

CE 02

Arm 09  
Pasta 54

GRUPO COORDENADOR PARA OPERAÇÃO INTERLIGADA - GCOI

SUBCOMITE DE ESTUDOS ELETRICOS - SCEL

GRUPO DE TRABALHO DE ESTUDOS ESPECIAIS DO SISTEMA - GTEE

ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE COMPONENTES  
HARMÔNICOS GERADOS PELO CONSUMIDOR  
ALUMAR COM 70MM DE CARGA RETIFICADORA.

RELATORIO SCEL-GTEE-007/34  
DEZEMBRO 34

## Í N D I C E

01 - CONSIDERAÇÕES GERAIS -----	01
02 - OBJETIVO -----	02
03 - INCOVENIENTES CAUSADOS POR HARMÔNICOS -----	03
04 - CRITÉRIOS ADOTADOS -----	05
4.1. Limites de tensão harmônica -----	05
4.2. Limites de distorção harmônica -----	07
4.3. Limites de corrente harmônica -----	07
05 - ENSAIOS DE CAMPO -----	09
5.1. Metodologia -----	09
5.2. Instrumentos/Equipamentos usados -----	11
5.3. Medições -----	12
5.3.1. Medição de corrente harmônica -----	12
5.3.2. Medição de tensão harmônica -----	15
06 - ANÁLISE DOS RESULTADOS -----	16
07 - CONCLUSÃO -----	17
08 - RECOMENDAÇÕES/SUGESTÕES -----	18
ANEXO 1 - PROGRAMA EXECUTIVO DE MEDIÇÃO DE COMPONENTES HARMÔNICOS NO SISTEMA INTERLIGADO NORTE/NORDESTE GERADOS PELO CONSUMIDOR ALUMAR.	
ANEXO 2 - FIGURAS	

## 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O complexo industrial da ALUMAR entrou em operação em julho/1984 e nesta primeira fase contará com uma refinaria de alumina, com capacidade de 500.000 toneladas/ano e uma fábrica de alumínio (retificação) com capacidade de 100.000 toneladas/ano.

A ALUMAR é alimentada pela ELETRONORTE, em 230 kV, através de duas linhas de transmissão a partir da SE de São Luís II com uma carga prevista para a fase inicial (Dez/84) da ordem de 200 MW onde 90% dessa carga é de retificação, o que implica que correntes harmônicas significativas serão injetadas no Sistema ELETRONORTE.

A carga de retificação da indústria consiste de uma linha de 204 cubas eletrolíticas em série, alimentadas por 6 pontes retificadoras de 6 pulsos operando em paralelo e alimentadas cada uma delas através de transformadores retificadores trifásicos de 34,5/0,7 kV, com defasamento angular de  $10^{\circ}$  elétricos entre si, necessários a formação de um sistema de 36 pulsos visto do lado de 34,5 kV. A figura 1 mostra o sistema ALUMAR, onde, também, pode-se verificar o filtro de 19,2 Mvar/39,7 kV sintonizado para o 5º harmônico.

Esta carga de retificação, por ter características não lineares, provoca a circulação de correntes cuja forma de onda não é uma senóide pura, o que origina uma distorção na forma de onda da tensão. Esta distorção resulta no aparecimento de tensões harmônicas, cujos efeitos nos equipamentos elétricos se manifestam através da diminuição de sua vida útil, perdas de energia e até mesmo falhas de componentes.

Estudos de harmônicos desenvolvidos no âmbito de GTAS/NO - "Estudo Pré-Operacional da Influência dos Harmônicos Gerados pelo Consumidor ALUMAR no Sistema Interligado Norte/Nordeste" (Relatório SCEL-GTAS/NO-10/84, Abril/84) recomendaram a necessidade de medição de correntes e tensões harmônicas nas subestações de Miranda e Peritoró do Sistema Interligado NO/NE e na Subestação Redução da ALUMAR, para que fossem verificados os níveis harmônicos causados pela operação do consumidor ALUMAR.

As medições foram realizadas no período de 14/08 a 17/08 e a equipe técnica foi constituída de integrantes da ELETRONORTE, CHESF e ALUMAR.

2. OBJETIVO

Verificar os níveis de harmônicos nas SE's Miranda, Peritoró e Redução, provocados pela operação dos retificadores do consumidor ALUMAR.

3. INCONVENIENTES CAUSADOS POR HARMÔNICOS

Os efeitos dos harmônicos nos equipamentos elétricos se manifestam através da diminuição da sua vida útil, perdas de energia e até mesmo falhas de operação de alguns componentes, tais como:

- Perdas adicionais e aquecimentos em máquinas rotativas
- Torques pulsantes em motores A.C.
- Sobrecarga em capacitores e transformadores.
- Sobretensões.
- Instabilidade em sistemas de controle.
- Interferência em sistema de comunicação.
- Atuação incorreta da proteção.
- Erros de medições, etc.

As máquinas A.C. apresentam perdas adicionais e aquecimentos resultantes das correntes parasitas induzidas no ferro. As componentes de baixa ordem, que se apresentam com maiores amplitudes, são em geral as principais responsáveis por esses efeitos.

No caso de motores de indução, a existência de harmônicos na tensão de alimentação reduz o seu torque à velocidade nominal e causa torques parasitas que podem impedir a sua aceleração normal.

Os bancos de capacitores, quando alimentados com tensões distorcidas, fornecem uma potência reativa diferente da nominal e tem sua vida útil bastante prejudicada. Nestas condições, é comum um aquecimento anormal e a sua solicitação de isolamento, que é proporcional ao valor de pico da tensão, pode ser aumentada com os harmônicos da tensão. A queima de fusíveis ou defeitos em capacitores é a primeira evidência de excessivos níveis harmônicos.

Os efeitos capacitivos e indutivos, presentes nos sistemas de potência, podem constituir ressonâncias série ou paralela para uma frequência harmônica existente, ou próxima dela, originando sobre tensões ou sobrecorrentes, que prejudicam a operação normal dos equipamentos.

De um modo geral pode-se dizer que os harmônicos afetarão a operação de qualquer dispositivo que se baseia na existência de formas de onda senoidais. Assim os sistemas de controle, comunicação, proteção e medição são influenciados pelas correntes e tensões harmônicas, devido a induções eletromagnéticas e/ou erros nos sinais de controle.

Os distúrbios provocados por harmônicos nos sistemas de potência, resumidos neste item, mostram claramente a necessidade de se prever, da forma mais confiável possível, os níveis esperados e procurar limitar as distorções harmônicas nos barramentos das subestações.

#### 4. CRITÉRIOS ADOTADOS

Os critérios adotados neste trabalho são aqueles definidos no relatório SCEL-GTEE-03/84 "Critérios e Metodologias para Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais".

As tensões harmônicas expressam-se geralmente pela relação percentual da tensão fundamental (60 Hz), isto é:

$$v_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\%, \text{ onde}$$

$V_h$  = valor eficaz da tensão harmônica de ordem h, em volts

$V_1$  = valor eficaz da tensão fundamental, em volts

h = ordem harmônica.

##### 4.1. Limites de Tensão Harmônica

4.1.1. A tensão harmônica fase-terra ( $v_h$ ) em qualquer p.a.c. com tensão nominal do sistema < 69 kV não pode exceder a:

4% para harmônicos ímpares

2% para harmônicos pares

4.1.2. A tensão harmônica ( $v_h$ ) correspondente a qualquer harmônico de ordem ímpar não deverá em nenhum p.a.c. para sistemas com tensão nominal  $\geq$  69 kV, exceder o limite especificado para aquela harmônica, conforme tabela descrita na próxima página.

Ordem de Harmônica (h)	Limite de Tensão $v_h$ (%)
3	2,5
5	1,4
7	1,0
9	0,8
11	0,7
13	0,6
15	0,5
17 a 21	0,4
23 a 49	0,3

Tabela 1 - Limites de Tensões Harmônicas Ímpares

- 4.1.3. A tensão harmônica ( $v_h$ ) correspondente a qualquer harmônico de ordem par não deverá em nenhuma p.a.c., para sistemas com tensão nominal  $\geq 69$  kV, exceder o limite especificado para aquele harmônico, conforme tabela abaixo.

Ordem de Harmônica (h)	Limite de Tensão $v_h$ (%)
2	1,20
4	0,60
6	0,40
8 a 10	0,30
12 a 50	0,20

Tabela 2 - Limites de Tensões Harmônicas Pares

#### 4.2. Limite da Distorção Harmônica

4.2.1. A distorção de tensão harmônica total em qualquer p.a.c., para sistemas com tensão nominal < 69 kV, não pode exceder a 5%.

$$d = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} v_h^2} < 5\%$$

onde  $v_h$  é dado em percentagem.

#### 4.3. Limites de Corrente Harmônica

4.3.1. A corrente harmônica que circula entre qualquer consumidor e o p.a.c., para os harmônicos de ordem ím par, não deverá exceder o limite especificado para aquele harmônico.

Ordem de Harmônica (h)	Limite de Corrente Harmônica (em ampères a tensão nominal do sistema)					
	500 kV	345 kV	230 kV	138 kV	88 kV	69 kV
3	12,7	8,8	5,9	3,5	2,2	1,8
5	7,7	5,3	3,5	2,1	1,4	1,1
7	5,5	3,8	2,5	1,5	1,0	0,8
9	4,2	2,9	2,0	1,2	0,8	0,6
11	3,5	2,4	1,6	1,0	0,6	0,5
15	2,9	2,0	1,4	0,8	0,5	0,4
15	2,6	1,8	1,2	0,7	0,5	0,4
17	2,5	1,6	1,0	0,6	0,4	0,5
19 a 21	1,9	1,5	0,9	0,5	0,5	0,5
25	1,7	1,2	0,8	0,5	0,5	0,2
25 a 49	1,6	1,1	0,7	0,4	0,5	0,2

Tabela 5 - Limites de Correntes Harmônicas Ímpares

4.3.2. A corrente harmônica que circula entre qualquer consumidor e o n.a.c., para os harmônicos de ordem par, não deverá exceder o limite especificado para aquele harmônico.

Orden de Harmônica (h)	Limite de Corrente Harmônica (Em amperes a tensão nominal do sistema)					
	500 kV	345 kV	230 kV	138 kV	88 kV	69 kV
2	6,2	4,5	2,9	1,8	1,1	0,9
4	5,2	2,2	1,5	0,9	0,6	0,4
6	2,2	1,5	1,0	0,6	0,4	0,3
8	3,6	2,5	0,7	0,4	0,3	0,2
10	1,5	0,9	0,6	0,4	0,2	0,2
12 e 14	1,0	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2
16 e 18	0,9	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2
20 a 50	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2

Tabela 4 - Limites de Correntes Harmônicas pares

4.4 - Limites

5. ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo foram realizados no período de 14/08 a 17/08/84 na SE Redução da ALUMAR e nas SE's Peritoró e Miranda da ELETRONORTE. Durante a realização dos ensaios, a carga retificadora encontrava-se em torno de 70 MW.

Para se obter uma referência inicial, foram realizadas medições sem os retificadores da ALUMAR.

A equipe técnica que participou dos ensaios foi composta por integrantes da ELETRONORTE, CHESF e ALUMAR, cujas responsabilidades/atribuições constam no programa executivo (anexo 1).

A tabela 5 mostra as medições, configurações da ALUMAR e a ordem de execução das medições nas SE's Peritoró, Miranda e Redução.

5.1. Metodologia

A metodologia usada para a execução das medições baseou-se no relatório SCEL/GTAS/NO-017/84 "Diretriz Geral de Medição para Verificação da Influência dos Harmônicos Gerados pelo Consumidor Industrial ALUMAR no Sistema Interligado NO/NE".

- 5.1.1. Levantamento fasorial da tensão de 230 kV para o cálculo do desequilíbrio do sistema.
- 5.1.2. Para cada medição foram registrados alguns ciclos de formas de ondas de tensão e corrente (6 ciclos) e o espectro harmônico correspondente (amplitude e fase de cada harmônico).
- 5.1.3. Durante cada medição, foram observadas/registradas a configuração/carga do sistema supridor e a condição de carga do consumidor ALUMAR.
- 5.1.4. As medições foram efetuadas na configuração de carga média do sistema interligado Norte/Nordeste, com o consumidor ALUMAR operando com 6 pontes ou 5 pontes retificadores com ou sem a presença do filtro na barra de 34,5 kV.

Configuração Medição	6 retificado res + filtro	5 retificado res + filtro	5 retificado res - filtro	6 retificado res - filtro	6 retificado res - filtro	som a car de Retificação	LOCAL DE MEDIÇÃO
Tensão 34,5 kV Corrente no Re tificador nº 06.	1	4	-	-	-	-	Sala 301
Tensão 34,5 kV Corrente no Re tificador nº 05.	2	3	-	-	-	-	Sala 301
Tensão 34,5 kV Corrente no filtro.	5	8	-	-	-	-	Sala 112Y
Tensão 34,5 kV Corrente no Trafo 34,5 kV.	6	9	13	-	-	-	Sala 112Y
Tensão 230 kV Corrente LT 230 kV	7	10	14	15	11	-	Sala 112Y
Corrente no Trafo 230 kV Ten são no Trafo 34,5 kV	-	-	12	-	-	-	Sala 112Y
Tensão 230 kV TP Indutivo Ten são 230 kV DPC	-	-	16	-	-	-	Pátio de Redução
Tensão 230 kV DPC	21	20	18	17	19	-	Pátio de Miranda
Tensão 230 kV - DPC	22	23	25	26	24	-	Pátio de Peritorô

OBS.: 1 ..... 26 - Ordem de execução das medições

Tabela 5 - medição, configuração e ordem de execução das medições

- 5.1.5. Os sinais de corrente foram obtidos através dos TC's existentes na SE ALUMAR.
- 5.1.6. Os sinais de tensão foram obtidos através dos TP's (indutivos) de barra da SE ALUMAR e através do DPC (capacitor padrão) nas subestações de Miranda e Peritoró.
- 5.1.7. A medição foi efetuada em uma única fase em todo o sistema.

Os principais pontos de medição no consumidor ALUMAR, estão mostrados na figura 2 e tabela 6.

Pontos de medição	Grandeza medida
01	corrente do retificador nº 05
02	corrente do retificador nº 06
03	corrente no filtro
04	tensão no 34,5 kV
05	corrente no transf. (34,5 kV)
06	corrente no transf. (230 kV)
07	corrente na LT 230 kV
08	tensão no barra de 230 kV

Tabela 6 - Pontos de medição do consumidor ALUMAR

## 5.2. Instrumentos/Equipamentos Usados

Os instrumentos/equipamentos usados nas medições foram os seguintes:

- Analisador de Espectro (HP - 3582 - A)
- Capacitor Padrão (DPC) de 200 kV (MICAFIL, tipo SC-200)
- Transformadores de corrente (TC's)
- Transformadores de Potencial (TP's)
- Registrador XY (HP - 7064A)

### 5.3. Medições

Os sinais de tensão na subestação Redução da ALUMAR foram obtidos através do transformador de potencial (indutivo), instalado na barra de 230 kV daquela SE, enquanto que nas SE's Peritoró e Miranda foram obtidos através do DPC.

Ressaltamos a importância da utilização do DPC, uma vez que a sua resposta em frequência é plana, enquanto os TP's convencionais tem suas respostas distorcidas. O TP indutivo, por exemplo, responde satisfatoriamente até 1000 Hz; o TP capacitivo (TPC) é sintonizado para a frequência fundamental (60 Hz) e fora deste ponto pode acarretar resultados falsos das medições, devido a aleatoriedade do seu ganho.

Quanto aos sinais dos TC's, não há grandes preocupações, uma vez que eles respondem satisfatoriamente até 5 kHz.

A configuração base do sistema, no instante das medições, é mostrada na figura 3. Vale a pena ressaltar que o banco de capacitores da barra de 230 kV da SE Redução, na época, estava em comissionamento e portanto indisponível para a operação.

No anexo 2 encontra-se os gráficos dos resultados das medições de campo.

#### 5.3.1. Medição de Correntes Harmônicas

As medições de correntes harmônicas foram realizadas somente na SE Redução da ALUMAR, uma vez que a fonte geradora de harmônicos encontra-se naquela SE e não existe nenhuma outra fonte significativa nas proximidades.

As tabelas de 7 a 11 mostram os resultados das medições executadas nas SE Redução.

Configuração Ordem Harmônica	6 retificadores + filtro	5 retificadores + filtro
01	93,50	96,00
05	15,50	38,50
07	1,00	4,50
11	-	1,50
15	-	1,00

Tabela 7 - Correntes no filtro harmônico, em ampères

Configuração Ordem Harmônica	6 retificadores + filtro	5 retificadores + filtro	5 retificadores - filtro
01	1216,00	1149,00	1122,00
03	-	5,50	7,50
05	-	18,50	22,00
07	-	15,00	16,50
11	-	9,00	11,00
13	-	5,50	7,50

Tabela 8 - Corrente total no secundário do transformador 250/54,5 kV , em ampères

Configuração Ordem Harmônica	6 retificadores + filtro	5 retificadores + filtro	5 retificadores - filtro	6 retificadores - filtro
01	243,00	247,00	277,00	251,00
03	1,00	2,50	3,50	3,00
05	-	3,70	7,50	
07	-	3,00	6,00	
11	-	2,00	3,00	
13	-	1,50	1,00	
35	-	-		

Tabela 9 - Corrente da LT São Luis II - Redução 230 kV, na SE Redução, em ampères

Configuração Ordem Harmônica	6 retificadores + filtro	5 retificadores + filtro
01	445,00	525,00
05	83,00	98,00
07	46,00	56,00
11	21,00	17,00
13	7,50	13,00
17	2,00	2,00
19	1,50	1,00

Tabela 10 - Corrente no retificador nº 06, em ampères

Configuração Ordem Harmônica	6 retificadores + filtro	5 retificadores + filtro
01	442,00	496,00
05	81,00	94,00
07	42,00	50,00
11	17,00	25,50
13	7,50	9,00
17	3,00	1,50
19	1,50	1,50

Tabela 11 - Corrente no retificador nº 05, em amperes

#### 5.3.2. Medição de Tensões Harmônicas

As medições de tensões harmônicas foram realizadas nas SE's Redução, Peritorô e Miranda nos barramentos de 230 kV, com a carga da ALUMAR totalizando 70 MW de retificação, executando-se várias manobras na SE Redução, de forma a alterar a injeção de correntes harmônicas no Sistema Interligado Norte/Nordeste.

As tensões harmônicas medidas nas barras dessas SE's apresentaram valores muito pequenos, a ponto de se confundirem com os níveis de ruídos existentes no sistema, e portanto não foram levadas em conta na análise detalhada dos resultados pois isso levaria a conclusões falsas.

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Dos resultados obtidos nas medições de campo dos componentes harmônicos gerados pela operação dos retificadores da ALUMAR, podemos observar que:

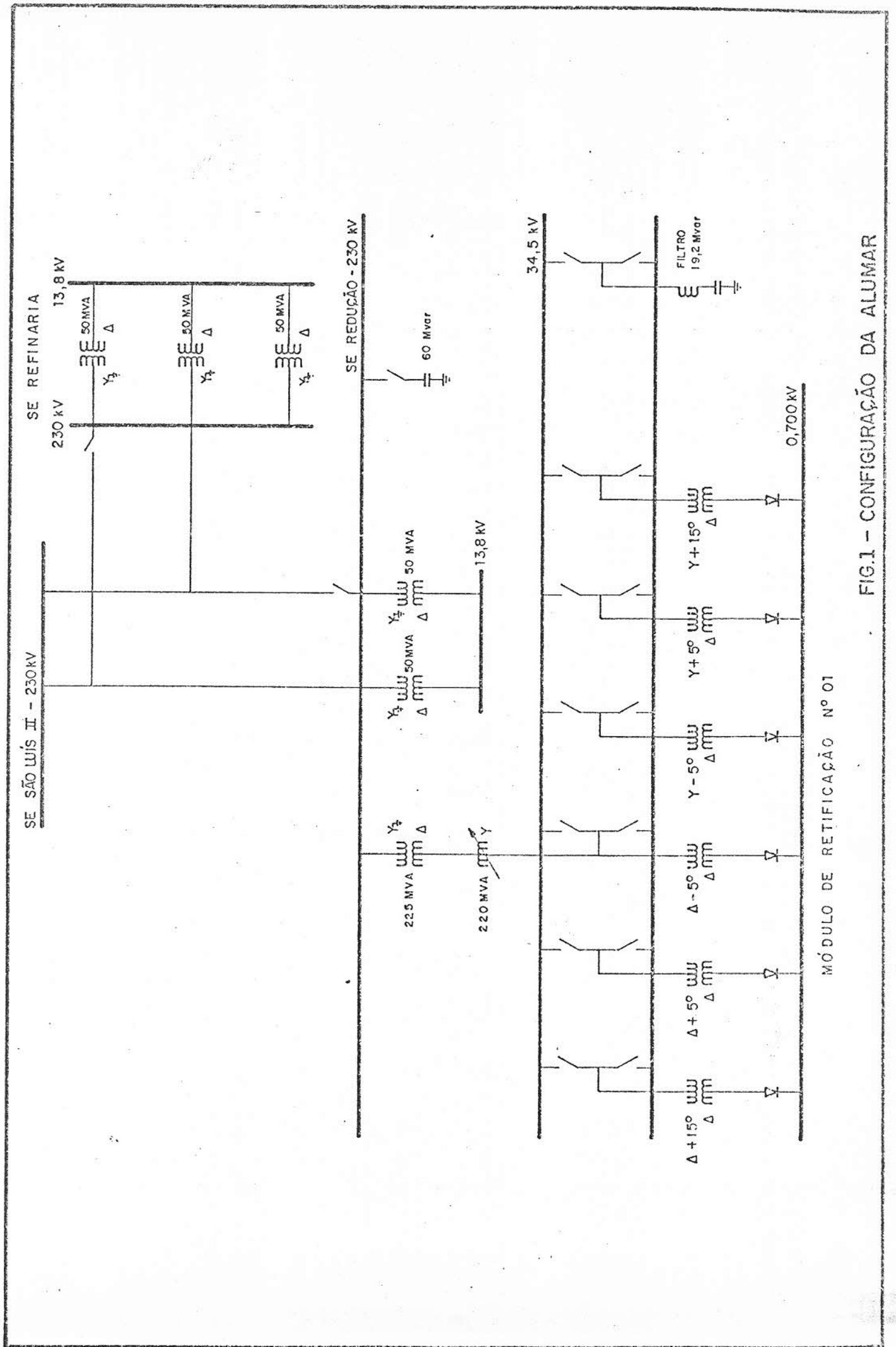
1. As diferenças das correntes harmônicas nos retificadores da ALUMAR (Retificadores n°s 05 e 06 - Anexo 2) causam o aparecimento de correntes harmônicas não-características injetadas no sistema supridor.
2. A influência do filtro é desprezível, em termos de injeção de harmônicos no sistema quando a ALUMAR opera com 6 pontes retificadoras.
3. Com a ALUMAR operando com 5 pontes retificadoras, a retirada do filtro acarreta um aumento significativo (da ordem de 100%) nas correntes de 5° e 7° harmônicos injetados no sistema.
4. As correntes harmônicas geradas pela ALUMAR quando opera com 5 pontes retificadoras, mesmo com a presença do filtro harmônico e com 70 MW de carga retificadora, ultrapassa os critérios adotados.
5. O filtro de harmônico da barra de 34,5 kV da ALUMAR não mostrou-se eficiente a ponto de absorver as correntes harmônicas geradas pelos retificadores.
6. As tensões harmônicas medidas nas SE's Redução, Peritoró e Miranda apresentaram valores muito baixos, a ponto de se confundirem com o nível de ruído existente no sistema. As barras das SE's, portanto, não apresentaram distorção harmônica.

## 7. CONCLUSÃO

1. Os níveis de tensões harmônicas nas SE's Redução, Peritorô e Miranda mantiveram-se abaixo dos limites estabelecidos, com a ALUMAR operando com 6 ou 5 pontes retificadoras com ou sem a presença do filtro de harmônicos.
2. Os critérios estabelecidos para as correntes harmônicas foram violados, quando a ALUMAR opera com 5 pontes retificadoras com ou sem a presença do filtro.

## 8. RECOMENDAÇÕES/SUGESTÕES

1. Considerando-se que os limites de correntes harmônicas foram violados mesmo com a ALUMAR com a carga de 70 MW, sugere-se que sejam feitos estudos para melhorar a filtragem desses harmônicos, uma vez que carga prevista para DEZ/84 é da ordem de 200 MW e portanto as correntes harmônicas serão maiores.
2. Recomenda-se a verificação do desempenho do banco de capacitores da barra de 230 kV da SE Redução, através de medição de corrente harmônicas, levando-se em conta que a injeção de correntes harmônicas excederam os limites e que crescerão ainda mais quando a carga atingir 200 MW.
3. Recomenda-se a realização de novas medições de harmônicos quando a ALUMAR atingir a plena carga (200 MW), incluindo medições nas SE's localizadas próximas ao consumidor ALUMAR.



MÓDULO DE RETIFICAÇÃO Nº 01

FIG.1 - CONFIGURAÇÃO DA ALUMAR

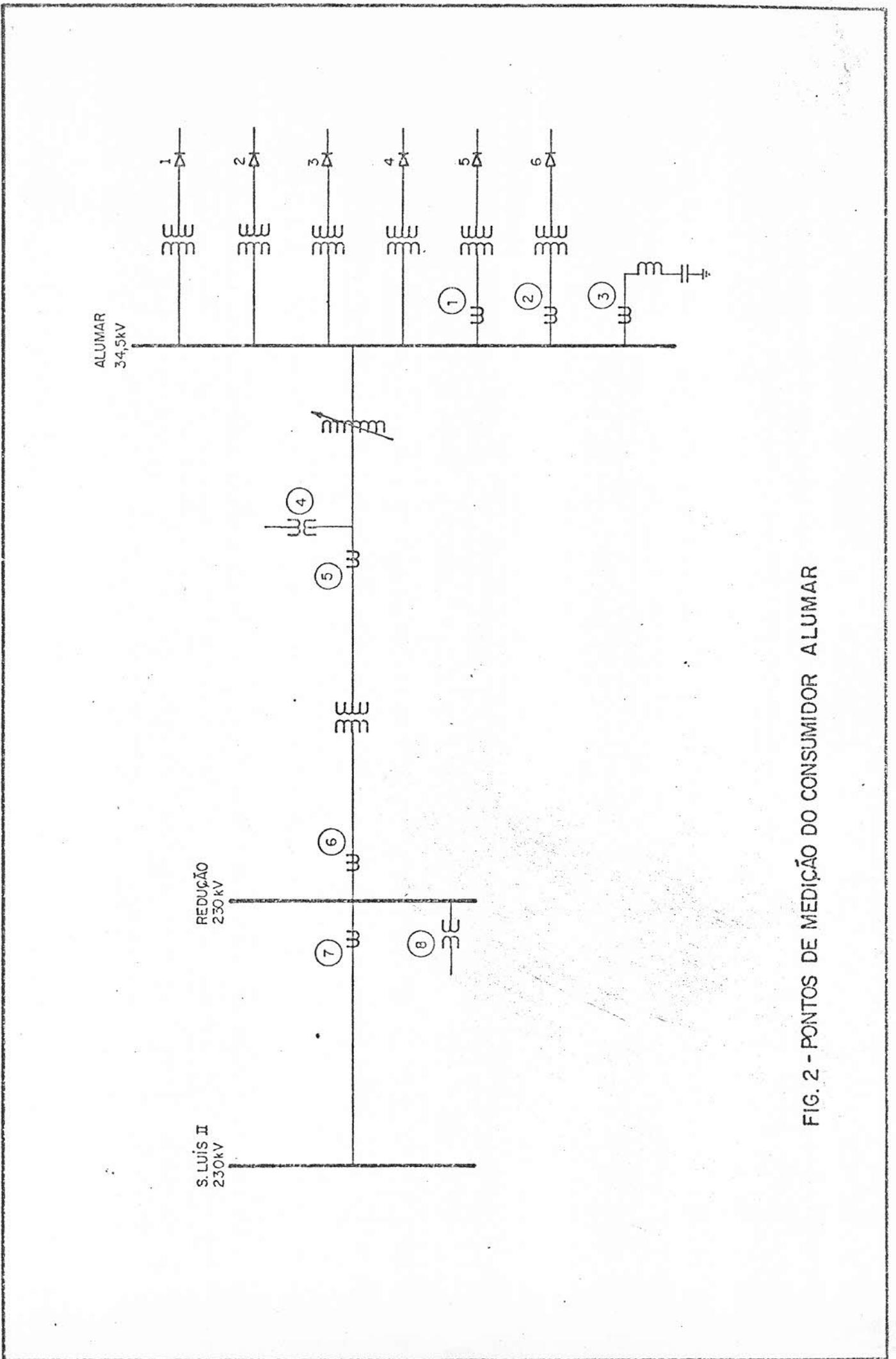


FIG. 2 - PONTOS DE MEDIÇÃO DO CONSUMIDOR ALUMAR



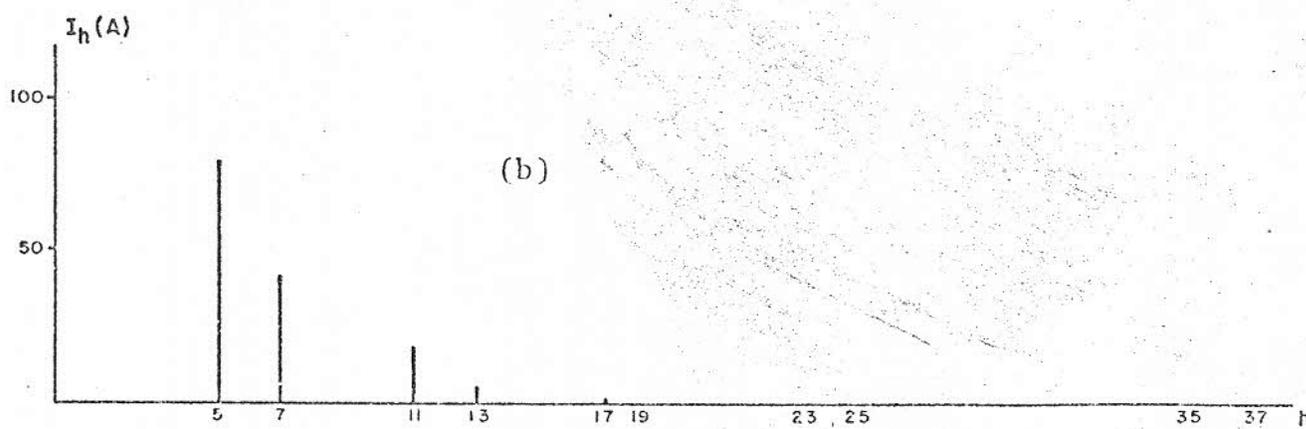
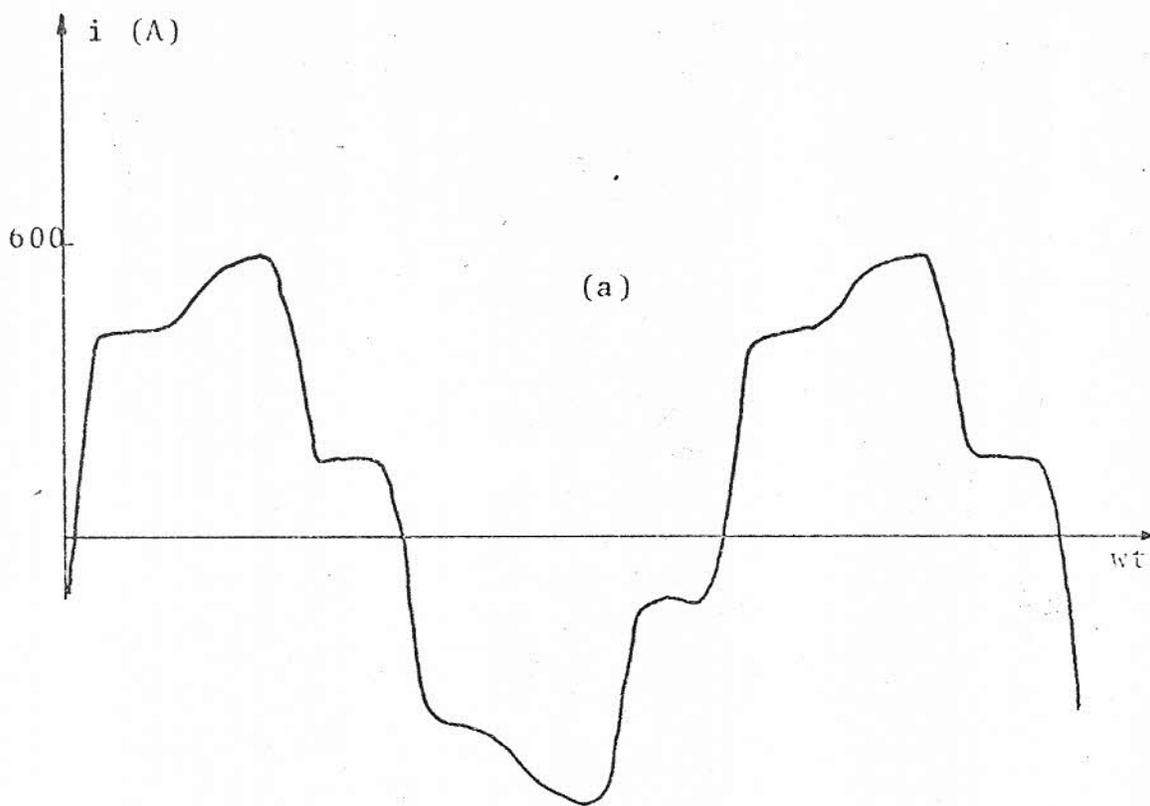


FIG. 4 - (a) Forma de onda da corrente do retificador n° 06

(b) Amplitudes dos harmônicos

Configuração: ALUMAR com 6 retificadores e o filtro

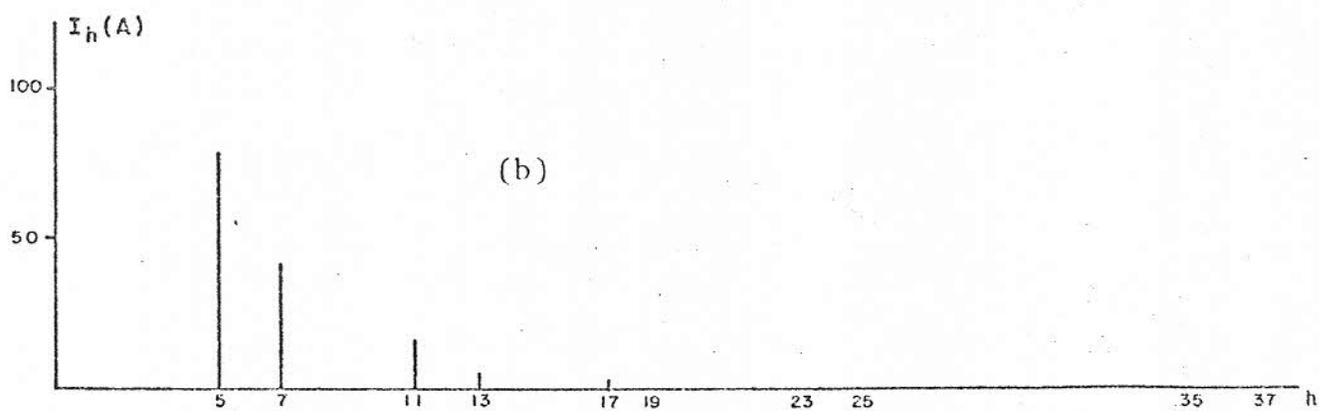
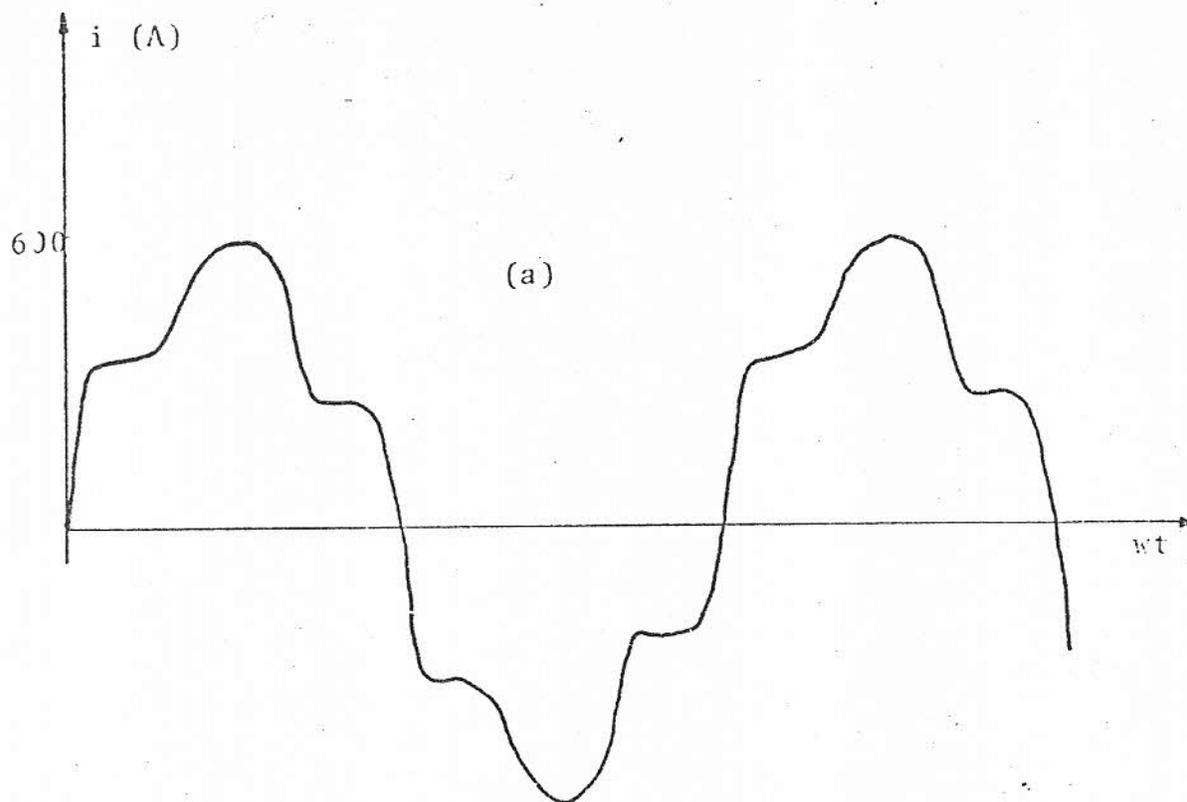


FIG. 5 - (a) Forma de onda da corrente no retificador nº 05  
 (b) Amplitudes dos harmônicos  
 Configuração: ALUMAR com 6 retificadores e o filtro

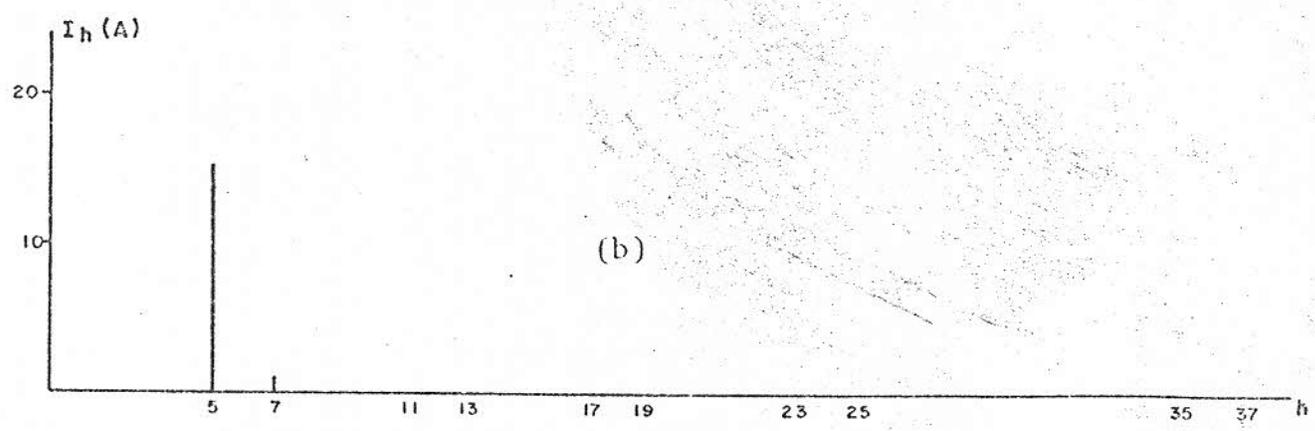
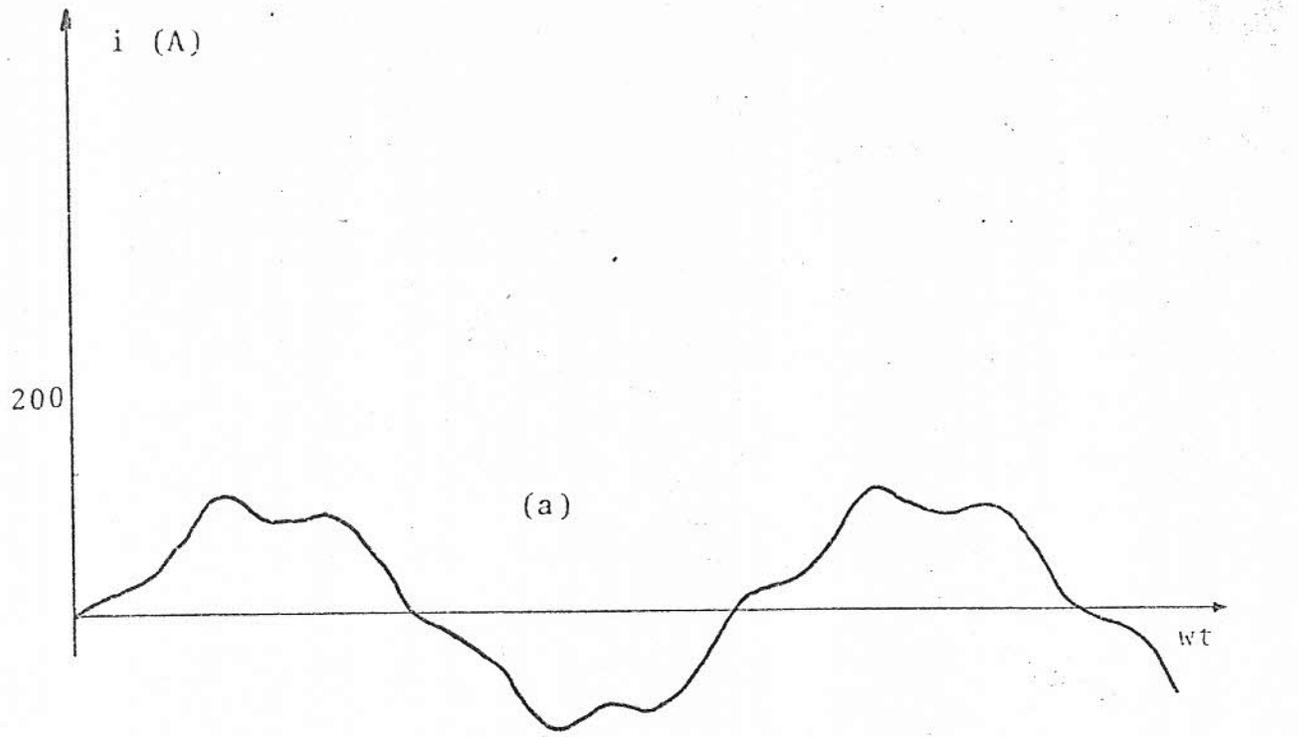


FIG. 6 - (a) Forma de onda da corrente no filtro  
 (b) Amplitudes dos harmônicos  
 Configuração: ALUMAR com 6 retificadores e o filtro

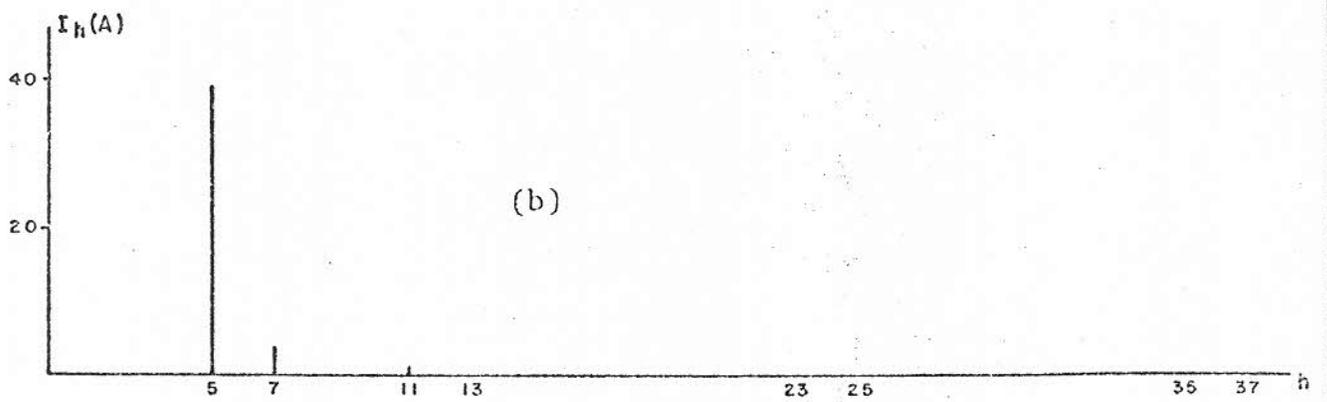
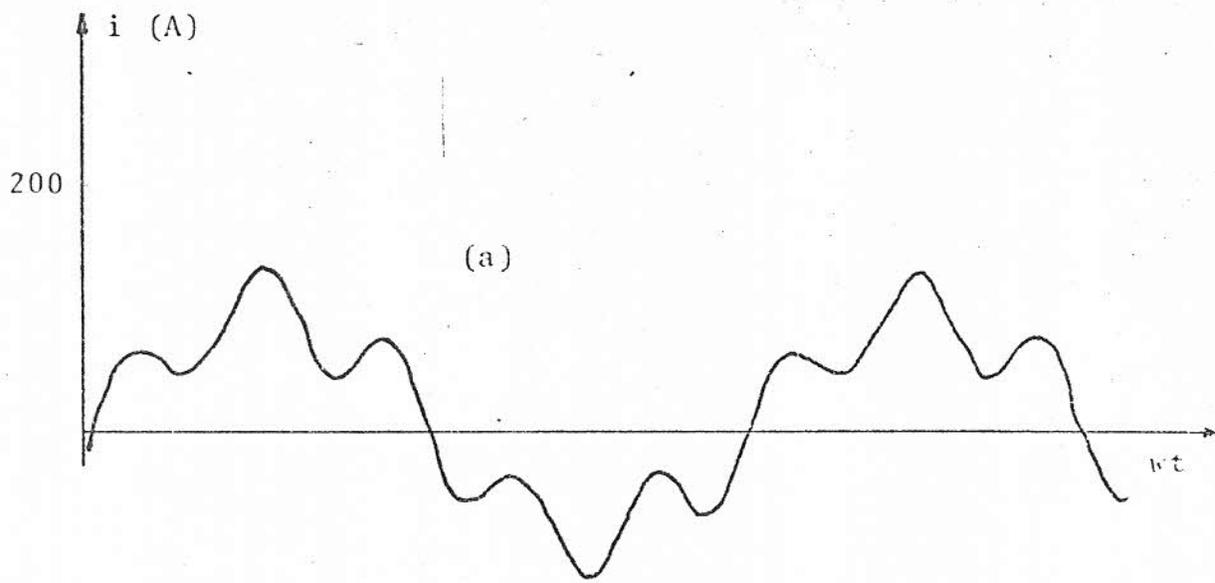


FIG. 7 - (a) Forma de onda da corrente no filtro

(b) Amplitudes dos harmônicos

Configuração: ALUMAR com 5 retificadores e o filtro

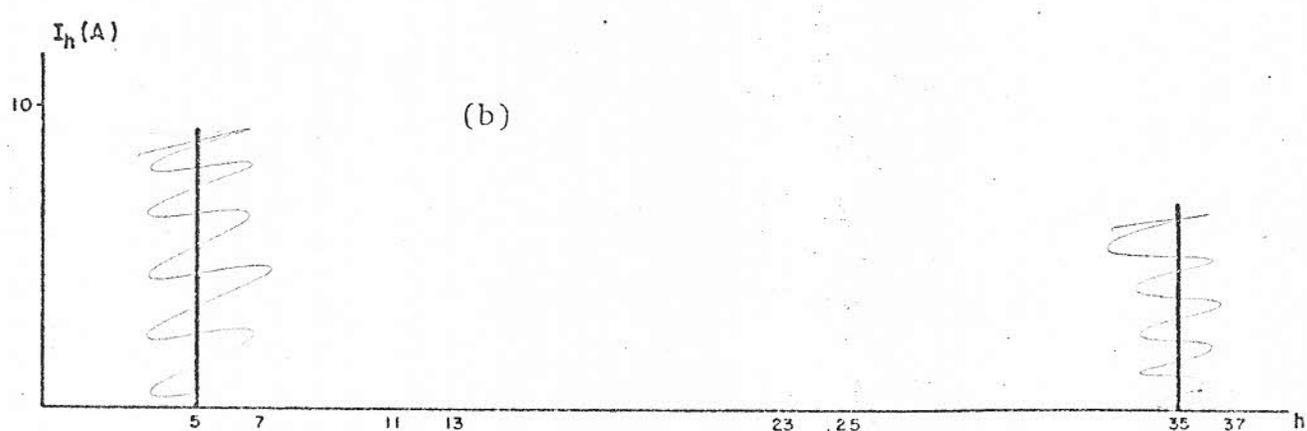
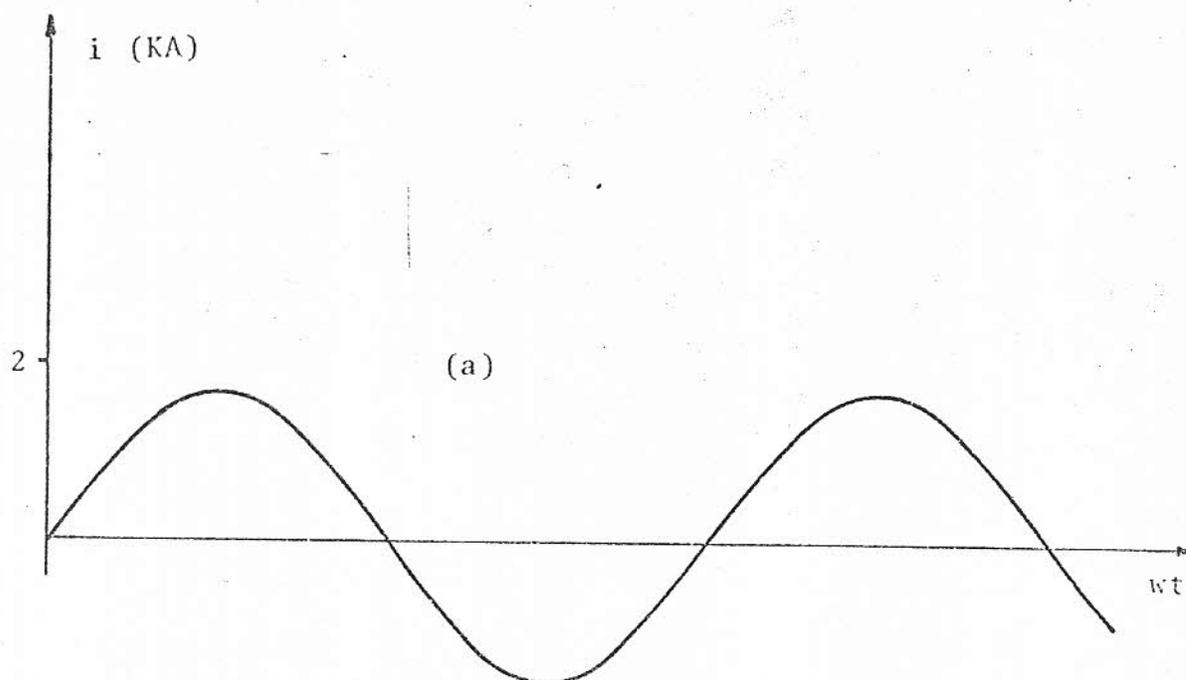


FIG. 8 - (a) Forma de onda da corrente total no barramento de 34,5 KV da SE: REDUÇÃO  
 (b) Amplitudes dos harmônicos  
 Configuração: ALIMAR com 6 retificadores e o filtro

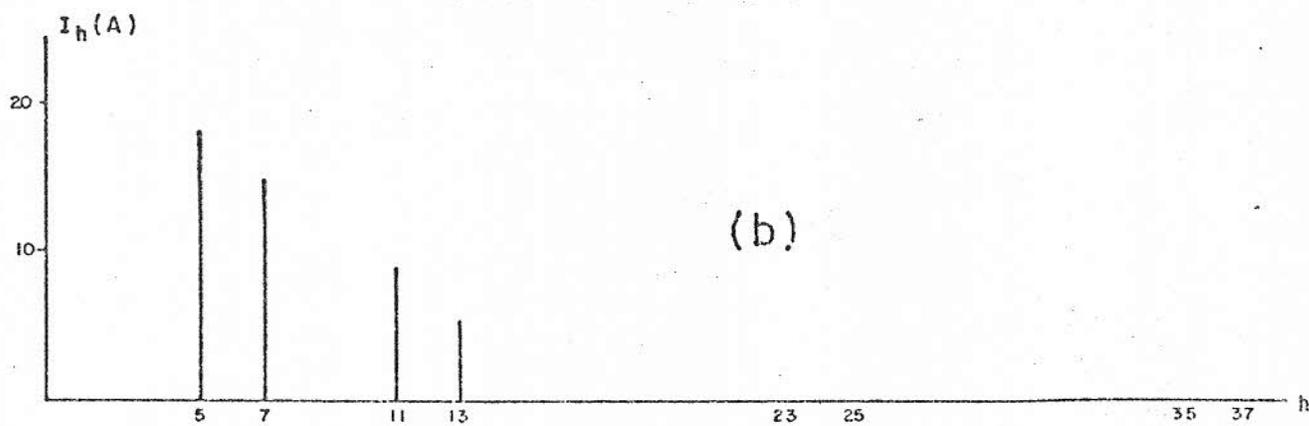
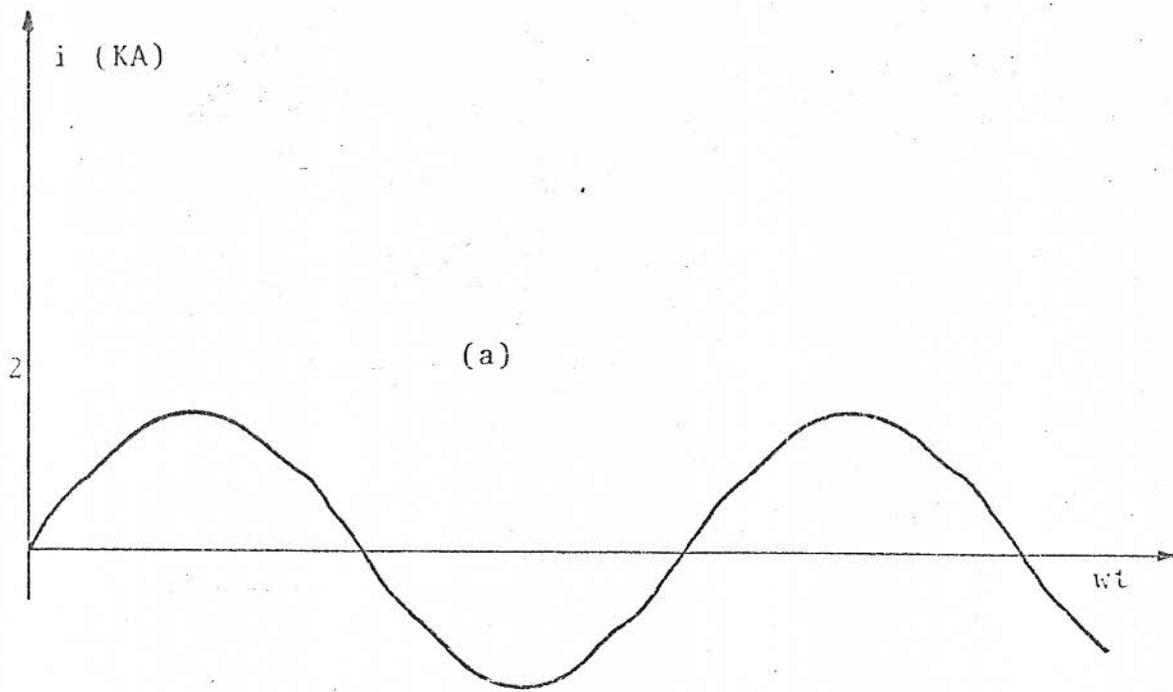


FIG. 9 - (a) Forma de onda da corrente total no barramento de 34,5 KV da SE REDUÇÃO

(b) Amplitudes dos harmônicos

Configuração: ALUMAR com 5 retificadores e o filtro

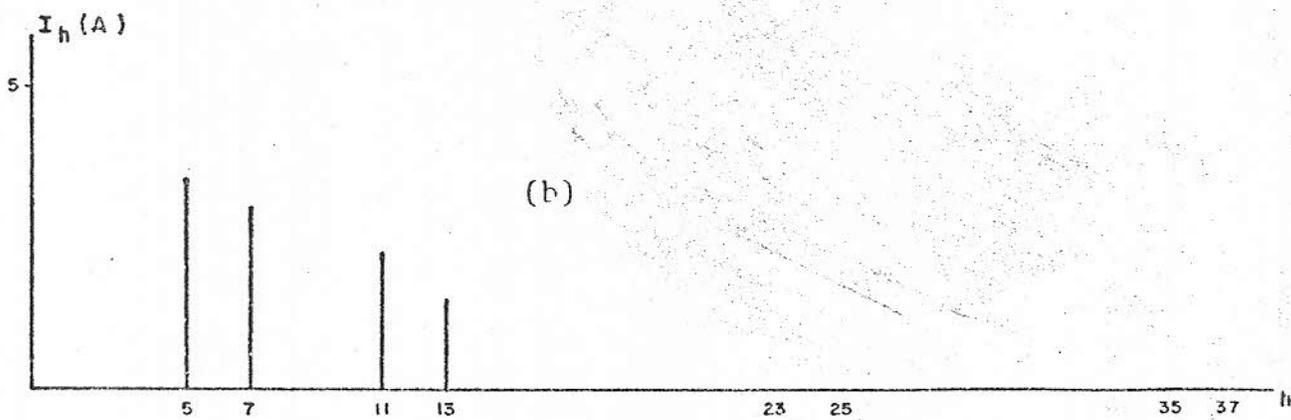
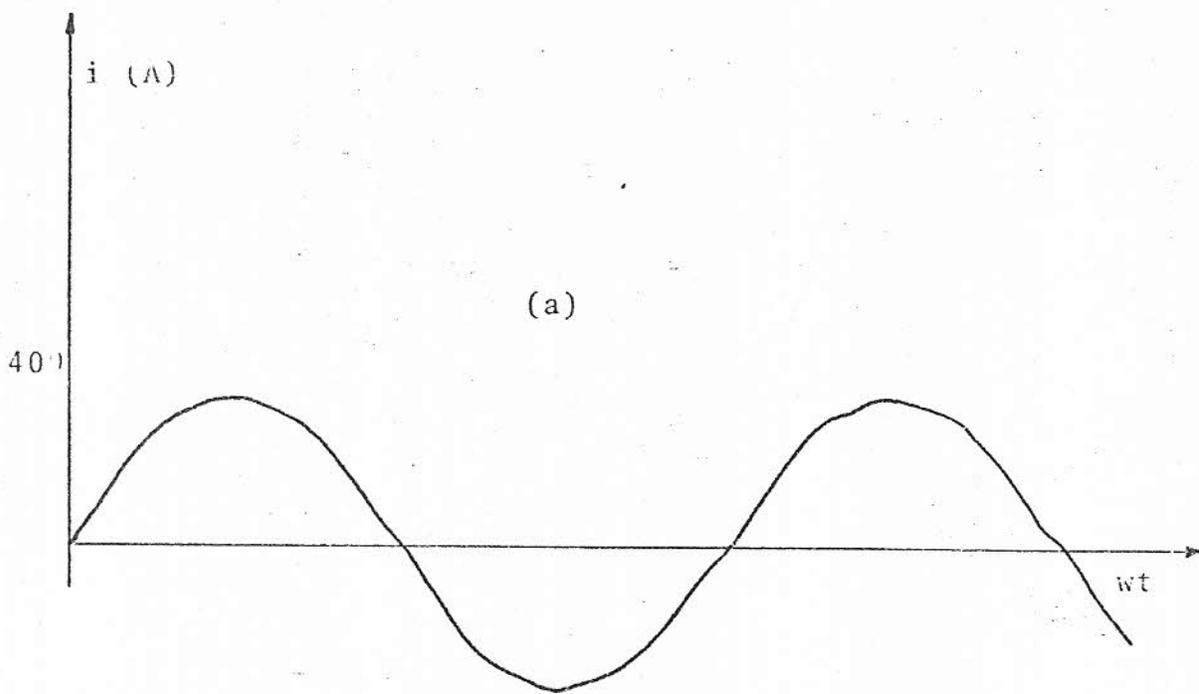


FIG. 10 - (a) Forma de onda da corrente total na LT São Luis II -  
Redução 250 KV (terminal SE Redução)

(b) Amplitudes dos harmônicos

Configuração: ALUMAR com 5 retificadores e o filtro

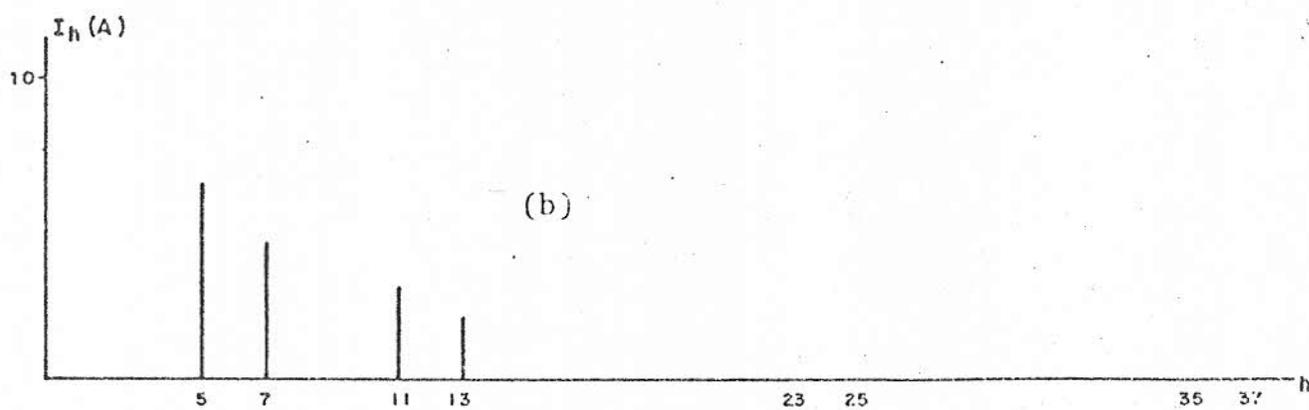
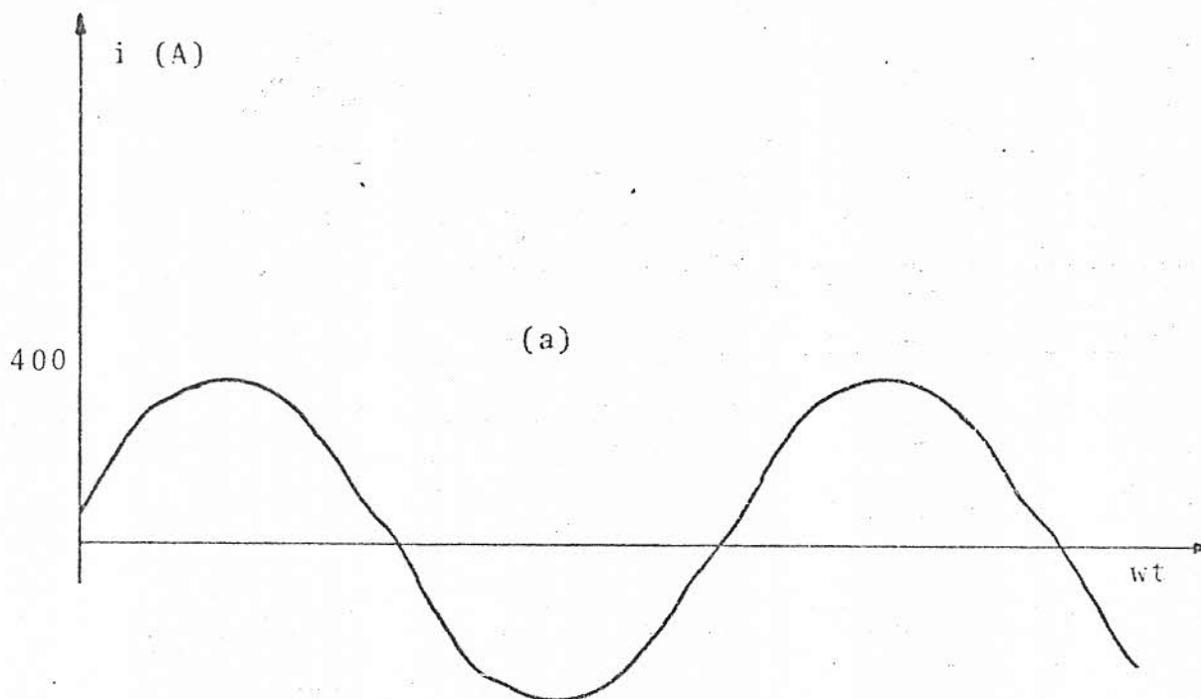


FIG. 11 - (a) Forma de onda da corrente total na LT São Luis II -  
Redução 230 KV (terminal SE Redução)

(b) Amplitudes dos harmônicos

Configuração: ALUMAR com 5 retificadores e sem o filtro

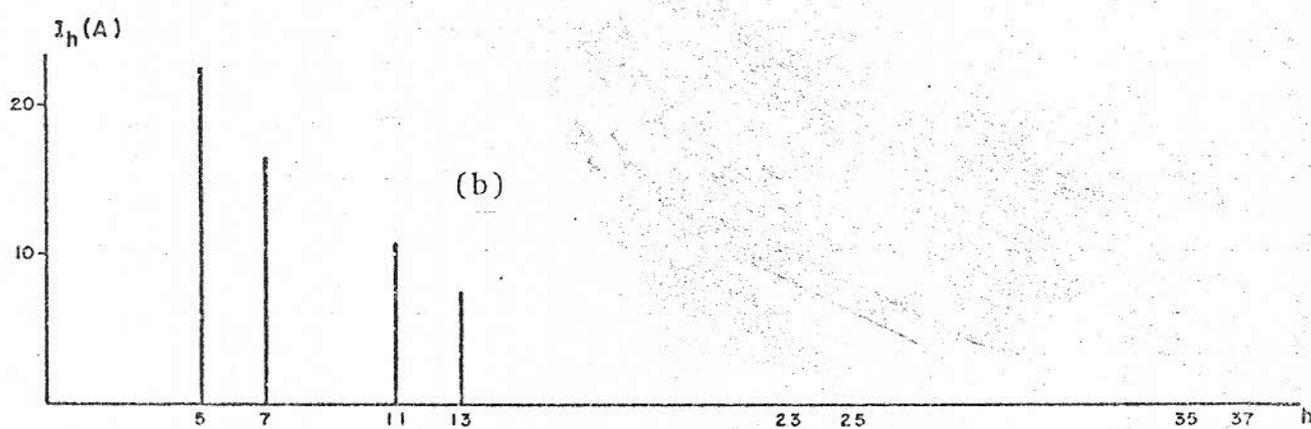
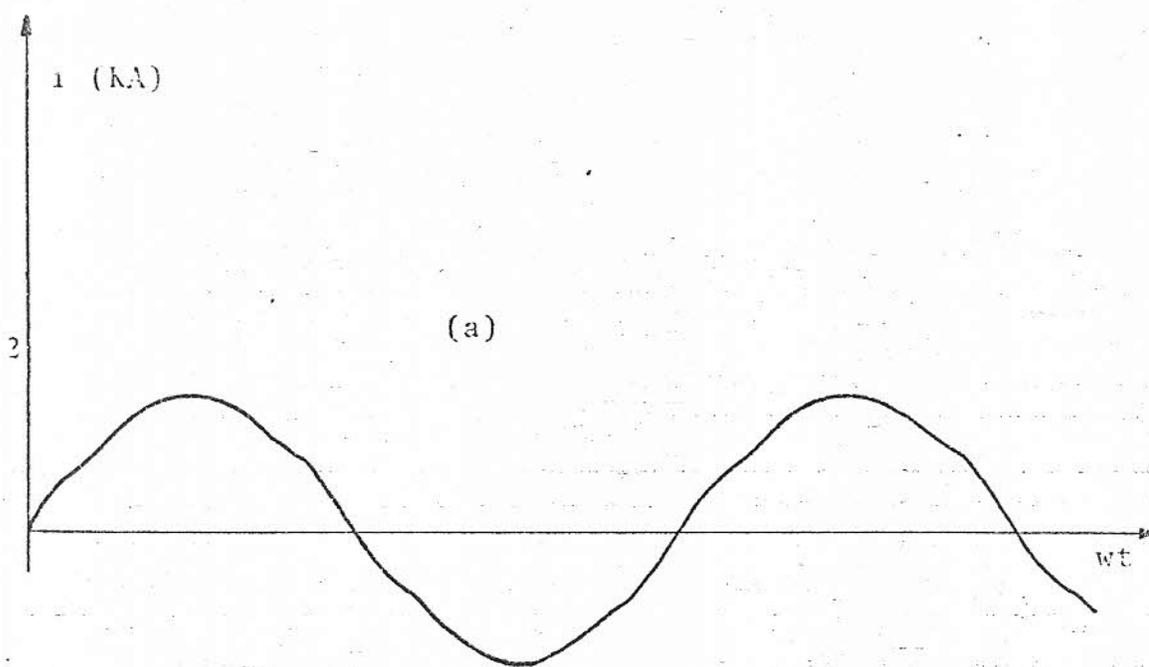


FIG. 12 - (a) Forma de onda da corrente total no barramento de 34,5 KV da SE REDUÇÃO

(b) Amplitudes dos harmônicos

Configuração: ALUMAR com 5 retificadores e sem o filtro

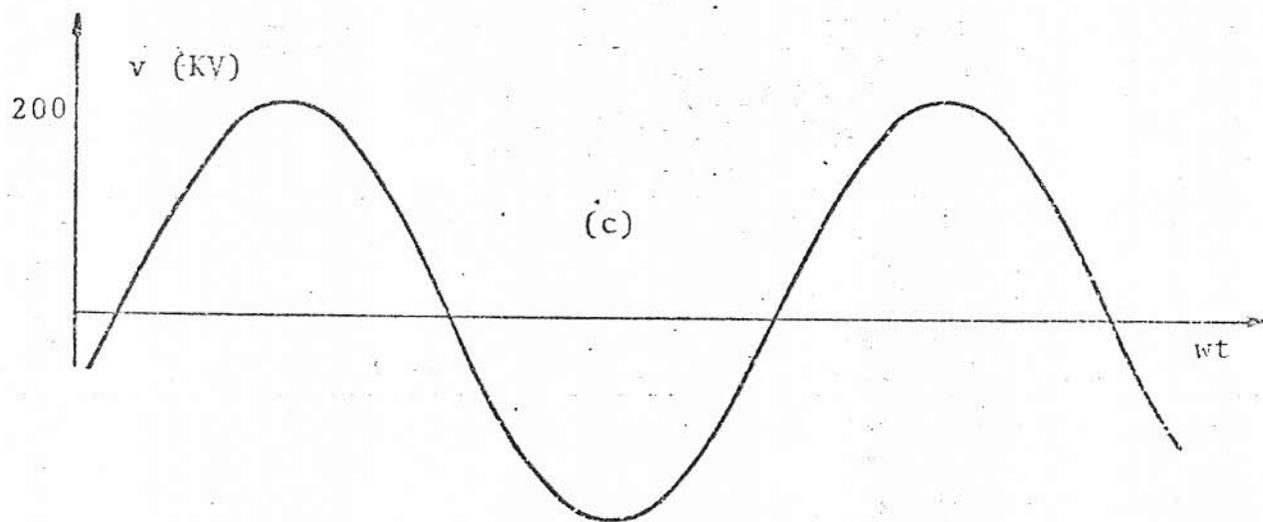
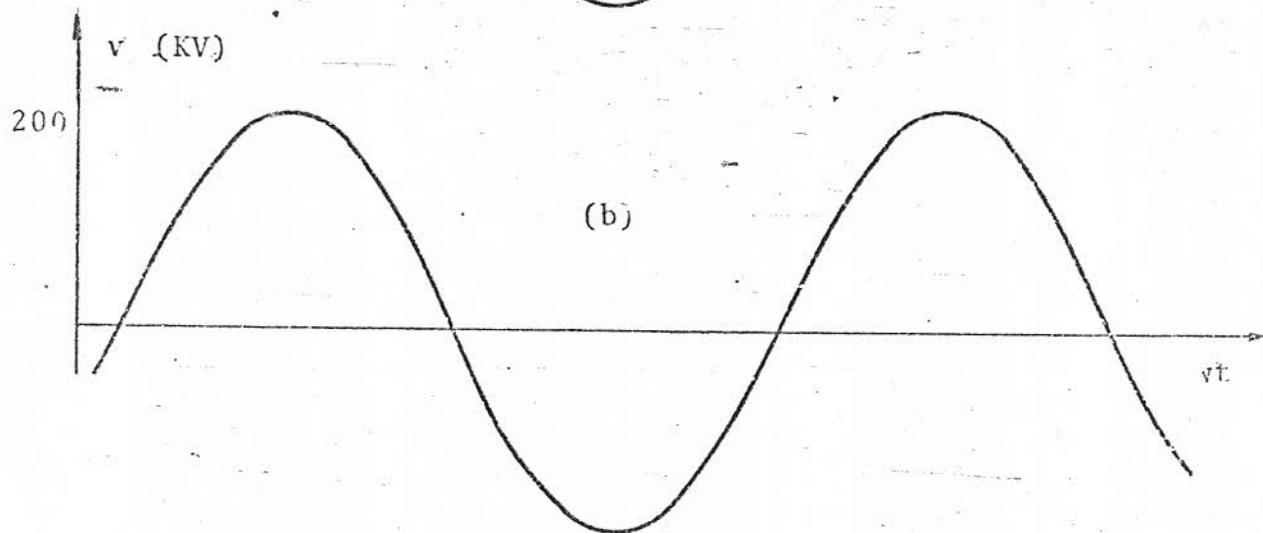
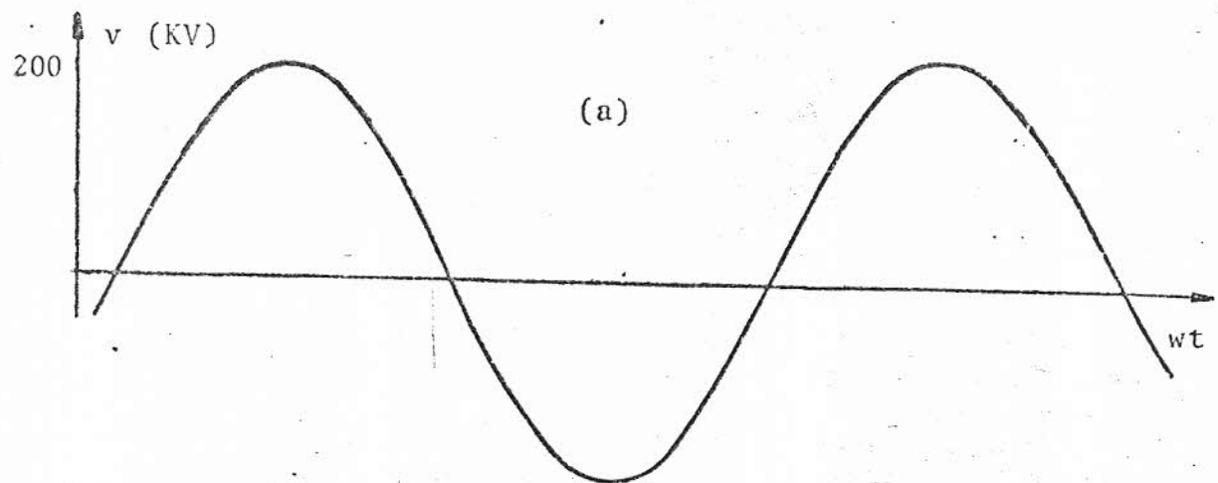


FIG. 13 - FORMAS DE ONDA DA TENSÃO NOS BARRAMENTOS DE 230KV (FASE-TERRA)

- (a) SE Redução
- (b) SE Miranda
- (c) SE Peritorô