde a impedância equivalente (de THEVENIN) a partir da barra 2, é dada por:

$$\dot{Z}_{2Fn} = \frac{(jX_{Sn}) \cdot (-jX_{Cn} + jX_{Rn})}{(jX_{Sn} - jX_{Cn} + jX_{Rn})} \quad (8)$$

Para o sistema da FIGURA 2.c, fazendo-se a ressonância do filtro ocorrer para uma frequência n_0 vezes a fundamental, tem-se:

$$\frac{X_{C1}}{n_0} = n_0 \cdot X_{R1} \quad (9)$$

Com base nas expressões (5) e (9) pode-se escrever:

$$X_{R1} = \left(\frac{n_S}{n_0}\right)^2 \cdot X_{S1} \quad (10)$$

Com base em (5) e (10) a expressão (8) torna-se:

$$\dot{Z}_{2Fn} = jX_{S1} \cdot \left\{ \frac{n[(nn_S)^2 - (n_S n_o)^2]}{[(nn_o)^2 + (nn_S)^2 - (n_S n_o)^2]} \right\} \quad (11)$$

A expressão (11) assume o valor infinito para $n = NR$ dado por:

$$NR = \frac{n_S \cdot n_0}{\sqrt{n_0^2 + n_S^2}} \quad (12)$$

Analogamente ao item anterior, o valor da corrente I_{fn} (vide FIGURA 2.c) é dado por:

$$I_{Fn} = \frac{(nn_o)^2}{(nn_o)^2 + (nn_S)^2 - (n_S n_o)^2} \quad (13)$$

A curva característica para os mesmos valores de n_S definidos na FIGURA 3 do item anterior é apresentada na FIGURA 4.

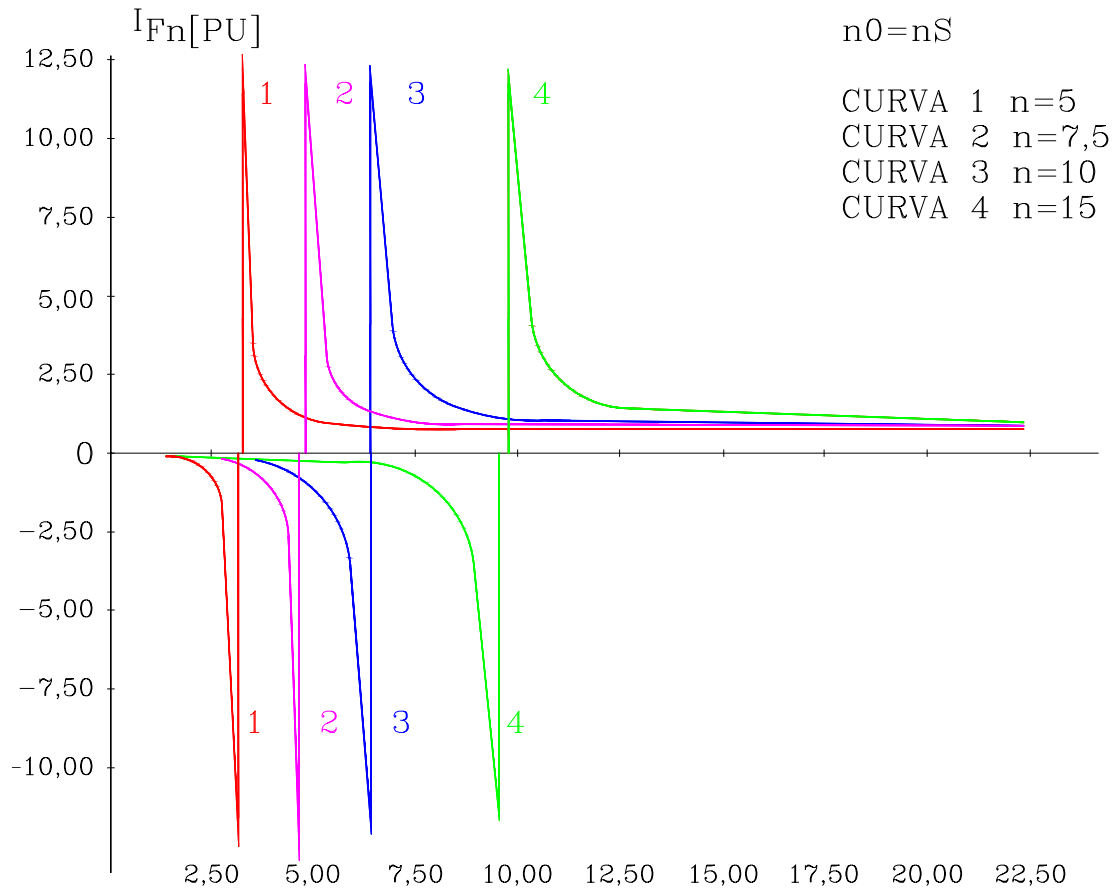


FIGURA 4 - CURVA CARACTERÍSTICA DE CORRENTE NO FILTRO EM FUNÇÃO DA ORDEM DO HARMÔNICO EXISTENTE TOMADO COMO SENDO DE 1 [PU].

4 - DEFINIÇÃO DO FILTRO DE HARMÔNICO

Para a definição da tensão nominal do banco de capacitores (U_{BCN}) após a inclusão do reator em série (FIGURA 2.c) recomenda-se de modo a garantir a sua vida útil que atenda a expressão a seguir:

$$U_{BCN} \geq X_{C1} \cdot I_1 + \sum_{n=2}^{\infty} X_{Cn} \cdot I_n \quad (14)$$

e a potência reativa nominal (Q_{BCN}) do banco de capacitores deve ser no mínimo de :

$$Q_{BCN} \geq 3 X_{C1} I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} (3 \cdot X_{Cn} \cdot I_n^2) \quad (15)$$

Como o valor de X_{C1} nas expressões (14) e (15) depende exatamente de Q_{BCN} e U_{BCN} que pretende-se determinar, adota-se, inicialmente, que:

$$U_{BCN} = \xi \cdot U_1 \quad (16)$$

onde U_1 é o componente da tensão na frequência fundamental do sistema elétrico, onde o filtro será instalado. Note que, praticamente, o valor de ξ deve ficar compreendido entre:

$$1,06 \leq \xi \leq 1,35 \quad (17)$$

Visto que a correção do fator de potência é feita na frequência fundamental em função da potência ativa e do fator de potência atuais (conta de energia elétrica mensal) pode-se, inicialmente, estimar que a potência reativa na frequência fundamental para corrigir o fator de potência é dada por:

$$Q_1 \cong P \{tg [arc(\cos(FP_A))] - tg [arc(\cos(FP_D))]\} \quad (18)$$

Na expressão (18) tem-se:

P - potência ativa média;

FP_A - fator de potência atual;

FP_D - fator de potência desejado (recomenda-se adotar 0,94).

Assim, para uma primeira estimativa, visando eliminar as inequações (14) e (15), adota-se:

$$Q_{BCN} = Q_1 \cdot \xi^2 \quad (19)$$

Logo com base nas equações (16) e (19) tem-se:

$$X_{C1} = \frac{U_1^2}{Q_1} \quad (20)$$

Assim, a partir deste valor inicial de X_{C1} retorna-se às equações (14) e (15) para se calcular os valores reais de U_{BCN} e Q_{BCN} do banco de capacitores e a reatância X_{R1} do reator a ser adquirido.

Recomenda-se, portanto, a seguinte seqüência:

- 1 - Defina Q_1 usando-se a equação (18)
- 2 - Calcule X_{C1} usando-se a equação (20)
- 3 - defina X_{R1} como sendo

$$X_{R1} = \frac{X_{C1}}{n_o^2} \cdot f_R$$

$$1,03 \leq f_R \leq 1,05 \text{ ou } 0,93 \leq f_R \leq 0,97$$

Adote inicialmente que $n_o = n_s$ sendo n_s definido conforme equação (5).

OBS: Nunca deve-se adotar: $0,97 \leq f_R \leq 1,03$

4 - Calcule U_{BCN} de acordo com o lado direito da inequação (14).

5 - Calcule Q_{BCN} de acordo com o lado direito da inequação (15).

6 - Calcule o novo ξ

$$\xi = \frac{U_{BCN}}{U_1}$$

7 - Calcule Q_{BCN} de acordo com a equação (19).

8 - Compare o resultado do passo 7 com o resultado do passo 5 se maior pare; se menor faça:

$$X_{C1} = \frac{[U_{BCN}(\text{passo 4})]^2}{Q_{BCN}(\text{passo 7})}$$

9 - Retorne ao passo 3.

Para a visualização dos pontos de ressonância considere a TABELA 1, a seguir, a qual ilustra os valores obtidos considerando-se:

1 - A variação da frequência da carga elétrica especial de 0,01 em 0,01 vezes a frequência fundamental. Em outras palavras, fez-se uma varredura em frequência, dada por:

$$F = \Delta n \cdot F_{\text{rede}}$$

onde Δn assumiu uma faixa de valores desde zero até 1,5.n variando de 0,01 em 0,01 sendo que, nas diversas simulações, adotou-se:

$$n = 3, 4, 5, 6, 7, \text{ e } 11$$

valores estes típicos para as cargas elétricas especiais.

2 - Adotou-se, para fins de análise, que a frequência de sintonia entre o banco de capacitores e a rede (não se considerando o filtro de harmônicos) era de:

$$n_s = 3,001; 4,001; 5,001; 6,001 \text{ e } 11,001$$

3 - Para cada valor de n_s admitiu-se um filtro sintonizado com 1 valor base de n_o e para cada n_o uma variação de $\pm 3\%$ em torno de seu valor.

5 - CONCLUSÕES

Conforme nota-se na TABELA 1 a instalação de um filtro para um determinado harmônico muda o valor da frequência de ressonância relativamente àquela que se teria caso fosse colocado na rede apenas um banco de capacitores.

Por exemplo, a instalação apenas de capacitores na rede com possibilidade de ressonância para o quinto harmônico ($n_s = 5,001$) levaria a se ter uma elevação na tensão da rede de:

- 12754 vezes a impedância do sistema (X_{S1}) para cada unidade de corrente produzida pela carga elétrica especial.

porém, ao instalar um filtro no lugar deste banco para o quinto harmônico ($n_o = 5,00$) tem-se que o valor da tensão agora passa a ser zero neste harmônico. Todavia, para o harmônico correspondente a ordem 3,54 ($NC = 3,54$) vezes a frequência fundamental. A elevação de tensão seria:

- 759 vezes a impedância do sistema para cada unidade de corrente produzida pela carga especial nesta frequência, sendo infinita para a ordem 3,536 ($NR = 3,536$).

Assim, percebe-se que a frequência de sintonia onde ocorrerá ressonância fica alterada sempre para um valor correspondente à frequência menor que aquela original de ressonância.

Como os valores de frequência não são múltiplos inteiros da fundamental (acima de uma vez a fundamental) é difícil de ser encontrado, deve-se precaver ao construir um filtro, de modo que não se tenha a ocorrência de valores para NC e NR em um número próximo a valores inteiros principalmente caso a Carga Elétrica Especial o tenha como harmônico característico.

Cabe-se ressaltar que os valores obtidos para Z_{2n} foram para uma varredura na frequência de 0,01 em 0,01. Caso se faça a varredura com valores diferentes destes, novos resultados são obtidos os quais podem ser maiores ou menores. Todavia, a medida que a varredura leve a se ter $NC = NR$, os valores serão bastante elevados.

Na prática, deve-se projetar o filtro escolhendo-se valores de X_{R1} e X_{C1} de modo que NR não seja inteiro ou fique próximo de um número inteiro. Na falta de uma melhor informação do sistema, fazendo-se $X_{R1} = 6\%$ de X_{C1} tem-se obtido bons resultados na prática.

TABELA 1 - VALORES OBTIDOS PARA Z_{2n} e Z_{2Fn}					
n_S	Z_{2n}	n_O	Z_{2Fn}	NC	NR
3,001	4491,864	2,91	1191,076	2,090	2,089
		3,00	672,305	2,120	2,122
		3,09	425,800	2,150	2,153
4,001	7976,949	3,88	405,074	2,790	2,785
		4,00	1642,064	2,830	2,829
		4,12	7449,159	2,870	2,870
5,001	12754,040	4,85	1803,654	3,480	3,482
		5,00	759,064	3,540	3,536
		5,15	1479,937	3,590	3,588
6,001	18803,940	5,82	1997,747	4,180	4,178
		6,00	1505,593	4,240	4,243
		6,18	999,538	4,310	4,305
7,001	26220,140	6,79	1397,237	4,870	4,874
		7,00	74197,260	4,950	4,950
		7,21	2408,771	5,020	5,023
11,001	71692,600	10,67	15697,940	7,660	7,659
		11,00	9724,307	7,780	7,779
		11,33	6302,435	7,890	7,893

Na TABELA 1 tem-se:

- n_S ; Z_{2n} ; n_O ; Z_{2Fn} e NR: já definidas anteriormente;
- NC: é o valor de n que fornece para cada par (n_S , n_O) o máximo valor de Z_{2Fn} considerando uma variação incremental em n de 0,01 em 0,01.

6 - NOMENCLATURA UTILIZADA

U_1 - Componente fundamental da tensão na barra 2;

U_{2n} - harmônico de tensão de ordem n na barra 2;

X_{S1} - reatância equivalente vista da barra 2 na frequência fundamental;

n - ordem do harmônico existente ($n = 2, 3, 4, 5, \dots$);

I_n - harmônico de corrente de ordem n obtido através da decomposição em série trigonométrica de FOURIER para o sinal de corrente $i(t)$ apresentado na FIGURA 1;

$X_{EQn} = nX_{EQ1}$ - Reatância do sistema calculada para o n-ésimo harmônico;

$X_{TEn} = nX_{TE1}$ - Reatância do transformador calculada para o n-ésimo harmônico;

$X_{Cn} = X_{C1}/n$ - Reatância do banco de capacitores calculada para o n-ésimo harmônico;

X_{EQ1} - Reatância do sistema calculada para a frequência fundamental;

X_{TE1} - Reatância do transformador de entrada calculada para a frequência fundamental;

X_{C1} - Reatância do banco de capacitores calculada para a frequência fundamental;

X_{R1} - Reatância do reator do filtro de harmônicos calculada para a frequência fundamental;

S_{CC} - Potência de curto-circuito equivalente na barra 1;

X_{S1} - Reatância equivalente 'vista da barra 2' na frequência fundamental;

Z_{2n} - Impedância equivalente "vista da barra 2" para o harmônico de ordem n.

Note que em $[\Omega]$, o valor de X_{EQ1} pode, aproximadamente, ser calculado como:

$$X_{EQ1} = (U_{barra1})^2 / S_{CC}$$

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Cogo, J.R. Critérios para Dimensionamento de Filtros de Harmônicos. X Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica - Universidad Austral de Chile - Valdivia, Chile - 22/11/93 - 25/11/93.
- [2] - Cogo, J.R. Analysis of the Reactive Power Consumption and the Harmonics Injected in the Network by the Non-Linear Electrical Loads. IV Symposium of Specialists in Electrical Operational and Expansion Planning, 23-27-Maio-1994, Foz do Iguaçu, Brasil.