

21. - 24/02 GIAS/NO

DO-1357

Arm 09  
Pasta 54

PRESIDÊNCIA

DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO ELÉTRICO

PARA O ENGEº EDUARDO

Cxps

CE 6

SISTEMA NORTE NORDESTE

ESTUDOS DOS HARMÔNICOS GERADOS PELOS  
RETIFICADORES DA ALCOA

PPL-RE-1.013/83

OUTUBRO/83

- SOLICITAR O PROGRAMA DE HARMÔNICOS DA CRESF
- SOLICITAR INFORMAÇÕES SOBRE MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS DA CRESF

ESTUDOS DOS HARMÔNICOS GERADOS PELOS RETIFICADORES DA ALCOA

Í N D I C E

	pag.
1. <u>INTRODUÇÃO</u> .....	01
1.1 - Objetivo .....	01
1.2 - Descrição do Sistema .....	01
2. <u>CONCLUSÕES</u> .....	02
3. <u>CRITÉRIOS ADOTADOS</u> .....	03
4. <u>METODOLOGIA</u> .....	04
4.1 - Representação das Instalações da ALCOA .....	04
4.2 - Representação do Sistema ELETRONORTE/CHESF .....	05
4.3 - Cálculo da Distorção .....	07
5. <u>RESULTADOS</u> .....	13
5.1 - Corrente Harmônicas Geradas pelos Retificadores da ALCOA .	13
5.2 - Impedâncias Equivalentes do Sistema ELETRONORTE-CHESF ....	14
6. <u>REFERÊNCIAS</u> .....	30
7. <u>EQUIPE DE TRABALHO</u> .....	31
8. <u>ANEXO - DADOS DO SISTEMA ELETRONORTE-CHESF</u> .....	32
9. <u>ANEXO - DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES GERADAS PELOS RETIFICADO</u> <u>RES DA ALCOA</u> .....	40

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 OBJETIVO

Este estudo visa determinar o nível de distorção harmônica no ponto de suprimento da ELETRONORTE, devido apenas à geração de correntes de harmônicos característicos pelos retificadores da ALCOA e caso o nível de distorção atinja valores não aceitáveis, estabelecer medidas corretivas para que os critérios adotados pela concessionária sejam atendidos.

### 1.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O complexo industrial da ALCOA ALUMÍNIO S/A, com entrada em operação prevista para meados de 1984, será implantado no distrito de Pedrinhas, na ilha de São Luís, no Estado do Maranhão. Será composto basicamente, por uma unidade de Redução com 225 MVA de capacidade instalada para retificação e 50 MVA para demais cargas e uma unidade de Refinação com capacidade de 50 MVA.

O suprimento de energia para atendimento destas cargas será feito a partir da subestação S. Luís II da ELETRONORTE.

2.

CONCLUSÕES

INFLUÊNCIA DOS  
HARMÔNICOS NA  
CARACTERÍSTICAS

- Em condições normais de operação com 6 pontes retificadoras de 6 pulsos, sem filtro, as distorções harmônicas não ultrapassam os critérios adotados pela ELETRONORTE.
- Em condições de operação com 5 pontes retificadoras de 6 pulsos, sem filtro, as distorções harmônicas ultrapassam os critérios adotados pela ELETRONORTE.
- Em condições de operação com 5 pontes retificadoras de 6 pulsos, com um filtro de 19,2 MVAR do tipo LC, sintonizado para harmônica de ordem 4,85 as distorções harmônicas são atenuadas, atendendo aos critérios adotados pela ELETRONORTE.
- \* - Os resultados apresentados neste relatório diferem dos apresentados no anterior principalmente devido a inclusão do compensador estático na SE de S. Luís II, do banco de capacitores na SE da ALCOA e do aumento da potência do filtro na SE da ALCOA.

A tabela 5.3.1 apresenta o resumo dos resultados obtidos, permitindo a visualização das conclusões acima.

*Qual o programa utilizado?*

3.

CRITÉRIOS ADOTADOS

GCOI

A ELETRONORTE estabeleceu no contrato de fornecimento com a ALCOA, no título IV, cláusula 11<sup>a</sup>, item b, como limite máximo de distorção harmônica no ponto de entrega da energia, o valor de 1,5% o qual corresponde a relação entre o valor médio quadrático da distorção harmônica da tensão e o valor médio quadrático da tensão a frequência fundamental, ou seja:

$$D = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \leq 1,5\%$$

$V_h \rightarrow$  Valor médio quadrático da distorção harmônica

$V_1 \rightarrow$  Valor médio q. da tensão a freq. fundamental

Como critério para distorção individual para harmônicas de ordem ímpar foi estabelecido que a relação entre o valor eficaz de qualquer tensão harmônica de ordem ímpar e o valor eficaz de tensão à frequência fundamental não seja superior a 1%, ou seja:

$$D_h \leq 1\%$$

4. METODOLOGIA4.1 REPRESENTAÇÃO DAS INSTALAÇÕES DA ALCOA

A representação do sistema de retificação da ALCOA foi feita considerando-se a configuração apresentada na figura 4.1

Os elementos foram representados da seguinte forma:

Retificadores - Representados por fontes de correntes harmônicas referidas ao lado primário dos transformadores retificadores, para cada uma das pontes de 6 pulsos

Banco de Capacitores - Representado por reatância capacitiva e variando inversamente com a ordem da frequência.

Filtro - Representado por reatâncias capacitiva e indutiva em série, variando proporcionalmente com a ordem da harmônica.

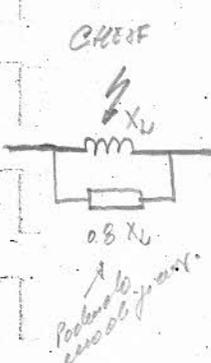
Transformador - Representado pela impedância de dispersão, variando proporcionalmente com a ordem da harmônica

Linha de Transmissão, S. Luís II - Redução 230 kV - Representada pela impedância série, com resistência constante e reatância indutiva variando proporcionalmente com a ordem da harmônica

4.1.1 Determinação das Correntes Harmônicas Geradas Pelos Retificadores da Alcoa

As correntes harmônicas injetadas em um sistema de corrente alternada, por um grupo de retificadores de 6 pulsos são de ordem  $h = 6q + 1$ , portanto os harmônicos característicos gerados pela ALCOA serão de ordem, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47 e 49. As amplitudes dessas correntes harmônicas são determinadas em função da amplitude da corrente fundamental, da ordem da harmônica e dos ângulos de disparo e de "overlap".

Visando minimizar o efeito das corrente harmônicas injetadas no



sistema da ELETRONORTE-CHESF pelas instalações da ALCOA os transformadores retificadores de cada uma das pontes possuem ligações de forma a prover o cancelamento (soma vetorial das correntes igual a zero) das correntes harmônicas no primário dos mesmos.

As ligações especificadas para cada um dos transformadores retificadores são as seguintes:  $\Delta + 15^\circ/\Delta$ ,  $\Delta + 5^\circ/\Delta$ ,  $\Delta - 5^\circ/\Delta$ ,  $Y - 5^\circ/\Delta$ ,  $Y + 5^\circ/\Delta$  e  $Y + 15^\circ/\Delta$  portanto para a condição de operação de 6 pulsos as fontes de correntes harmônicas situadas nos secundários de cada um dos transformadores retificadores refletirão nos primários correntes harmônicas com um desfasamento angular de tal forma que as mesmas se anularão vetorialmente, com exceção apenas para os harmônicos característicos de um sistema de 36 pulsos que são os de ordem 35 e 37 ( $36 \pm 1$ ). Em caso de saída de serviço de uma das pontes (5 x 6 pulsos) a soma vetorial das correntes não será mais nula, estando portanto todos os harmônicos característicos presentes no lado primário dos transformadores.

## 4.2

## REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELETRONORTE-CHESF

O sistema ELETRONORTE-CHESF foi representado para as configurações do sistema correspondentes aos anos de 1984, 1987 e 1988 apresentadas nas figuras 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 respectivamente.

Para a representação do sistema foram considerados os seguintes elementos:

*OK*  
Geradores e Compensadores Síncronos - representados pela reatância subtransitória, variando proporcionalmente com a ordem da harmônica.

*OK*  
Transformadores - Representados pela reatância de dispersão, variando proporcionalmente com a ordem da harmônica.

*OK*  
Linhas de Transmissão - Representadas pelo circuito  $\pi$  equivalente, no qual com a variação da ordem da harmônica, as resistências permanecem constantes, as reatâncias indutivas variam proporcionalmente e as reatâncias capacitivas variam inversamente.

*Devido ao elevado número de harmônicos de ordem superior.*

Reatores - Representados por uma reatância equivalente à potência nominal, variando proporcionalmente com a ordem da harmônica.

Capacitores - Representados por uma reatância capacitiva equivalente à potência nominal, variando inversamente com a ordem da harmônica.

Cargas - As de serviços auxiliares da ALCOA foram representadas com o fator de potência 0,85. As demais cargas do sistema foram representadas nos barramentos de 230kV com valores obtidos dos fluxos de potência. Todas as cargas foram modeladas por impedância constante.

A parcela ativa das cargas foi considerada variando proporcionalmente com a raiz quadrada da ordem da harmônica e a parcela reativa variando linearmente com a ordem da harmônica.

Equivalentes - O sistema de Boa Esperança até Paulo Afonso e de Tucuruí até P. Dutra foi representado por geradores equivalentes quando forneciam energia ao sistema e quando absorviam energia foram representados por cargas equivalentes.

Compensadores Estáticos - Os de Miranda e Teresina foram representados por reatâncias capacitivas equivalentes à potência reativa obtida no fluxo de carga. O compensador estático de S. Luís II foi representado por uma fonte de corrente harmônica, (gerando 7550<sup>A</sup> a 60 Hz e 5%, 2,5%, 1,0% e 0,75% da fundamental, nas harmônicas 5<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup>, 11<sup>o</sup> e 13<sup>o</sup> respectivamente) em paralelo com os filtros inerentes ao compensador (2 x 100 MVAR) sintonizados na 5<sup>o</sup> harmônica. Este compensador está ligado ao barramento de 230kV de S. Luís II por um transformador de 200MVA, 230-16-26kV, reatância 15%.

#### 4.2.1 Determinação da Impedância Equivalente do Sistema ELETRONORTE -CHESF Vista da Barra S. Luís II 230kV

Uma vez representado o sistema, utilizou-se um programa digital para cálculo da impedância equivalente da rede vista da barra São Luís II 230kV, para cada frequência característica em estudo.

Do programa do  
CHESF a carga  
não varia com  
a ordem harmônica

MAIORES  
DETA LHE S

A partir das configurações correspondentes aos anos de 1984, 1987 e 1988 foram estudados os seguintes casos:

ANO 1984

Caso 1 : considerando condições normais de operação

Caso 2 : considerando operação sem a LT entre P. Dutra e S. Luís II 500kV e com 1 térmica em S. Luís II

ANO 1987

Caso 3 : considerando condições normais de operação

Caso 4 : considerando operação sem 1 LT entre P. Dutra e S. Luís II 500 kV.

ANO 1988

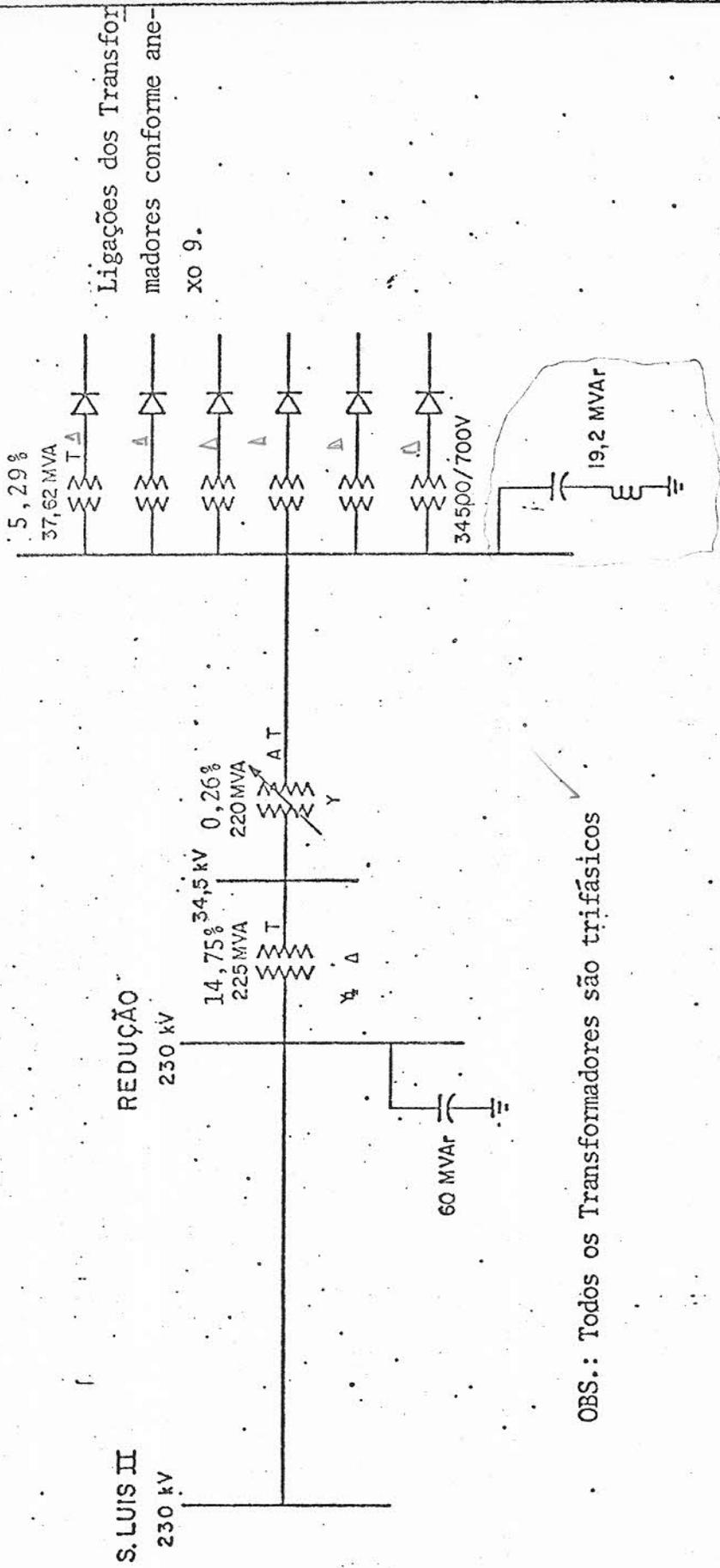
Caso 5 : considerando condições normais de operação

Caso 6 : considerando operação sem 1 LT entre Miranda e São Luís II - 500kV

4.3 CÁLCULO DA DISTORÇÃO

Para a determinação da distorção harmônica na barra de S. Luís II 230 kV, os sistemas representados de acordo com os itens 4.1 e 4.2 foram acoplados, resultando no esquema apresentado na figura 4.3.1. Obteve-se então o valor da corrente harmônica que penetra no sistema de corrente alternada, a qual por sua vez produz uma tensão harmônica ao circular pela impedância do sistema. O valor da distorção harmônica é obtido pela razão entre a tensão harmônica e a tensão nominal na barra, sendo então este valor comparado com os critérios adotados pela ELETRONORTE.

O cálculo da distorção foi feito através de um programa digital para todos os harmônicos característicos até o de ordem 49, sendo a validadas as condições de operação dos retificadores com 6 x 6 pulsos e 5 x 6 pulsos, e as configurações do sistema para os anos de 1984, 1987 e 1988.



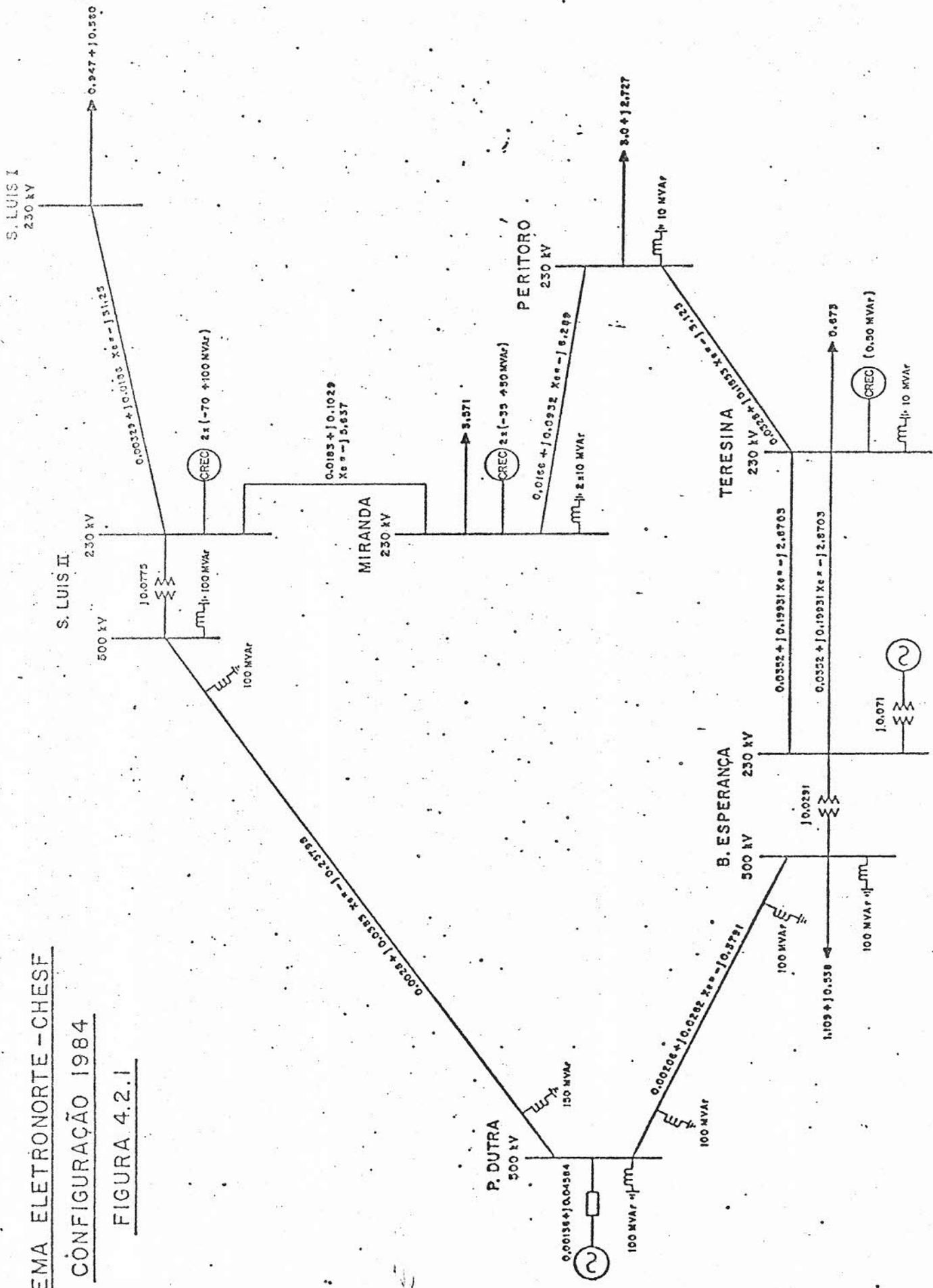
OBS.: Todos os Transformadores são trifásicos

FIGURA 4.1 - SISTEMA DE RETIFICAÇÃO DA ALCOA

SISTEMA ELETRONORTE - CHESF

CÔNFIGURAÇÃO 1984

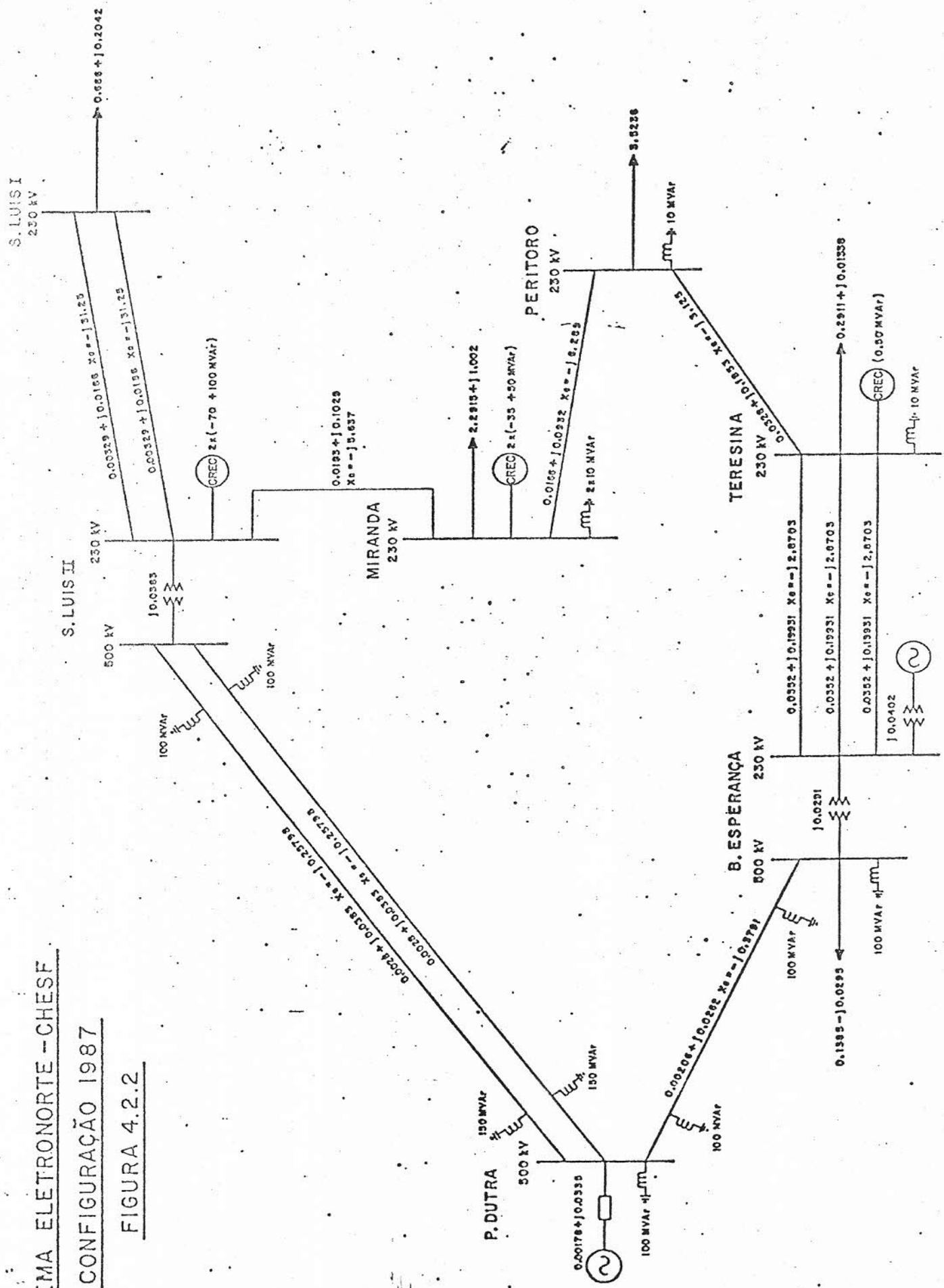
FIGURA 4.2.1



# SISTEMA ELETRONORTE - CHESF

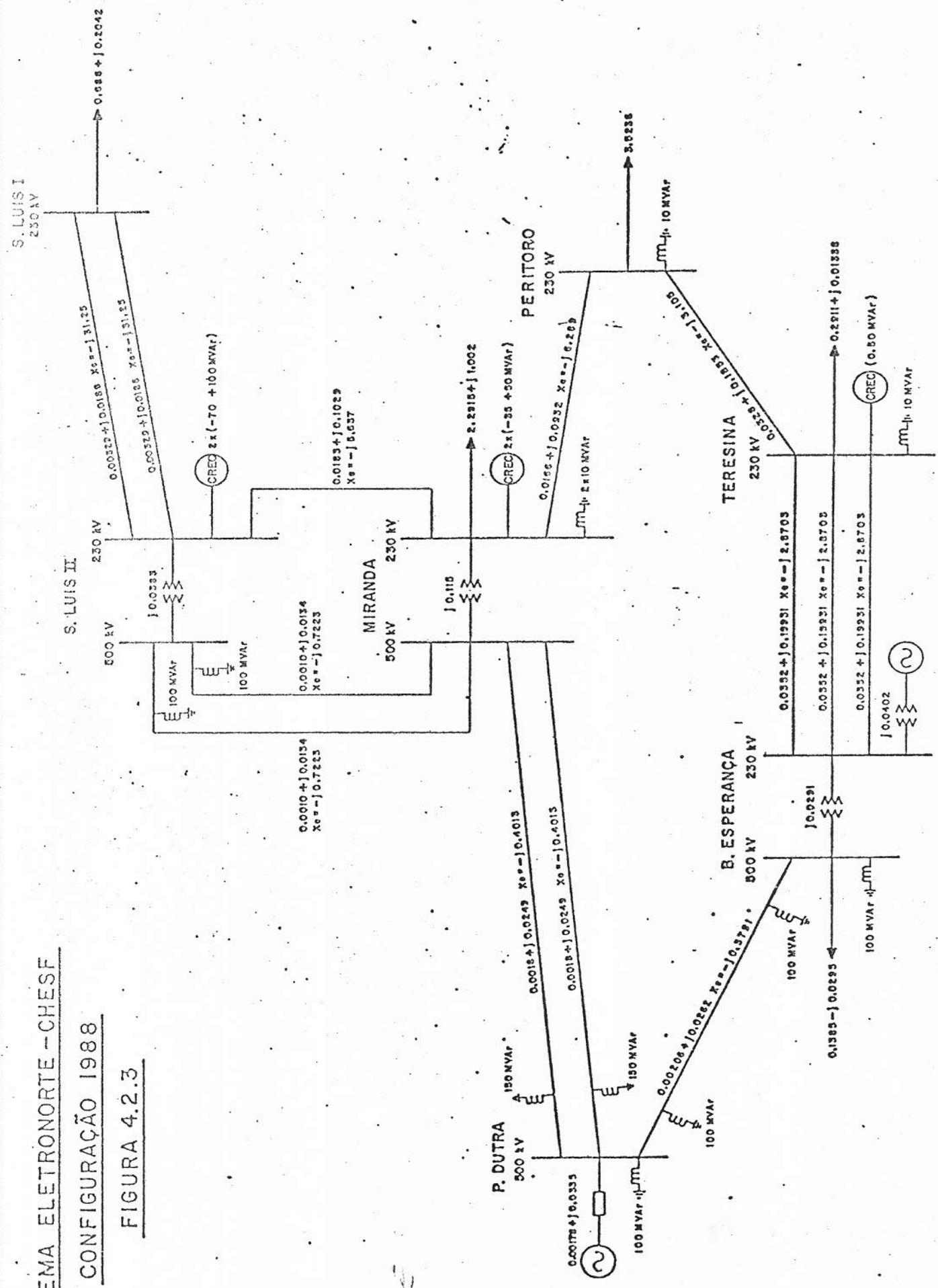
## CONFIGURAÇÃO 1987

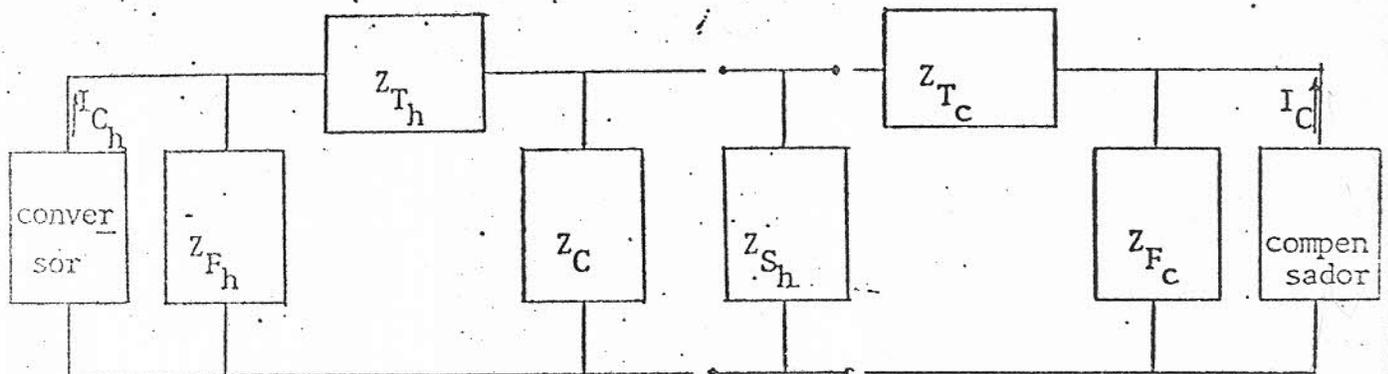
FIGURA 4.2.2



SISTEMA ELETRONORTE - CHESF  
 CONFIGURAÇÃO 1988

FIGURA 4.2.3





- $I_{Ch}$  - Corrente harmônica gerada pelo conversor, no lado primário dos transformadores retificadores
- $Z_{Fh}$  - Impedância do filtro de harmônicos, determinada para cada frequência harmônica característica
- $Z_{Th}$  - Impedância do transformador e da linha de transmissão situados entre o filtro e a barra de S. Luís II 230 kV determinada para cada frequência harmônica características.
- $Z_{Sh}$  - Impedância equivalente de sequência positiva do sistema supridor ELETRO NORTE-CHESEF, vista da barra S. Luís 230 kV, determinada para as diversas configurações do sistema e para cada frequência harmônica característica
- $Z_C$  - Impedância equivalente do banco de 60MVar instalado na barra de redução 230 kV
- $Z_{Fc}$  - Impedância do filtro de harmônicos do compensador estático, determinada para cada frequência harmônica característica
- $I_C$  - Corrente harmônica gerada pelo compensador, no lado secundário do transformador.

FIGURA 4.3.1 - SISTEMA REPRESENTADO PARA O CÁLCULO DA DISTORÇÃO

5. RESULTADOS

## 5.1 CORRENTES HARMÔNICAS GERADAS PELOS RETIFICADORES DA ALCOA

A tabela 5.1.1 apresenta os valores de correntes harmônicas geradas pelo sistema de retificação da ALCOA para as condições de operação com 6 pontes de 6 pulsos e com 5 pontes de 6 pulsos.

TABELA 5.1.1 - Correntes Harmônicas Geradas pelos Retificadores

*↓ por retificadores*

Corrente Harmônica ( $I_h$ )	Modo de Operação - Corrente em (A)	
	6 x 6 pulsos	5 x 6 pulsos
$I_1$	502,0 ✓	601,0 <del>✓</del> $f = 3020$
$I_5$	90,4	104,7 <del>✓</del>
$I_7$	58,2	65,3 ✓
$I_{11}$	26,9	27,2 ✓
$I_{13}$	18,3	17,4 ✓
$I_{17}$	8,5	8,1
$I_{19}$	6,3	6,8
$I_{23}$	4,7	5,5
$I_{25}$	4,3	4,7
$I_{29}$	3,3	3,1
$I_{31}$	2,8	2,6
$I_{35}$	2,0	2,2
$I_{37}$	1,7	2,0
$I_{41}$	1,6	1,7
$I_{43}$	1,5	1,4
$I_{47}$	1,2	1,2
$I_{49}$	1,1	1,1

$N = 22,18^\circ$        $N = 25$

## 5.2 IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DO SISTEMA ELETRONORTE-CHESEF

Os valores das impedâncias equivalentes do sistema, para as frequências harmônicas, vistas da barra de S. Luís II 230 kV são apresentadas nas tabelas 5.2.1 a 5.2.6.

Os casos 1 e 2 correspondem a configuração do ano de 1984, considerando respectivamente o sistema em condições normais de operação e durante a perda da linha P. Dutra - S. Luís-II 500kV

Os casos 3 e 4 correspondem a configuração do ano de 1987, considerando respectivamente o sistema em condições normais de operação e durante a perda de uma das linhas P. Dutra - S. Luís II 500 kV.

Os casos 7 e 8 correspondem a configuração do ano de 1988, considerando respectivamente o sistema em condições normais de operação e durante a perda de uma das linhas Miranda - S: Luís II 500 kV.

As impedâncias do sistema consideradas no cálculo da distorção harmônica são apresentadas sob forma gráfica nas figuras 5.2.1 a 5.2.6.

Analisando o comportamento do sistema quanto à variação das frequências harmônicas características, pode-se ressaltar os seguintes pontos:

- Na 1<sup>a</sup> harmônica (fundamental) o sistema é indutivo para todas as configurações estudadas (casos 1 a 8);
- Na 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> harmônicas o sistema é capacitivo para as configurações referentes aos casos 1 e 2, é indutivo para os casos 3, 4, e 5, e para o caso 6 a 5<sup>a</sup> harmônica é indutiva sendo a 7<sup>a</sup> capacitiva.
- As demais harmônicas são capacitivas para todas as configurações em estudo exceto 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> no caso 1.
- A linha P. Dutra - S. Luís II 500 kV, e o seccionamento desta em Miranda, apresentam uma grande influência nas harmônicas de ordem mais baixa.

## 5.3 DISTORÇÃO HARMÔNICA

Os valores de distorção harmônica individual e total, encontrados

para os casos estudados, são apresentados na tabela 5.3.1.

Esses valores foram comparados com os critérios de distorção especificados pela ELETRONORTE ou seja.

Máxima distorção harmônica individual permitida :  $D_h \leq 1\%$

Máxima distorção harmônica total permitida :  $D \leq 1,5\%$

Os resultados obtidos são detalhados a seguir:

Para a condição normal de operação do sistema de retificação, com 6 pontes de 6 pulsos, a distorção é causada apenas pelas correntes harmônicas de ordem 35 e 37, as quais por serem de baixa magnitude, sempre atendem aos critérios acima. Os valores encontrados, considerando a impedância equivalente do sistema que resultou em maior distorção (caso 1 do item 5.2) e com filtro de harmônicos sintonizado na 4,85 foram:

- Distorção harmônica individual :  $D_{35} = 0,013\%$  ,  $D_{37} = 0,010\%$
- Distorção harmônica total :  $D = 0,016\%$

Para a condição de operação com uma ponte fora de serviço ( 5 x 6 pulsos), com a impedância do sistema do caso 1 do item 5.2 e sem o filtro de harmônicos, os valores de distorção violaram os critérios adotados, para a 5ª harmônica e a distorção total, resultando em:

- Distorção harmônica individual :  $D_5 = 4,374\%$
- Distorção harmônica total :  $D = 4,383\%$

Como medida corretiva para situar a distorção dentro dos critérios estabelecidos, foi considerado um filtro harmônico de 19,2 MVar, tipo LC, ligado ao barramento de 34,5 kV da SE Redução, sintonizado de forma a "atrair" a maior parte da corrente de 5ª harmônica que penetrava no sistema de corrente alternada. Os valores encontrados, considerando a mesma impedância do sistema do caso anterior, atenderam aos critérios, resultando em,

- Distorção harmônica individual :  $D_5 = 0,302\%$

Os casos estudados para as demais configurações do sistema supridor, considerando a operação com 5 pontes de 6 pulsos e o filtro

de harmônicos, apresentam valores de distorção que obedecem aos critérios adotados pela ELETRONORTE conforme comprova a tabela 5.3.1.

TABELA 5.2.1  
CASO 1 - ANO 1984  
CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO

FREQUENCIA (Hz)	HARM.	IMPEDANCIA EQUIVALENTE	MODULO	ANG.
60.00	1.0	.20200E-01	.792222E-01	.81757E-01
300.00	5.0	.20909E+00	-.33023E+00	.39036E+00
420.00	7.0	.91729E-01	-.54195E-01	.10554E+00
650.00	11.0	.28250E-03	.39966E-01	.39907E-01
780.00	13.0	.12967E-02	.10973E+00	.10979E+00
1020.00	17.0	.30524E-01	-.66366E+00	.66+57E+00
1140.00	19.0	.27985E-02	-.21510E+00	.21512E+00
1330.00	23.0	.53073E-03	-.10377E+00	.10377E+00
1500.00	27.0	.32925E-03	-.84809E-01	.84809E-01
1740.00	29.0	.16760E-03	-.63489E-01	.63489E-01
1860.00	31.0	.13098E-03	-.55755E-01	.56755E-01
2100.00	35.0	.91205E-04	-.47103E-01	.47103E-01
2220.00	37.0	.80605E-04	-.43481E-01	.43431E-01
2460.00	41.0	.70334E-04	-.37711E-01	.37711E-01
2580.00	43.0	.69690E-04	-.35342E-01	.35343E-01
2620.00	47.0	.70992E-04	-.31266E-01	.31267E-01
2940.00	49.0	.92216E-04	-.29434E-01	.29434E-01

Observação : Valores em pu na base 100 MVA tensão 230 kV

TABELA 5.2.2.  
 CASO 2 - ANO 1984  
 OPERAÇÃO SEM A LT P.DUTRA-S.LUÍS II 500KV

FREQUENCIA (H)	HARM.	IMPEDANCIA EQUIVALENTE	MODULO	ANG.
60.00	1.0	.70569E-01	.16944E+00	67.57
300.00	5.0	.81376E+00	.89538E+00	47.73
420.00	7.0	.36356E-01	-.33691E+00	-84.63
660.00	11.0	.29914E-02	-.15613E+00	-88.70
780.00	13.0	.14778E-02	-.12344E+00	-89.51
1020.00	17.0	.53730E-03	-.88476E-01	-89.65
1140.00	19.0	.36410E-03	-.77789E-01	-89.73
1380.00	23.0	.19428E-03	-.62835E-01	-89.82
1500.00	25.0	.15049E-03	-.57366E-01	-89.85
1740.00	29.0	.99297E-04	-.48879E-01	-89.88
1860.00	31.0	.84188E-04	-.45508E-01	-89.89
2100.00	35.0	.65645E-04	-.39964E-01	-89.92
2220.00	37.0	.60417E-04	-.37646E-01	-89.91
2460.00	41.0	.56055E-04	-.33667E-01	-89.90
2580.00	43.0	.56832E-04	-.31929E-01	-89.90
2820.00	47.0	.66977E-04	-.28791E-01	-89.87
2940.00	49.0	.79435E-04	-.27318E-01	-89.85

Observação : Valores em pu na base 100 MVA, tensão 230 kv

TABELA 5.2.3.  
CASO 3 - ANO 1987  
CONDICÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO

FREQUENCIA (Hz)	HARM.	IMPEDANCIA EQUIVALENTE	MODULO	ANG.
60.00	1.0	.26113E-01	.73918E-01	71.54
300.00	5.0	.13224E+00	.14176E+00	46.99
420.00	7.0	.21468E+00	.53400E+00	68.12
660.00	11.0	.14194E-01	-.22290E+00	-86.35
780.00	13.0	.54659E-02	-.15097E+00	-87.93
1020.00	17.0	.17163E-02	-.95974E-01	-88.98
1140.00	19.0	.11418E-02	-.82000E-01	-89.20
1380.00	23.0	.60897E-03	-.63993E-01	-89.45
1500.00	25.0	.47537E-03	-.57776E-01	-89.53
1740.00	29.0	.32197E-03	-.48440E-01	-89.62
1860.00	31.0	.27687E-03	-.44821E-01	-89.65
2100.00	35.0	.22194E-03	-.38951E-01	-89.67
2220.00	37.0	.20576E-03	-.36519E-01	-89.68
2460.00	41.0	.19519E-03	-.32349E-01	-89.69
2580.00	43.0	.19872E-03	-.30519E-01	-89.63
2820.00	47.0	.23161E-03	-.27164E-01	-89.51
2940.00	49.0	.26983E-03	-.25547E-01	-89.39

Observação : Valores em pu na base 100 MVA, tensão 230 kV

TABELA 5.2.4.

CASO 4 - ANO 1987

OPERAÇÃO SEM I LT P.DUTRA-S.LUÍS II 500kV

FREQUENCIA (Hz)	HARM.	IMPEDANCIA EQUIVALENTE	MODULO	ANG.
60.00	1.0	.32997E-01	.85567E-01	.91709E-01
300.00	5.0	.15196E+00	.37212E-01	.15645E+00
420.00	7.0	.12992E+00	.26556E+00	.29554E+00
600.00	11.0	.15446E-01	-.23239E+00	.23290E+00
780.00	13.0	.55353E-02	-.15329E+00	.15339E+00
1020.00	17.0	.17299E-02	-.95349E-01	.96364E-01
1140.00	19.0	.11471E-02	-.82190E-01	.82193E-01
1330.00	23.0	.51148E-03	-.64156E-01	.54353E-01
1500.00	25.0	.47653E-03	-.57815E-01	.57317E-01
1740.00	29.0	.32220E-03	-.43459E-01	.48459E-01
1850.00	31.0	.27702E-03	-.44333E-01	.44334E-01
2100.00	35.0	.22201E-03	-.38958E-01	.33958E-01
2220.00	37.0	.20651E-03	-.35524E-01	.35524E-01
2450.00	41.0	.19521E-03	-.32352E-01	.32352E-01
2550.00	43.0	.19875E-03	-.30521E-01	.30522E-01
2920.00	47.0	.23153E-03	-.27166E-01	.27167E-01
2940.00	49.0	.26985E-03	-.25546E-01	.25548E-01

Observação : Valores em pu na base 100 MVA, tensão 230 kV

TABELA 5.2.5

CASO 5 - ANO 1988

## CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO

FREQUENCIA (Hz)	HARM.	IMPEDANCIA EQUIVALENTE	MODULO	ANG.
60.00	1.0	.24145E-01	.71557E-01	71.36
300.00	5.0	.43239E-01	.16472E+00	75.29
420.00	7.0	.10067E+01	.27692E-01	1.58
660.00	11.0	.11145E-01	-.19238E+00	-86.68
780.00	13.0	.42810E-01	.17978E-01	22.76
1020.00	17.0	.17815E-02	-.97526E-01	-88.95
1140.00	19.0	.11612E-02	-.82621E-01	-89.19
1380.00	23.0	.61232E-03	-.64156E-01	-89.45
1500.00	25.0	.47756E-03	-.57872E-01	-89.53
1740.00	29.0	.32251E-03	-.48479E-01	-89.62
1860.00	31.0	.27721E-03	-.44848E-01	-89.65
2100.00	35.0	.22209E-03	-.38964E-01	-89.67
2220.00	37.0	.20687E-03	-.36528E-01	-89.68
2460.00	41.0	.19524E-03	-.32354E-01	-89.65
2580.00	43.0	.19877E-03	-.30523E-01	-89.63
2820.00	47.0	.23165E-03	-.27167E-01	-89.51
2940.00	49.0	.26987E-03	-.25547E-01	-89.39

Observação : Valores em pu na base 100 MVA, tensão 230 kV

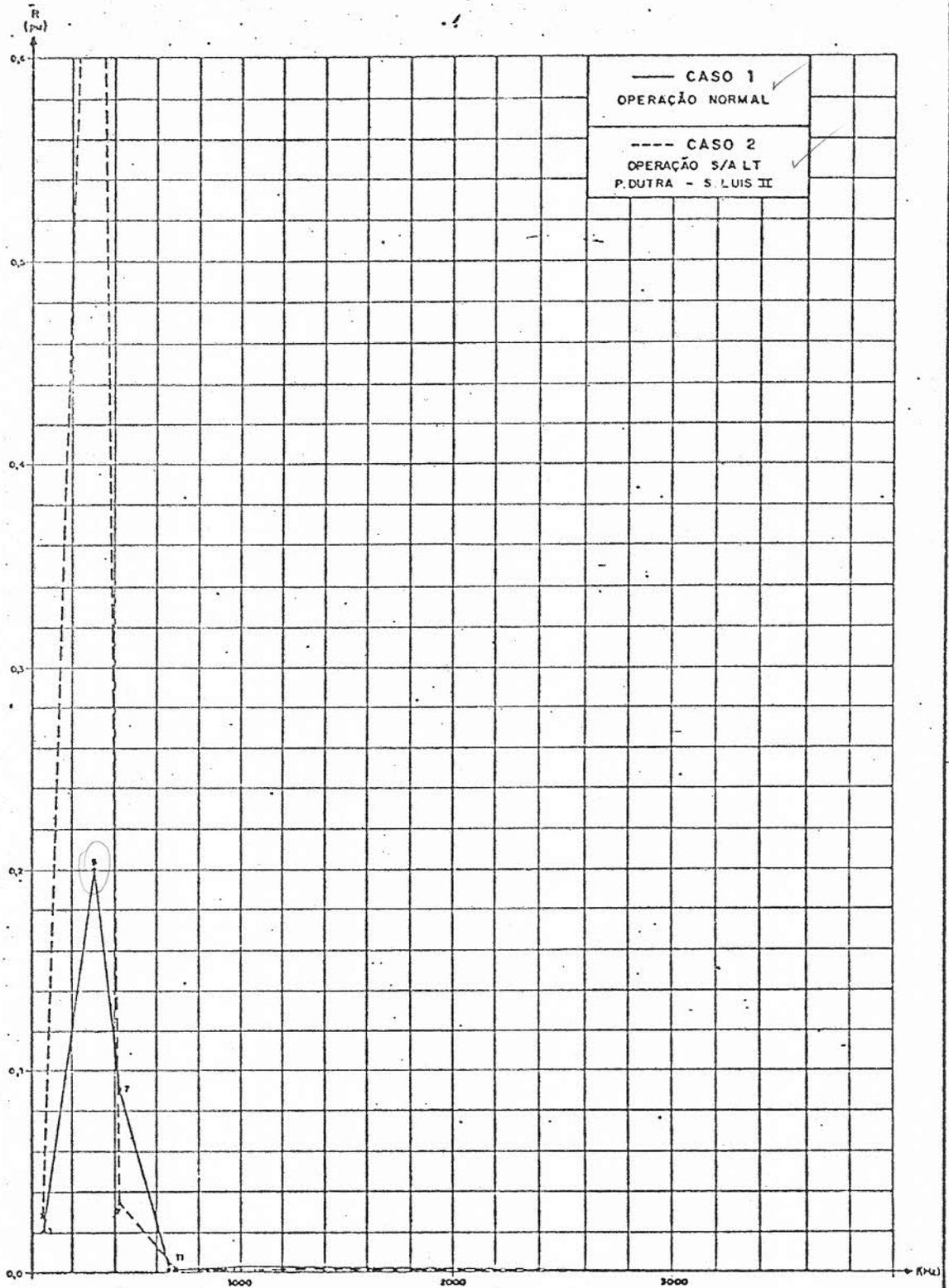
## TABELA 5.2.6

CASO 6 - ANO 1988

OPERAÇÃO SEM 1 LT MIRANDA-S.LUÍS II 500KV

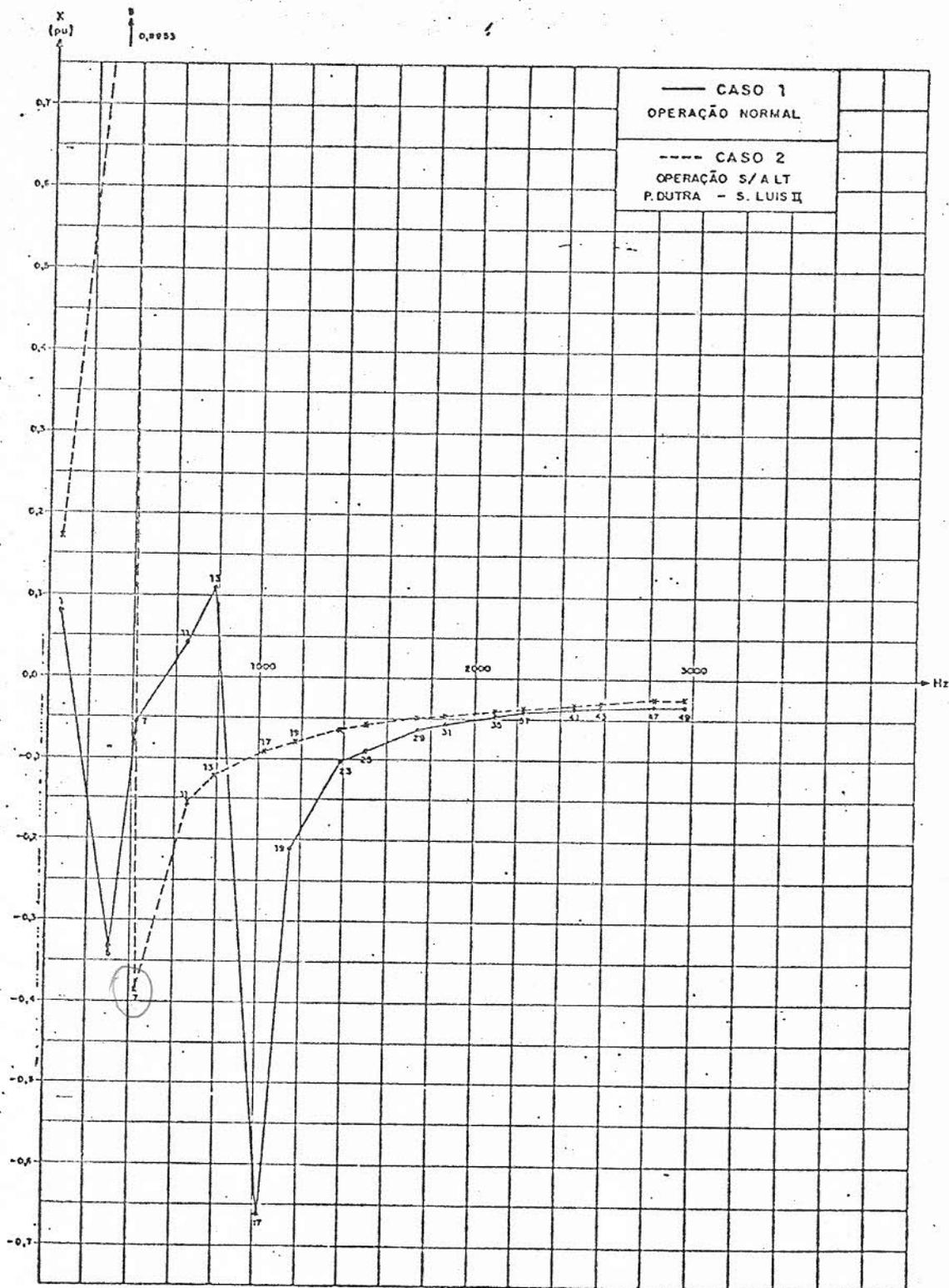
FREQUENCIA (Hz)	HARM.	IMPEDANCIA EQUIVALENTE	MODULO	ANG.
60.00	1.0	.25404E-01	.74582E-01	71.19
300.00	5.0	.57609E-01	.18747E+00	72.92
420.00	7.0	.64432E+00	-.50968E+00	-34.35
660.00	11.0	.87310E-02	-.16595E+00	-84.99
780.00	13.0	.11673E-01	-.46326E-02	-21.65
1020.00	17.0	.18773E-02	-.99845E-01	-84.92
1140.00	19.0	.11894E-02	-.83542E-01	-89.18
1380.00	23.0	.61723E-03	-.64400E-01	-84.45
1500.00	25.0	.48005E-03	-.58016E-01	-80.53
1740.00	29.0	.32332E-03	-.48538E-01	-84.62
1860.00	31.0	.27772E-03	-.44888E-01	-84.65
2100.00	35.0	.22233E-03	-.38985E-01	-89.67
2220.00	37.0	.20704E-03	-.36543E-01	-89.68
2460.00	41.0	.19534E-03	-.32363E-01	-89.65
2580.00	43.0	.19886E-03	-.30530E-01	-87.63
2820.00	47.0	.23172E-03	-.27171E-01	-84.51
2940.00	49.0	.26993E-03	-.25550E-01	-84.39

Observação: Valores em pu na base 100 MVA, tensão 230 KV



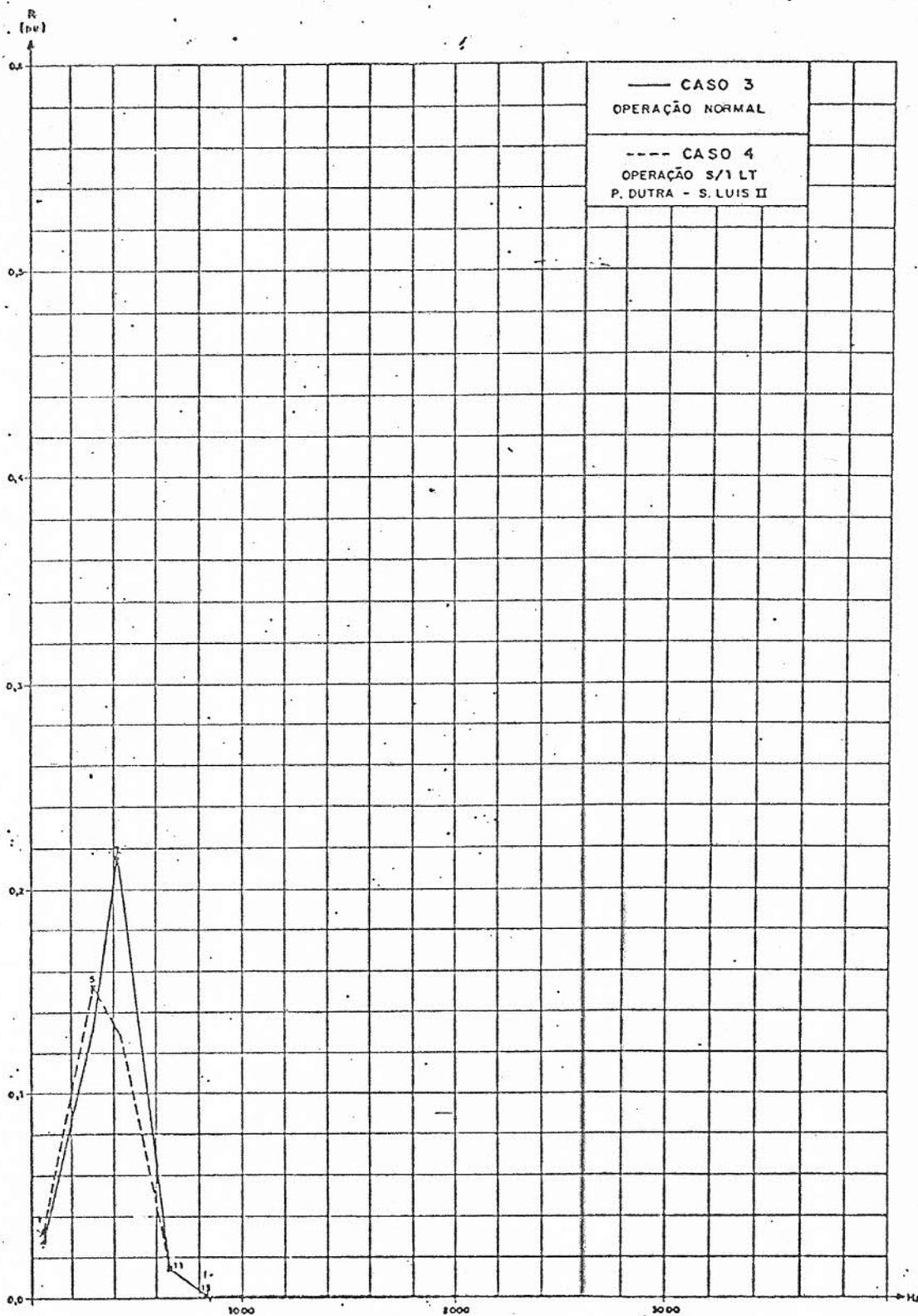
CONFIGURAÇÃO - 1984

GRÁFICO 5.2.1



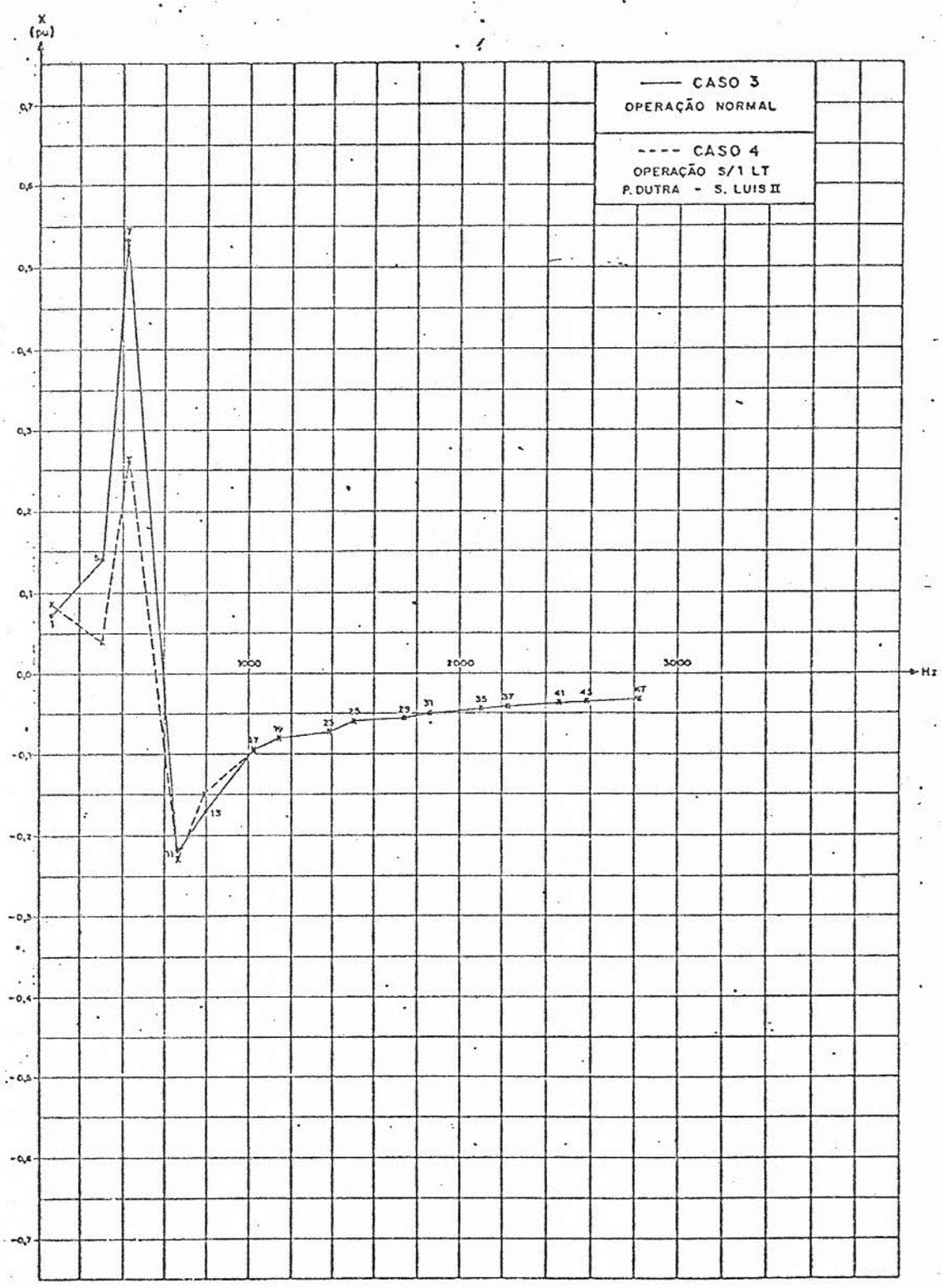
CONFIGURAÇÃO-1984

GRÁFICO 5.2.2



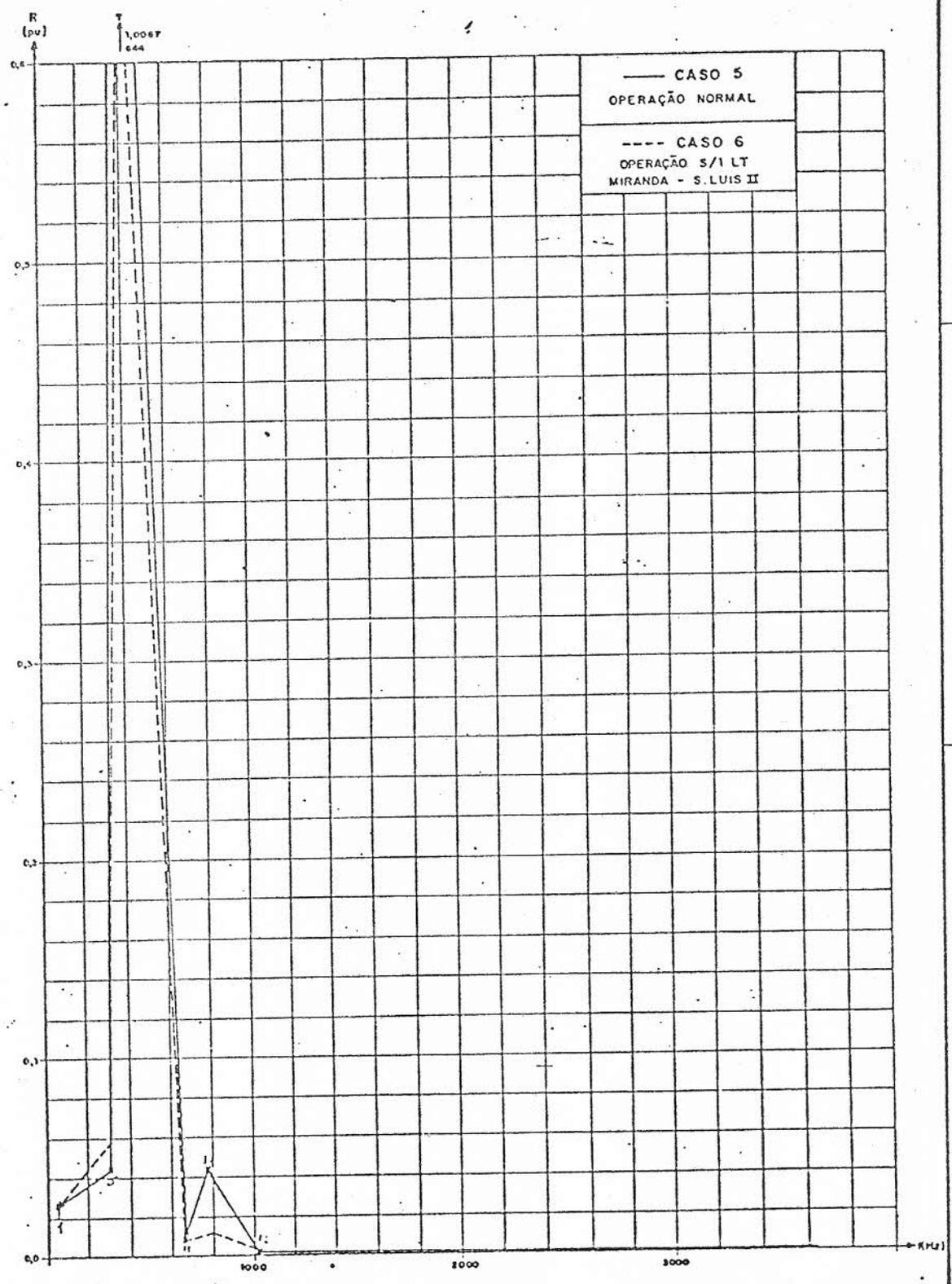
CONFIGURAÇÃO - 1987

GRÁFICO 5.2.3



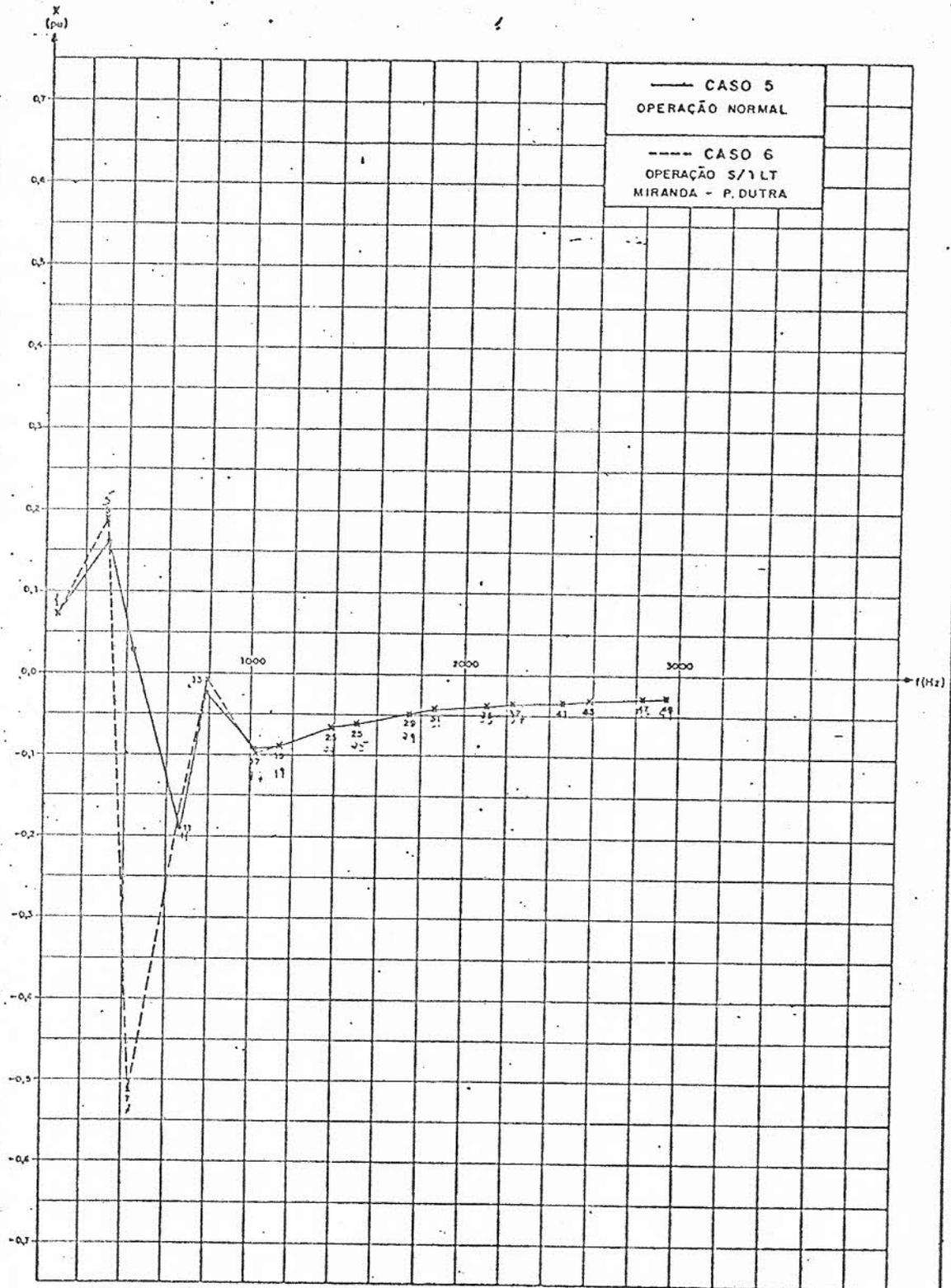
CONFIGURAÇÃO - 1987

GRÁFICO 5.2.4



CONFIGURAÇÃO - 1988

GRÁFICO 5.2.5



CONFIGURAÇÃO-1988

GRÁFICO 5.2.6

TABELA - 5.3.1.1 - DISTORÇÃO HARMÔNICA

CASO	MODO DE OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO	D <sub>5</sub> (%)	D <sub>7</sub> (%)	D <sub>11</sub> (%)	D <sub>13</sub> (%)	D <sub>17</sub> (%)	D <sub>19</sub> (%)	D <sub>23</sub> (%)	D <sub>25</sub> (%)	D <sub>29</sub> (%)	D <sub>31</sub> (%)	D <sub>35</sub> (%)	D <sub>37</sub> (%)	D <sub>41</sub> (%)	D <sub>43</sub> (%)	D <sub>47</sub> (%)	D <sub>49</sub> (%)	D (%)	
A	6x6 pulsos	ANO 1984 operação normal - com filtro de 19,2kVar h = 4,85, q = 25.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	.013	.010	0.	0.	0.	0.	0.	.016
B	5x6 pulsos	ANO 1984 operação normal - sem filtro	4.374	.214	.133	.092	0.46	.027	.014	.011	.006	.004	.016	.014	.002	.002	.001	.001	.001	4.383
C	5x6 pulsos	ANO 1984 operação normal - com filtro de 19,2kVar. h = 4,85, q = 25	.302	.068	.108	.010	0.34	.020	.011	.008	.004	.003	.012	.010	.001	.001	.001	.001	.001	.331
D	5x6 pulsos	ANO 1984 operação sem a LT P. Dutra - S. Luís II - 500 kV com filtro de 19,2kVar, h = 4,85, q = 25	.166	.221	.202	.002	.018	.013	.009	.007	.004	.003	.011	.010	.001	.001	.001	.001	.001	.358
E	5x6 pulsos	ANO 1987 operação normal com filtro de 19,2kVar, h = 4,85, q = 25	.101	.217	.251	.002	.019	.013	.009	.007	.004	.003	.011	.009	.001	.001	.001	.001	.001	.348
F	5x6 pulsos	ANO 1987 operação sem LIT P. Dutra - S. Luís II - 500 kV, com filtro de 19,2kVar, h = 4,85, q = 25	.097	.476	.245	.002	.019	.013	.009	.007	.004	.003	.011	.009	.001	.001	.001	.001	.001	.545
G	5x6 pulsos	ANO 1988 operação normal - com filtro de 19,2kVar, h = 4,85, q = 25	.085	.612	.227	.002	.019	.011	.009	.007	.004	.003	.011	.009	.001	.001	.001	.001	.001	.659
H	5x6 pulsos	ANO 1988 operação sem LIT Miranda-S. Luís II - 500kV filtro de 19,2kVar, h = 4,85, q = 25	.092	.436	.210	.000	.019	.014	.009	.007	.004	.003	.011	.009	.001	.001	.001	.001	.001	.529

$$D = \sqrt{\sum D_h^2}$$

Critérios da ELETRONORTE  
 Máxima distorção individual =  $D_h \leq 1\%$   
 Máxima distorção total =  $D \leq 15\%$

6. REFERÊNCIAS

1- "Direct Current Transmission" ↗

Edward Wilson Kimbark

2- IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA - 12, nº 3,  
Maio/Junho 1976

⇒ "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial  
Power Systems Using Thyristor Converters".

## 7. EQUIPE DE TRABALHO

O presente trabalho foi elaborado pela ALCOA com consultoria da MONASA e Supervisão da PPL-A Divisão de Análise da Transmissão do PPL - Departamento de Planejamento Elétrico, por intermédio do Eng<sup>o</sup> Carolino Augusto Cepeda.

8 - ANEXO

DADOS DO SISTEMA ELETRONORTE - CHESF

DADOS DO SISTEMA - 1984- Linhas de Transmissão

Tensão (kV)	Linha	Impedância a 100MVA		Susceptância (MVar)	Número de Circuitos	Referência
		R (%)	X (%)			
500	São Luis II P. Dutra	0,28	3,83	387,62	1	*
500	P. Dutra Boa Esperança	0,206	2,62	263,8	1	*
500	P. Dutra Im- peratriz	0,31	4,54	484,55	1	*
500	Imperatriz Marabá	0,185	2,356	235,53	1	Banco de Da- dos Eletro- norte
500	Marabá Tucuruí	0,224	2,8725	286,32	1	"
500	Tucuruí V. Conde	0,319	4,164	425,32	1	"
230	São Luis II São Luis I	0,33	1,86	3,2	1	"
230	São Luis II Miranda	1,83	10,29	17,74	1	*
230	Miranda Peritoro	1,66	9,32	15,9	1	*
230	Peritoró Teresina	3,28	18,55	32,0	1	*
230	Teresina Piripiri	2,68	15,09	25,9	1	*
230	Piripiri Sobral	2,9	16,34	28,34	1	*
230	Teresina - Boa Espe- rança	3,52	19,93	34,84	2	*

\* Informações obtidas da Eletronorte

## - Transformadores

Localização	Reatância(%) Base 100MVA	Potência (MVA)	Quantidade	Referência
Vila do Conde 500-230-13,8kV	$X_A = 1,749$ $X_M = -0,188$ $X_B = 3,041$	750	1	Banco de Dados da Eletronorte
Vila do Conde 230-13,8kV	$X = 6,1$	160	2	Banco de Dados da Eletronorte
Maraba 500-230-13,8kV	$X_A = 4,067$ $X_M = -0,667$ $X_B = 5,933$	300	1 banco	Banco de Dados Eletrobrás
Maraba 230-13,8kV	$X = 6,181$	160	1	Banco de Dados Eletrobrás
Imperatriz 500-230kV	$X = 1,23$	600	1	Informações Eletronorte
Imperatriz 230-13,8-13,8kV	$X_A = 0$ $X_M = 6,7$ $X_B = 6,7$	200	2	"
P. Dutra 500-230kV	$X = 2,96$	300	1 Banco	"
P. Dutra 230-13,8-13,8kV	$X_A = 0$ $X_M = 6,7$ $X_B = 6,7$	200	1	"
Boa Esperança 500-230-13,8kV	$X_A = 2,45$ $X_M = 0,45$ $X_B = 12,22$	300	1	Banco de Dados Eletrobrás
Boa Esperança 230-13,8kV	$X = 18,57$	60	2	Informações Eletronorte

## - Transformadores (cont.)

Localização	Reatância(%) Base 100 MVA	Potência (MVA)	Quantidade	Referência
Terésina 230-69kV	$X = 13,00$	100	2	Banco de Dados Eletrobrás
Piripiri 230-69-13,8 kV	$X_A = 29,53$ $X_M = -1,33$ $X_B = 10,84$	33,34	1	Banco de Dados Eletrobrás
Piripiri 230-69-13,8 kV	$X_A = 31,88$ $X_M = -2,43$ $X_B = 14,28$	33,34	1	Banco de Dados Eletrobrás
Sobral 230-69-13,8 kV	$X_A = 13,5$ $X_M = -0,5$ $X_B = 6,5$	100	1	Banco de Dados da Eletrobrás
Peritoró 230-69-13,8 kV	$X_A = 80,7$ $X_M = -3,7$ $X_B = 46,7$	10	3	Banco de Dados Eletrobrás
Miranda 230-69-13,8 kV	$X_A = 13,5$ $X_M = -0,5$ $X_B = 6,5$	100	2	Banco de Dados Eletrobrás
São Luis II 230-13,8 kV	$X = 16,48$	62,5	2	Banco de Dados Eletrobrás
São Luis II 500-230 kV	$X = 1,15$	600	2	Informações da Eletrobrás
São Luis I 230-69 kV	$X = 13$	100	2	Banco de Dados Eletrobrás
São Luis I 230-69-13,8 kV	$X_A = 33,44$ $X_M = -1,35$ $X_B = 13,05$	33,44	2	Banco de Dados Eletrobrás

- Máquinas Síncronas

Referência: Banco de Dados da Eletronorte e Banco de Dados da Eletrobras

Localização	Potência Nominal (MVA)	Característica X'd (pu)	Quantidade
Vila do Conde 13,8 kV	150	0,174 0,266	2
Tucuruí 13,8 kV	350	0,19	4*
Marabá 13,8 kV	150	0,174	1
Imperatriz 13,8 kV	100	0,19	3
P. Dutra 13,8 kV	100	0,19	2
Boa Esperança I 13,8 kV	60	0,145	2
S.Luis II 13,8 kV	65	0,135	2

\* Em 84 foi considerado o caso de não existência de geração em Tucuruí

- Reatores

Referência : informações da ELETRONORTE

Localização	Características	
	Potencia (MVar)	Tensao (kV)
SE - Vila do Conde	2 x 163	500
SE - Tucuruí	1 x 136	500
SE - Marabá	1 x 163	500
	1 x 136	500
SE - Imperatriz	1 x 100	500
	2 x 150	500
SE - P. Dutra	2 x 150	500
	2 x 100	500
SE - Boa Esperança	3 x 100	500
SE - S. Luís II	2 x 100	500
SE - Miranda	2 x 10	230
SE - Teresina	10	230
SE - Peritoró	10	230

\* Só existe na operação do sistema sem geração em Tucuruí

## - Cargas

## CARGAS MW

	1984	1986	1988	Referência
CEMAR	65,3	113,9		Informações da Ele- trobrás
ALBRAS	147 $f_p = 0,95$	291 $f_p = 0,95$	581 $f_p = 0,95$	Informações da Albras
ALUNORTE	174			Informações da Alunorte

Despacho em Boa Esperança 500 kV

Ano	Geradores em Tucuruí	MW
1984	4 ✓	+ 73
1984	0 ✓	- 782
1986	8 ✓	+ 789

+ : a barra está fornecendo energia

- : a barra está recebendo energia

## Alterações do Sistema em Relação a Configuração de 1984

1986

- 8 geradores em Tucuruí
- entrada da 2<sup>a</sup> linha de 500 kV nos trechos Vila do Conde - Tucuruí, Tucuruí - Marabá, Marabá - Imperatriz, Imperatriz - P. Dutra, P. Dutra - S. Luís II
- entrada de mais um transformador em Vila do Conde de 750 MVA 500-230-13,8 kV
- entrada de mais dois geradores em Boa Esperança de 63 MW cada
- entrada de mais uma linha Teresina - Boa Esperança 230 kV
- compensação série de 70% nas linhas Imperatriz - P. Dutra 500 kV
- remoção do reator de barra de 100 MVar da SE de S. Luís II

1988

- entrada de mais uma linha Tucuruí - Vila do Conde 500 kV
- entrada de um transformador de 600 MVA 500-230-13,8 kV na SE de Miranda
- entrada de mais um transformador de 100 MVA 230-69 kV em São Luís I
- entrada de mais um transformador de 600 MVA 500-230-13,8 kV em S. Luís II
- transferência do reator de 163 MVar da SE de Tucuruí para a SE de Vila do Conde
- transferência dos reatores de 150 MVar da linha P. Dutra - S. Luís II para a SE de Miranda

9 - ANEXO

DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES GERADAS PELOS  
RETIFICADORES DA ALCOA

RESPOSTA AO TELEX 31/PPL/29.08.83 DA ELETRONORTE

DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES HARMÔNICAS GERADAS PELOS RETIFICADORES DA ALCOA.

I) SISTEMA DE RETIFICAÇÃO

- 6 transformadores retificadores de 37,62 MVA

-  $V_{pri} = 34,5 \text{ kV}$

-  $V_{sec} = 0,7 \text{ kV}$

-  $I_{DCnominal} = 190 \text{ kA}$

- DPF (Displacement Power Factor)  $\left\{ \begin{array}{l} \underline{6 \text{ pontes}} \quad \text{DPF} = \underline{0,963} \\ \underline{5 \text{ pontes}} \quad \text{DPF} = \underline{0,952} \end{array} \right.$

- Ângulo de disparo  $\alpha = 0^\circ$

II) SISTEMA OPERANDO COM 6 PONTES DE 6 PULSOS

- Corrente no secundário de cada transformador retificador

$I_{sec} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{190}{6} = 24,72 \text{ kA}$  (24,69 kA)  
*p/3 Retificadores = 29,63 kA*

- Corrente no primário de cada transformador retificador

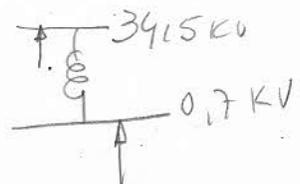
$I_{pri} = 24,72 \times \frac{0,7}{34,5} = 502 \text{ A}$

*601 p) 5 pontes,  $\frac{I_{pri}}{5} = \frac{I_a}{5}$   
 $I_p = \frac{I_a}{5}$*

- Determinação do Ângulo de Overlap ( $\mu$ )

$\text{DPF} = \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)}{2}$

$\mu = 22,18^\circ$



## II.1) Cálculo dos Ângulos de Fase das Correntes Injetadas pelos Retificadores.

### II.1.1 Componente Fundamental

O valor da componente fundamental no primário de cada um dos 6 transformadores retificadores é de 502 A (Fasorialmente  $I_{pA1} = 502 \angle 0^\circ$ ,  $I_{pB1} = 502 \angle -120^\circ$ ,  $I_{pC1} = 502 \angle 120^\circ$ )

As componentes fundamentais das correntes no secundário estarão defasadas de acordo com o tipo de ligação de cada um dos transformadores retificadores, a saber:

a) Ligação  $\Delta + 15^\circ : \Delta$

$$I_{sal} = 24,72 \text{ kA} \angle -15^\circ, \quad I_{sbl} = 24,72 \text{ kA} \angle -135^\circ,$$

$$I_{scl} = 24,72 \text{ kA} \angle 105^\circ$$

b) Ligação  $\Delta + 5^\circ : \Delta$

$$I_{sal} = 24,72 \text{ kA} \angle -5^\circ, \quad I_{sbl} = 24,72 \text{ kA} \angle -125^\circ,$$

$$I_{scl} = 24,72 \text{ kA} \angle 115^\circ$$

c) Ligação  $\Delta - 5^\circ : \Delta$

$$I_{sal} = 24,72 \text{ kA} \angle 5^\circ, \quad I_{sbl} = 24,72 \text{ kA} \angle -115^\circ,$$

$$I_{scl} = 24,72 \text{ kA} \angle 125^\circ$$

d) Ligação  $\gamma - 5^\circ : \Delta$

$$I_{sal} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{-25^\circ}, \quad I_{sbl} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{-145^\circ},$$

$$I_{scl} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{95^\circ}$$

e) Ligação  $\gamma + 5^\circ : \Delta$

$$I_{sal} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{-35^\circ}, \quad I_{sbl} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{-155^\circ},$$

$$I_{scl} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{85^\circ}$$

f) Ligação  $\gamma + 15^\circ : \Delta$

$$I_{sal} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{-45^\circ}, \quad I_{sbl} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{-165^\circ},$$

$$I_{scl} = 24,72 \text{ kA} \quad \underline{75^\circ}$$

## II.1.2 Componentes Harmônicas

As harmônicas características de pontes de 6 pulsos podem ser de dois tipos:

Sequência Negativa - Harmônicas de ordem  $6n - 1$ , onde  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$

Sequência Positiva - Harmônicas de ordem  $6n + 1$ , onde  $n = 0, 1, 2, 3, 4 \dots$

Levando-se em conta que os transformadores retificados proporcionam uma defasagem de  $+ \theta$  graus para a fase de uma corrente de sequência positiva ao passar do primário para o secundário e de  $- \theta$  graus para a fase de uma corrente de sequência negativa e que no sistema de retificação em questão, as pontes de correntes harmôni

cas se encontram no secundário dos transformadores retificadores, as componentes à frequência fundamental e harmônicas sofrerão defasamento de  $-\theta$  para as componentes de sequência positiva e de  $+\theta$  para as componentes de sequência negativa.

Outro ponto a considerar é que se o defasamento da componente fundamental de correntes no secundário de dois grupos distintos de transformadores retificadores for  $\alpha$ , o defasamento correspondente às correntes harmônicas de ordem  $h$  será  $h\alpha$ .

Escolhendo-se como referência a ligação  $\Delta-5^\circ:\Delta$  (item 3.1.a) em relação à ligação  $\Delta+5^\circ:\Delta$  (item 3.1.b), pode-se observar que para esta ligação a componente fundamental da corrente de uma determinada fase está defasada de  $-10^\circ$  em relação à ligação de referência, portanto as componentes harmônicas estarão defasadas de  $h(-10^\circ)$ .

Analogamente para os demais grupos:

Ligação  $\Delta + 15^\circ : \Delta$  - Harmônicas defasadas de  $h(-20^\circ)$

Ligação  $\Upsilon - 5^\circ : \Delta$  - Harmônicas defasadas de  $h(-30^\circ)$

Ligação  $\Upsilon + 5^\circ : \Delta$  - Harmônicas defasadas de  $h(-40^\circ)$

Ligação  $\Upsilon + 15^\circ : \Delta$  - Harmônicas defasadas de  $h(-50^\circ)$

As correntes harmônicas no primário das diversas ligações sofrerão ainda o defasamento correspondente a cada ligação tomado no mesmo sentido da fundamental se a harmônica for de sequência positiva ou no sentido oposto se a harmônica for de sequência negativa.

Assim no primário as correntes harmônicas sofrerão os seguintes defasamentos em relação à referência do secundário.

Ligação  $\Delta-5^\circ$  :  $\Delta$

Referência  $-5^\circ$ , se sequência positiva

Referência  $+5^\circ$ , se sequência negativa

Ligação  $\Delta+5^\circ$  :  $\Delta$

Referência  $+h(-10^\circ)+5^\circ$ , se sequência positiva

Referência  $+h(-10^\circ)-5^\circ$ , se sequência negativa

Ligação  $\Delta+15^\circ$  :  $\Delta$

Referência  $+h(-20^\circ)+15^\circ$ , se sequência positiva

Referência  $+h(-20^\circ)-15^\circ$ , se sequência negativa

Ligação  $\gamma-5^\circ$  :  $\Delta$

Referência  $+h(-30^\circ) + 25^\circ$ , se sequência positiva

Referência  $+h(-30^\circ) - 25^\circ$ , se sequência negativa

Ligação  $\gamma+5^\circ$  :  $\Delta$

Referência  $+h(-40^\circ) + 35^\circ$ , se sequência positiva

Referência  $+h(-40^\circ) - 35^\circ$ , se sequência negativa

Ligação  $\gamma+15^\circ$  :  $\Delta$

Referência  $+h(-50^\circ) + 45^\circ$ , se sequência positiva

Referência  $+h(-50^\circ) - 45^\circ$ , se sequência negativa

Ao fazermos a composição dessas correntes no primário (34,5 kV) para cada uma das fases a, b e c, obteremos soma fasorial zero para as harmônicas de  $5^a$ ,  $7^a$ ,  $11^a$ ,  $13^a$ ,  $17^a$ ,  $19^a$ ,  $23^a$ ,  $25^a$ ,  $29^a$ ,  $31^a$ ,  $35^a$ ,  $37^a$ ,  $41^a$ ,  $43^a$ ,  $47^a$  e  $49^a$  ordem.

## II.2

## Cálculo das Amplitudes das Correntes Harmônicas

As amplitudes das correntes harmônicas foram determinadas a partir das fórmulas abaixo, (Referência Direct Current Transmission - Edward W. Kimbark, Seção 8.2).

$$\frac{I_h}{I_{ho}} = K_5 F_1$$

$$I_{ho} = \frac{I_{s1}}{h}$$

$$\frac{I_h}{I_{s1}} = \frac{K_5 F_1}{h}$$

$$K_5 = \frac{1}{2(\cos \alpha - \cos (\alpha + \mu))} = \frac{1}{2(1 - \cos \mu)}$$

$$F_1 = \frac{\left| \frac{-(h+1)\alpha}{h+1} - \frac{-(h+1)(\alpha + \mu)}{h+1} \right| - \left| \frac{-(h-1)\alpha}{h-1} - \frac{-(h-1)(\alpha + \mu)}{h-1} \right|}{h+1 - h-1}$$

onde:

$I_h$  = Amplitude da harmônica ordem  $h$

$I_{ho}$  = Amplitude da harmônica ordem  $h$ , se não houvesse overlap

$I_{s1}$  = Amplitude da corrente à frequência fundamental no secundário do transformador retificador

$\alpha$  = Ângulo de disparo ( $0^\circ$ ).

$\mu$  = Ângulo de overlap ( $22,18^\circ$ )

$$P = VI$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$\frac{I_h}{I_{s1}} = \frac{1}{2h(1-\cos\mu)} - \frac{1}{h+1} - \frac{1}{h-1} - \frac{1}{h+1} \left[ \frac{-(h+1)\mu}{h-1} \right] + \frac{1}{h-1} \left[ \frac{-(h-1)\mu}{h+1} \right]$$

III) Sistema operando com 5 pontes de 6 pulsos

- Corrente no secundário de cada transformador retificador

$$I_{sec} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \frac{190}{5} = 29,63 \text{ kA}$$

- Corrente no primário de cada transformador retificador

$$I_{pri} = 29,63 \times \frac{0,7}{34,5} = 601 \text{ A}$$

- Determinação do ângulo de Overlap ( $\mu$ )

$$DPF = \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)}{2}$$

$$\mu = 25,31^\circ$$

III.1) Cálculo dos Ângulos de Fase das Correntes Injetadas pelos Retificadores

III.1.1 Componente Fundamental

Em todos os grupos esta componente estará em fase nos primários e defasada nos secundários conforme o item II.1.1, com a exclusão do grupo que saiu de operação.

III.1.2 Componentes Harmônicas

Fases de acordo com o item II.1.2, com a exclusão do grupo que saiu de operação.

190 30 26

### III.2 Cálculo das Amplitudes das Correntes Harmônicas

As amplitudes das correntes harmônicas foram determinadas conforme exposto no item II.2.

A partir da metodologia exposta nos itens II e III foram determinados os valores constantes na tabela 5.1 do relatório "Estudos dos Harmônicos Gerados pelos Retificadores da ALCOA".