



**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

**ANÁLISE HARMÔNICA NO SISTEMA ELÉTRICO DE UMA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO: INVESTIGAÇÃO DO
ACRÉSCIMO DE CORRENTE NO SISTEMA DE FILTRAGEM**

Alex T. Yokoyama* **Maria Emília de L. Tostes*** **Carmina 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

O presente trabalho apresenta uma investigação da origem da amplificação harmônica verificada no filtro de quinta ordem da redução IV da ALBRÁS a partir da verificação do defasamento angular dos transformadores retificadores e através de registros e medições da corrente em diversos pontos. O trabalho propõe o desenvolvimento de análises combinando medições e estudos do sistema com base nas informações obtidas. As medições foram realizadas dentro da sala de comando da Subestação Principal e na sala do subcontrole dos retificadores. Os resultados da investigação foram utilizados para apresentar propostas de mitigação a fim de solucionar o problema em questão. Uma comparação do perfil harmônico do sistema antes e após a solução do problema também é mostrada.

PALAVRAS-CHAVE

Distorção Harmônica, Filtros, Qualidade de Energia, Retificadores.

1.0 - INTRODUÇÃO

A fábrica de alumínio ALBRAS (Alumínio Brasileiro S.A.) localizada em Barcarena-PA possui atualmente quatro linhas de redução para a obtenção da redução eletrolítica do Alumínio. Cada linha de redução é alimentada por um transformador (MT) de 208,4MVA – 230kV/ 34,5kV, possuindo dois autotransformadores reguladores de tensão (LVR) e seis transformadores defasadores com configuração do tipo “delta/estrela dupla invertida”. Em cada um dos secundários ligados em estrela existe um retificador de seis pulsos. Os retificadores são conectados em paralelo no lado CC. O primário dos transformadores retificadores possui um defasamento angular, a fim de atenuar os harmônicos de corrente injetados no sistema CA pela técnica de multipulsos. Esse defasamento deve ser igual a 10° de tal forma que o número de pulsos em cada sistema de retificação seja 36 e entre dois grupos ou duas linhas de redução sejam 72. Cada uma das reduções 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 10MVA 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 ALBRÁS, tendo sido trocados os autotransformadores reguladores e os transformadores retificadores de todas as reduções por equipamentos de potência mais elevada. Em 2003 houve também a troca dos bancos de capacitores em todas as reduções, com exceção da redução I. Bancos de 20MVA foram substituídos por bancos de 50MVA, a fim de manter o fator de potência de 0,99 na barra correspondente. Foram feitas também melhorias na refrigeração dos cubículos dos retificadores. A potência dos filtros de harmônicos não foi alterada. Após as reformas a capacidade nominal da barra de retificação foi elevada de 1040 V/155 kA para 1104 V/170 kA. No entanto, por volta do final de 2002,

*Av. Augusto Correa, 1 - CEP 66075-900 - Belém - PA - BRASIL

Tel.: (091) 3183-1634 - Fax: (091) 3183-1634 - e-mail: takashi@ufpa.br; tostes@ufpa.br; carmina@ufpa.br;

quando da necessidade de parada de um dos retificadores da redução IV, notou-se um aumento absurdo na corrente do filtro de quinta ordem daquela redução, tendo sido relatado, em uma das fases, a ruptura de um dos tirantes de suporte mecânico da estrutura metálica de tal filtro. Tais 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.

O presente trabalho apresenta uma investigação da origem da amplificação harmônica verificada no filtro de quinta ordem da redução IV da ALBRÁS partindo da verificação do defasamento angular dos transformadores retificadores e através de registros e medições da corrente em diversos pontos, conforme indicado na Figura 1. Os pontos em vermelho indicam as medições realizadas dentro da Subestação Principal da ALBRÁS. Os pontos em azul indicam as medições realizadas nas salas dos subcontroles dos retificadores. Para a coleta de dados foi utilizado um Medidor/ Registrador Trifásico de Grandezas em Tempo Real. As investigações mostram que a sobrecarga no filtro em questão provoca um sensível aumento na distorção harmônica da corrente, a qual pode alcançar valores bem mais elevados quando comparados com os valores obtidos nas outras reduções. O trabalho propõe o desenvolvimento de análises combinando medições e estudos do sistema com base nas informações obtidas. As medições de campo foram realizadas dentro da sala de comando da Subestação Principal e na sala de subcontrole dos retificadores, a fim de verificar pontos estratégicos associados à redução IV do sistema elétrico da ALBRÁS. Uma comparação do perfil harmônico do sistema antes e após a solução do problema é mostrada.

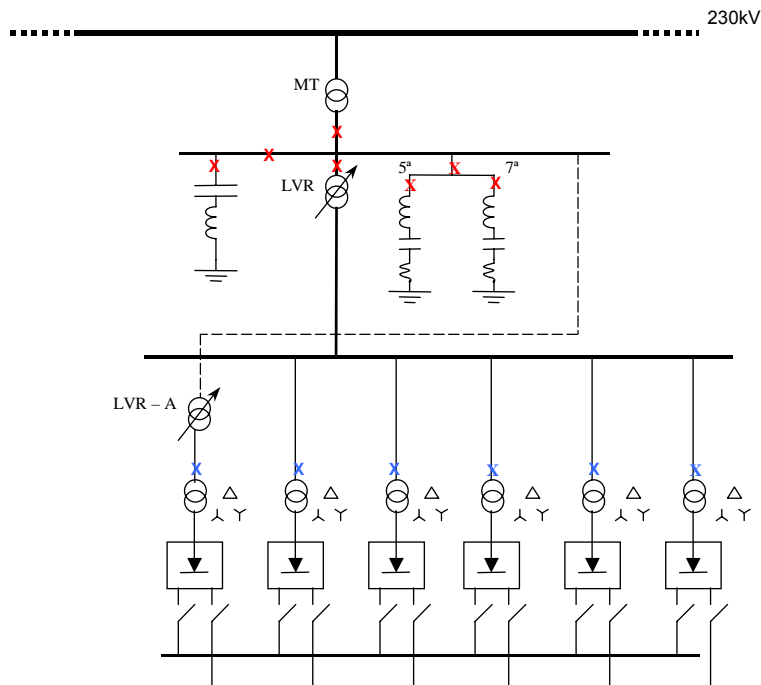


FIGURA 1: Diagrama unifilar de uma redução e pontos de medição

2.0 - AVALIAÇÃO HARMÔNICA COMPARATIVA ENTRE AS REDUÇÕES ANTES DA MEDIDA MITIGADORA

A fim de levantar o perfil harmônico do sistema e determinar a extensão real do problema de penetração harmônica identificado pelos engenheiros da ALBRÁS foram realizadas medições nos pontos mostrados em vermelho na Figura 1, em todas as reduções. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam um resumo da distorção harmônica de corrente (DHTi%) encontrada, com todos os retificadores em operação. Essas tabelas mostram a existência de uma sobrecarga harmônica nos filtros de 5ª e 7ª harmônica da redução IV, pois a Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTi%) desses equipamentos atinge 60% ou mais da corrente fundamental. Essa sobrecarga fica ainda mais evidente quando são comparados os valores de DHTi% entre as reduções. Na fase A, por exemplo, a DHTi% no filtro de 5ª harmônica da redução IV chega a ser 5,2 vezes maior que a DHTi% no filtro de 5ª harmônica da redução I e 4,5 vezes maior que a DHTi% no filtro de 5ª harmônica da redução II. A DHTi% do filtro de 7ª harmônica da redução IV chega a ser 8,5 vezes maior que a DHTi% no filtro de 7ª harmônica da redução I, 11,8 vezes maior que a DHTi% no filtro de 7ª harmônica da redução II e 10,8 vezes maior que a DHTi% no filtro de 7ª harmônica da redução III.

TABELA 1: Distorção Harmônica de Corrente na Fase “A” – DHTi%

Ponto de Medição	Redução I	Redução II	Redução III	Redução IV
Secundário do transformador de alimentação (MT)	0,90	1,00	-*	1,77
Primário do transformador regulador (LVR)	4,88	4,73	-*	4,40
Banco de capacitores	1,85	1,78	2,23	5,79
Ponto comum entre os filtros	7,63	8,40	15,59	45,62
Filtro de 5ª harmônica	13,33	15,42	29,30	68,91
Filtro de 7ª harmônica	7,23	5,20	5,67	61,48

TABELA 2: Distorção Harmônica de Corrente na Fase “B” – DHTi%

Ponto de Medição	Redução I	Redução II	Redução III	Redução IV
Secundário do transformador de alimentação (MT)	0,94	0,92	-*	1,52
Primário do transformador regulador (LVR)	4,92	4,72	-*	4,24
Banco de capacitores	2,13	1,26	1,86	5,15
Ponto comum entre os filtros	9,53	9,15	19,35	45,68
Filtro de 5ª harmônica	14,15	18,48	35,52	68,87
Filtro de 7ª harmônica	13,13	6,14	6,38	60,68

TABELA 3: Distorção Harmônica de Corrente na Fase C – DHTi%

Ponto de Medição	Redução I	Redução II	Redução III	Redução IV
Secundário do transformador de alimentação (MT)	0,93	1,00	-*	1,88
Primário do transformador regulador (LVR)	5,08	4,58	-*	4,38
Banco de capacitores	1,39	2,41	2,76	6,40
Ponto comum entre os filtros	9,65	8,53	18,37	45,33
Filtro de 5ª harmônica	16,86	16,73	32,97	69,42
Filtro de 7ª harmônica	9,12	5,85	6,62	60,38

* Não houve medição na redução III.

Além das distorções elevadas nos filtros de 5ª e 7ª harmônica da redução IV, também foi verificada a existência de sobrecarga no banco de capacitores dessa redução. Nesse caso, a DHTi% da fase C chega a ser 4,6 vezes maior que a DHTi% no banco de capacitores da redução I, 2,65 vezes maior que a DHTi% no banco de capacitores da redução II e 2,3 vezes maior que a DHTi% no banco de capacitores da redução III. As Tabelas 1, 2 e 3 também evidenciam um desequilíbrio no DHTi% dos equipamentos entre as fases A, B, e C em todas as reduções, podendo-se destacar o filtro de 7ª harmônica da redução I, que apresenta uma diferença de 45% entre o DHTi% das fases A e B. Pode-se concluir, portanto, que existe uma sobrecarga nos filtros de 5ª e 7ª harmônica da redução IV provocada por um sensível aumento na distorção da corrente. Essa distorção se propaga pelo sistema e atinge equipamentos sensíveis como o banco de capacitores, alcançando valores bem mais elevados quando comparados com os valores obtidos nas demais reduções.

Deve-se ressaltar, no entanto, que as distorções encontradas na corrente do primário dos transformadores reguladores (LVR's) e na corrente do secundário dos transformadores alimentadores (MT's), nas reduções onde foram feitas essas medições, apresentaram valores reduzidos, indicando que o problema da redução IV não se propaga para o sistema fornecedor. Foi realizada também uma medição da DHTv% na barra de 230kV. Os resultados, apresentados na Tabela 4, mostram que os níveis de distorções da tensão de alimentação encontram-se abaixo de 1,5%, que é o máximo DHTv% permitido pela recomendação norte-americana *Standard IEEE-519*, do *IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers*, e também pela proposta brasileira do GCOI/ GPS – Grupo Coordenador para Operação Interligada/ Grupo Coordenador do Planejamento do Sistema.

TABELA 4: DHTv% na Barra de 230kVAR

Fase	A	B	C
DHTv%	1,09	1,03	1,33

3.0 - INVESTIGAÇÃO DO ACRÉSCIMO DA CORRENTE DE QUINTA HARMÔNICA NO SISTEMA DE FILTRAGEM DA REDUÇÃO IV

A fim de detectar a origem do problema de amplificação harmônica da redução IV foi feita uma análise minuciosa desse sistema partindo-se da verificação do defasamento angular dos transformadores que alimentam os retificadores. Em seguida, foi feita uma comparação com os resultados da redução II, que possui operação semelhante à redução IV, com mesmo ângulo de defasagem aplicado aos transformadores. Os resultados da comparação indicaram uma alteração associada ao primeiro retificador da redução IV, o retificador 19. Por isso, embora as análises tenham sido realizadas para todos os retificadores das reduções II e IV, serão mostrados neste trabalho somente os resultados associados aos primeiros retificadores dessas reduções, os retificadores 7 e 19, respectivamente, em função das limitações de espaço.

Inicialmente, será apresentada a análise da corrente produzida no primário dos transformadores. Para uma situação ideal de operação, a forma de onda resultante se apresenta como mostrado na Figura 2 [1]:

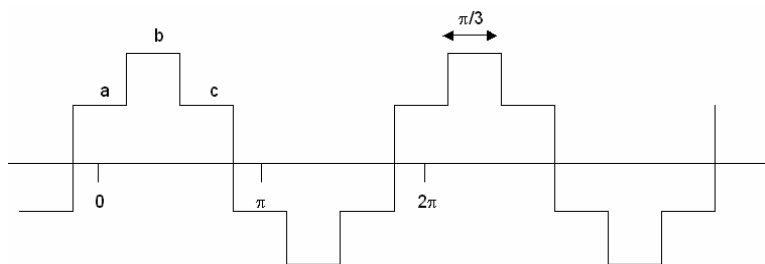


FIGURA 2: Corrente AC para operação ideal do retificador

Tomando-se como base a forma de onda mostrada na Figura 2, pode-se determinar teoricamente as equações que definem as amplitudes a , b e c utilizando as equações 1 a 3 (transformadores com modo de ligação com adiantamento angular) [2]:

$$a = \frac{I_d}{\sqrt{3}} (\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \text{sen } \theta) \quad (1)$$

$$b = \frac{I_d}{\sqrt{3}} (\sqrt{3} \cdot \cos \theta + \text{sen } \theta) \quad (2)$$

$$c = \frac{2I_d \text{sen } \theta}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Essas equações foram aplicadas aos transformadores dos retificadores 7 e 19 a fim de determinar os valores de a , b e c teóricos. As amplitudes de I_d foram retiradas de acordo com o manual do fabricante, e variam de acordo com a corrente no lado DC de cada retificador (aproximadamente 29,33kA). Os valores de θ , para efeito de cálculo, são fixos em 12,5 graus.

A seguir serão apresentadas as comparações feitas entre formas de onda de corrente que foram coletadas no subcontrole II e no subcontrole IV para os retificadores 7 e 19, que teoricamente deveriam apresentar os mesmos valores de a , b e c calculados. Leva-se em conta que a redução II, por não apresentar problemas de grandes proporções em seus equipamentos, é referência no momento das comparações. As medições foram realizadas com todos os retificadores das respectivas reduções em operação, na sala do subcontrole das reduções (pontos mostrados em azul na Figura 1). As formas de onda coletadas nos subcontroles, apesar de possuírem caráter basicamente qualitativo, atendem às necessidades das análises. As coletas foram feitas na fase "A" dos retificadores.

3.1 Comparação das formas de onda de corrente obtidas no lado primário dos transformadores defasadores dos retificadores 7 e 19

A Figura 3 apresenta uma comparação entre as formas de onda do primário dos transformadores que alimentam os retificadores 7, da redução II (em vermelho) e 19, da redução IV (em azul). A Tabela 5 mostra uma comparação entre os valores esperados, calculados através das equações 1, 2 e 3, e os valores obtidos através de medições nas reduções II e IV.

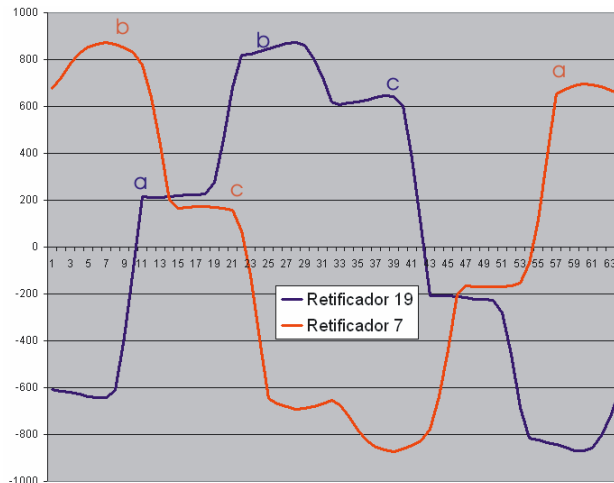


FIGURA 3: Formas de onda de corrente coletadas no primário dos transformadores defasadores, que indicavam valores dos patamares “a” e “c” invertidos no retificador 19

TABELA 5: Comparação entre os valores calculados e os coletados para os retificadores 7 e 19

	Valores calculados	Corrente medida no Primário do TC Retificador 7	Corrente medida no Primário do TC Retificador 19
a	3,41	3,76	1,19
b	4,41	4,75	4,80
c	1	0,94	3,55

Como já citado anteriormente, esses dois retificadores deveriam apresentar características semelhantes, como por exemplo, defasamento angular, níveis de distorção harmônica, etc. e, portanto, deveriam apresentar formas de onda semelhantes. No entanto, os resultados obtidos evidenciaram a existência de um problema no transformador defasador que alimenta o retificador 19 da redução IV. A fim de comprovar as suspeitas levantadas, maiores investigações foram realizadas considerando a operação da redução IV com e sem a presença do retificador 19 e comparando esses resultados com os obtidos para a redução II, conforme mostrado a seguir.

3.2 Determinação do Comportamento da Redução IV Com e Sem a Presença do Retificador 19

A fim de comprovar a existência de problemas associados ao retificador 19, foi realizado um procedimento para investigação do perfil harmônico das reduções II e IV. O objetivo era analisar as consequências causadas pela retirada de determinados retificadores estrategicamente escolhidos, já que ambas as reduções deveriam apresentar desempenhos similares, dados os mesmos valores de defasagem dos transformadores que alimentam os retificadores (LVR's). Os pontos utilizados para a coleta de dados são aqueles mostrados com um “x” em vermelho na Figura 1. Com o objetivo de facilitar a análise, os resultados das medições foram resumidos em três casos, comparando-se os resultados obtidos para a redução II com aqueles obtidos para a redução IV, conforme apresentado nas Tabelas 6, 7 e 8.

3.2.1 Todos os retificadores em operação normal

De acordo com a Tabela 6, pode-se notar que no momento em que ambas as reduções em análise estão com todos os retificadores em operação normal, os níveis de distorção presentes na redução IV atingem valores extremamente elevados, comparativamente à redução II. A distorção harmônica de corrente no filtro de 5ª harmônica da redução IV, por exemplo, é em média, quatro vezes maior que a DHTi% do filtro de 5ª harmônica da redução II. No filtro de 7ª harmônica da redução IV, a DHTi% chega a pouco mais de onze vezes o valor encontrado na redução II. Além disso, a distorção no banco de capacitores na redução IV é três vezes maior do que a encontrada na redução II.

TABELA 6: Distorção Harmônica de Corrente nas Fases A, B e C – DHTi%

Ponto de Medição	Redução II			Redução IV		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Secundário do transformador de alimentação (MT)	1,00	0,92	1,00	1,77	1,52	1,88
Primário do transformador regulador (LVR)	4,73	4,72	4,58	4,40	4,24	4,38
Banco de capacitores	1,78	1,26	2,41	5,79	5,15	6,40
Ponto comum entre os filtros	8,40	9,15	8,53	45,62	45,68	45,33
Filtro de 5ª harmônica	15,42	18,48	16,73	68,91	68,87	69,42
Filtro de 7ª harmônica	5,20	6,14	5,85	61,48	60,68	60,38

3.2.2 Operação sem os retificadores 7 e 19 das reduções II e IV, respectivamente

Conforme mostra a Tabela 7, quando ocorreu a retirada de operação do retificador 7 da redução II os níveis de distorção aumentaram significativamente, já que a composição dos trinta e seis pulsos formada por todos os retificadores da redução ficou comprometida. Na redução IV, porém, ao invés de aumentarem com a retirada do retificador 19, conforme esperado, os níveis de DHTi% diminuíram significativamente em relação aos valores encontrados quando todos os retificadores se encontravam em operação normal.

Tabela 7: Distorção Harmônica de Corrente nas Fases A, B e C – DHTi%

Ponto de Medição	Redução II			Redução IV		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Secundário do transformador de alimentação (MT)	1,27	1,20	1,31	1,61	1,31	1,76
Primário do transformador regulador (LVR)	4,30	4,41	4,37	4,39	4,31	4,38
Banco de capacitores	3,22	3,12	3,83	4,21	3,30	4,58
Ponto comum entre os filtros	33,05	34,61	32,81	25,10	25,40	25,14
Filtro de 5ª harmônica	49,81	51,68	50,85	39,10	39,52	39,99
Filtro de 7ª harmônica	44,52	43,87	44,99	36,65	36,35	34,65

Para concluir as análises foi feita a comparação da retirada dos retificadores 12 e 24 – os últimos retificadores das reduções II e IV, respectivamente, conforme mostrado a seguir.

3.2.3 Operação sem os retificadores 12 e 24 das reduções II e IV, respectivamente

Tabela 8: Distorção Harmônica de Corrente nas Fases A, B e C – DHTi%

Ponto de Medição	Redução II			Redução IV		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Secundário do transformador de alimentação (MT)	1,34	1,21	1,36	2,21	2,03	2,31
Primário do transformador regulador (LVR)	8,85	8,72	8,73	9,04	12,10	8,94
Banco de capacitores	2,43	2,21	3,11	8,95	8,24	9,35
Ponto comum entre os filtros	26,53	28,61	26,19	76,98	77,67	76,51
Filtro de 5ª harmônica	32,65	31,98	31,75	116,83	117,66	117,82
Filtro de 7ª harmônica	42,84	42,37	42,67	105,03	105,52	103,37

Conforme mostra a Tabela 8, no momento da retirada de operação do retificador 12 da redução II os níveis de distorção aumentaram significativamente, visto que a composição dos trinta e seis pulsos formada por todos os retificadores em operação normal foi novamente comprometida. Na redução IV, por outro lado, ocorreu um aumento excessivo dos níveis de DHTi% devido a presença do retificador 19. Portanto, com base nos dados mostrados anteriormente, pode-se afirmar que **o principal responsável pelos elevados níveis de distorção presentes na redução IV é o transformador defasador que alimenta o retificador 19.**

4.0 - MEDIDA MITIGADORA ADOTADA

Após análises em manuais e catálogos do fabricante do transformador defasador e investigações de campo verificando os cabos de ligação, encontrou-se realmente uma inversão nas fases “A” e “C” 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 e um novo ajuste nos *taps* dos indutores dos filtros harmônicos da redução, a fim de otimizar a sintonia dos mesmos.

As Tabelas 9, 10 e 11 mostram os níveis de harmônicos presentes nas reduções após a inversão das fases no transformador defasador que alimenta o retificador 19. Nota-se que, agora, os níveis de distorção da redução II e IV encontram-se bem mais próximos que antes da mitigação. Fazendo-se uma comparação entre as Tabelas 1 e 9, pode-se destacar a redução de 46,8% na distorção no banco de capacitores, de 84,34% no filtro de 5ª harmônica, de 92,78% e de 21,47% no secundário do transformador de alimentação da redução IV (MT-4).

A Tabela 12 mostra que 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, no caso, o retificador 24, diferentemente do que foi mostrado na Tabela 8.

TABELA 9: DHTi% na Fase A com todos os retificadores em operação normal, após a medida mitigadora

Ponto de Medição	Redução II	Redução III	Redução IV
Secundário do transformador de alimentação (MT)	0,88	1,14	1,39
Primário do transformador regulador (LVR)	4,62	4,39	4,89
Banco de capacitores	2,03	2,16	3,08
Ponto comum entre os filtros	7,69	14,17	5,41
Filtro de 5ª harmônica	14,77	23,29	10,10
Filtro de 7ª harmônica	5,11	6,84	4,44

TABELA 10: DHTi% na Fase B com todos os retificadores em operação normal, após a medida mitigadora

Ponto de Medição	Redução II	Redução III	Redução IV
Secundário do transformador de alimentação (MT)	0,67	1,17	1,06
Primário do transformador regulador (LVR)	4,56	4,48	4,88
Banco de capacitores	1,23	1,37	2,20
Ponto comum entre os filtros	9,79	14,20	5,48
Filtro de 5ª harmônica	16,28	23,84	9,98
Filtro de 7ª harmônica	5,81	6,42	3,70

TABELA 11: DHTi% na Fase C com todos os retificadores em operação normal, após a medida mitigadora

Ponto de Medição	Redução II	Redução III	Redução IV
Secundário do transformador de alimentação (MT)	0,91	1,07	1,59
Primário do transformador regulador (LVR)	4,60	4,51	5,09
Banco de capacitores	1,94	2,43	3,87
Ponto comum entre os filtros	7,71	13,52	5,75
Filtro de 5ª harmônica	13,94	20,84	9,32
Filtro de 7ª harmônica	6,14	8,22	4,69

TABELA 12: DHTi% nas Fases A, B e C quando da saída dos retificadores 19 ou 24.

Ponto de Medição	Redução IV – Retificador “19” Fora de Operação			Redução IV – Retificador “24” Fora de Operação		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Secundário do transformador de alimentação (MT-4)	1,79	1,62	2,00	1,70	1,53	2,00
Primário do transformador regulador (LVR-4)	4,28	4,28	4,31	9,31	9,27	9,38
Banco de capacitores	4,42	3,61	4,91	4,49	3,66	5,62
Ponto comum entre os filtros	26,81	26,88	26,59	27,75	26,67	27,29
Filtro de 5ª harmônica	38,05	38,72	38,78	36,33	35,86	37,19
Filtro de 7ª harmônica	37,48	36,39	35,27	43,01	41,75	42,10

5.0 - CONCLUSÕES

Os retificadores trifásicos não-controlados são largamente empregados em aplicações industriais onde se necessita de corrente contínua para algum processo da planta. Em determinados casos é comum inclusive a associação de retificadores em paralelo. No entanto, proporcionalmente à sua importância, os retificadores figuram também entre uma das grandes fontes poluidoras no que diz respeito à qualidade da energia elétrica. Devido ao largo emprego desses equipamentos faz-se necessária uma constante verificação das correntes harmônicas geradas e do nível de distorção proporcionado pela sua inserção nos sistemas elétricos.

O presente trabalho visou a investigação do acréscimo de corrente no sistema de filtragem da fábrica da ALBRAS, mais especificamente na sua subestação principal, em uma das reduções. Através de comparações entre valores calculados teoricamente e de sucessivas análises das formas de onda coletadas, paulatinamente foi sendo descartada a suspeita de algum tipo de ressonância provocada pela troca dos equipamentos da subestação, que se iniciou em 2001. Através de análises nos diagramas dos transformadores pôde-se encontrar a inversão de fases do transformador defasador do retificador 19.

Mesmo com os altos níveis de distorção presentes na planta da ALBRAS o sistema elétrico da concessionária não foi prejudicado, pois a DHTv% na barra de 230kV encontrava-se dentro de normas recomendadas. Porém, a vida útil dos equipamentos do pátio da subestação estava sendo comprometida, tendo ocorrido o rompimento de tirantes do reator do filtro harmônico por sobreaquecimento, havendo também uma grande quantidade de energia sendo desperdiçada.

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 Power*. IEEE Press, 1996.
- (5) RMS Sistemas Eletrônicos, MARH-21/ 993 – Manual de Instruções.
- (6) 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.