



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7747  
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

## PERDAS ASSOCIADAS AOS HARMÔNICOS GERADOS NA OPERAÇÃO DE RETIFICADORES DE GRANDE PORTE: UM ESTUDO DE CASO

ALEX T. YOKOYAMA	MARIA EMÍLIA DE L. TOSTES	CARMINDA CÉLIA M. M. CARVALHO	PEDRO P. C. DE SOUZA
UFPA	UFPA	UFPA	ALBRAS
AFONSO H. J. DA PAZ BITTENCOURT	GIORDANI L. TAVARES	ANDRÉ C. DO NASCIMENTO	LUIZ ANTÔNIO C. LOPES
ALBRAS	ALBRAS	UFPA	CONCORDIA UNIVERSITY

### RESUMO

Este trabalho aborda uma análise harmônica e de perdas referente a amplificação de corrente verificada nos filtros harmônicos e no banco de capacitores de uma das quatro linhas de redução eletrolítica do Alumínio da ALBRÁS. O problema foi provocado por uma inversão acidental de fases no transformador defasador que alimenta um dos seis retificadores presentes na redução IV. Uma comparação das distorções entre o sistema problemático e logo após a solução mitigadora é realizada, bem como os cálculos das perdas e o ajuste de *taps* dos filtros.

### PALAVRAS-CHAVE

Distorção Harmônica, Filtros, Perdas, *Tap*.

### 1.0 INTRODUÇÃO

A fábrica de Alumínio ALBRAS (Alumínio Brasileiro S.A.) localizada em Barcarena-PA é alimentada em 230kV pela ELETRONORTE a partir da subestação de Vila do Conde. Para atender a demanda acima de 700MW de potência a fábrica possui quatro linhas de redução alimentadas, cada uma, por um transformador (MT) de 208,4MVA - 230kV/ 34,5kV, autotransformadores reguladores de tensão e seis transformadores defasadores com configuração do tipo "delta/ estrela dupla

invertida". Esses últimos alimentam, cada um, um retificador de seis pulsos a diodo. Cada redução possui também um banco de capacitores sintonizado na harmônica de 4,08, e filtros passivos de harmônicos para as componentes de ordens 5 e 7. Esses filtros, de 10MVAr cada um, são formados por bancos de capacitores e reatores a núcleo de ar. A figura 1 mostra o diagrama unifilar de uma redução.

Em 2001 iniciou-se um processo de reforma na planta industrial da ALBRAS, tendo sido trocados os autotransformadores reguladores e os transformadores retificadores de todas as reduções por equipamentos de potência mais elevada. Após as reformas a capacidade nominal das barras de retificação foi elevada de 1040V/ 155kA para 1104V/ 170kA.

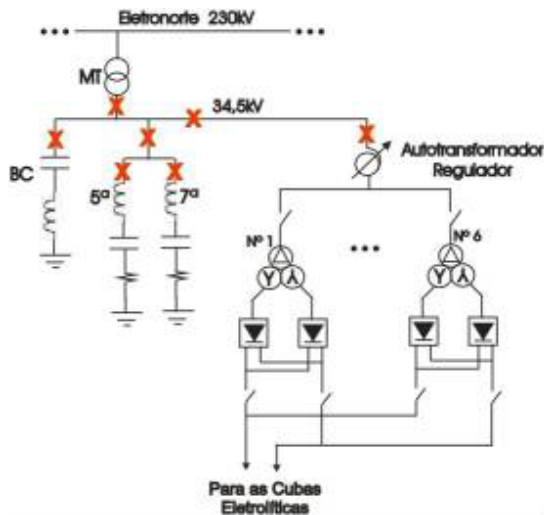


Figura 1: Diagrama unifilar de uma redução e pontos de medição

Em 2002, quando da necessidade de parada de um dos retificadores da redução IV, constatou-se um aumento anormal no valor da corrente medida no filtro de quinta ordem daquela redução. O aumento de corrente provocou uma maior vibração na estrutura física constitutiva do filtro, o que acarretou a ruptura de um dos tirantes de suporte mecânico da estrutura metálica do mesmo em uma das fases. Os tirantes são de fibra de vidro, tendo luvas de atracação de alumínio e pontas de aço inox. Após esse incidente pôde ser notado que mesmo com todos os retificadores em operação normal a corrente no filtro de quinta ordem da redução IV permanecia um pouco mais elevada, o que obrigou a equipe de manutenção a alterar o *tap* do reator desse filtro para minimização do problema. Os *taps* foram trocados de “-2” e “+2” para “+4” e “+6”, para os filtros de 5ª e 7ª ordem, respectivamente. A figura 2 ilustra um dos filtros (5ª ordem) onde ocorreram as trocas dos *taps*, mostrados na figura 3.



Figura 2: Filtro de 5ª ordem, onde ocorreram as trocas dos *taps*



Figura 3: *Taps* do filtro de 5ª ordem (uma das fases)

A fim de levantar o perfil harmônico do sistema foram realizadas medições nos pontos mostrados em vermelho na figura 1, em todas as reduções. Foram também obtidas as formas de onda de corrente no primário dos transformadores defasadores, que possuem um defasamento angular a fim de atenuar os harmônicos injetados no sistema CA pela técnica de multipulsos.

Após a avaliação das formas de onda coletadas, pôde-se constatar a ocorrência de uma inversão nas fases “A” e “C” do transformador defasador do primeiro retificador da redução IV (retificador “19”). Uma consulta complementar aos manuais e catálogos do fabricante e investigações de campo verificando os cabos de ligação confirmaram as suspeitas levantadas, encontrando-se a inversão de fases na entrada do transformador que alimenta o retificador “19”. Tal fato se deu acidentalmente, porque a identificação de cores na entrada do transformador segue o padrão japonês (Vermelho – Fase “A”, Branco – Fase “B” e azul – Fase “C”), exatamente o contrário do padrão ABNT adotado no Brasil (Azul - Fase “A”, Branco – Fase “B” e Vermelho – Fase “C”).

Para solucionar o problema foi realizada a inversão entre as fases “A” e “C” do transformador, mas um novo ajuste nos *taps* dos indutores dos filtros harmônicos da redução, a fim de otimizar a sintonia dos mesmos, se fez necessária.

O presente trabalho apresenta um estudo associado à escolha dos *taps* ótimos para os filtros harmônicos da redução IV da ALBRAS, bem como às perdas, em Watts, relacionadas à antes da medida mitigadora e após a mitigação, com dois valores de *taps*: “+4” e “+6” e “-2” “+2”, para os filtros de 5ª e 7ª ordem, respectivamente.

## 2.0 NÍVEIS DE DHT<sub>i</sub>% ANTES E DEPOIS DA MITIGAÇÃO

As tabelas a seguir mostram os níveis de Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT<sub>i</sub>%) antes e após a inversão das fases “A” e “C” do transformador defasador que alimenta o retificador “19”, da redução IV. As medidas referentes à antes da mitigação foram feitas com os *taps* nas posições “+4” e “+6”, para os filtros de 5ª e 7ª ordem, respectivamente.

### 2.1 Antes da mitigação

#### 2.1.1 Todos os retificadores em operação normal

Tabela 1: DHT<sub>i</sub>% nas fases A, B e C, com todos os retificadores em operação normal

Ponto de Medição	Redução IV		
	Fase A	Fase B	Fase C
Secundário do transformador de alimentação (MT)	1,77	1,52	1,88
Primário do transformador regulador (LVR)	4,40	4,24	4,38
Banco de capacitores	5,79	5,15	6,40
Ponto comum entre os filtros	45,62	45,68	45,33
Filtro de 5ª harmônica	68,91	68,87	69,42
Filtro de 7ª harmônica	61,48	60,68	60,38

A tabela 1 mostra a existência de uma sobrecarga harmônica nos filtros de 5ª e 7ª ordem da redução IV, pois a DHT<sub>i</sub>% desses equipamentos atinge 60% ou mais da corrente fundamental. Essa amplificação harmônica, no entanto, não se propaga para o resto do sistema, conforme indicaram as medições realizadas nas outras reduções. As figuras 4 e 5 mostram as formas de onda de corrente nos filtros de 5ª e 7ª ordens (fase “A”), na condição em que todos os retificadores se encontravam em operação normal.

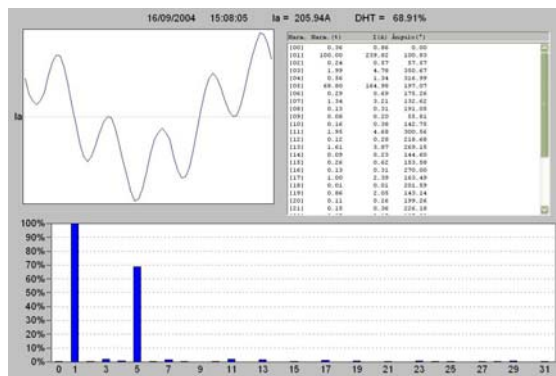


Figura 4: Forma de onda e espectro harmônico referentes ao Filtro de 5ª harmônica da redução IV, com todos os retificadores em operação normal, antes da mitigação (fase A)

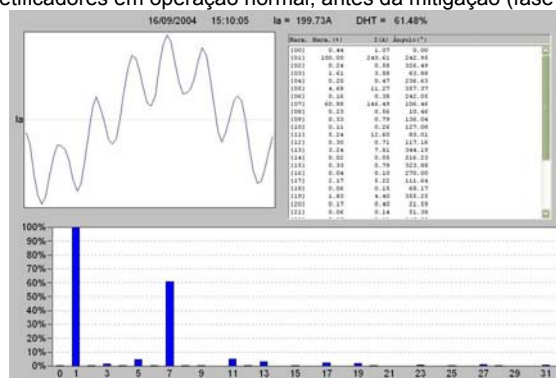


Figura 5: Forma de onda e espectro harmônico referentes ao Filtro de 7ª harmônica da redução IV, com todos os retificadores em operação normal, antes da mitigação (fase A)

Os capacitores são projetados de tal forma que em condições normais de operação a tensão e a potência reativa não excedam a capacidade nominal do equipamento. Os filtros harmônicos estão sujeitos, em geral, às mesmas condições operacionais que os bancos de capacitores, com a agravante de ainda possuírem a sobrecarga imposta pelos harmônicos.

A recomendação *IEEE Std 18-2002* estabelece alguns limites que não deverão ser excedidos em caso de operação contínua sob situação de contingência [10]. Em relação à corrente, essa norma estabelece que o seu valor eficaz não deverá ultrapassar 135% da corrente nominal do banco. As figuras 4 e 5 mostram que os filtros encontravam-se com uma sobrecarga de 23% antes da mitigação, visto que a corrente nominal dos mesmos em regime permanente é 167A e os valores registrados foram de 205,94A para o filtro de 5ª ordem e 199,73A para o filtro de 7ª ordem. Apesar de não ultrapassar o limite estabelecido pela norma, esses valores são elevados, principalmente se for levado em consideração o tempo que os equipamentos ficaram submetidos aos mesmos.

### 2.1.2 Operação sem os retificadores “19” ou “24”

Considerando-se que o comportamento do sistema deveria ser o mesmo para qualquer que fosse o retificador retirado de operação, foi realizado um procedimento para investigação do perfil harmônico causado pela retirada do retificador “24”, que representa meramente a saída de um retificador escolhido aleatoriamente, a fim de comparar com o perfil harmônico obtido sem o retificador “19”. O objetivo era comprovar a operação incorreta do retificador “19”.

Conforme mostra a tabela 2, quando ocorreu a retirada de operação do retificador 24 os níveis de distorção aumentaram significativamente, já que a composição de pulsos formada por todos os retificadores da redução ficou comprometida. Com a retirada do retificador 19, porém, ao invés de aumentarem, os níveis de DHTi% diminuíram significativamente em relação aos valores encontrados quando todos os retificadores se encontravam em operação normal, podendo-se concluir que o principal responsável pelos elevados níveis de distorção presentes na redução IV era o transformador defasador que alimenta o retificador “19”.

Tabela 2: DHTi% nas Fases A, B e C sem os retificadores “19” ou “24”, antes da mitigação

Ponto de Medição	Redução IV					
	Retificador “19” fora			Retificador “24” fora		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Secundário do transformador de alimentação (MT)	1,61	1,31	1,76	2,21	2,03	2,31
Primário do transformador regulador (LVR)	4,39	4,31	4,38	9,04	12,10	8,94
Banco de capacitores	4,21	3,30	4,58	8,95	8,24	9,35
Ponto comum entre os filtros	25,10	25,40	25,14	76,98	77,67	76,51
Filtro de 5ª harmônica	39,10	39,52	39,99	116,83	117,66	117,82
Filtro de 7ª harmônica	36,65	36,35	34,65	105,03	105,52	103,37

## 2.2 Após a mitigação

Após a medida que mitigou o problema pôde-se comparar o desempenho da redução IV para as mesmas situações consideradas anteriormente: com todos os retificadores em operação, sem o retificador “19” e sem o retificador “24”. Desta forma pôde-se determinar também quais os melhores *taps* para a configuração de carga atual da fábrica: os *taps* nominais definidos por ocasião do seu “comissionamento” ou os que foram obrigados a permanecer devido à inversão acidental das fases do transformador defasador do retificador “19”.

### 2.2.1 Todos os retificadores em operação normal

A tabela 3 mostra os níveis de harmônicos presentes na redução IV após a inversão das fases no transformador defasador que alimenta o retificador 19. Nota-se que agora os níveis de distorção encontram-se bem abaixo dos que foram verificados antes da mitigação, podendo-se destacar, inclusive, um alívio na DHTi% do banco de capacitores.

Tabela 3: DHTi% nas Fases A, B e C com todos os retificadores em operação normal

Ponto de Medição	Redução IV – Todos os Retificadores em Operação Normal					
	Fase A	Fase A	Fase B	Fase B	Fase C	Fase C
	FS: TAP -2 FT: TAP +2	FS: TAP +4 FT: TAP +6	FS: TAP -2 FT: TAP +2	FS: TAP +4 FT: TAP +6	FS: TAP -2 FT: TAP +2	FS: TAP +4 FT: TAP +6
Secundário do transformador de alimentação (MT-4)	1,29	1,39	0,88	1,06	1,28	1,59
Primário do transformador regulador (LVR-4)	4,88	4,89	4,89	4,88	4,95	5,09
Banco de capacitores	2,69	3,08	1,61	2,20	2,83	3,87
Ponto comum entre os filtros	8,15	5,41	10,13	5,48	8,14	5,75
Filtro de 5ª harmônica	13,01	10,10	16,79	9,98	12,74	9,32
Filtro de 7ª harmônica	5,77	4,44	4,17	3,70	5,81	4,69

As figuras 6 e 7 mostram as formas de onda de corrente nos filtros de 5ª e 7ª ordens (fase “A”), na condição em que todos os retificadores se encontravam em operação normal.



Figura 6: Forma de onda e espectro harmônico referentes ao Filtro de 5ª harmônica (TAP: “+4”) da redução IV, com todos os retificadores em operação normal, após da mitigação (fase A)



Figura 7: Forma de onda e espectro harmônico referentes ao Filtro de 7ª harmônica (TAP: “+6”) da redução IV, com todos os retificadores em operação normal, após da mitigação (fase A)

## 2.2.2 Operação sem os retificadores “19” ou “24”

Tabela 4: DHTi% nas Fases A, B e C sem o retificador “19”, após a mitigação

Ponto de Medição	Redução IV – Retificador “19” Fora de Operação					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	F5: TAP -2 F7: TAP +2	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP -2 F7: TAP +2	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP -2 F7: TAP +2	F5: TAP +4 F7: TAP +6
Secundário do transformador de alimentação (MT-4)	1,75	1,79	1,31	1,62	1,65	2,00
Primário do transformador regulador (LVR-4)	4,68	4,28	4,65	4,28	4,71	4,31
Banco de capacitores	5,76	4,42	5,51	3,61	5,97	4,91
Ponto comum entre os filtros	55,34	26,81	57,81	26,88	55,24	26,59
Filtro de 5ª harmônica	94,76	38,05	100,34	38,72	96,80	38,78
Filtro de 7ª harmônica	47,89	37,48	47,76	36,39	46,31	35,27

Tabela 5: DHTi% nas Fases A, B e C sem o retificador “24”, após a mitigação

Ponto de Medição	Redução IV – Retificador “24” Fora de Operação					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	F5: TAP -2 F7: TAP +2	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP -2 F7: TAP +2	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP -2 F7: TAP +2	F5: TAP +4 F7: TAP +6
Secundário do transformador de alimentação (MT-4)	1,24	1,70	0,85	1,53	1,64	2,00
Primário do transformador regulador (LVR-4)	9,53	9,31	9,47	9,27	9,65	9,38
Banco de capacitores	5,24	4,49	5,09	3,66	5,99	5,62
Ponto comum entre os filtros	50,98	27,75	52,08	26,67	51,55	27,29
Filtro de 5ª harmônica	84,20	36,33	86,67	35,86	85,61	37,19
Filtro de 7ª harmônica	52,96	43,01	52,00	41,75	52,17	42,10

Conforme mostram as tabelas 4 e 5 os níveis de distorções provocados pela saída de um dos módulos de retificação não variam muito, seja com a saída do retificador “19” ou com saída de um outro qualquer (nesse caso, o retificador “24”), diferentemente do que foi verificado anteriormente.

## 3.0 DETERMINAÇÃO DOS TAPS DOS FILTROS DE 5ª E 7ª ORDEM

Levando-se em consideração os níveis de DHTi% encontrados após a medida mitigadora pode-se determinar os valores de *taps* considerados ideais para a situação atual de carregamento em que a fábrica opera.

De maneira geral, para as três situações consideradas (com todos os retificadores em operação normal, sem o retificador “19” e sem o retificador “24”), os níveis de DHTi% encontraram-se próximos entre si, como mostraram as tabelas 3, 4 e 5, com os *taps* nas posições “+4” e “+6”. Porém, para os *taps* “-2” e “+2”, foram constatadas taxas de distorção de corrente maiores nos pontos mostrados na tabela a seguir, comparativamente aos resultados obtidos para os *taps* “+4” e “+6”:

Tabela 6: Pontos onde os níveis de DHTi% foram maiores, quando nos *taps* “-2” e “+2”, comparativamente aos *taps* “+4” e “+6”, para os filtros de 5ª e 7ª ordem, respectivamente

Ponto de Medição	Redução IV		
	Todos os retificadores em operação normal	Retificador “19” fora	Retificador “24” fora
Banco de capacitores	até 26,87% maior	até 34,48% maior	até 28,09% maior
Filtro de 5ª harmônica	até 40,56% maior	até 61,41% maior	até 58,62% maior
Filtro de 7ª harmônica	até 23,05% maior	até 23,84% maior	até 19,71% maior

Levando-se em consideração as maiores taxas de distorção harmônica de corrente notadas no banco de capacitores e filtros quando foram adotados os *taps* “-2” e “+2” (que chegou a ultrapassar os 100% na fase B no filtro de 5ª ordem, quando da retirada do retificador “19”), pode-se concluir que os melhores *taps* para os filtros de 5ª e 7ª ordem seriam “+4” e “+6”, respectivamente.

## 4.0 PERDAS OCASIONADAS PELAS CORRENTES HARMÔNICAS NA REDUÇÃO IV

A fim de considerar a sobrecarga imposta pela amplificação harmônica resultante da inversão de fases no transformador defasador do retificador “19”, foram calculadas as perdas provocadas nos capacitores do banco e dos filtros da redução IV utilizando-se a equação (1) [8]. Os cálculos dizem respeito a uma das fases somente, já que todas apresentam níveis de distorção bastante próximos.

$$P_n = (I_n \cdot DHT_i\%)^2 \times R_{eq} \quad (1)$$

Onde:

$P_n$ : Perdas associadas às correntes harmônicas;  
 $I_n$ : Corrente nominal do banco de capacitores;  
 $DHTi\%$ : Distorção Harmônica Total de Corrente;  
 $R_{eq}$ : Resistência equivalente para cada nível harmônico, que será considerada constante.

A equação (1) faz referência a valores de  $DHTi\%$  por fase, que foram coletados através de TC's nos pontos indicados com um "X" na figura 1, e também a valores de corrente nominal por fase para bancos e filtros. A resistência associada a um módulo capacitivo é calculada através da equação (2):

$$R_n = \frac{tg\delta}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (2)$$

$R_n$ : Resistência associada às perdas de um só módulo capacitivo constitutivo do banco ou do filtro;

$tg\delta$ : Tangente de perdas, obtida do relatório de ensaio dos capacitores;

$C$ : Capacitância de um módulo que constitui o banco;

$f$ : Frequência fundamental do sistema.

Portanto, é necessário calcular o valor da resistência equivalente ( $R_{eq}$ ) associada a cada fase, considerando-se a configuração adotada para os capacitores do banco de capacitores e dos filtros de 5ª e 7ª ordem, que estão ligados em "dupla estrela isolada", como mostra a figura 8:

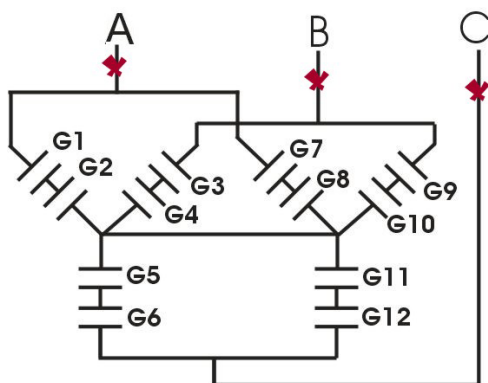


Figura 8: Configuração de ligação dos capacitores do banco e dos filtros

Onde "G1", "G2", ..., "G12" representam grupos de capacitores em série, agrupados dois a dois nos ramos em estrela. Cada grupo possui um número igual de capacitores em paralelo. Para os cálculos de perdas, cada célula capacitiva foi considerada como um resistor em série com um capacitor, sendo que a equação (2) diz respeito à

resistência ( $R_n$ ) de somente uma célula capacitiva, como destacado na figura 9.

**O banco de capacitores do filtro de 5ª ordem** é constituído de 96 capacitores monofásicos de  $2,67\mu F$ , 200kVAr e tensão nominal de 14,09 kV. Os dados obtidos do relatório de ensaios indicaram um valor médio de  $tg\delta = 0,12 \times 10^{-3}$  (tangente de perdas) para os módulos individuais. A potência total do banco trifásico é de 19,2MVar, com corrente nominal de 167,35A e tensão nominal de 48,89 kV;

**O banco de capacitores do filtro de 7ª ordem** é constituído de 84 capacitores monofásicos de  $3,115\mu F$ , 200kVAr e tensão nominal de 13,059 kV. Os dados obtidos do relatório de ensaios indicaram um valor médio de  $tg\delta = 0,12 \times 10^{-3}$  para cada módulo.

A potência total do banco trifásico é igual a 16,8MVar, com corrente nominal de 167,35A e tensão nominal de 45,206 kV.

**O banco de capacitores** é um banco trifásico de 57,6MVar, corrente nominal de 900A e tensão nominal de 36,39kV. É constituído por 96 capacitores monofásicos de  $14,17\mu F$ , 600kVAr e tensão nominal de 10,60kV. Os dados obtidos do relatório de ensaios indicaram um valor médio de  $tg\delta = 0,17 \times 10^{-3}$  para os módulos individuais.

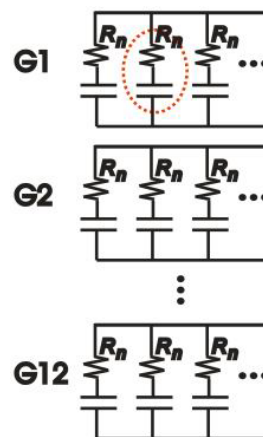


Figura 9: Representação das células capacitivas para o cálculo das perdas

Portanto, "G1" no banco de capacitores e no filtro de 5ª ordem possui oito capacitores associados em paralelo e no filtro de 7ª ordem possui sete capacitores.

Para exemplificar melhor será mostrado a seguir o cálculo de  $R_{eq}$  para o banco de capacitores na fase "A". Conforme citado anteriormente, esse banco possui 96 capacitores distribuídos igualmente nos grupos "G1", "G2", ..., "G12", de

acordo com a figura 8. Portanto, são 8 capacitores ligados em paralelo por grupo de acordo com a figura 9. Logo, para cada célula capacitiva tem-se:

$$R_n = \frac{tg\delta}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{0,12 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 60 \cdot 2,67 \cdot 10^{-6}} = 0,12\Omega$$

Como “G1” encontra-se em série com “G2”, que tem o mesmo valor de  $R_n$  que “G1”, a resistência referente à associação entre “G1” e “G2” ( $R_{n(G1G2)}$ ) é igual a:

$$R_{n(G1G2)} = \frac{0,12 \cdot 2}{8} = 0,03\Omega$$

Porém o agrupamento série G1G2 encontra-se em paralelo com o agrupamento G7G8 que por sua vez possui o mesmo valor de resistência, no caso 0,03Ω. Portanto o valor de  $R_{eq}$  associado à Fase “A” no banco de capacitores é:

$$R_{eq} = 0,015\Omega$$

As tabelas a seguir mostram as perdas em Watts antes e depois da mitigação, com todos os retificadores em operação normal e quando da saída dos retificadores “19” e “24”, um de cada vez.

Tabela 7: Comparação entre as perdas em Watts na fase “A”, com todos os retificadores em operação normal

Redução IV – Com todos os retificadores em operação normal			
Ponto de Medição	“P <sub>n</sub> ” Antes da Mitigação (W)	“P <sub>n</sub> ” Após a Mitigação (W)	
	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP -2 F7: TAP +2
Banco de capacitores	10,79	3,04	2,32
Filtro de 5ª harmônica	199,44	4,28	7,10
Filtro de 7ª harmônica	153,49	0,8	1,35

Tabela 8: Comparação entre as perdas em Watts na fase “A”, com o retificador “19” fora de operação

Redução IV – Com o retificador “19” fora de operação			
Ponto de Medição	“P <sub>n</sub> ” Antes da Mitigação (W)	“P <sub>n</sub> ” Após a Mitigação (W)	
	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP -2 F7: TAP +2
Banco de capacitores	5,68	6,26	10,64
Filtro de 5ª harmônica	64,21	60,80	377,13
Filtro de 7ª harmônica	54,54	57,04	93,13

Tabela 9: Comparação entre as perdas em Watts na fase “A”, com o retificador “24” fora de operação

Redução IV – Com o retificador “24” fora de operação			
Ponto de Medição	“P <sub>n</sub> ” Antes da Mitigação (W)	“P <sub>n</sub> ” Após a Mitigação (W)	
	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP +4 F7: TAP +6	F5: TAP -2 F7: TAP +2
Banco de capacitores	25,69	6,46	8,8
Filtro de 5ª harmônica	573,27	55,43	297,76
Filtro de 7ª harmônica	447,96	75,12	113,9

Comparando-se os resultados apresentados nas tabelas 7 e 8 pôde-se observar que antes da mitigação do problema ocorreu um decréscimo nas perdas quando o retificador “19” foi retirado de operação. Além disso, de acordo com os resultados apresentados na tabela 9, foi possível observar a ocorrência de valores elevados de potência dissipada quando da saída do retificador “24”, já que um dos outros cinco remanescentes – o retificador “19” – tinha suas fases “A” e “C” invertidas.

Por outro lado, após a mitigação do problema e com os taps “-2” e “+2” para os filtros de 5ª e 7ª ordem, respectivamente, pôde-se notar valores elevados para “P<sub>n</sub>” no filtro de 7ª ordem, e em especial no filtro de 5ª ordem, quando da retirada de qualquer retificador.

## 5.0 CONCLUSÕES

Os retificadores trifásicos não controlados em paralelo são amplamente utilizados nas indústrias onde se necessita de altos valores de corrente contínua para a produção em determinada planta. Porém, proporcionalmente à sua importância e utilização, os retificadores são grandes fontes poluidoras, no que diz respeito à qualidade da energia elétrica.

Este trabalho mostrou as conseqüências provocadas pela troca acidental de fases no transformador defasador que alimenta um retificador de grande porte em uma fábrica de alumínio. Em particular, pôde-se destacar o decréscimo ocorrido nos níveis de perdas e de DHTi% quando o retificador problemático era retirado de operação. Esse fato chamou a atenção porque quando ocorre a retirada de um dos seis retificadores que compõem alguma das reduções da fábrica é de se esperar o aumento do nível de DHTi%, e conseqüentemente das perdas, já que a composição das formas de onda no primário dos transformadores defasadores fica comprometida.

O estudo das perdas foi realizado em três momentos: antes e após a mitigação, sendo esta

última dividida em dois valores de *tap* para os filtros de 5ª e de 7ª ordem.

Através da análise de DHTi% e dos valores de perdas pôde-se determinar os *taps* ideais para a atual configuração de operação da fábrica: “+4” e “+6” para os filtros de 5ª e 7ª ordem, respectivamente.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MILLER, T. J. E., *Reactive Power Control in Electric Systems*. John Wiley and Sons, 1982.
- (2) Estudo sobre o Sistema de Medição de Corrente dos Retificadores (Apostila). Toshiba Corporation, 1989.
- (3) YAMAGUCHI, T. *et al.*, “Multi-phase Converter Circuit Performance Analysis”. Conference Record of the 1979 IEEE Fourteenth IAS Annual Meeting – IAS’79, 1979, p. 484-494.
- (4) PAICE, Derek, *Power Electronic Converter Harmonics – Multipulse Methods for Clean*
- (5) *Power*. IEEE Press, 1996.
- (6) RMS Sistemas Eletrônicos, MARH-21/ 993 – Manual de Instruções.
- (7) WU, Chi-Jui *et al.*, “Investigation and Mitigation of Harmonic Amplification Problems Caused by Single-Tuned Filters”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, nº3, July 1998, p. 800-806.
- (8) FILHO, J. B. S; CARVALHO, M. A. D., “Método para a Especificação de Capacitores na Presença de Harmônicos”; Revista Eletricidade Moderna, Agosto de 2004.
- (9) DIAS, GUILHERME A. D., *Harmônicas em Sistemas Industriais*. Coleção Engenharia 4, EDIPUCRS, Porto Alegre, 1998.
- (10) *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*: IEEE Standard 519, 1992. 100 p.
- (11) *IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters*: IEEE Standard 1531, 2003. 60 p.