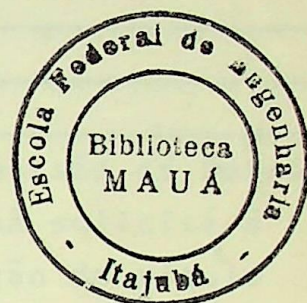


TESE

570

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO DE  
UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA AC/DC



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AUTOR: Ângelo José Junqueira Rezek

ORIENTADOR: Prof. João Roberto Cogo

CO-ORIENTADOR: Prof. Jocélio Souza de Sã

621.314.57:621.313.  
291(043.2)

R467a  
570

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO APRESENTADO À  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ESCOLA FEDERAL DE  
ENGENHARIA DE ITAJUBÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ITAJUBÁ, JUNHO DE 1986

CLASS. 621.314.57:64 313.291(043.2)  
CUTT. R 467 a  
TOMBO 570

  
Ministério da Educação e Cultura  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

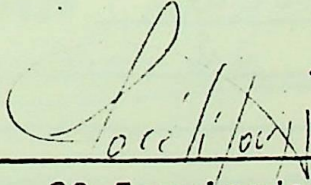
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 180 de 04/06/86, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado Intitulada: "Análise em Regime Permanente e Transitório de um Sistema de Conversão de Energia Elétrica AC/DC"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à Ângelo José Junqueira Rezek.

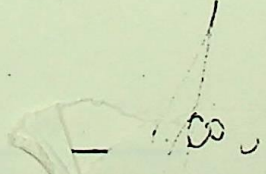
Itajubá, 05 de junho de 1986

  
\_\_\_\_\_  
1º Examinador

Prof. Mauro Sérgio Miskulin  
- UNICAMP -

  
\_\_\_\_\_  
2º Examinador

Prof. Jocélio Souza de Sá  
- EFEI -

  
\_\_\_\_\_  
3º Examinador

Prof. João Roberto Cogo  
EFEI-ORIENTADOR



Ministério da Educação e Cultura  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Análise em Regime Permanente e Transitório de um Sistema de Conversão de Energia Elétrica AC/DC"

Autor: Ângelo José Junqueira Rezek

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A <sup>+</sup>	<i>[Assinatura]</i>
2º	A <sup>+</sup>	<i>[Assinatura]</i>
3º	A <sup>+</sup>	<i>[Assinatura]</i>

Resultado médio: Conceito A<sup>+</sup>, ou seja Aprovado  
com distinção

Observações: não há

Itajubá, 05 de junho de 1986

*[Assinatura]*

1º Examinador

Prof. Mauro Sérgio Miskulin

- UNICAMP -

*[Assinatura]*

2º Examinador

Prof. Jocélio Souza de Sã

- EFEI -

*[Assinatura]*  
3º Examinador

Prof. João Roberto Cogo

EFEI-ORIENTADOR

## RESUMO

São estudados neste trabalho os conversores de 6 e 12 pulsos em regime permanente e na condição de falta, quando da ocorrência de curto circuito na ponte conversora. O sistema de controle de velocidade da máquina de corrente contínua também é apresentado sendo realizados em laboratório as verificações experimentais.

## ABSTRACT

In this work, 6 and 12-pulse converters are studied during steady-state and fault conditions, when occurring short circuit in the converting bridge. The speed control system of the direct current machine is also presented, in which experimental verifications were performed in laboratory.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. João Roberto Lago que, além de orientador, sempre demonstrou grande amizade, interesse e compreensão em todos os momentos.

Ao Prof. Jocélia Sousa de Sá, pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho.

A Srta. Claudete Celi Junqueira, pela dedicação e eficiência na digitografia dos originais.

Aos Professores Antônio Eduardo Bezerra e João César Ribeiro, pela demonstração constante de confiança e apoio.

Aos Professores José Wellington Gonçalves de Azevedo e Cícero Manoel do Noronha, colegas de trabalho e que sempre me incentivaram ao longo destes anos na UFPA.

Ao meu querido pai que, embora ausente, permanecerá sempre em minha lembrança, e à minha querida mãe, pela amizade, compreensão, incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao Prof. Chirajida Machado de Moraes, que sempre me incentivou e apoiou nos trabalhos de laboratório.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. João Roberto Cogo que, além do inestimável apoio técnico, sempre demonstrou grande amizade, interesse e compreensão em todos os momentos.

Ao Prof. Jocélio Souza de Sá, pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho.

À Srta. Claudete Coli Junqueira, pela dedicação e eficiência na datilografia dos originais.

Aos Professores Antonio Eduardo Hermeto e Júlio César Tibúrcio, pela demonstração constante de confiança e apoio.

Aos Professores José Policarpo Gonçalves de Abreu e Cícero Machado de Moraes, colegas de trabalho e que sempre me incentivaram ao longo destes anos na EFEI.

Ao Prof. Eduardo Oliveira Resek pelo auxílio na determinação das expressões dos harmônicos.

Ao Prof. José Carlos Goulart de Siqueira, pelo incentivo ao longo destes anos de Escola.

Ao Prof. Ubirajara Machado de Moraes, com quem muito aprendi e que me iniciou nos trabalhos de laboratório.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA	
1.2.1 - Principais Aplicações da Transmissão em Corrente Contínua	
1.2.2 - Constituição Básica de um Sistema de Transmissão em Corrente Contínua	3
1.2.3 - Principais Esquemas de Transmissão em Corrente Contínua	5
1.3 - CONFIGURAÇÃO BÁSICA DOS SISTEMAS CONVERSORES	7
CAPÍTULO II - PONTE CONVERSORA CONTROLADA DE SEIS PULSOS	10
2.1 - INTRODUÇÃO	10
2.2 - ANÁLISE DA PONTE CONVERSORA CONTROLADA DE 6 PULSOS	10
2.2.1 - Considerações Iniciais	10
2.2.2 - Equacionamento e Formas de Onda para a Ponte Conversora de 6 Pulsos desprezando-se o Efeito da Comutação	11
2.2.3 - Análise da Ponte Conversora Funcionando como Inversora	22
2.2.4 - O Efeito da Comutação na Ponte Conversora Controlada de 6 Pulsos	26
2.3 - RELAÇÃO ENTRE O DESLOCAMENTO DE FASE E O ÂNGULO DE DISPARO	41
2.4 - O PROCESSO DE COMUTAÇÃO CONSIDERANDO-SE O EFEITO DA RESISTÊNCIA	44
2.4.1 - Determinação da Corrente de comutação	44
2.4.2 - Cálculo do Ângulo de Comutação, considerando-se o Efeito da Resistência de Comutação [2]	45
2.4.3 - Modelo Utilizando a Influência da Resistência de Comutação	52

2.5 - HARMÔNICOS NO SISTEMA CONVERSOR	55
2.5.1 - Considerações Iniciais	55
2.5.2 - Decomposição em Série Trigonométrica de Fourier da Corrente de Alimentação dos Conversores	56
 CAPÍTULO III - CONVERSOR DE 12 PULSOS	 69
3.1 - INTRODUÇÃO	69
3.2 - EQUACIONAMENTO E FORMAS DE ONDA PARA O CONVERSOR DE 12 PULSOS	69
3.2.1 - Equacionamento	69
3.2.2 - Formas de Onda	76
 CAPÍTULO IV - ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENER <u>GIA</u> ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA FACE A CUR <u>TO</u> CIRCUITO	  98
4.1 - INTRODUÇÃO	98
4.2 - EQUACIONAMENTO PARA A PONTE CONVERSORA DE 6 PULSOS	98
4.3 - CÁLCULO DO VALOR DE PICO DA CORRENTE DE CURTO CIRCU <u>ITO</u> PELO CRITÉRIO DAS ÁREAS - CONVERSOR DE 6 PULSOS	119
4.4 - CÁLCULO DOS VALORES DE PICO DA CORRENTE DE CURTO CIR <u>CUITO</u> EM SISTEMAS CONVERSORES DE 12 PULSOS	127
4.5 - CONCLUSÕES	145
 CAPÍTULO V - CONTROLE DE VELOCIDADE DE MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA	 146
5.1 - INTRODUÇÃO	146
5.2 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO MOTOR	146
5.3 - MALHA DE CONTROLE DE VELOCIDADE	152
5.4 - MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE	154
5.5 - PROJETO DOS PARÂMETROS $K_{IIc}$ , $K_s$ , $E_I$	158
5.6 - MALHA DE CONTROLE DE VELOCIDADE	159
5.7 - TESTES EM LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DAS CONSTAN <u>TES</u> DE TEMPO	160
5.7.1 - Constante de Tempo da Armadura	160
5.7.2 - Constante de Tempo do Motor	161

5.8 - RESPOSTA PARA VARIAÇÕES DE CONJUGADO DE CARGA	164
CAPÍTULO VI - VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS EM LABORATÓRIO	169
6.1 - INTRODUÇÃO	169
6.2 - FORMAS DE ONDA NOS CONVERSORES	169
6.3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	175
6.3.1 - Determinação das Constantes de Tempo	175
6.3.2 - Dados do Motor de Corrente Contínua Utilizado	177
6.4 - CONCLUSÕES	183
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES GERAIS	185
BIBLIOGRAFIA	218

## APÊNDICES

APÊNDICE I - EQUACIONAMENTO CONSIDERANDO-SE O EFEITO DA RESISTÊNCIA DE COMUTAÇÃO	187
APÊNDICE II - DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DOS CONVERSORES EM SÉRIE TRIGONOMÉTRICA DE FOURIER	191
APÊNDICE III - TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR DE 12 PULSOS PARA ÂNGULO DE COMUTAÇÃO MAIOR QUE $30^{\circ}$	203
APÊNDICE IV - MANUAIS DE UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS	207

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o aparecimento dos dispositivos semicondutores a estado sólido e também dos componentes eletrônicos analógicos e digitais, houve um desenvolvimento bastante acentuado dos sistemas conversores de energia elétrica de corrente alternada para corrente contínua (conversão AC/DC).

A conversão AC/DC se faz necessária uma vez que a geração de energia elétrica é feita em corrente alternada. Entretanto, a utilização de corrente contínua é atualmente largamente empregada no meio industrial como fonte de suprimento de motores elétricos com características de regulação de velocidade e conjugado imprescindíveis a determinados processos. Assim é que o motor de corrente contínua, embora de custo elevado, é sempre encontrado nos processos de laminação das companhias siderúrgicas, em indústrias de fabricação de papel, que requerem velocidades constantes e sem oscilações nos processos de enrolamento das bobinas de papel e nos sistemas ferroviários que utilizam tração elétrica.

Os sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua se apresentam como nova opção, técnica e econômica, em relação aos tradicionais sistemas de transmissão em corrente alternada, fazendo com que a utilização da corrente contínua se torne ainda mais ampla e importante.

Os conversores injetam no sistema AC harmônicos de corrente e devido a este fato alguns efeitos prejudiciais são observados, como por exemplo: sobreaquecimento em máquinas rotativas, sobretensões no sistema elétrico, devido à ressonâncias ocorridas em frequências críticas e também interferências nos sistemas de comunicação. Para resolver estes problemas, duas soluções são adotadas: aumento do número de pulsos do sistema conversor e instalação de filtros.

No Brasil foi adotada como solução para a trans

missão de parte da energia elétrica de Itaipú a implantação de um sistema em corrente contínua, o que necessariamente fará com que sejam intensificados em nosso país os estudos e pesquisas nesta área.

Pretende-se neste trabalho abordar aspectos em regime permanente e transitório de um sistema de conversão de energia elétrica AC/DC, incluindo-se os sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua e controle de velocidade de máquina de corrente contínua. Em laboratório serão obtidas também algumas comprovações práticas.

## 1.2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CORRENTE CONTÍNUA

### 1.2.1 - Principais Aplicações da Transmissão em Corrente Contínua

A transmissão em corrente contínua é indicada principalmente nos seguintes casos [ 6 ]:

- Utilização em travessia submarina por intermédio de cabos devido ao menor custo dos mesmos e também devido ao fato de não haver necessidade de compensação de potência reativa;
- Interconexão de sistemas de corrente alternada (AC) com frequências diferentes. Como exemplo típico deste caso pode-se citar a interconexão dos sistemas de 50 [Hz] (Paraguai) e 60 [Hz] (Brasil):
- Transmissão de grandes potências a grandes distâncias. Neste caso a transmissão em corrente contínua é economicamente viável;
- Transmissão da energia elétrica em zonas urbanas congestionadas.

Nas regiões centrais dos grandes centros urbanos a utilização dos cabos subterrâneos é normalmente empregada devido a facilidades e economia de espaço na sua instalação.

- Simplifica a interligação dos sistemas sob o aspecto de estabilidade, evitando problemas de sincronismo.

### 1.2.2 - Constituição Básica de um Sistema de Transmissão em Corrente Contínua

A Figura 1.1 mostra o diagrama unifilar contendo os principais componentes de um sistema de transmissão em corrente contínua.

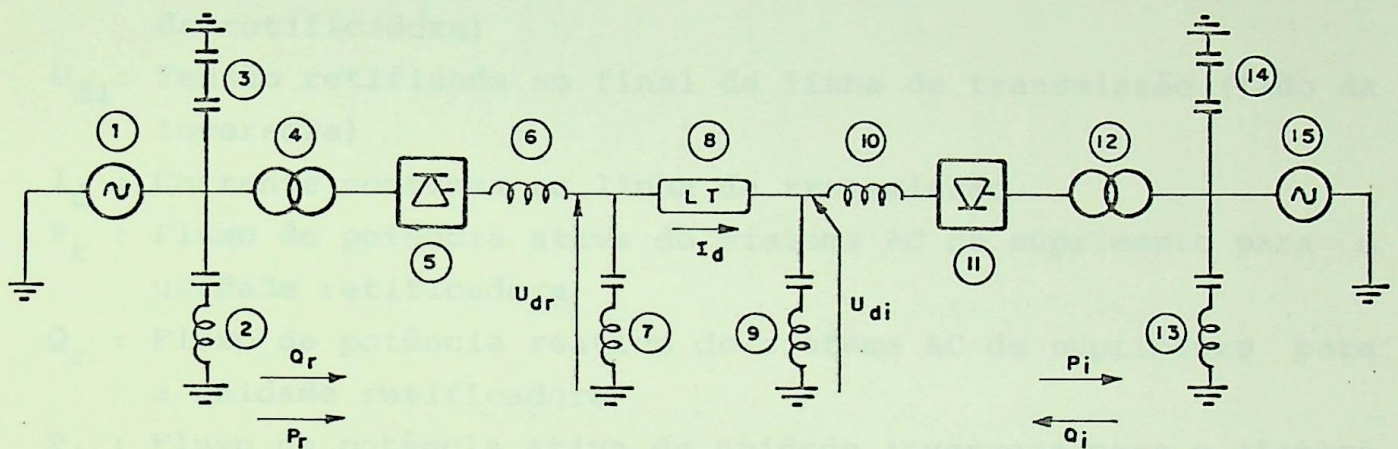


Figura 1.1 - Diagrama unifilar dos principais componentes de um sistema de transmissão em corrente contínua

Na Figura 1.1, tem-se:

- Partes constituintes da Unidade Retificadora:
  1. Sistema de geração em corrente alternada
  2. Filtro de harmônico de corrente - lado AC
  3. Compensadores de reativo
  4. Transformador da unidade conversora
  5. Ponte retificadora
  6. Reator de alisamento
  7. Filtro de harmônico de tensão - lado DC
- Interligação entre as unidades conversora e inversora
  8. Linha de transmissão em corrente contínua

- Partes constituintes da Unidade Inversora
- 9. Filtro de harmônico de tensão - lado DC
- 10. Reator de alisamento
- 11. Ponte inversora
- 12. Transformador da unidade inversora
- 13. Filtro de harmônico de corrente - lado AC
- 14. Compensadores de reativo
- 15. Sistema de geração em corrente alternada

Com relação às grandezas elétricas mostradas na Figura 1.1, tem-se:

- $U_{dr}$  : Tensão retificada no início da linha de transmissão (lado da retificadora)
- $U_{di}$  : Tensão retificada no final da linha de transmissão (lado da inversora)
- $I_d$  : Corrente contínua na linha de transmissão
- $P_r$  : Fluxo de potência ativa do sistema AC de suprimento para a unidade retificadora
- $Q_r$  : Fluxo de potência reativa do sistema AC de suprimento para a unidade retificadora
- $P_i$  : Fluxo de potência ativa da unidade inversora para o sistema AC
- $Q_i$  : Fluxo de potência reativa do sistema AC para a unidade inversora

Observa-se que ambas as unidades retificadora e inversora absorvem reativo, daí a necessidade de compensadores de reativo. Os filtros em corrente alternada são responsáveis pela eliminação de componentes harmônicos de corrente indesejáveis ao sistema e os capacitores dos mesmos contribuem também para o fornecimento de reativo ao sistema. Os filtros no lado de corrente contínua são responsáveis pela eliminação de harmônicos de tensão.

Eletrodos de terra são também incorporados ao sistema de transmissão e possibilitam o retorno pela terra de corrente, o que garantirá maior confiabilidade e flexibilidade ao sistema.

### 1.2.3 - Principais Esquemas de Transmissão em Corrente Contínua

Os sistemas em corrente contínua podem ser classificados em [ 6 ]:

#### 1.2.3.1 - Sistema monopolar

Possue um só condutor, sendo o retorno feito pelo mar ou terra. A Figura 1.2 ilustra.

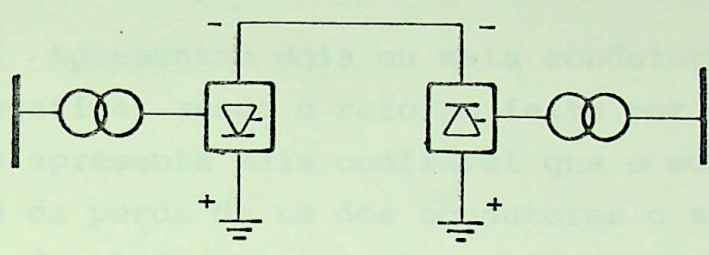


Figura 1.2 - Representação de um esquema monopolar de transmissão

O condutor de polaridade negativa é preferido devido ao menor efeito da interferência.

#### 1.2.3.2 - Sistema bipolar

Possue dois condutores, um positivo e outro negativo. Cada terminal apresenta dois conversores de mesma tensão nominal, ligados em série no lado de corrente contínua. A Figura 1.3 exemplifica um sistema bipolar de transmissão.

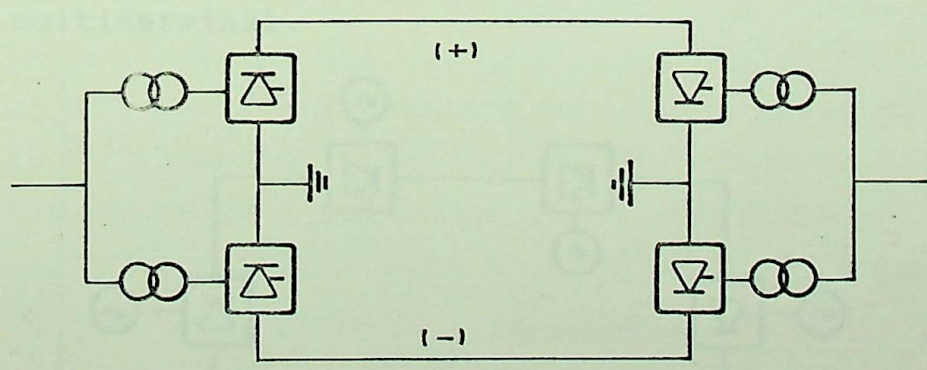


Figura 1.3 - Esquema bipolar de transmissão

O ponto de junção entre as unidades conversoras ligadas em série é aterrado em ambas as extremidades. Os sistemas DC pertencentes a este tipo podem operar com 50% da potência nominal na eventualidade da perda de um dos polos. Neste caso o retorno da corrente é feito por terra, sendo a operação monopolar.

O sistema de transmissão em corrente contínua de Itaipú é bipolar sendo a tensão dos polos igual a  $\pm 600$  [KV].

### 1.2.3.3 - Sistema homopolar

Apresentam dois ou mais condutores, geralmente de polaridade negativa, sendo o retorno feito por terra ou mar. Este sistema se apresenta mais confiável que o monopolar, pois na eventualidade da perda de um dos condutores o sistema pode continuar funcionando. A Figura 1.4 ilustra um esquema homopolar de transmissão.

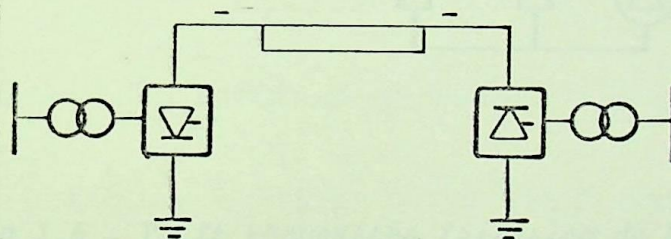


Figura 1.4 - Representação de um esquema homopolar

### 1.2.3.4 - Sistemas multiterminais

Nesta configuração, o número mínimo de estações conversoras é igual a três. A Figura 1.5 mostra um exemplo de um sistema multiterminal.

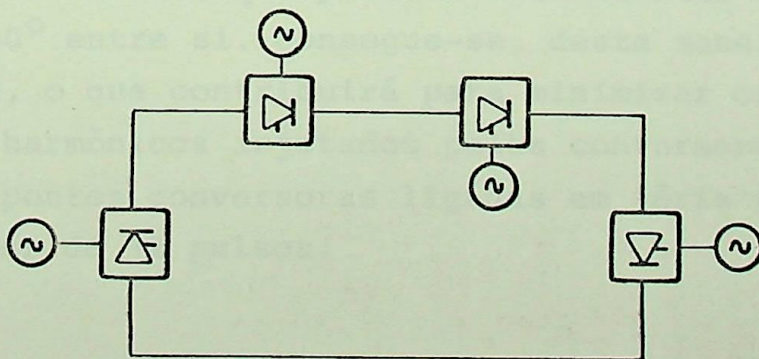


Figura 1.5 - Sistema multiterminal

### 1.3 - CONFIGURAÇÃO BÁSICA DOS SISTEMAS CONVERSORES

Os elementos responsáveis pela retificação são os tiristores ou SCR's (retificador controlado de silício). A Figura 1.6 ilustra uma ponte conversora trifásica, onde pode ser mostrada a disposição das válvulas para a obtenção da retificação da tensão. Nesta configuração tem-se uma ponte conversora de 6 pulsos.

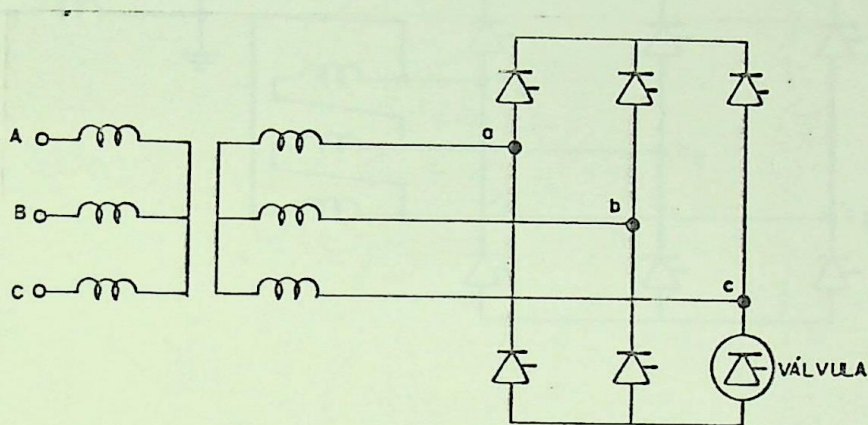


Figura 1.6 - Ponte conversora trifásica de 6 pulsos

Cada válvula representada na Figura 1.6 é uma associação série-paralelo de vários tiristores. No caso do sistema de Itaipú, cada válvula é composta de 96 tiristores.

Os sistemas de transmissão em corrente contínua, na sua maioria, utilizam duas pontes trifásicas ligadas em série nas estações conversoras. As pontes são alimentadas por intermédio de transformadores que possuem defasamentos angulares com diferença de  $30^\circ$  entre si. Consegue-se, desta maneira, um sistema de 12 pulsos, o que contribuirá para minimizar os efeitos prejudiciais dos harmônicos injetados pelos conversores. A Figura 1.7 mostra duas pontes conversoras ligadas em série formando um sistema conversor de 12 pulsos.

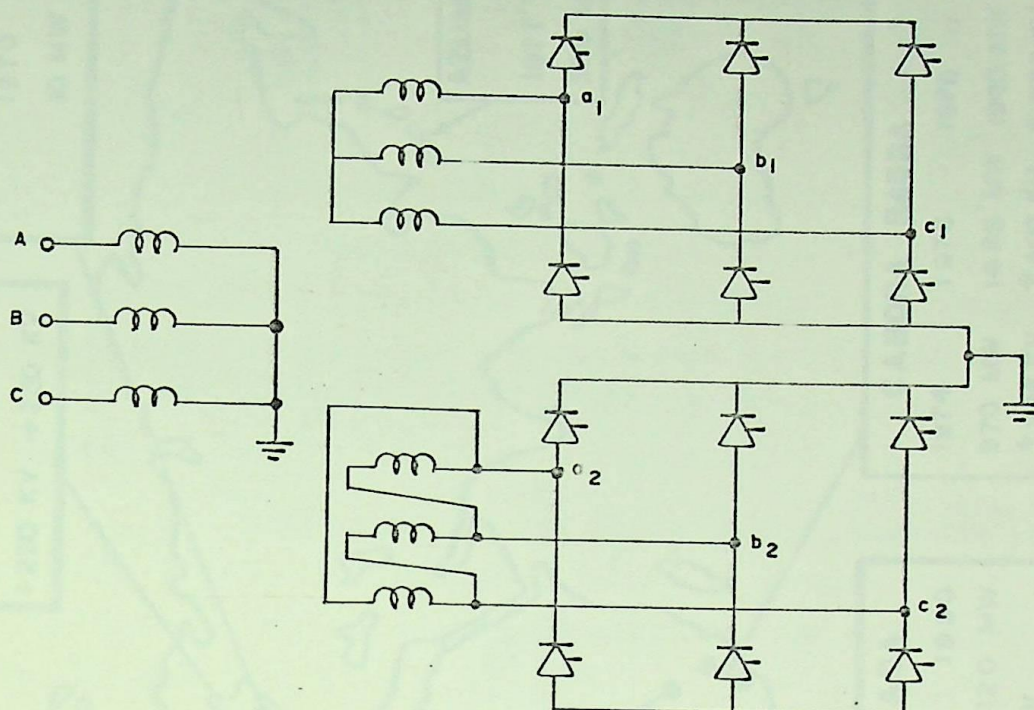


Figura 1.7 - Sistema conversor de 12 pulsos

A Figura 1.8 ilustra a disposição geográfica dos principais sistemas DC com estações conversoras constituídas de válvulas a tiristores [6].

Pode-se verificar que o sistema de 12 pulsos com pontes retificadoras em série é indicado para a transmissão em corrente contínua de potências elevadas a grandes distâncias. As pontes em série permitem que a transmissão seja feita em um nível de tensão mais elevado, o que é desejável. O sistema de 12 pulsos não possui harmônicos característicos de menor ordem, que são os mais críticos, resultando em economia na instalação dos filtros.

O sistema de 12 pulsos é formado pela associação de duas pontes conversoras de 6 pulsos, motivo pelo qual se faz necessário estudar inicialmente as equações e formas de onda para este tipo de conversor.

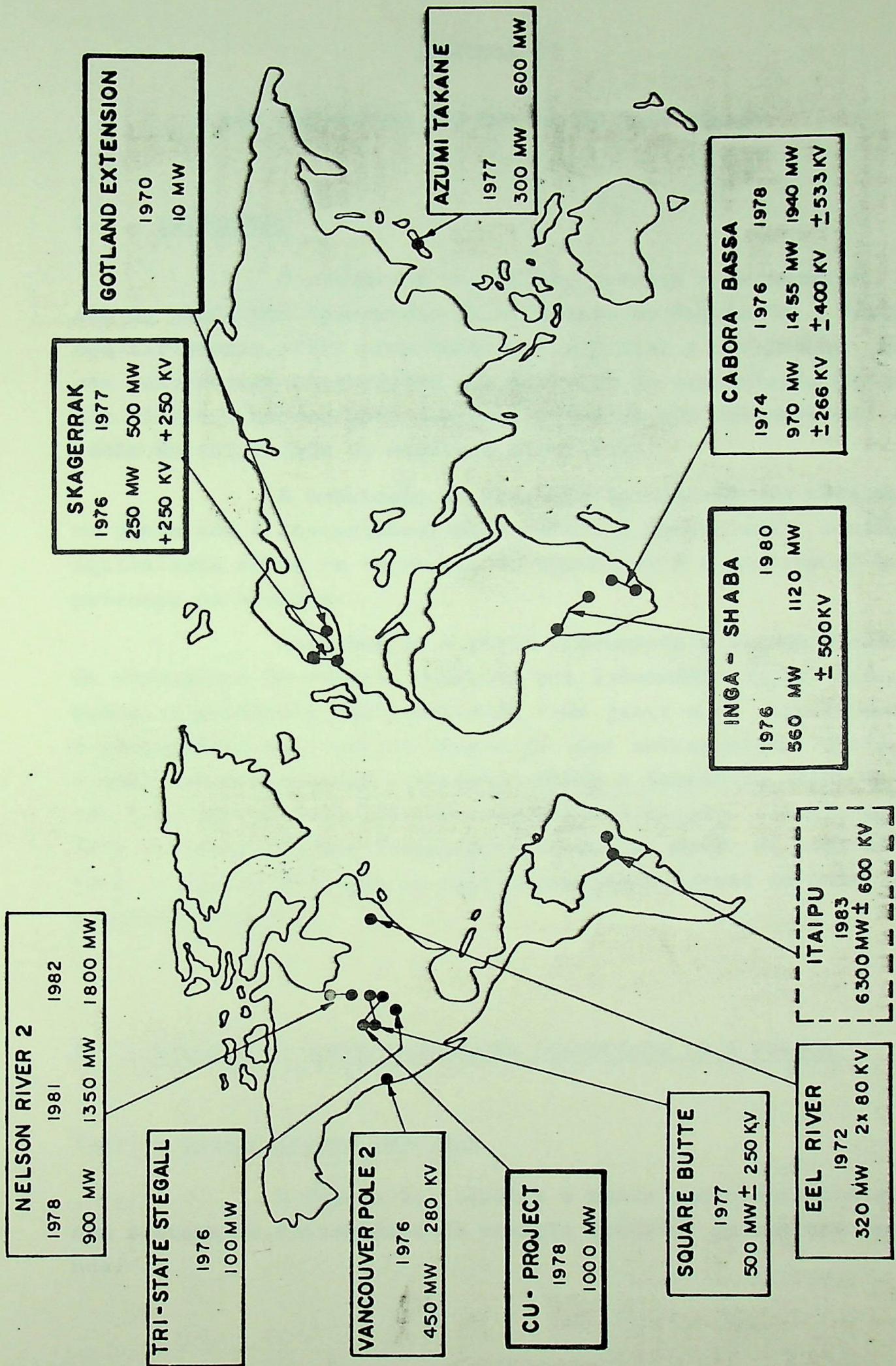


Figura 1.8 - Localização geográfica dos principais sistemas de transmissão em corrente contínua com válvulas a tiristores

## CAPÍTULO II

### PONTE CONVERSORA CONTROLADA DE SEIS PULSOS

#### 2.1 - INTRODUÇÃO

O conversor controlado permite a variação da tensão de saída por intermédio da alteração do ângulo de disparo dos tiristores. Esta propriedade possibilita a utilização ampla dos conversores controlados nos sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua e também nos sistemas de controle de velocidade de máquinas elétricas.

A comutação de corrente de uma válvula para outra na ponte não é instantânea, pois existirá sempre uma reatância equivalente entre os terminais do conversor e o sistema AC de suprimento de energia.

Normalmente a ponte conversora é ligada à rede AC de suprimento de energia elétrica por intermédio de um transformador. A reatância equivalente da rede junto a do transformador é responsável pelo efeito conhecido como sobreposição "overlap", o qual exercerá também influência sobre a tensão de saída da ponte. Este efeito será inicialmente desconsiderado. Posteriormente a sobreposição será acrescentada, quando então se poderá verificar o efeito da mesma no equacionamento e formas de onda para a ponte conversora.

#### 2.2 - ANÁLISE DA PONTE CONVERSORA CONTROLADA DE 6 PULSOS

##### 2.2.1 - Considerações Iniciais

A Figura 2.1 ilustra a ponte conversora instalada num sistema de transmissão de energia elétrica em corrente contínua.

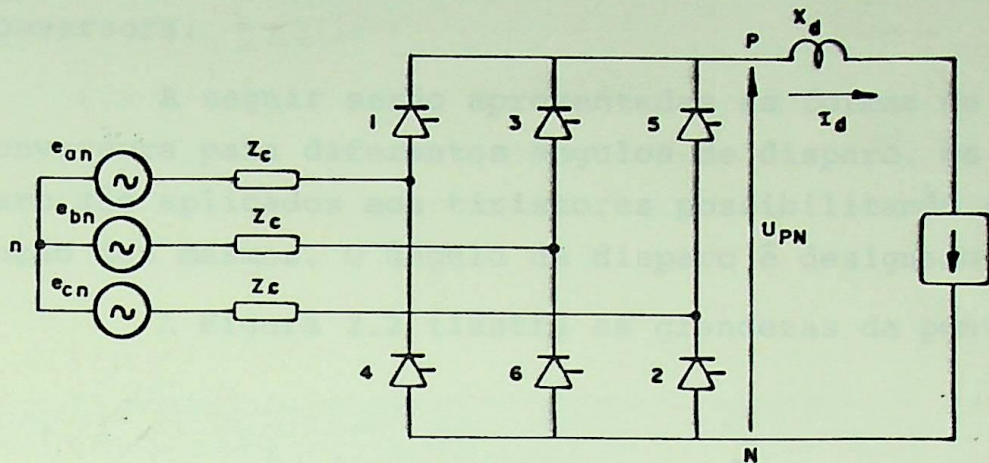


Figura 2.1 - Ponte conversora instalada em um sistema de transmissão em corrente contínua

Na Figura 2.1 tem-se:

- $e_{an}; e_{bn}; e_{cn}$ : forças eletromotrizes de alimentação da ponte conversora;
- $X_d$ : reatância do indutor de alisamento;
- $Z_c$ : impedância de comutação;
- $I_d$ : corrente no lado DC considerada perfeitamente contínua e constante;
- UPN: tensão entre o polo positivo e polo negativo.

A impedância de comutação é constituída de uma resistência em série com reatância. O efeito da resistência será posteriormente considerado no item 2.4.

2.2.2 - Equacionamento e Formas de Onda para a Ponte Conversora de 6 Pulsos Desprezando-se o Efeito da Comutação

Os números que aparecem junto às válvulas tiristorizadas da Figura 2.1 representam a sequência com que as mesmas são disparadas. As forças eletromotrizes de alimentação da ponte conversora são dadas pelas equações:

$$e_{an} = E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6) \tag{2.1}$$

$$e_{bn} = E_m \text{sen}(\omega t - \pi/2) \tag{2.2}$$

$$e_{cn} = E_m \sin(\omega t - 7\pi/6)$$

(2.3)

sendo  $E_m$ : valor máximo da tensão fase neutro de alimentação da ponte conversora.

A seguir serão apresentadas as formas de onda da ponte conversora para diferentes ângulos de disparo. Os pulsos de disparo são aplicados aos tiristores possibilitando a entrada em condução dos mesmos. O ângulo de disparo é designado por  $\alpha$ .

A Figura 2.2 ilustra as grandezas da ponte conversora.

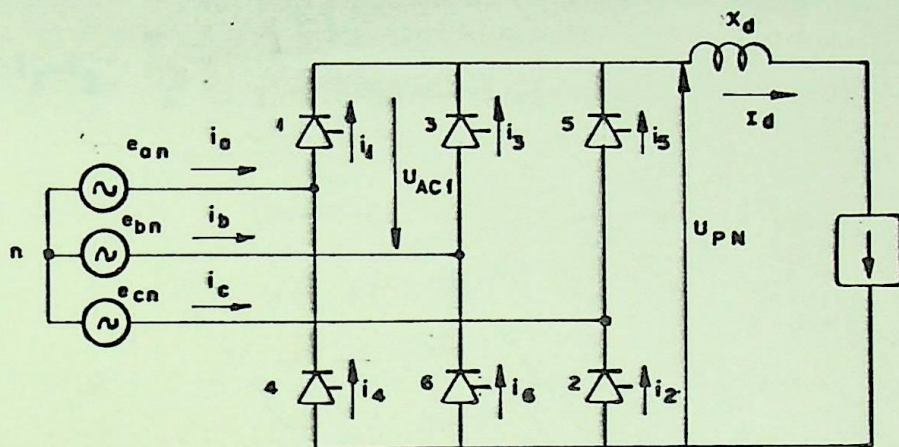


Figura 2.2 - Grandezas da ponte conversora

Na Figura 2.2 tem-se:

- UPN: Tensão polo positivo polo negativo
- UP<sub>n</sub>: Tensão polo positivo neutro
- UN<sub>n</sub>: Tensão polo negativo neutro
- i<sub>1</sub>: Corrente na válvula 1
- i<sub>2</sub>: Corrente na válvula 2
- i<sub>3</sub>: Corrente na válvula 3
- i<sub>4</sub>: Corrente na válvula 4
- i<sub>5</sub>: Corrente na válvula 5
- i<sub>6</sub>: Corrente na válvula 6
- i<sub>a</sub>: Corrente na fase a de alimentação da ponte conversora
- i<sub>b</sub>: Corrente na fase b de alimentação da ponte conversora
- i<sub>c</sub>: Corrente na fase c de alimentação da ponte conversora
- I<sub>d</sub>: Corrente contínua na saída da ponte
- U<sub>AC1</sub>: Tensão anodo catodo na válvula 1

### 2.2.2.1 - Ponte conversora controlada $-\alpha=0^\circ$

A Figura 2.3 ilustra as formas de onda da ponte retificadora de 6 pulsos para ângulo de disparo  $\alpha=0^\circ$ . Desta forma, a parte tiristorizada se comporta como se fosse uma ponte não controlada a diodos. O efeito da comutação foi por ora desprezado de modo que a corrente se transfere instantaneamente de uma válvula para outra. As correntes nas fases são dadas por:

$$i_a = i_1 - i_4 \quad (2.4)$$

$$i_b = i_3 - i_6 \quad (2.5)$$

$$i_c = i_5 - i_2 \quad (2.6)$$

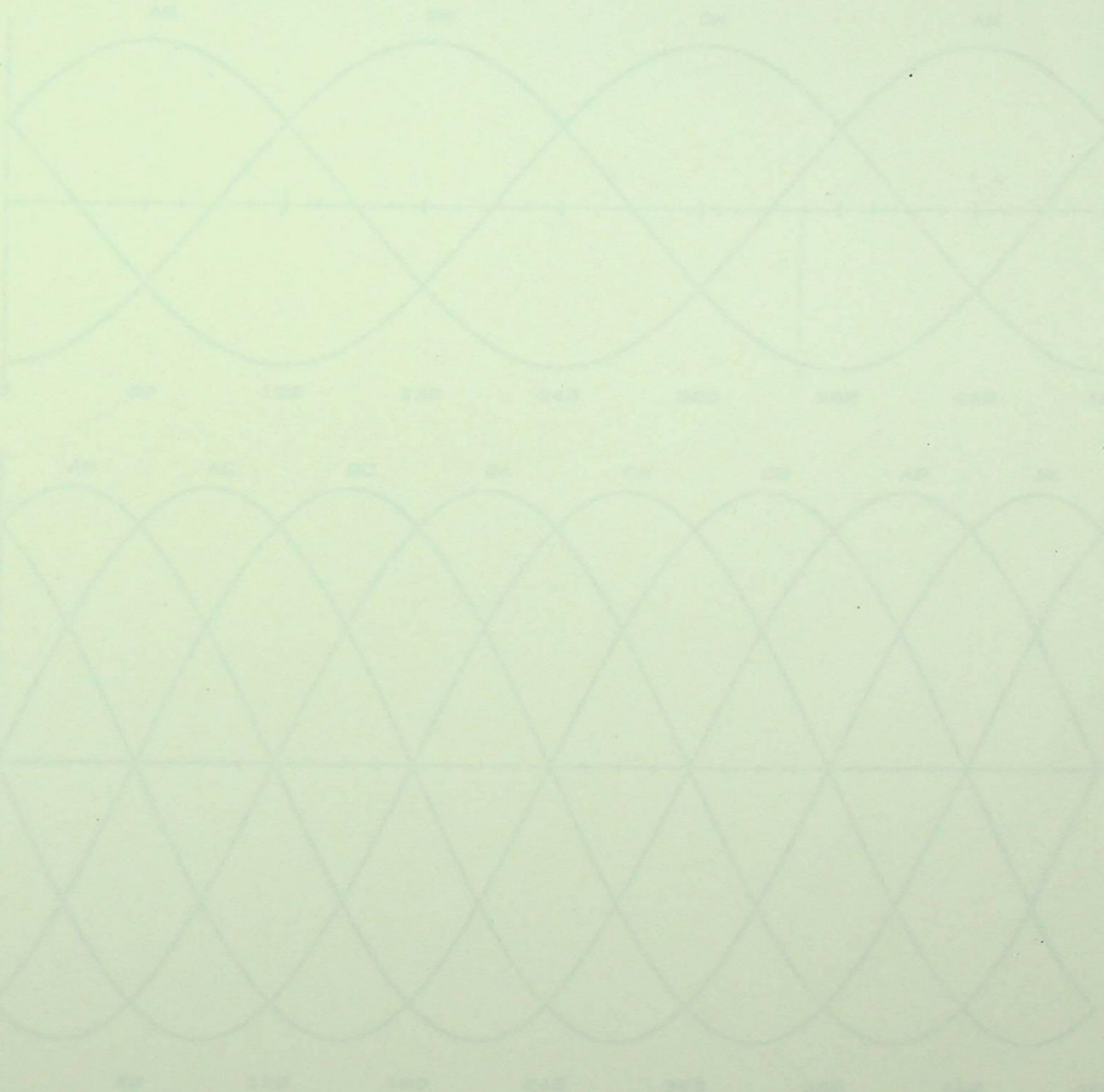
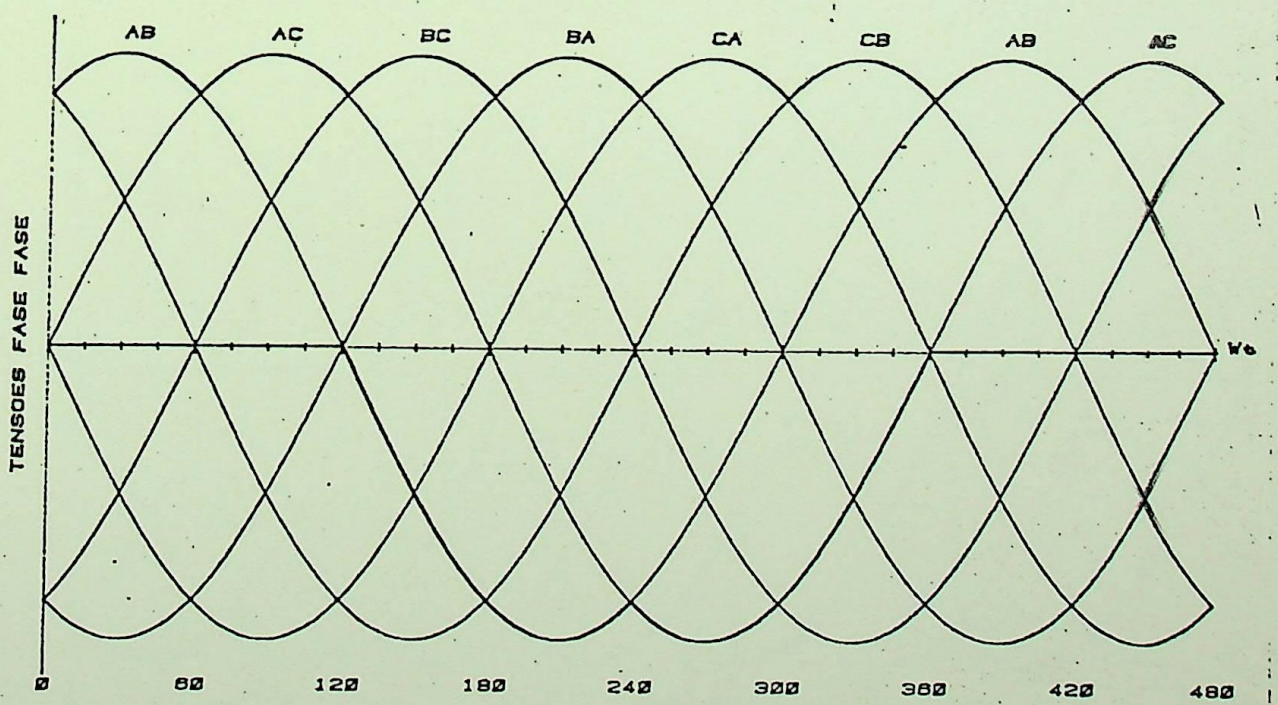
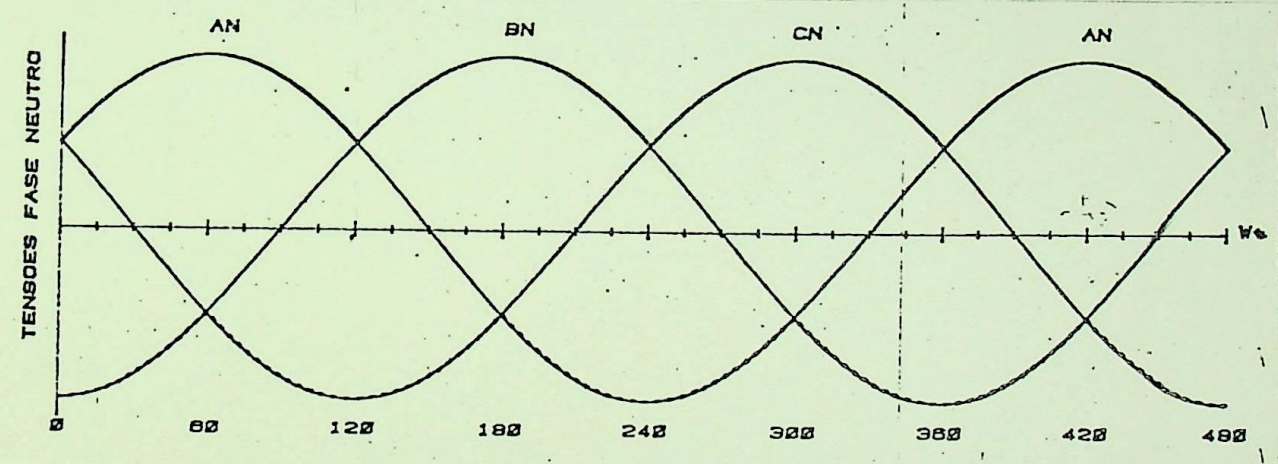
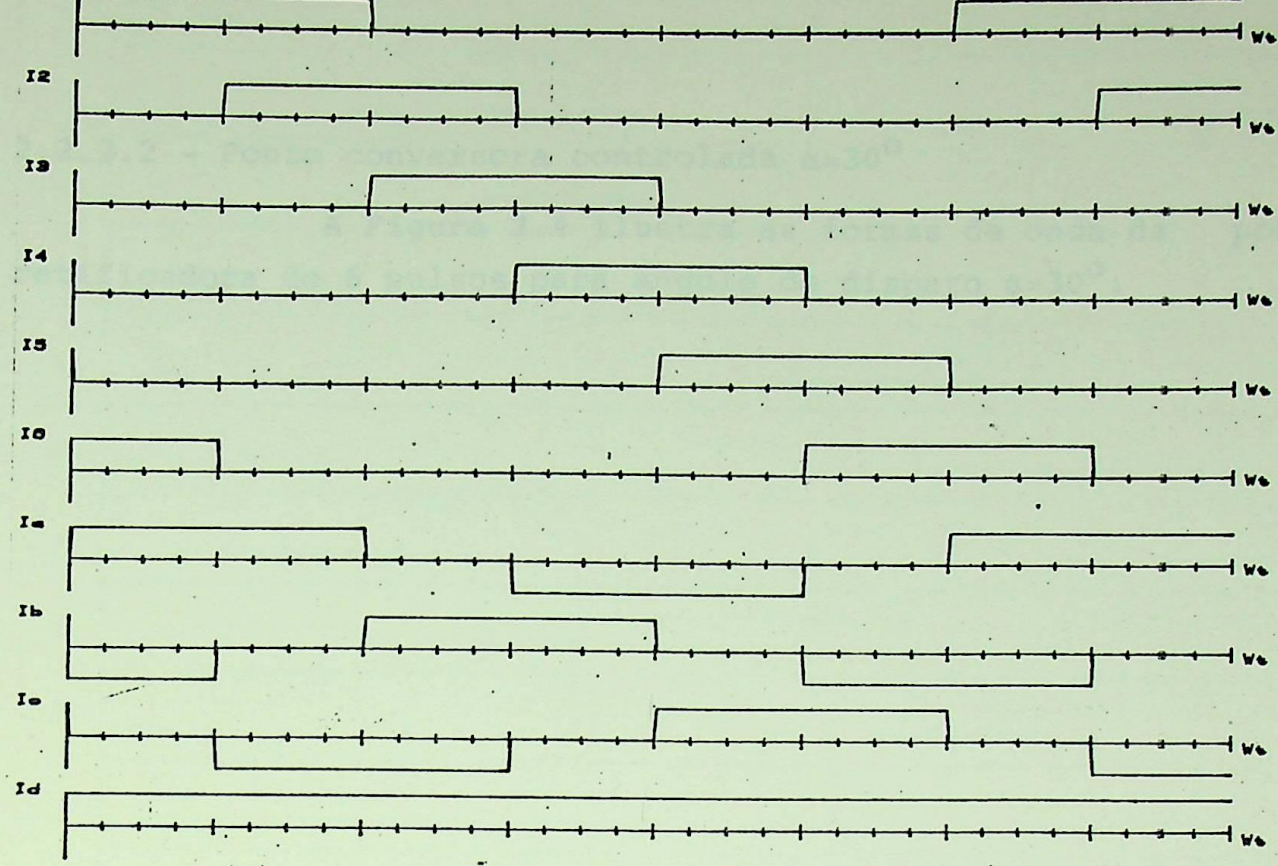


Figura 2.3 - Formas de onda para ponte retificadora controlada  $\alpha=0^\circ$



ALFA = .00 GRAUS MU = .00 GRAUS UPn UNn UPN UV1-

Figura 2.3 - Formas de onda para ponte retificadora controlada  $\alpha=0^\circ$

2.2.2.2 - Ponte conversora controlada  $\alpha=30^\circ$

A Figura 2.4 ilustra as formas de onda da ponte retificadora de 6 pulsos para ângulo de disparo  $\alpha=30^\circ$ .

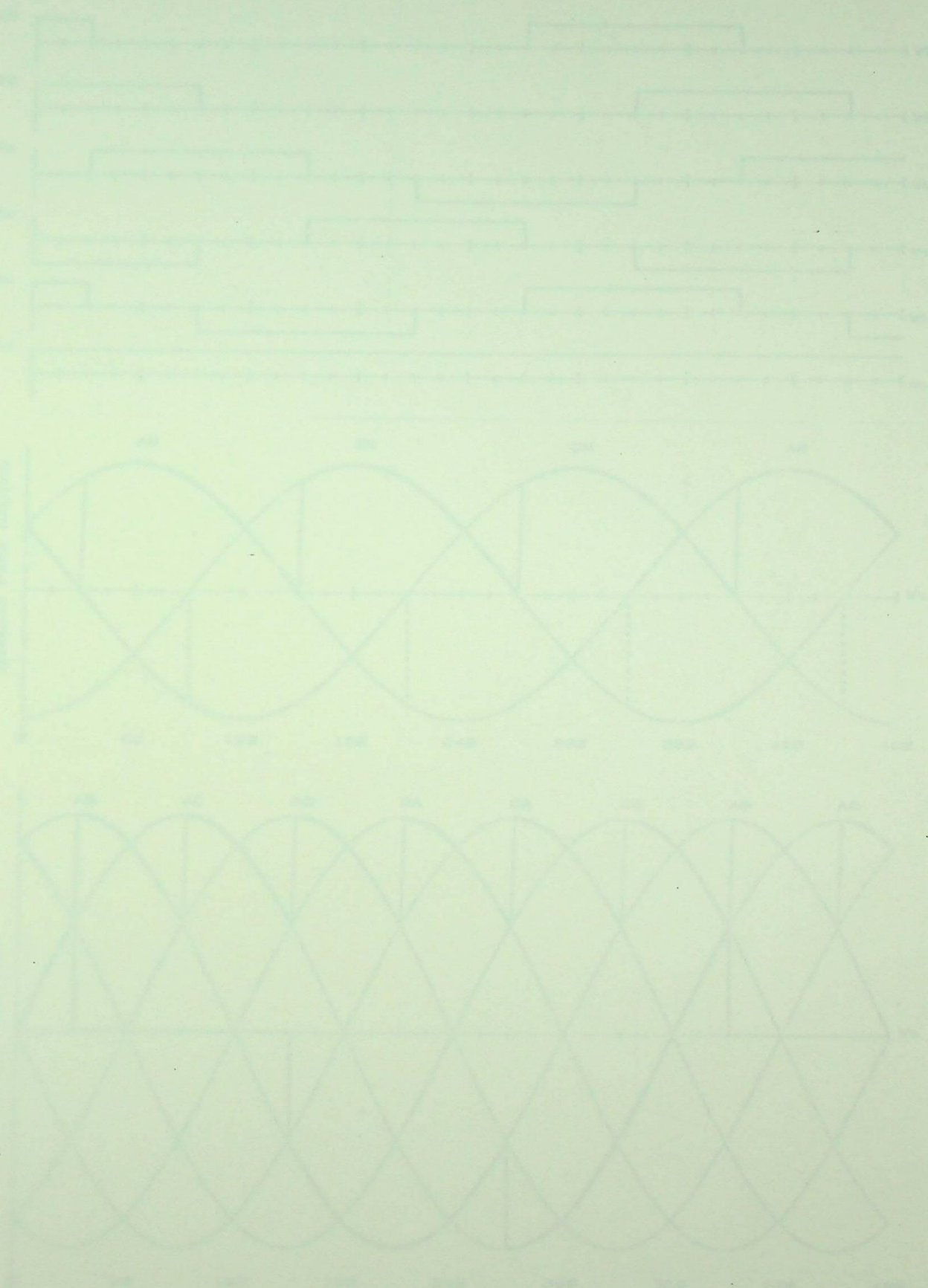
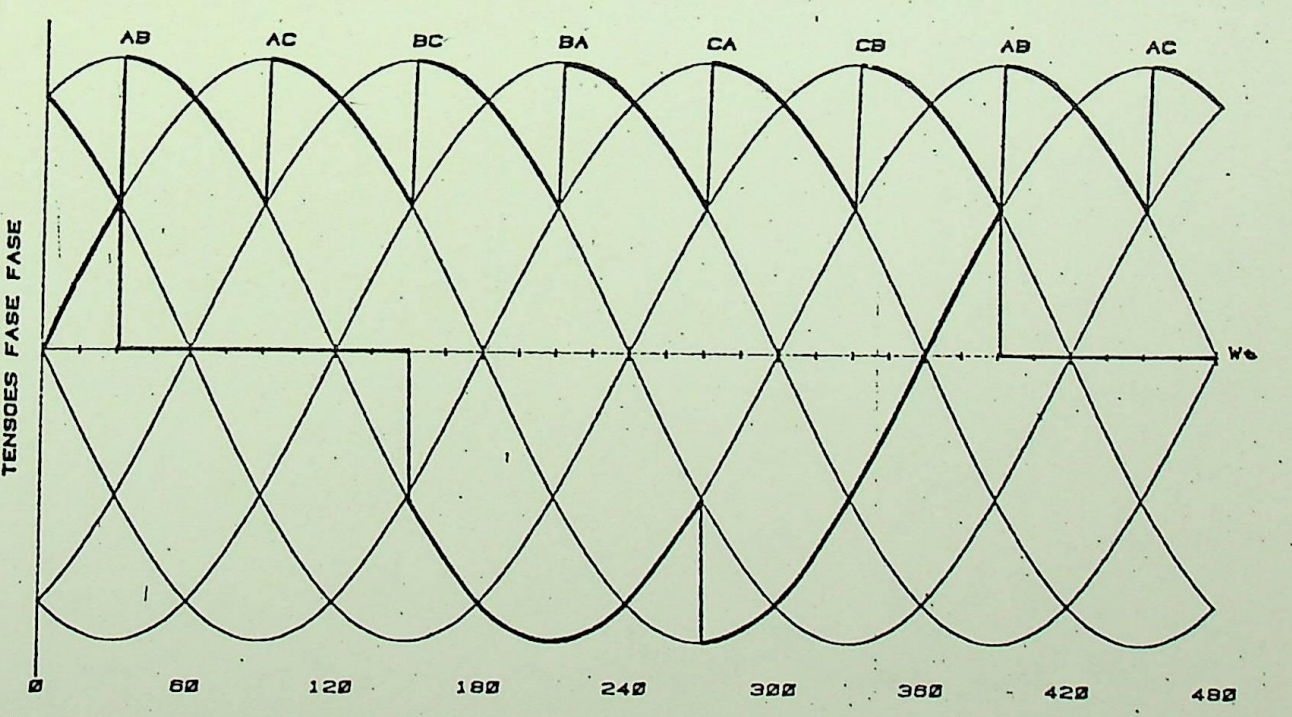
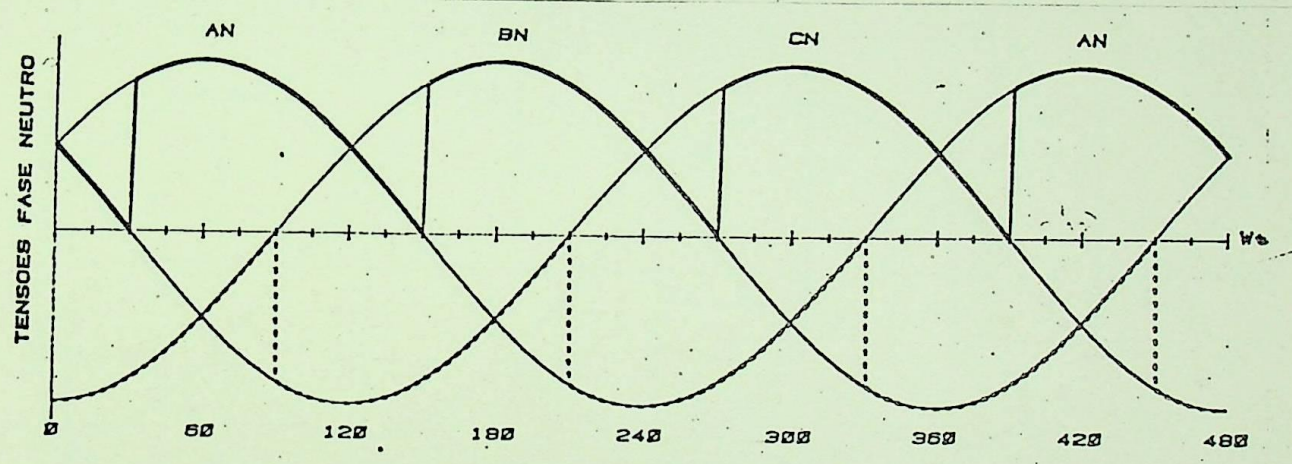
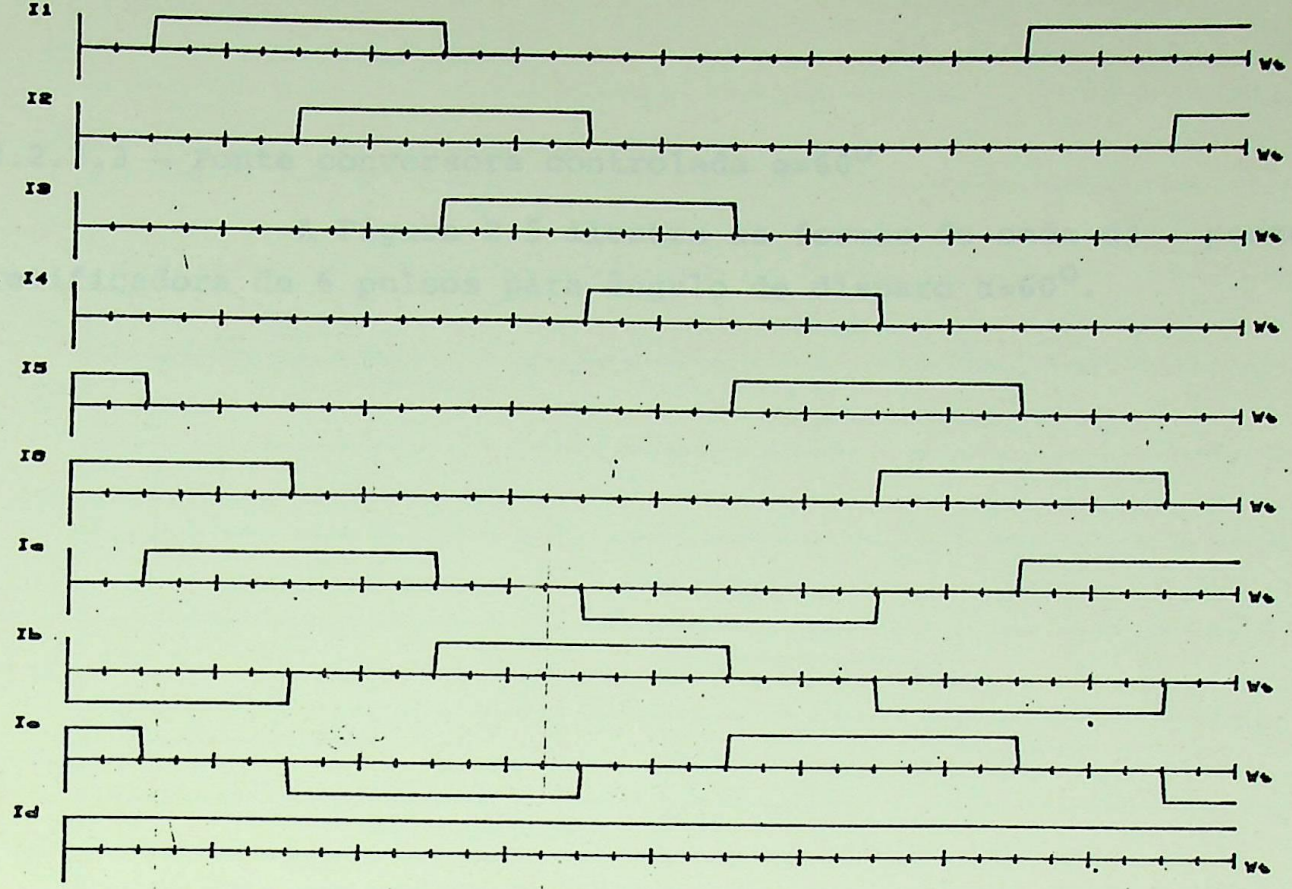


Figura 2.4 - Formas de onda para ponte retificadora  $\alpha=30^\circ$



ALFA = 30.00 GRAUS MU = .00 GRAUS UPn- UNn-UPN- UV1-

Figura 2.4 - Formas de onda para ponte retificadora  $\alpha=30^{\circ}$

### 2.2.2.3 - Ponte conversora controlada $\alpha=60^\circ$

A Figura 2.5 ilustra as formas de onda da ponte retificadora de 6 pulsos para ângulo de disparo  $\alpha=60^\circ$ .

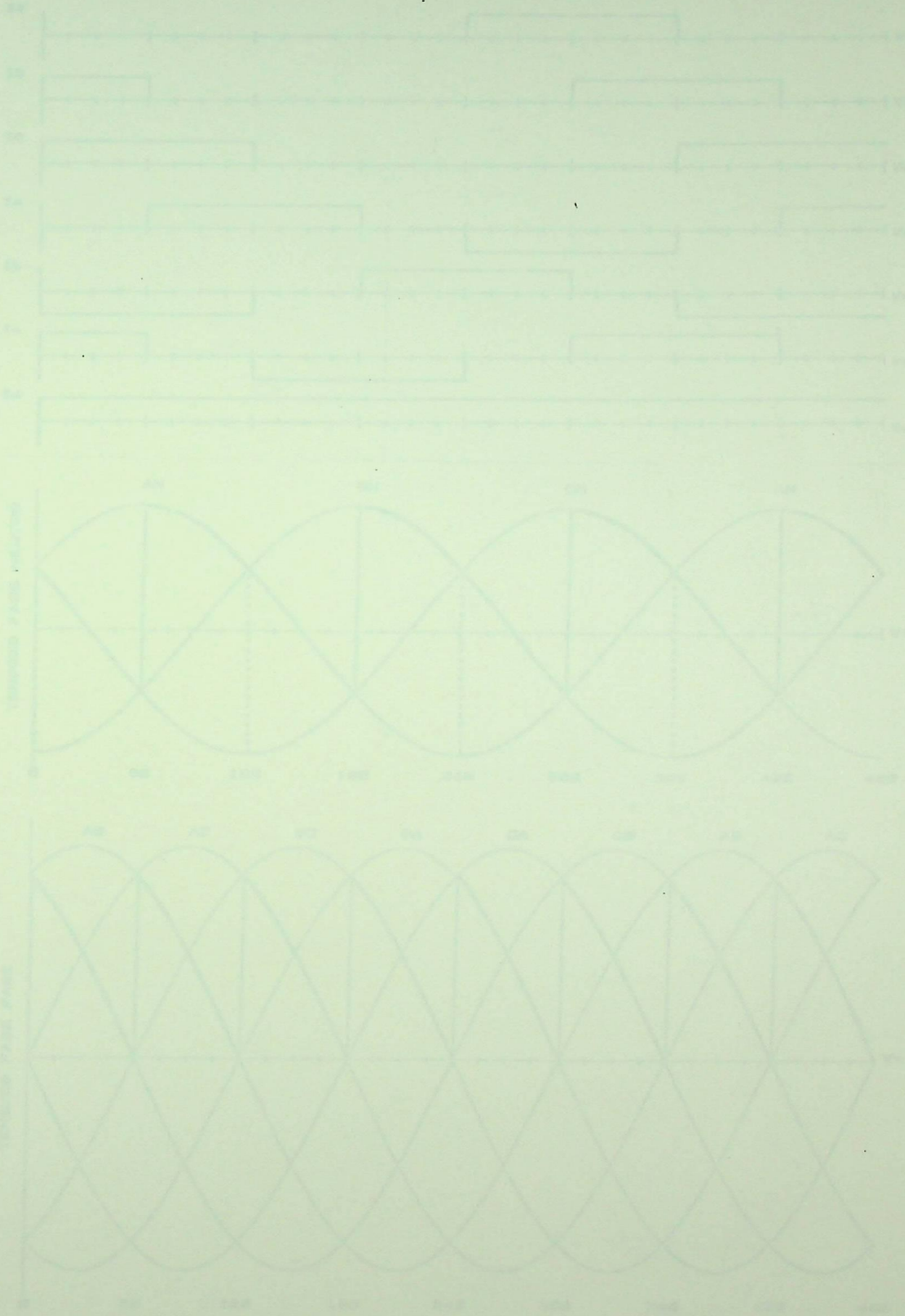
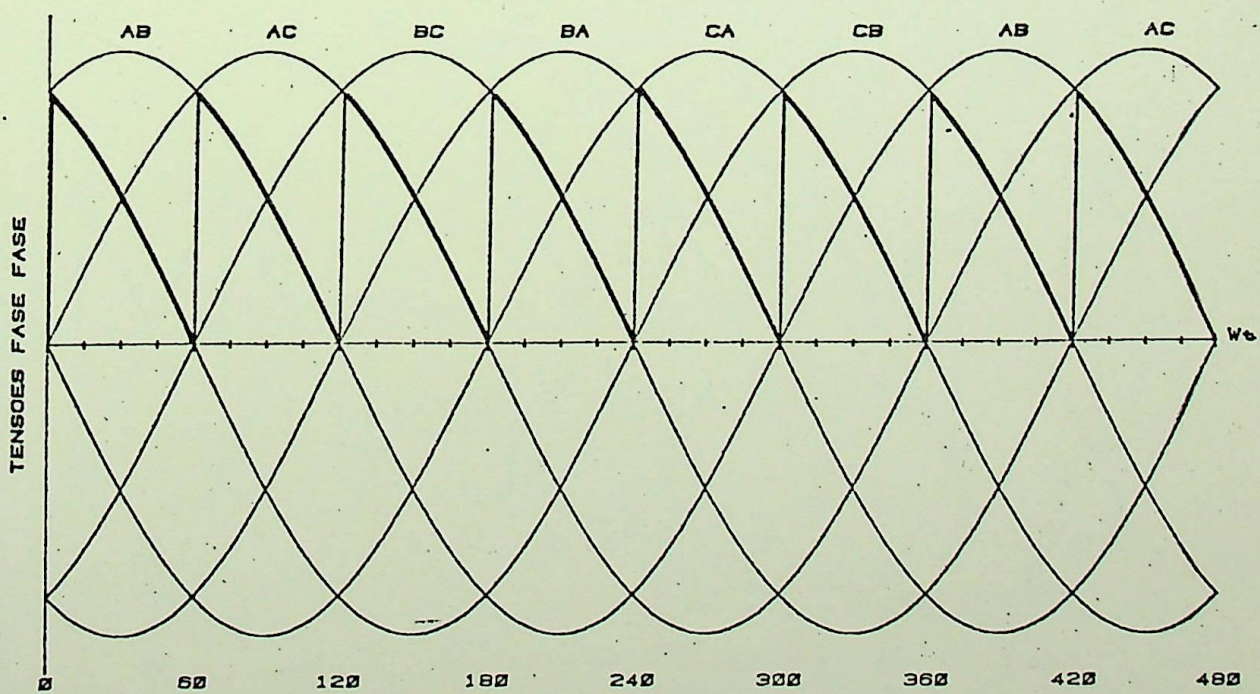
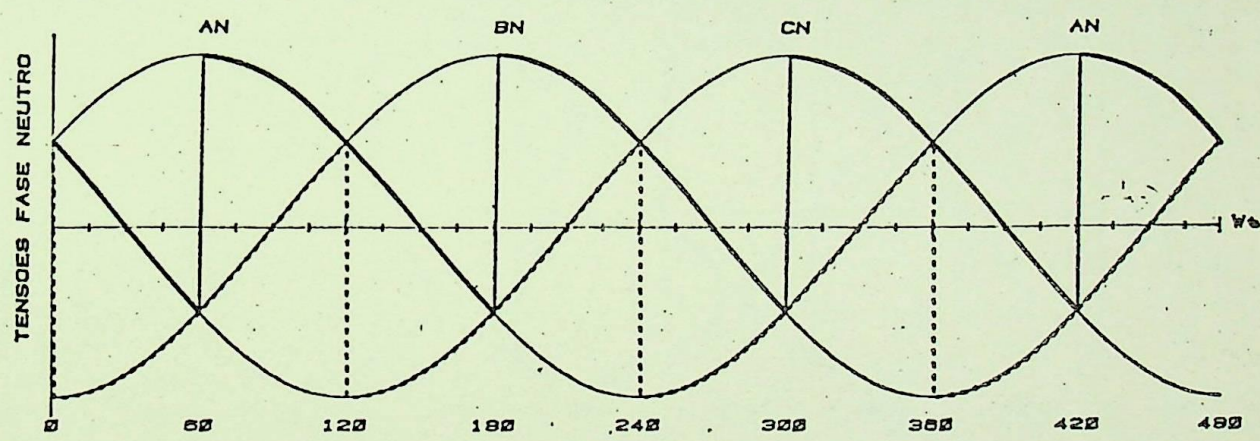
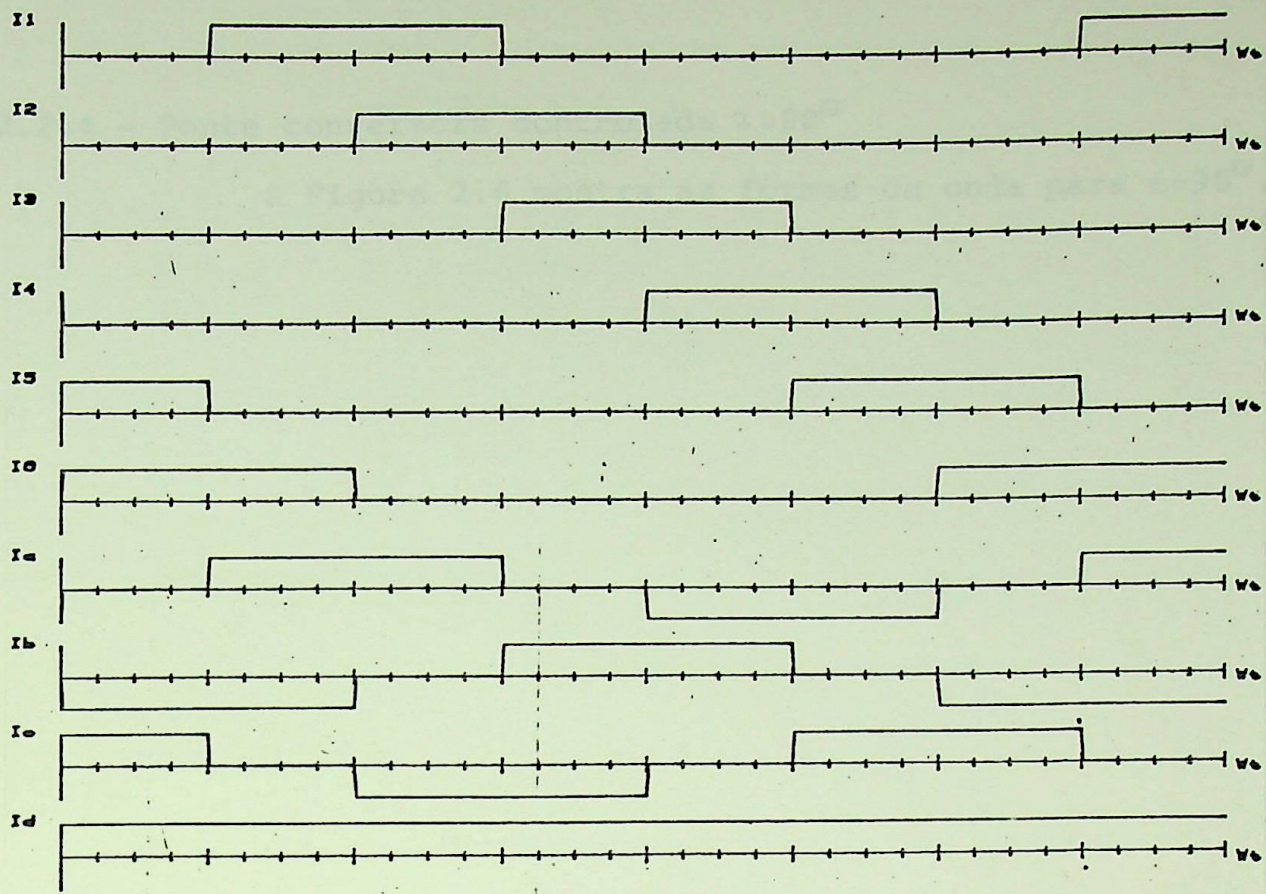


Figura 2.5 - Formas de onda para ponte retificadora controlada  $\alpha=60^\circ$



ALFA = 02.00 GRAUS MU = .00 GRAUS UPn-UNn-UPN-

Figura 2.5 - Formas de onda para parte retificadora controlada  $\alpha=60^\circ$

2.2.2.4 - Ponte conversora controlada  $\alpha=90^\circ$

A Figura 2.6 mostra as formas de onda para  $\alpha=90^\circ$ .

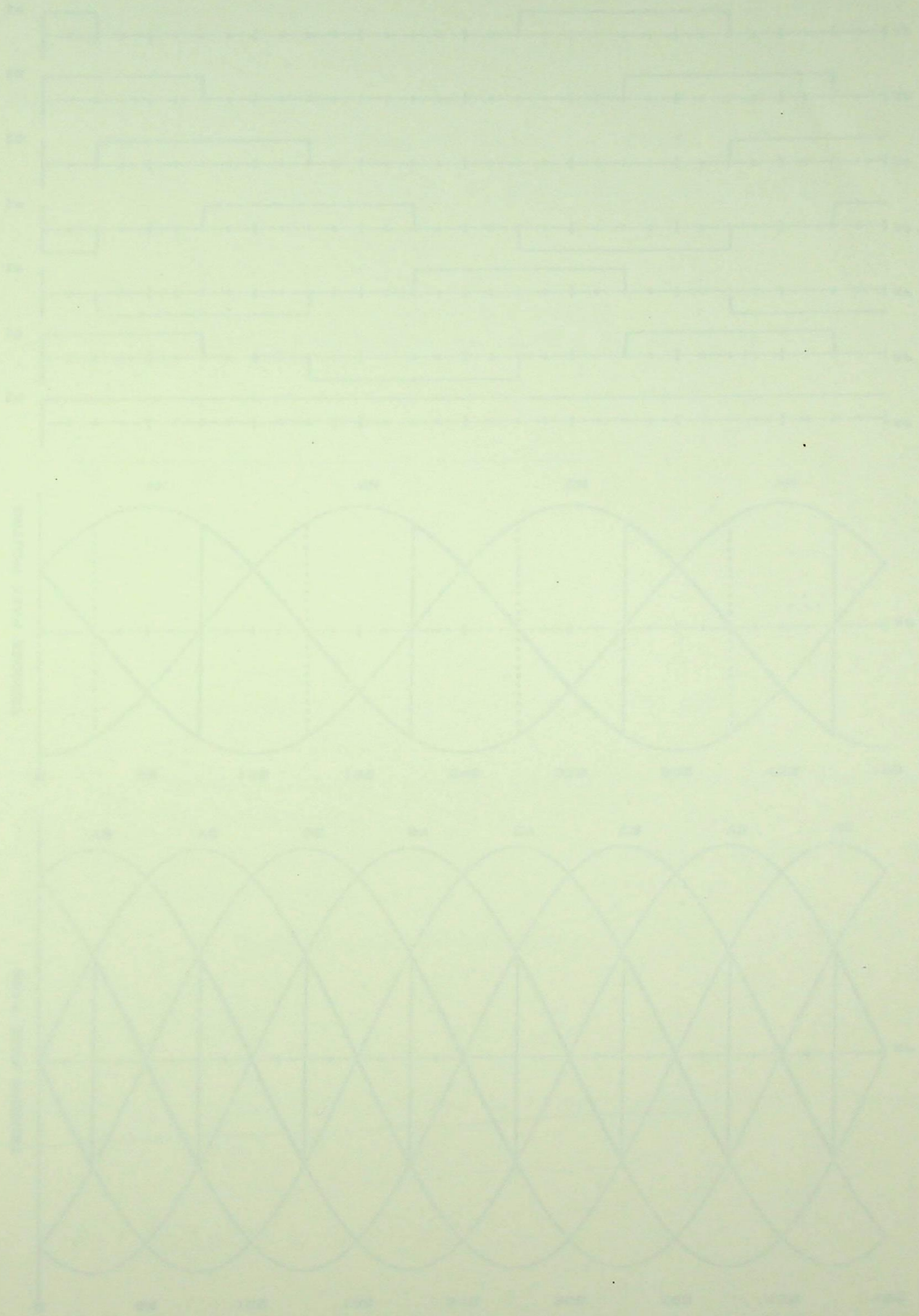
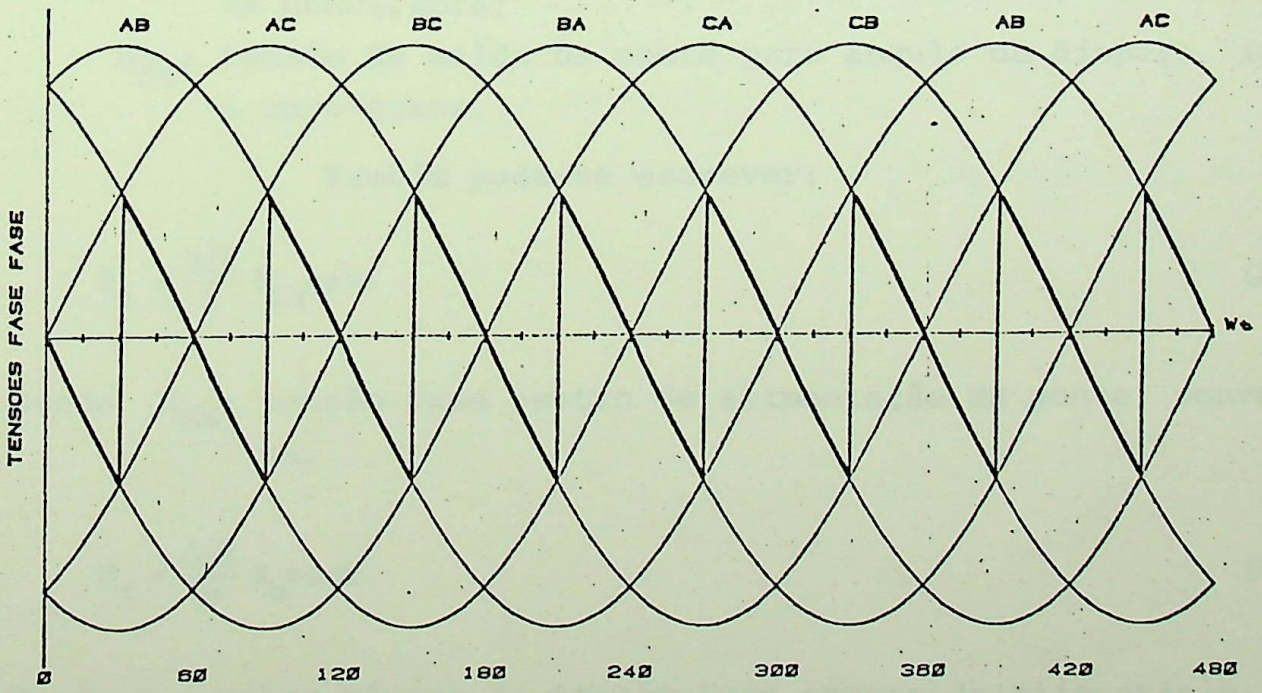
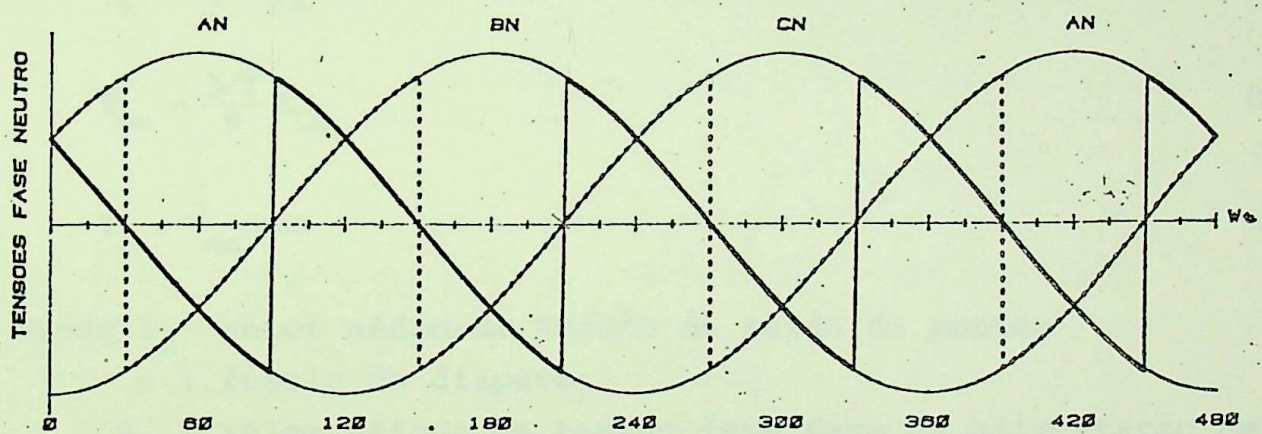
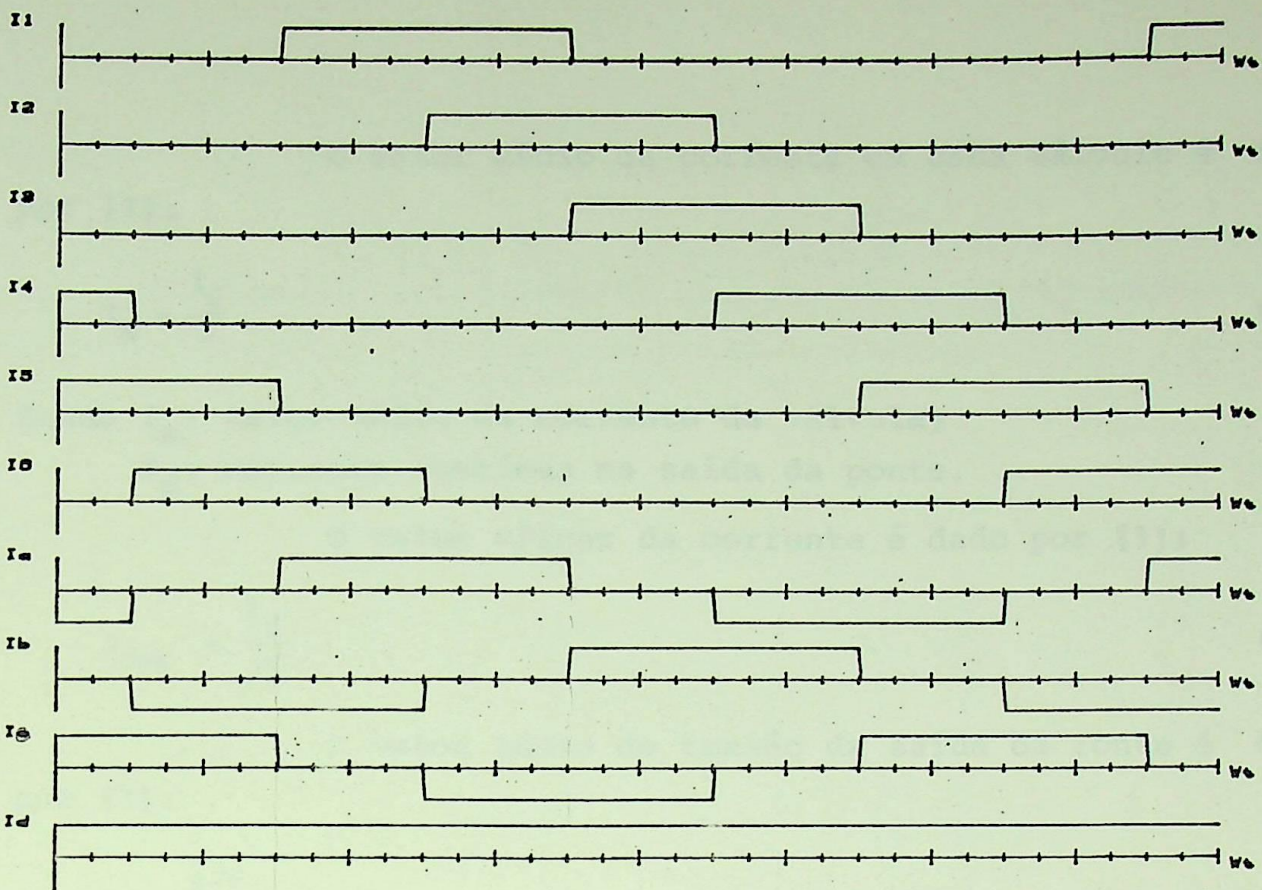


Figura 2.6 - Formas de onda para ponte conversora controlada  $\alpha=90^\circ$



ALFA = 90.00 GRAUS MU = 0.00 GRAUS UPN- UNn-UPN-

Figura 2.6 - Formas de onda para ponte conversora  $\alpha=90^\circ$

O valor médio da corrente em cada válvula é dado por [1]:

$$I_m = \frac{I_d}{3} \quad (2.7)$$

Sendo  $I_m$ : valor médio da corrente da válvula;  
 $I_d$ : corrente contínua na saída da ponte.

O valor eficaz da corrente é dado por [1]:

$$I_{rms} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

O valor médio de tensão da saída da fonte é dado por [1]:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} \cos\alpha \quad (2.9)$$

$$U_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} \quad (2.10)$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha \quad (2.11)$$

Sendo  $U_d$ : valor médio da tensão de saída da ponte;  
 $\alpha$ : ângulo de disparo;  
 $E_{LL}$ : valor eficaz da tensão fase fase de alimentação da ponte conversora;  
 $U_{do}$ : tensão de saída da ponte para ângulo de disparo igual a zero graus.

Também pode-se escrever:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} \cos\alpha \quad (2.12)$$

Sendo  $E_{LN}$ : tensão fase neutro de alimentação da ponte conversora.

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos\alpha \quad (2.13)$$

Sendo  $E_m$ : valor máximo da tensão fase neutro de alimentação da ponte conversora.

### 2.2.3 - Análise da Ponte Conversora Funcionando como Inversora

A Figura 2.7 ilustra a ponte inversora instalada em um sistema de transmissão de energia elétrica em corrente contínua, ou seja, a corrente é mantida constante.

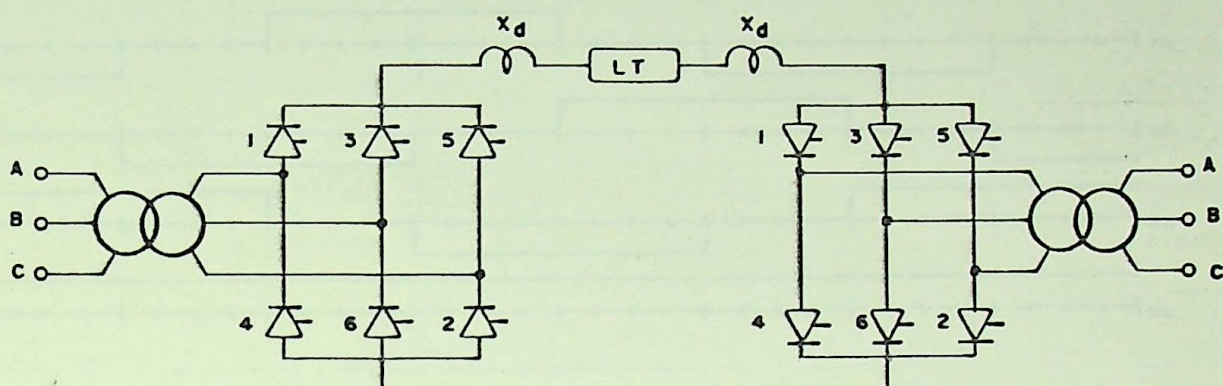
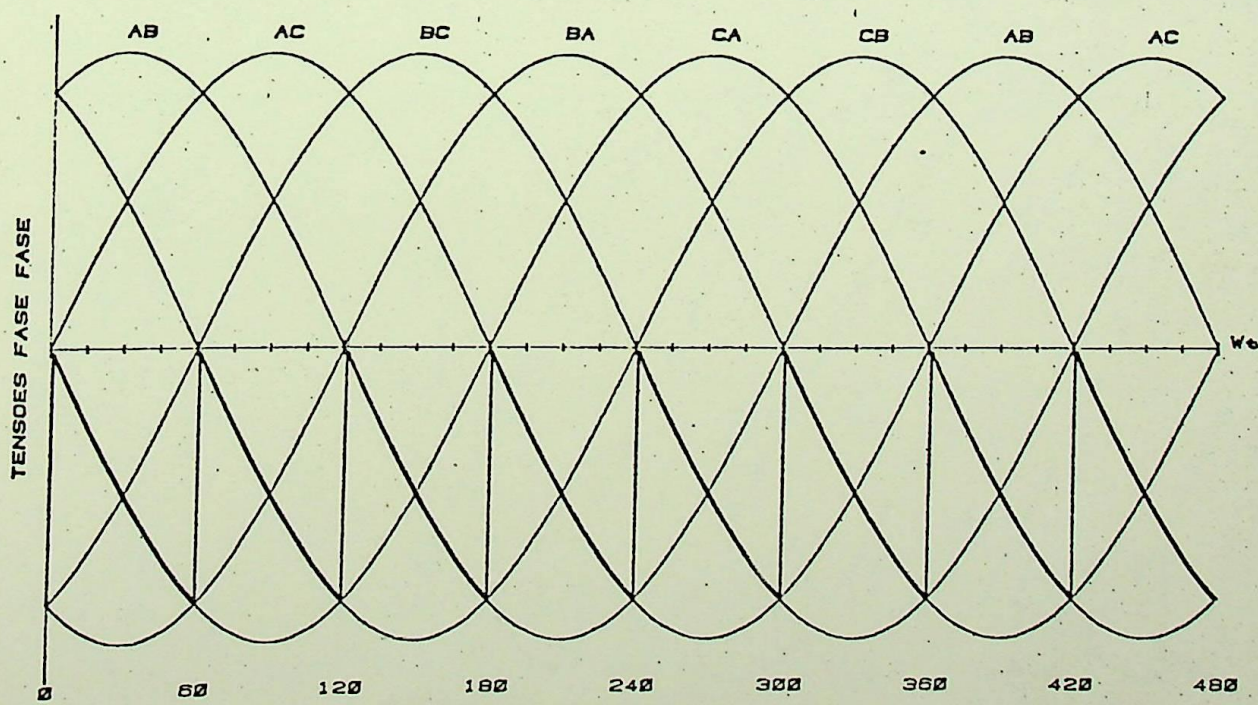
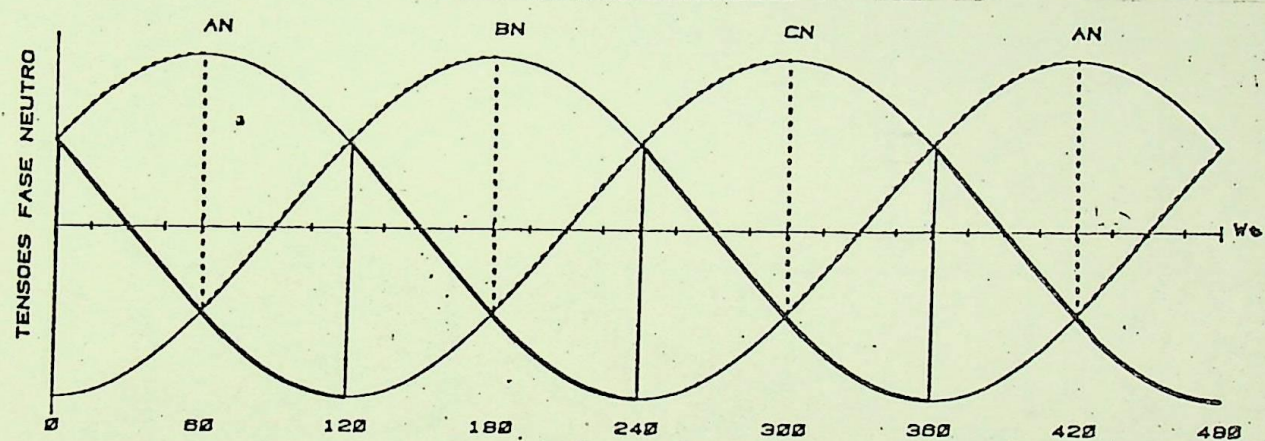
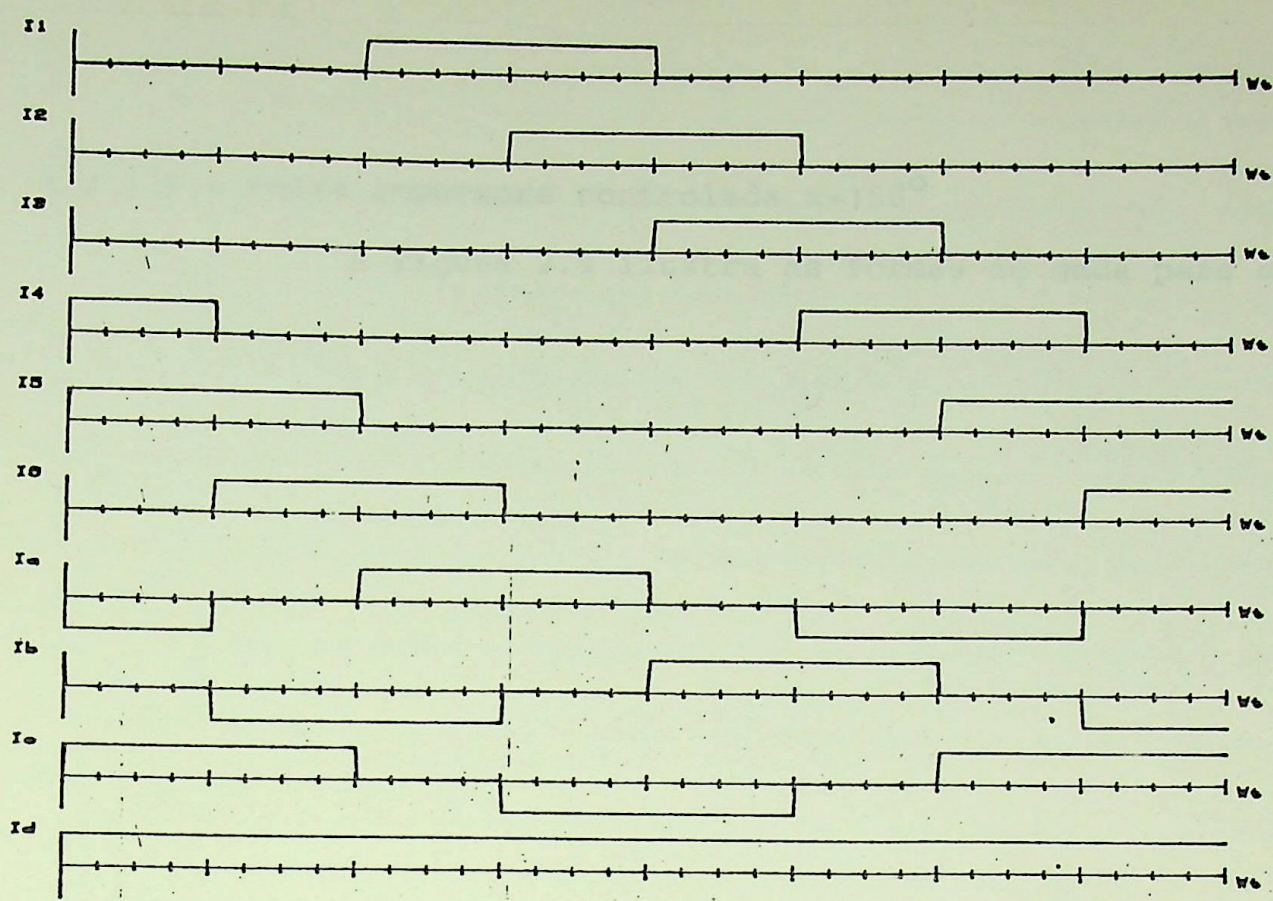


Figura 2.7 - Ponte inversora instalada em um sistema de transmissão em corrente contínua

Desprezando-se a comutação, o ângulo de disparo da ponte inversora está compreendido na faixa  $90 < \alpha < 180$ . Nesta faixa de valores a tensão média de saída da ponte é negativa. A ponte funciona como inversora havendo transferência de potência para a rede. As formas de onda da ponte inversora para diferentes ângulos de disparo são apresentadas a seguir.

#### 2.2.3.1 - Ponte inversora controlada $\alpha = 120^\circ$

A Figura 2.8 mostra as formas de onda para  $\alpha = 120^\circ$ .



ALFA = 120.00 GRAUS MU = .00 GRAUS UPn- UNn--UPN-

Figura 2.8 - Formas de onda da ponte inversora  $\alpha=120^\circ$

2.2.3.2 - Ponte inversora controlada  $\alpha=150^\circ$ 

A Figura 2.9 ilustra as formas de onda para  $\alpha=150^\circ$ .

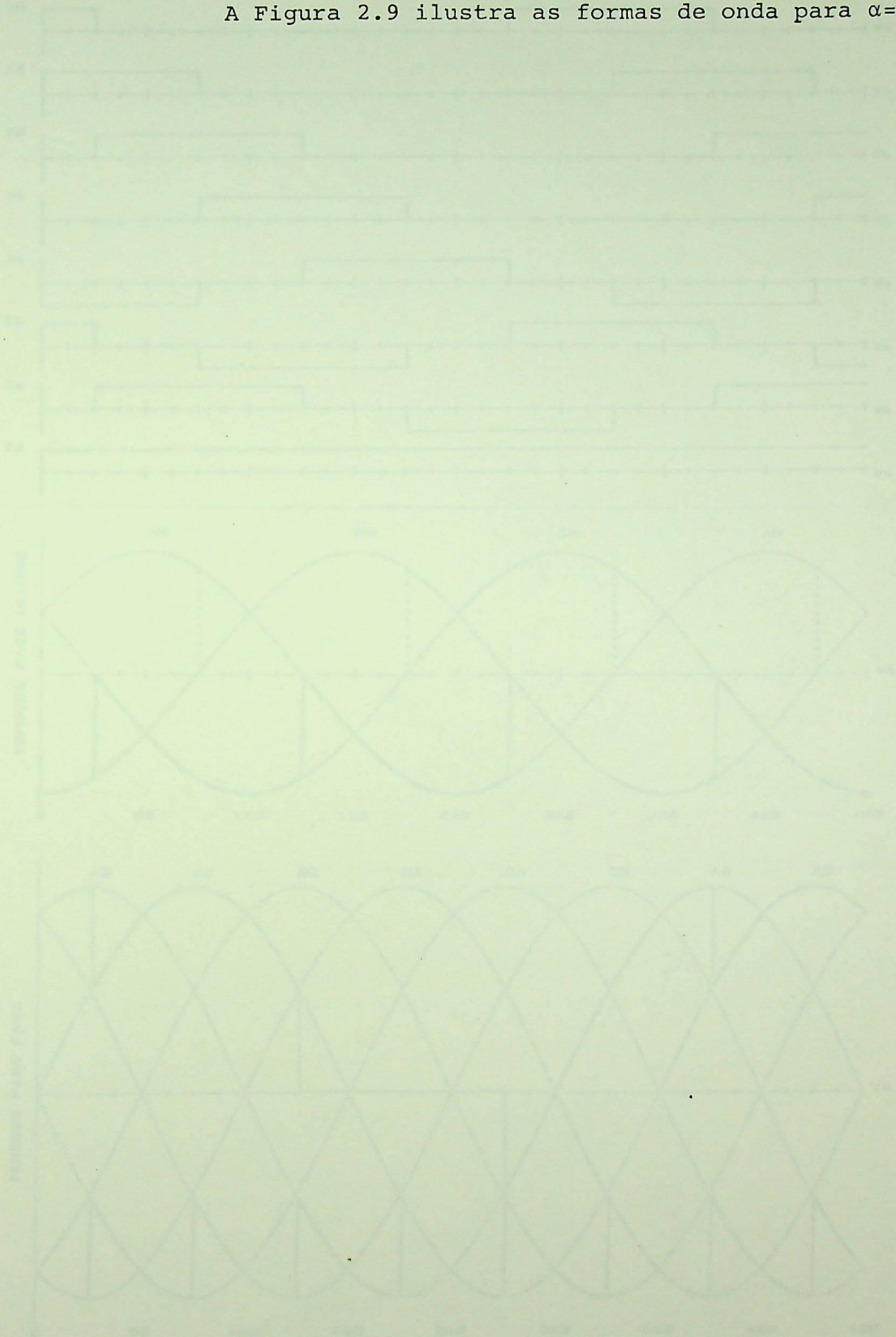
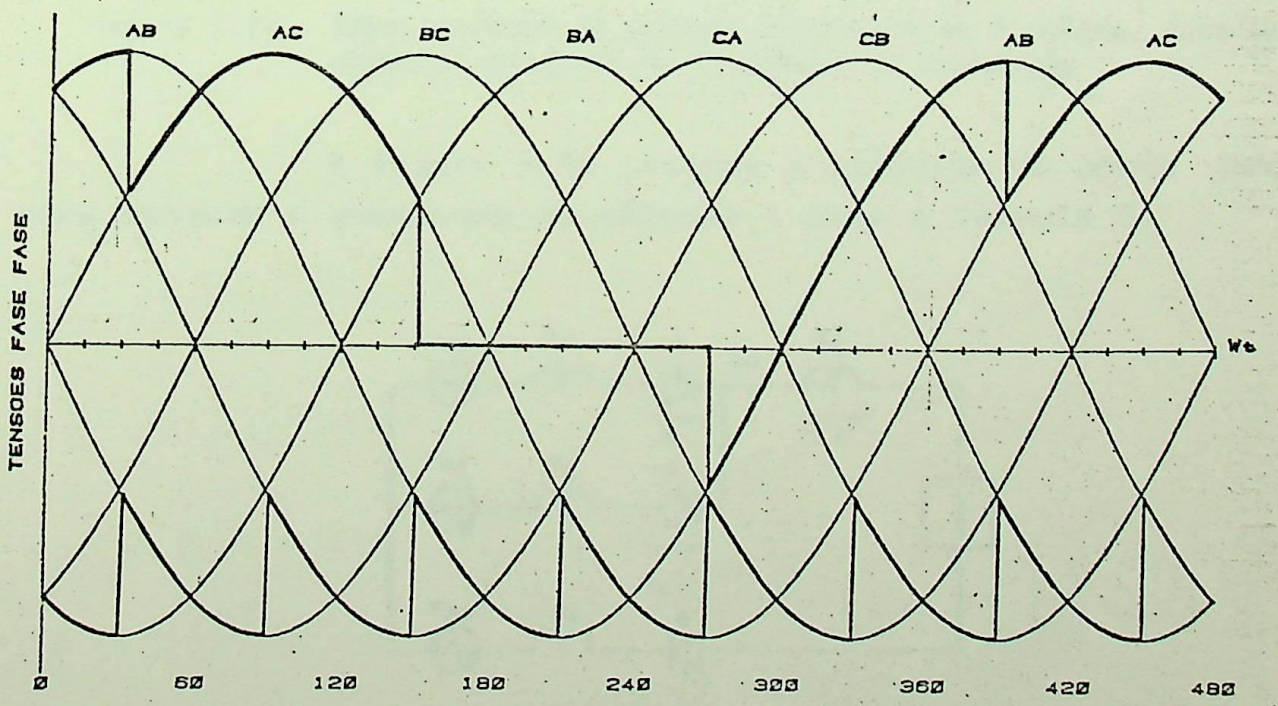
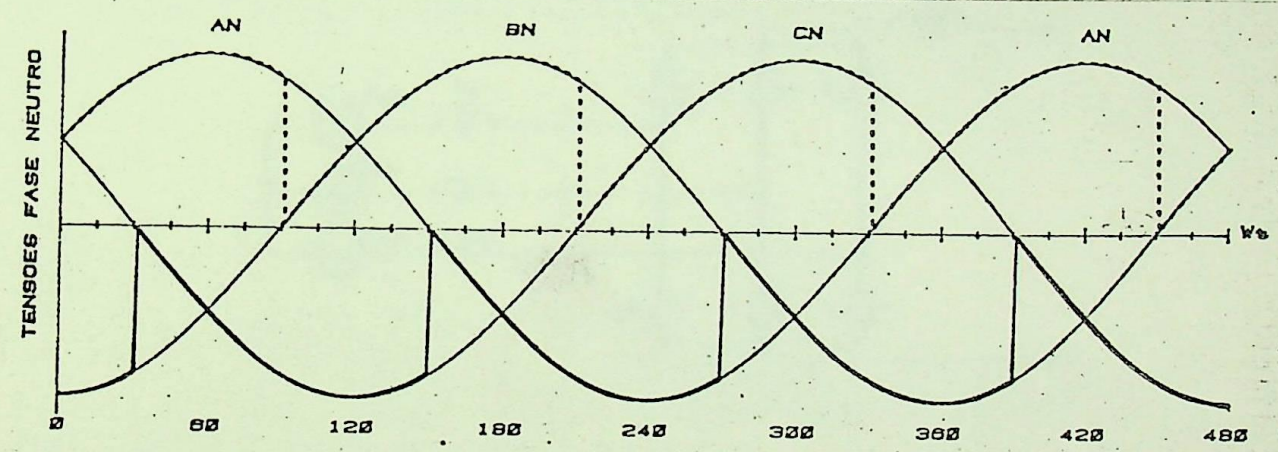
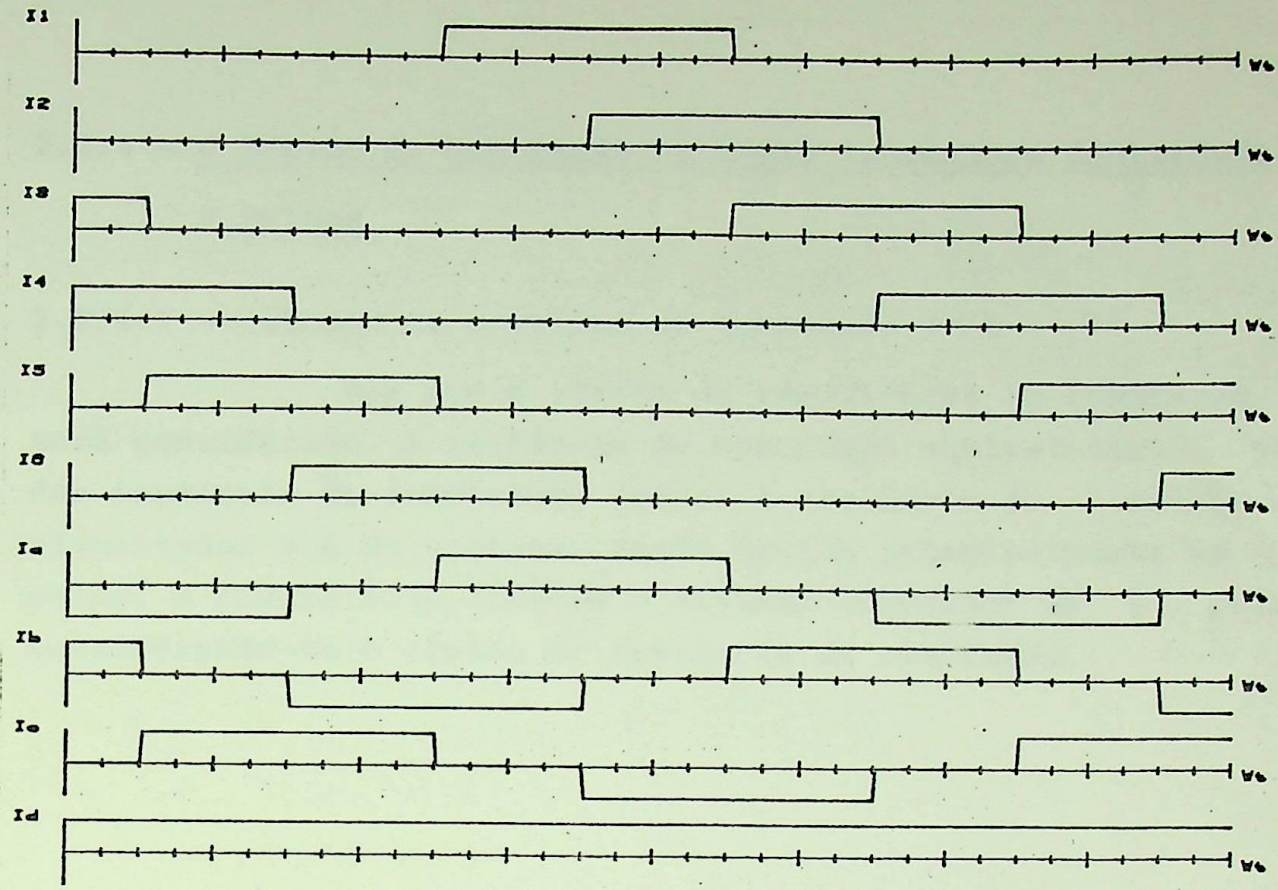


Figura 2.9 - Formas de onda para ponte inversora controlada  $\alpha=150^\circ$



ALFA = 150.00 GRAUS MU = .00 GRAUS UPn- UNn- UPn- UV1-

Figura 2.9 - Formas de onda para ponte inversora  $\alpha=150^\circ$

## 2.2.4 - O Efeito da Comutação na Ponte Conversora Controlada de 6 Pulsos

### 2.2.4.1 - Cálculo da corrente de comutação [ 1 ]

Por ora o efeito da resistência de comutação não será considerado. A reatância de comutação equivalente, vista dos terminais do conversor, inclui a reatância do transformador alimentador e a do sistema, sendo devida principalmente ao primeiro. A Figura 2.10 ilustra o sistema conversor de 6 pulsos, considerando-se o efeito da reatância de comutação.

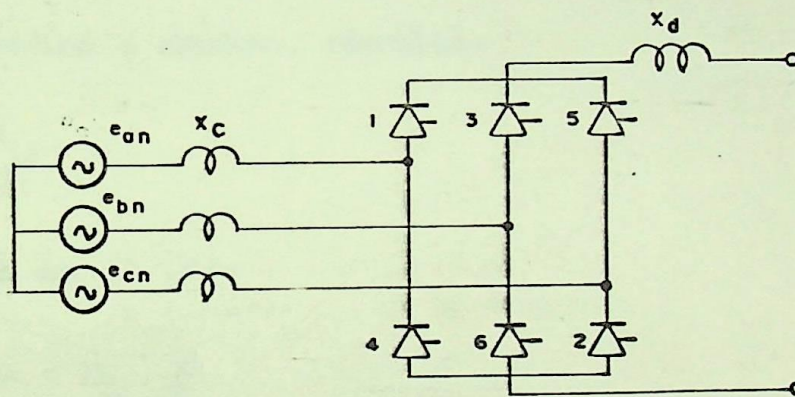


Figura 2.10 - Representação do sistema conversor de 6 pulsos, considerando-se o efeito da reatância de comutação

A Figura 2.11 ilustra o circuito da ponte conversora durante a comutação da válvula 1 para a válvula 5.

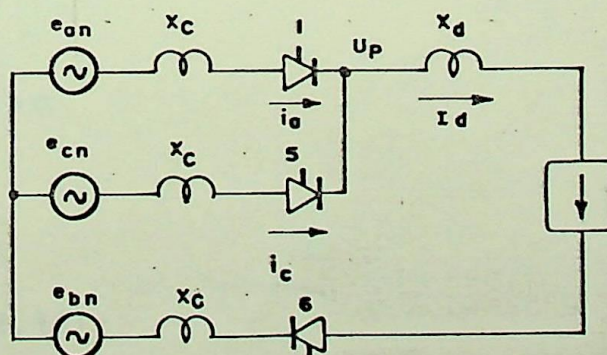


Figura 2.11 - Circuito equivalente da ponte conversora durante a comutação da válvula 1 para a válvula 5

Na Figura 2.11 tem-se:

$X_c$  → reatância de comutação;

$X_d$  → reatância do indutor de alisamento.

Durante a comutação, pode-se escrever:

$$e_{an} - e_{cn} = L_c \frac{d i_a}{dt} - L_c \frac{d i_c}{dt} \quad (2.14)$$

Sendo  $L_c$  → indutância de comutação.

Também:

$$e_{ac} = \sqrt{3} E_m \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \quad (2.15)$$

$$i_a + i_c = I_d \quad (2.16)$$

Derivando membro a membro, resulta:

$$\frac{d i_c}{dt} = - \frac{d i_a}{dt} \quad (2.17)$$

Substituindo em (2.14):

$$\sqrt{3} E_m \sin \omega t = 2L_c \frac{d i_a}{dt} \quad (2.18)$$

Integrando membro a membro:

$$\begin{aligned} \int 2L_c d i_a &= \int \sqrt{3} E_m \sin \omega t dt \\ 2L_c i_a &= - \frac{\sqrt{3} E_m}{\omega} \cos \omega t + c \end{aligned} \quad (2.19)$$

Mas  $i_a = 0$  para  $\omega t = \alpha$ , logo:

$$\begin{aligned} 0 &= - \frac{\sqrt{3} E_m}{\omega} \cos \alpha + c \\ c &= \frac{\sqrt{3} E_m}{\omega} \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.20)$$

Substituindo em (2.19):

$$2L_c i_a = \frac{\sqrt{3} E_m}{\omega} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

Logo:

$$i_a = \frac{\sqrt{3} E_m}{2X_c} (\cos\alpha - \cos\omega t) \quad (2.21)$$

Definindo

$$I_{s2} = \frac{\sqrt{3} E_m}{2X_c} \quad (2.22)$$

Resulta:

$$i_a = I_{s2} (\cos\alpha - \cos\omega t) \quad (2.23)$$

$$i_c = I_d - i_a$$

$$i_c = I_d - I_{s2} (\cos\alpha - \cos\omega t) \quad (2.24)$$

A Figura 2.12 ilustra a comutação da válvula 1 para a válvula 5.

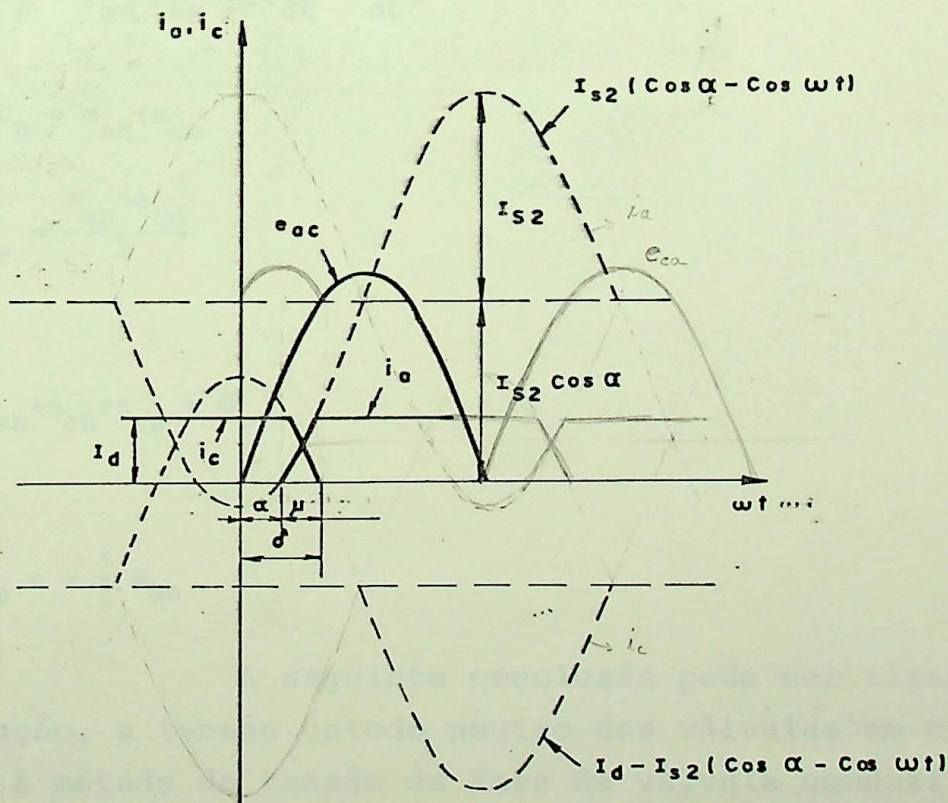


Figura 2.12 - Comutação da válvula 1 para a válvula 5

Na Figura 2.12 tem-se:

- $i_a$ : corrente na válvula 1;
- $i_c$ : corrente na válvula 5;
- $I_d$ : corrente contínua no lado DC;
- $\alpha$ : ângulo de disparo;
- $\mu$ : ângulo de comutação.

O ângulo  $\delta$  é igual à soma do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) e do ângulo de comutação ( $\mu$ ).

$$\delta = \alpha + \mu \quad (2.25)$$

Da Figura 2.11 pode-se escrever:

$$U_p = e_{an} - L_c \frac{d i_a}{dt} \quad (2.26)$$

$$U_p = e_{cn} - L_c \frac{d i_c}{dt} \quad (2.27)$$

Somando as equações (2.26) e (2.27), resulta:

$$2U_p = e_{an} + e_{cn} - L_c \left( \frac{d i_a}{dt} + \frac{d i_c}{dt} \right) \quad (2.28)$$

$$U_p = \frac{e_{an} + e_{cn}}{2}$$

Mas:

$$e_{an} + e_{bn} + e_{cn} = 0 \quad (2.29)$$

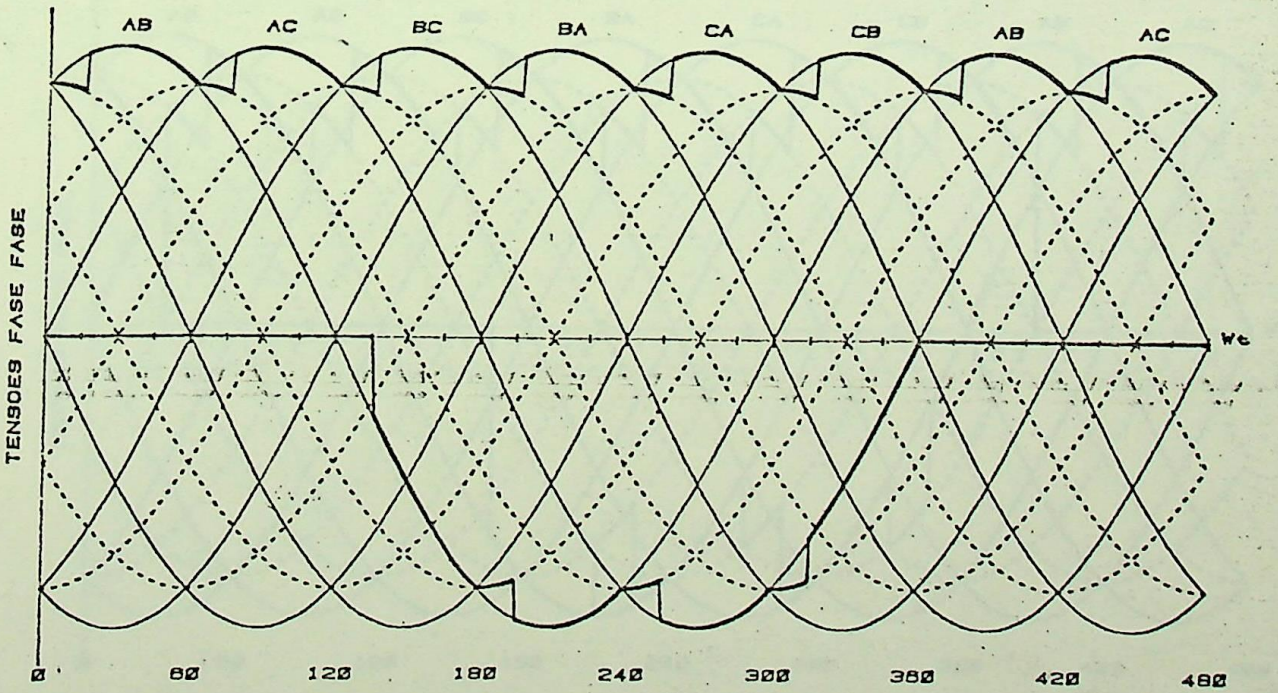
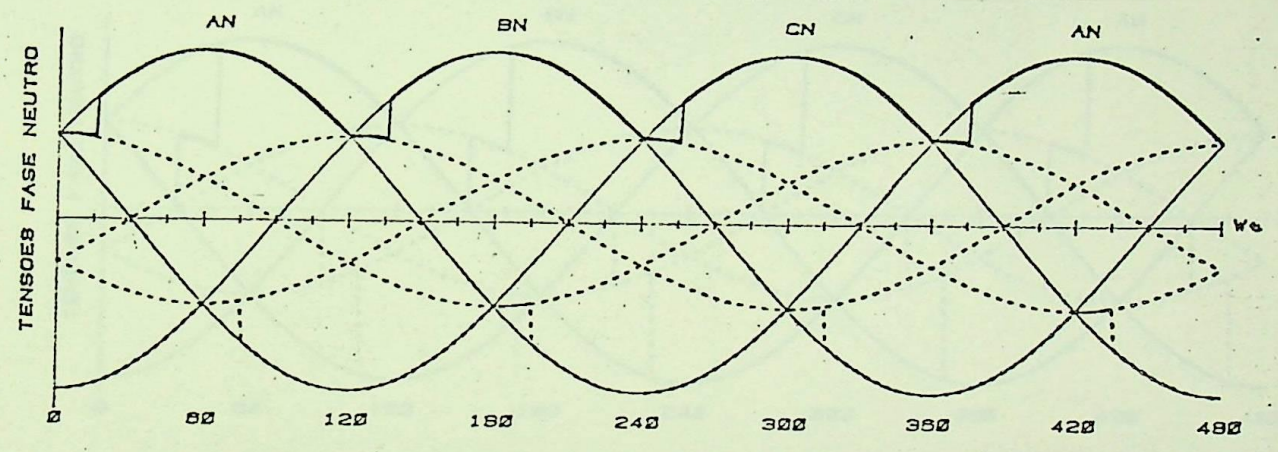
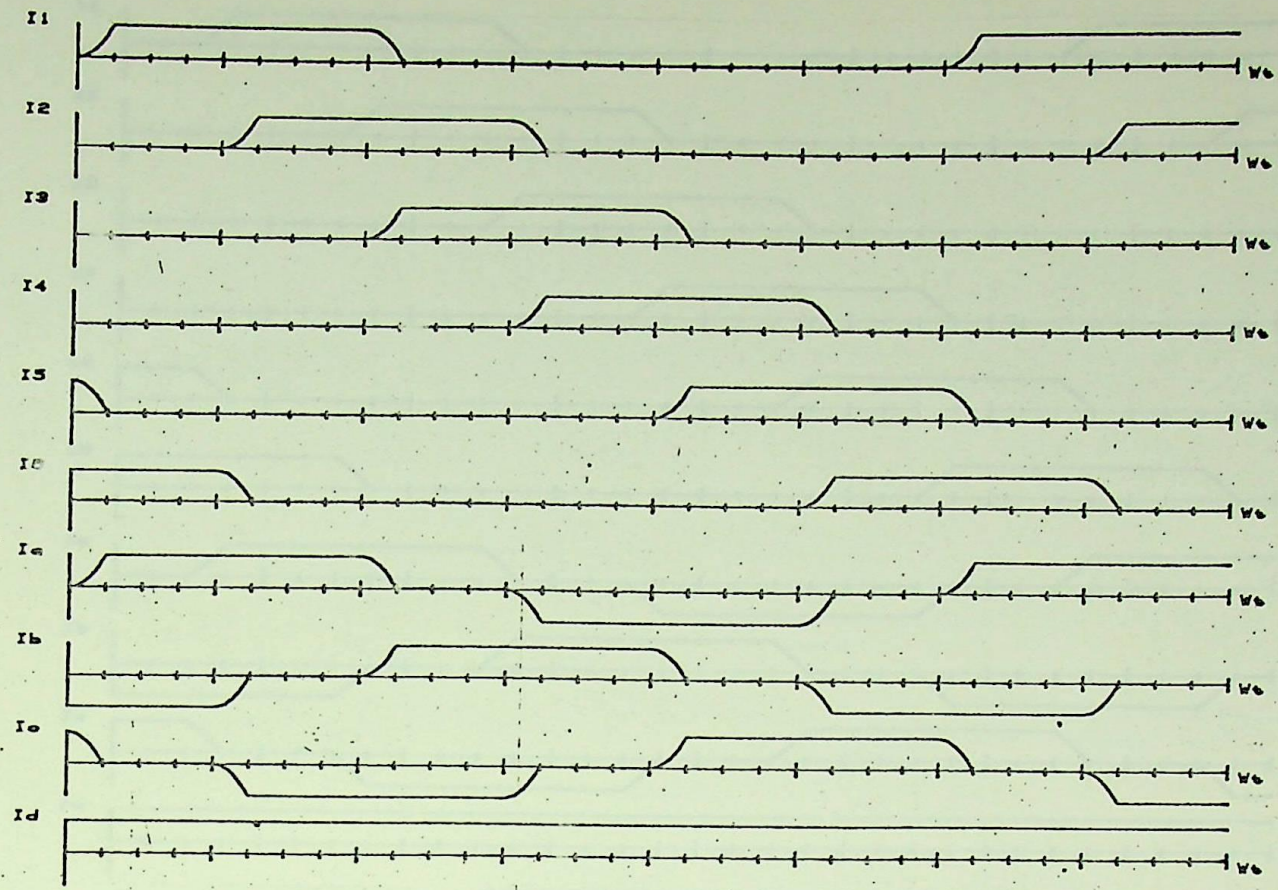
Logo:

$$U_p = -\frac{1}{2} e_{bn} \quad (2.30)$$

A seguinte conclusão pode ser tirada: durante a comutação, a tensão catodo neutro das válvulas em comutação é igual à metade da tensão de fase da válvula conduzindo e que não está comutando, tomada com sinal negativo. Exemplificando: se estão comutando as válvulas 1 e 5, estando a válvula 1 conectada à

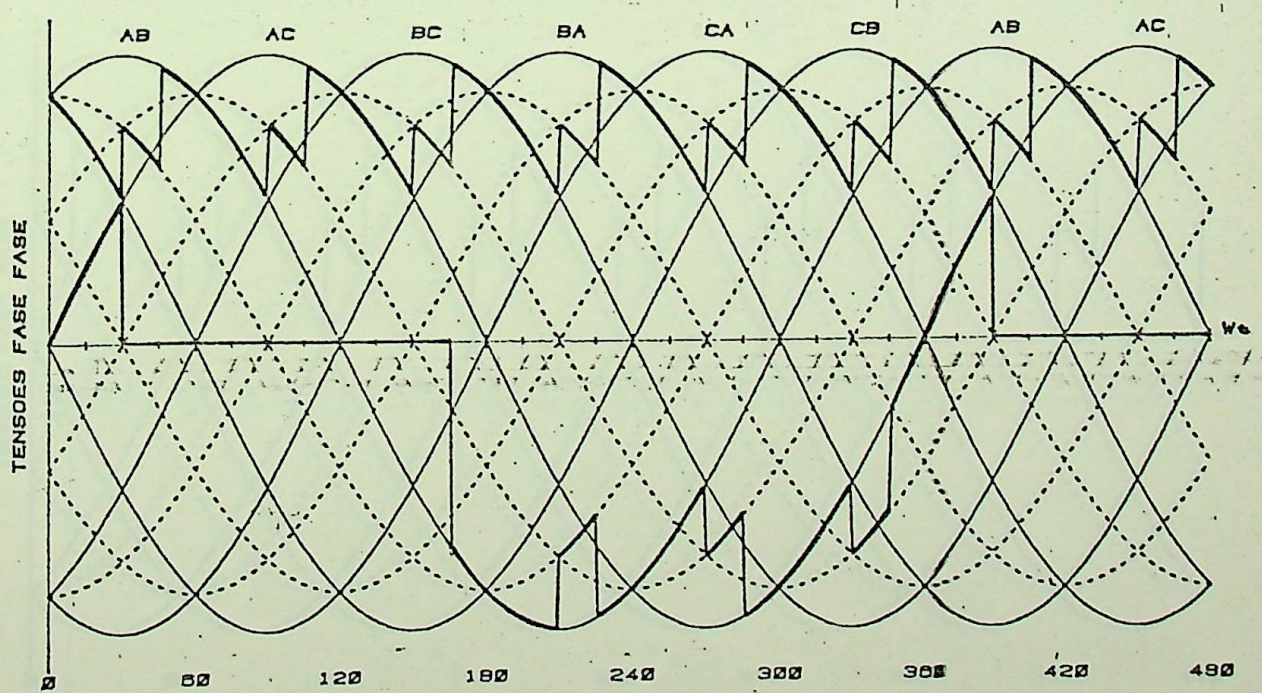
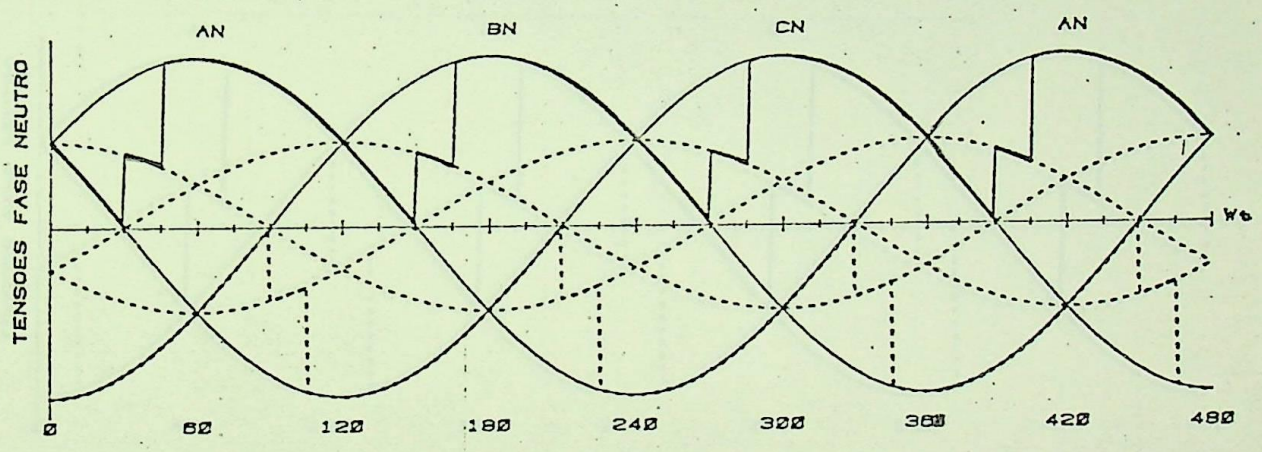
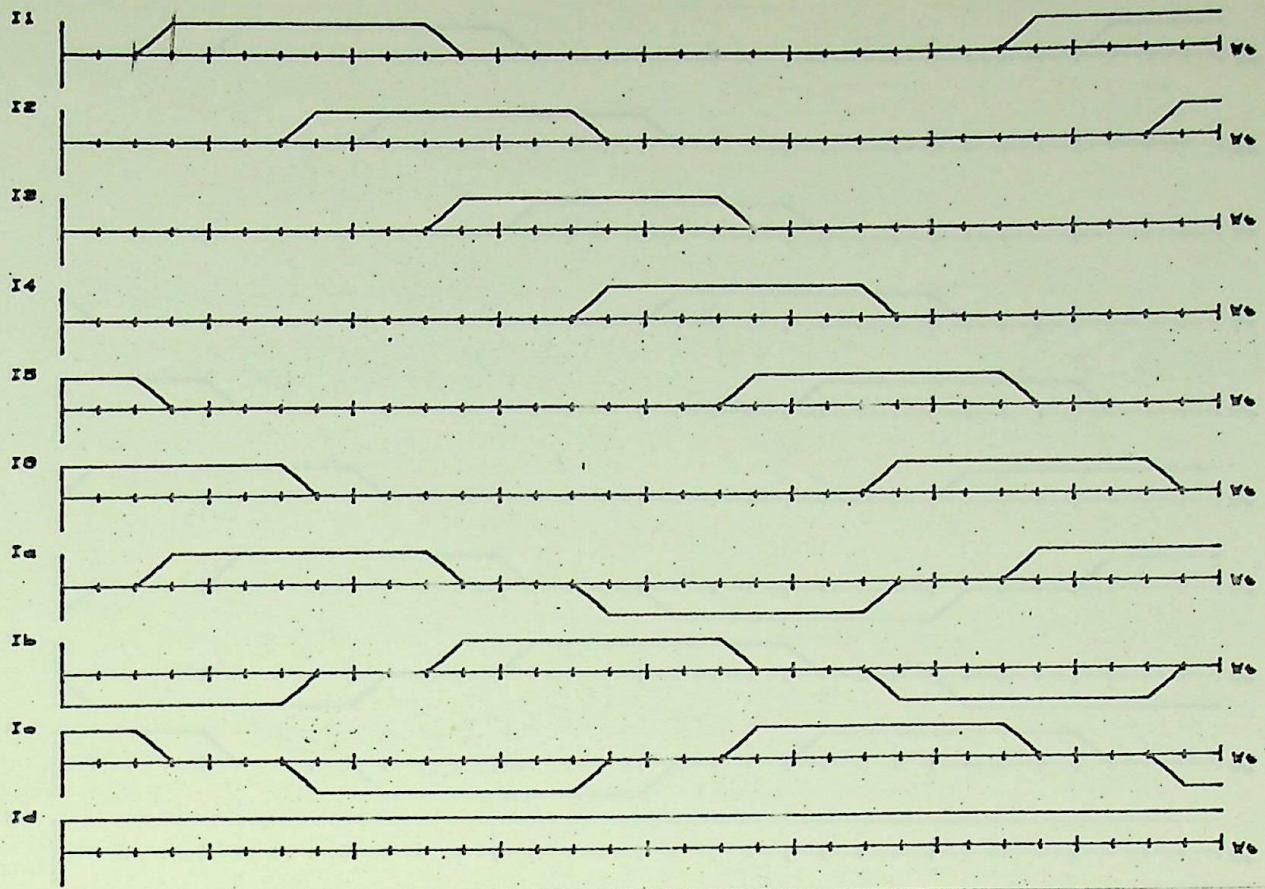
fase A e a válvula 5 à fase C, a tensão (catodo neutro) será i igual a  $-\frac{1}{2} e_{bn}$ .

As Figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 e 2.18 i lustram as formas de onda para a ponte conversora de 6 pulsos pa ra diversos ângulos de disparo e ângulo de comutação  $\mu=15^\circ$ .



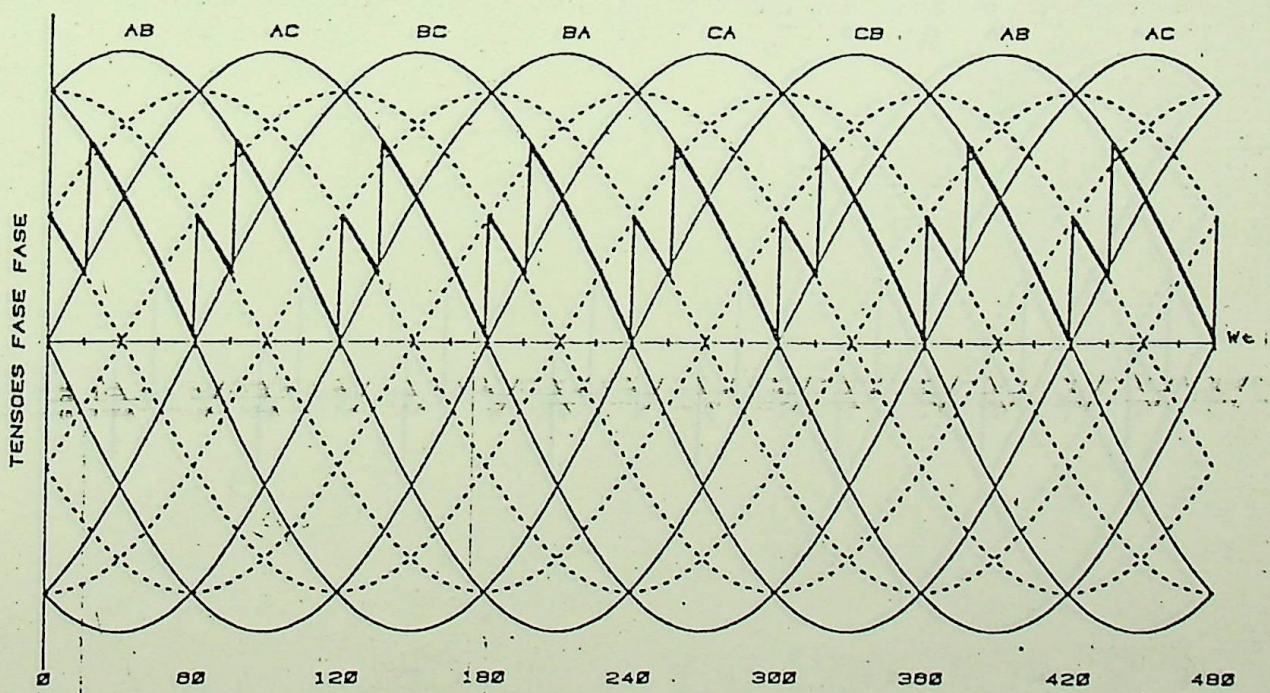
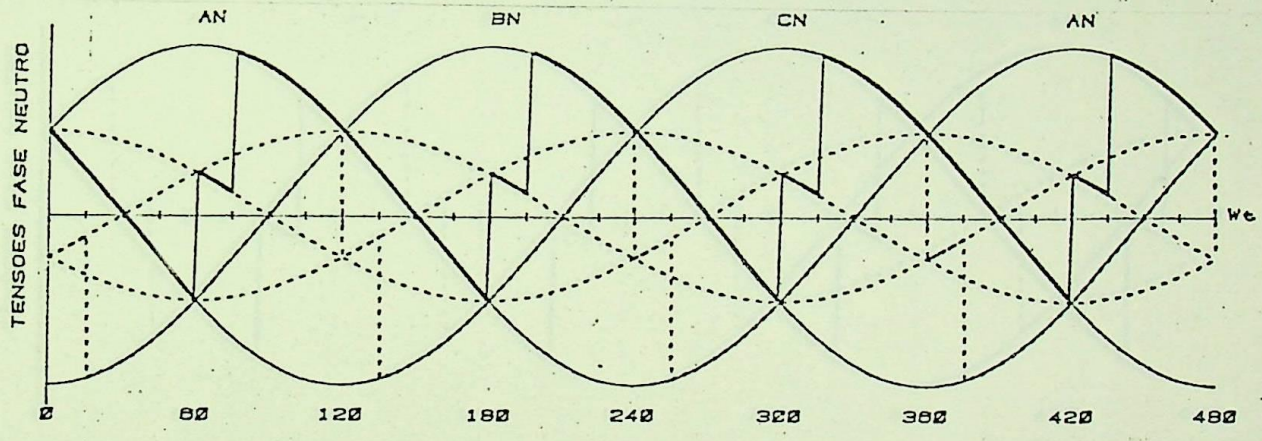
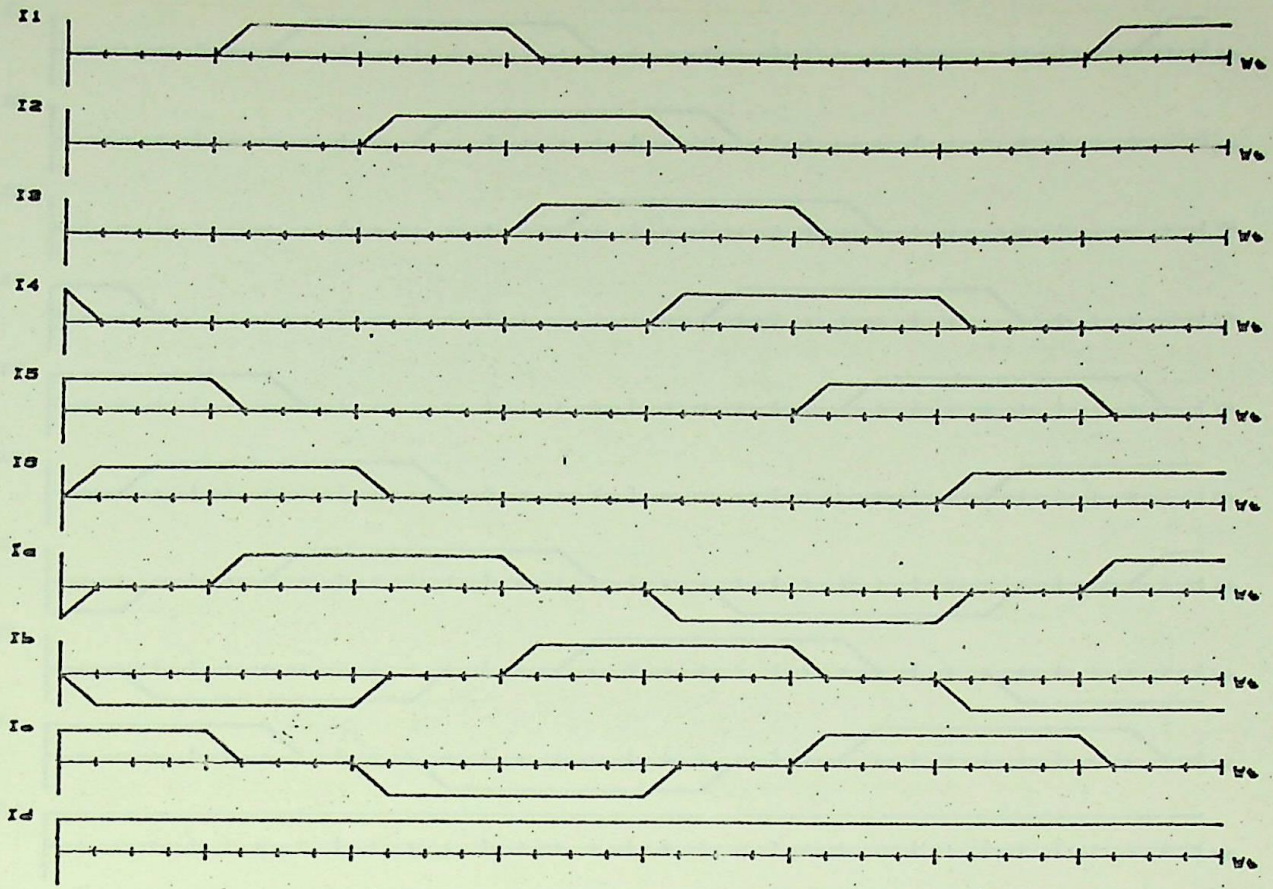
ALFA = .55 GRAUS MU = 15.55 GRAUS UPn-UN-UPN-UVI-

Figura 2.13 - Formas de onda para ponte conversora  $\alpha=0^\circ$   $\mu=15^\circ$



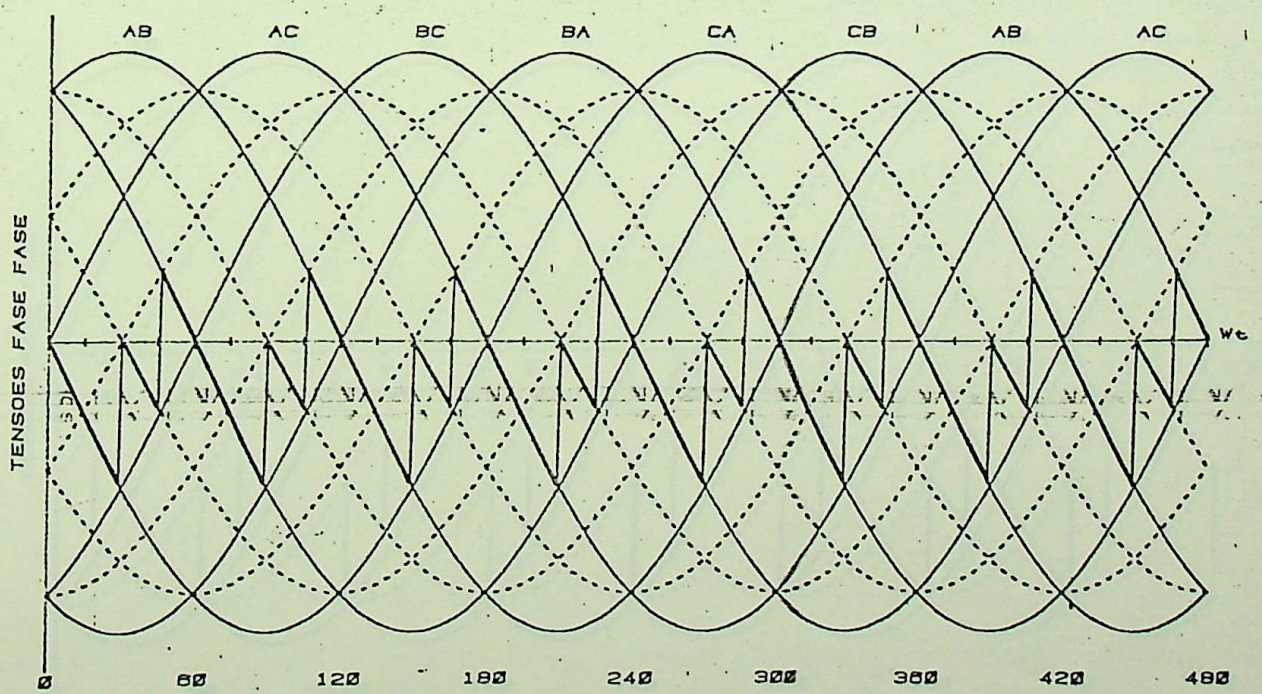
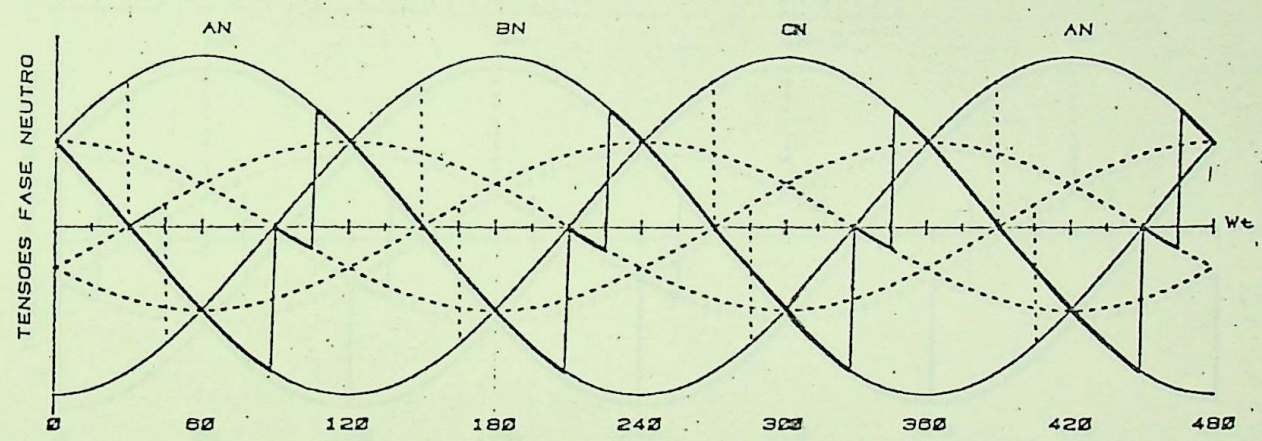
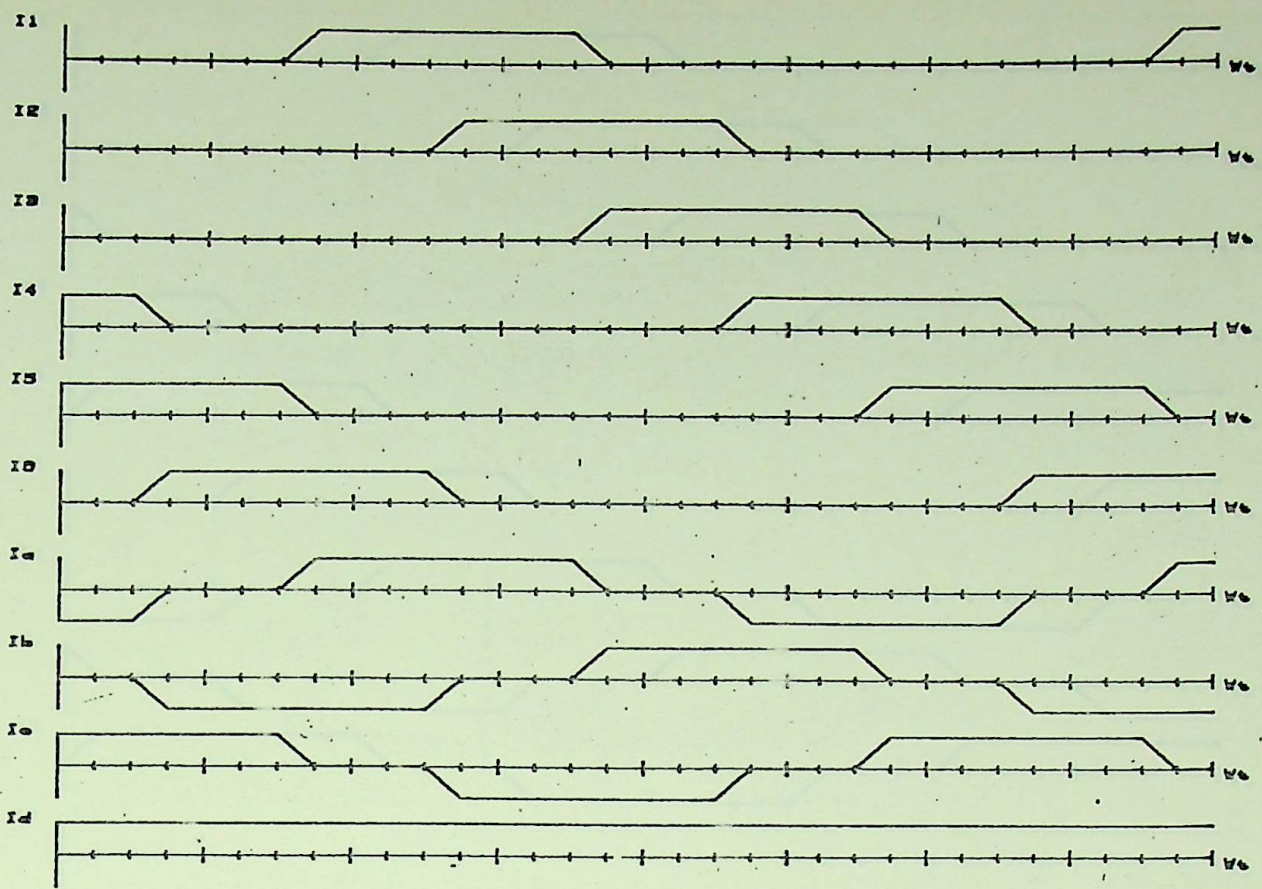
ALFA = 30,00 GRAUS MU = 15,00 GRAUS UPn- UNn--UPN- UV1-

Figura 2.14 - Formas de onda para ponte conversora  $\alpha=30^\circ$   $\mu=15^\circ$



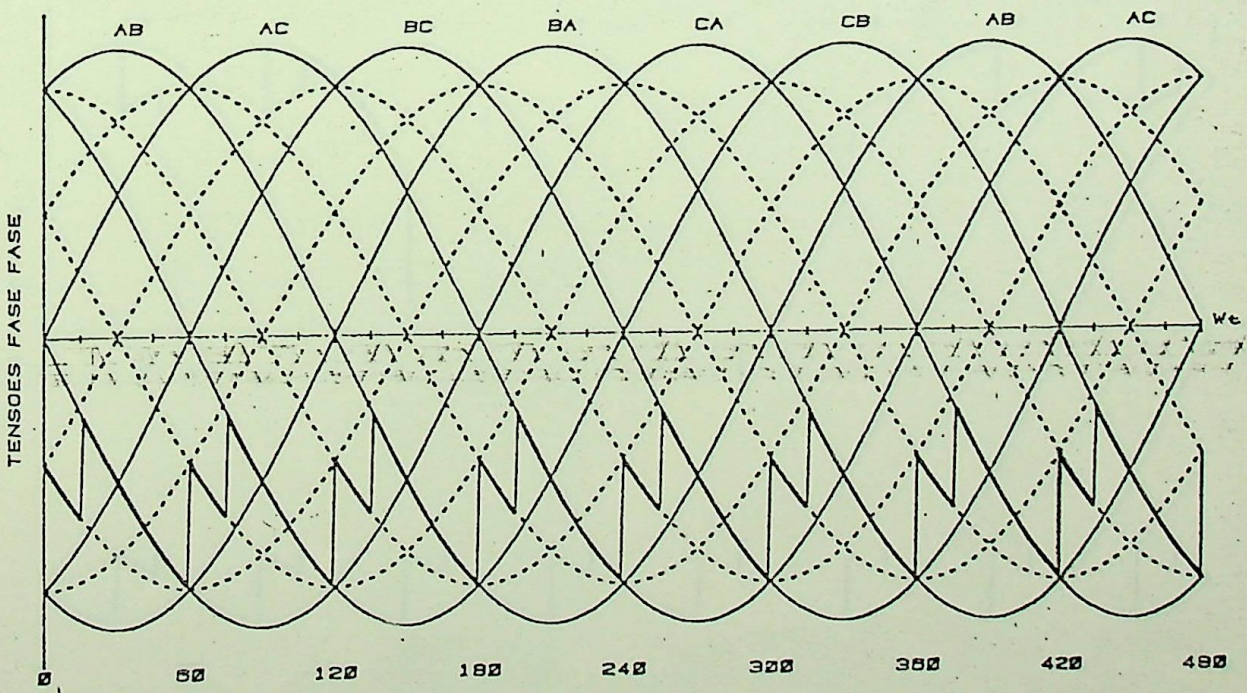
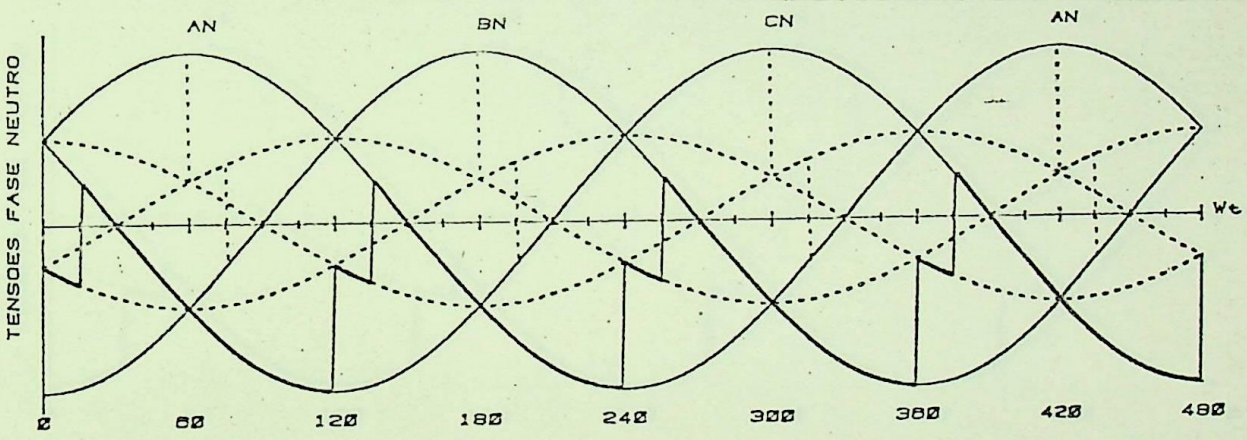
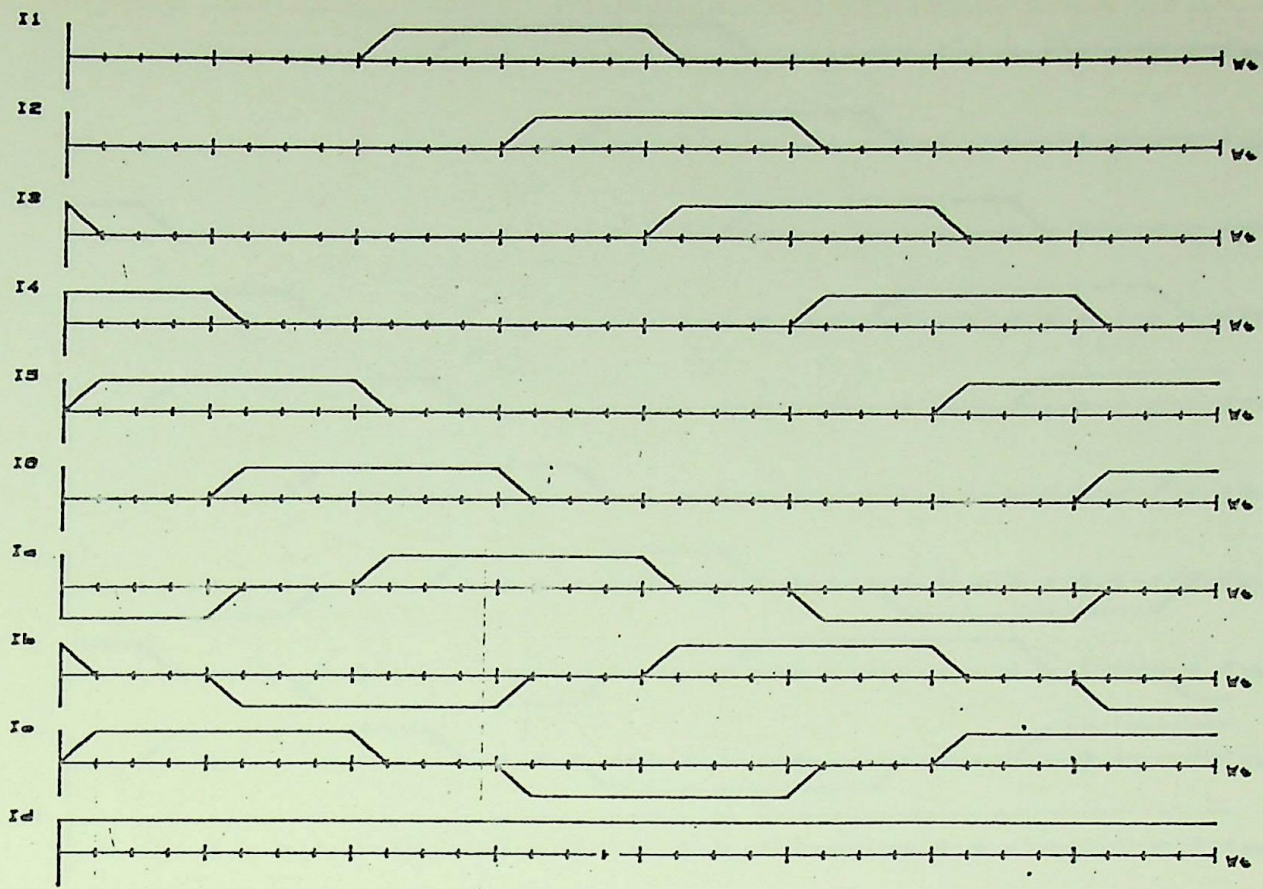
ALFA = 60.00 GRAUS MU = 15.00 GRAUS UPn- UNn-UPN-

Figura 2.15 - Formas de onda para ponte conversora  $\alpha=60^{\circ}$   $\mu=15^{\circ}$



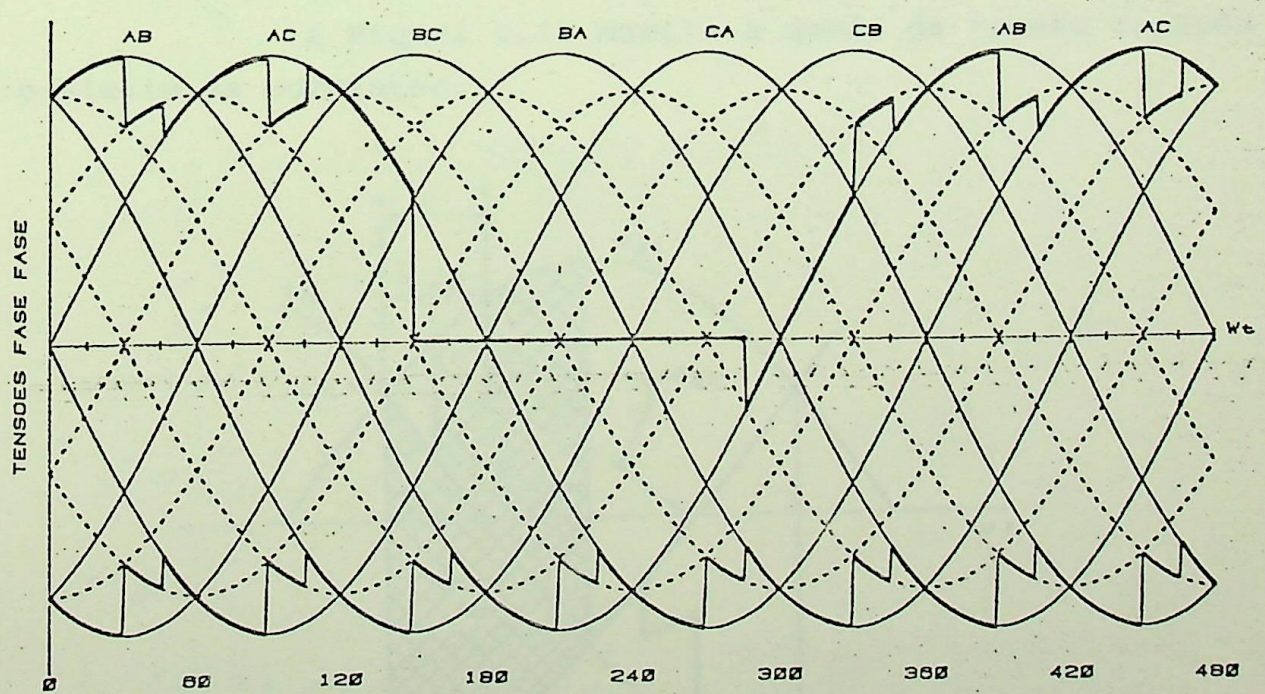
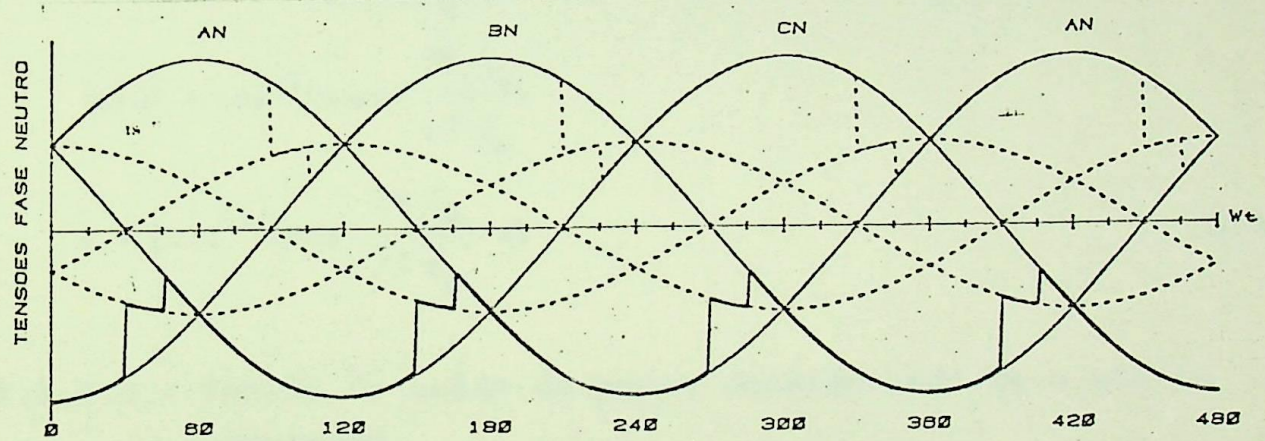
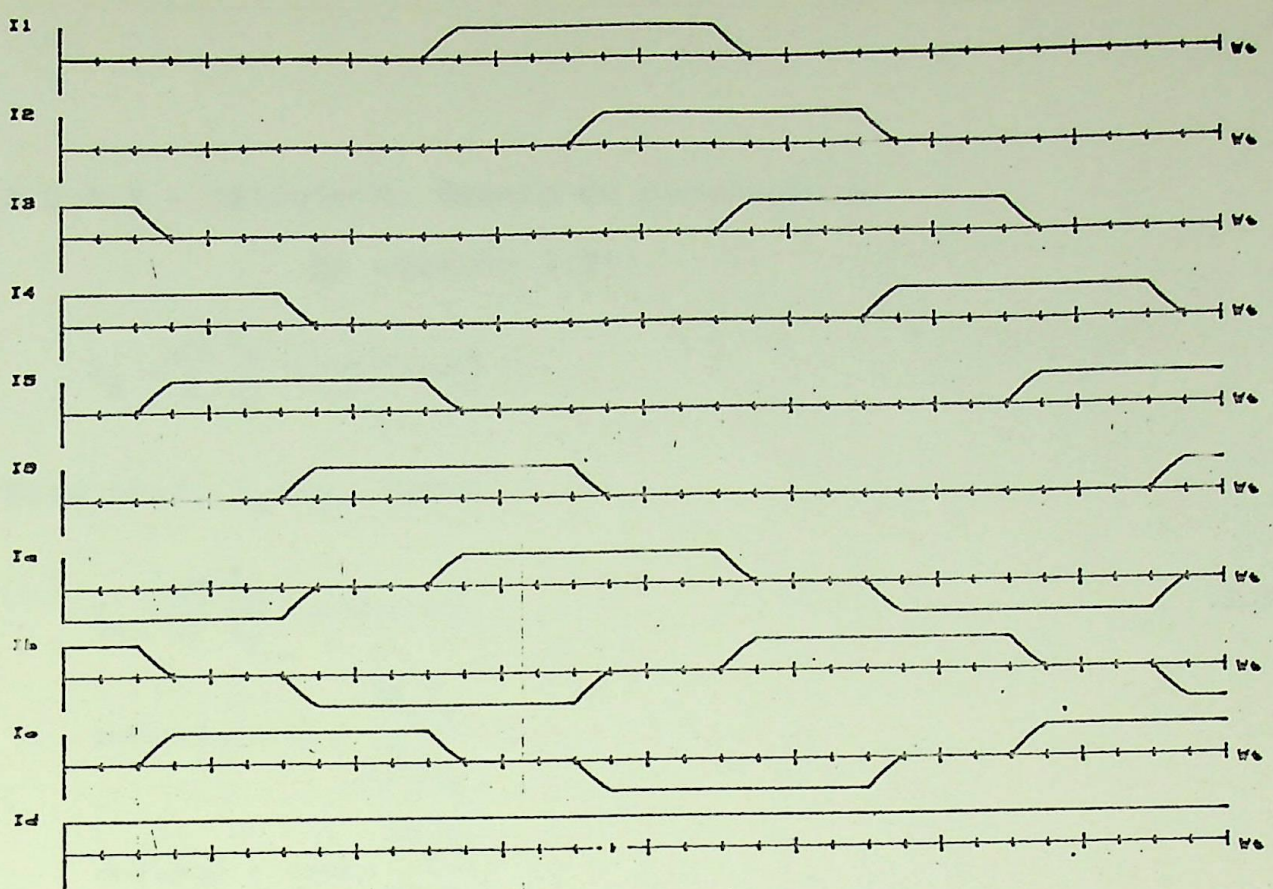
ALFA = 90.00 GRAUS MU = 15.00 GRAUS UPn- UNn-UPN-

Figura 2.16 - Formas de onda para ponte conversora  $\alpha=90^{\circ}$   $\mu=15^{\circ}$



ALFA = 120.00 GRAUS MU = 15.00 GRAUS UPn - UNn - UPN -

Figura 2.17 - Formas de onda para ponte conversora  $\alpha=120^\circ$   $\mu=15^\circ$



ALFA = 150.00 GRAUS MU = 15.00 GRAUS UPn - UNn - UPN - UV1 -

Figura 2.18 - Formas de onda para ponte conversora  $\alpha=150^\circ$   $\mu=15^\circ$



Conforme [1]:

$$A_o = U_{do} \frac{\pi}{3} \quad (2.33)$$

Tem-se também:

$$\theta = \omega t \quad (2.34)$$

Analogamente:

$$A = \Delta U_d (\pi/3) \quad (2.35)$$

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \left( e_{an} - \frac{e_{an} + e_{cn}}{2} \right) d\theta$$

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \frac{e_{an} - e_{cn}}{2} d\theta$$

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \frac{e_{ac}}{2} d\theta$$

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \frac{\sqrt{3} E_m}{2} \sin\theta d\theta$$

$$A = \frac{\sqrt{3} E_m}{2} [-\cos\theta]_{\alpha}^{\delta}$$

$$A = \frac{\sqrt{3} E_m}{2} (\cos\alpha - \cos\delta)$$

De (2.35):

$$\Delta U_d = \frac{3}{\pi} A$$

$$\Delta U_d = \frac{3}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} E_m (\cos\alpha - \cos\delta)$$

$$\Delta U_d = \frac{U_{do}}{2} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (2.36)$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - \Delta U_d$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - \frac{U_{do}}{2} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (2.37)$$

$$U_d = \frac{U_{do} (\cos\alpha + \cos\delta)}{2} \quad (2.38)$$

De (2.31):

$$I_d = I_{s2} (\cos\alpha - \cos\delta)$$

$$(\cos\alpha - \cos\delta) = \frac{I_d}{I_{s2}} \quad (2.39)$$

Substituindo em (2.37):

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - \frac{U_{do}}{2} \frac{I_d}{I_{s2}}$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - \frac{3\sqrt{3} E_m / \pi}{2\sqrt{3} E_m / 2X_c} I_d$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - \frac{3X_c}{\pi} I_d \quad (2.40)$$

Definindo a resistência de comutação equivalente,  $R_{ce}$  tem-se:

$$R_{ce} = \frac{3X_c}{\pi} \quad (2.41)$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - R_{ce} I_d \quad (2.42)$$

O circuito equivalente para a ponte retificadora é apresentado na Figura 2.20.

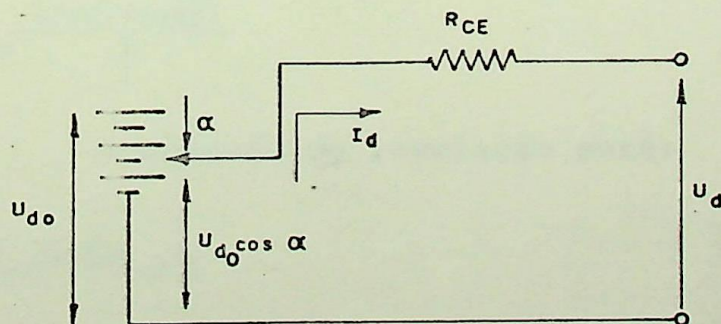


Figura 2.20 - Circuito equivalente para a ponte retificadora considerando-se a sobreposição

Considerando-se o efeito da comutação, a tensão de saída do conversor torna-se nula para ângulo de disparo  $\alpha$  menor que  $90^\circ$ . De fato, tem-se:

$$U_d = U_{do} \left( \frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \right)$$

$$\cos\alpha + \cos\delta = 0$$

$$\cos\alpha = -\cos\delta$$

$$\alpha = \pi - \delta$$

$$\alpha = \pi - \alpha - \mu$$

$$\alpha = \frac{\pi - \mu}{2} \quad (2.43)$$

Este ângulo será sempre menor que  $90^\circ$ .

Para os inversores é conveniente se definir:

$\beta \rightarrow$  ângulo de ignição;

$\gamma \rightarrow$  ângulo de extinção.

$$\beta = \pi - \alpha \quad (2.44)$$

$$\gamma = \pi - \delta \quad (2.45)$$

O equacionamento para o inversor fica:

$$I_d = I_{s2} (\cos\gamma - \cos\beta) \quad (2.46)$$

$$U_d = U_{do} \frac{(\cos\gamma + \cos\beta)}{2} \quad (2.47)$$

A equação de regulação será:

$$U_d = -U_{do} \cos\beta - R_{ce} I_d \quad (2.48)$$

Pode-se verificar que o efeito da comutação na ponte inversora é o de aumentar o valor médio da tensão da saída, ao contrário da ponte funcionando como retificadora, quando en

tão ocorre um decréscimo desta tensão. A Figura 2.21 ilustra o circuito equivalente para a ponte funcionando como inversora.

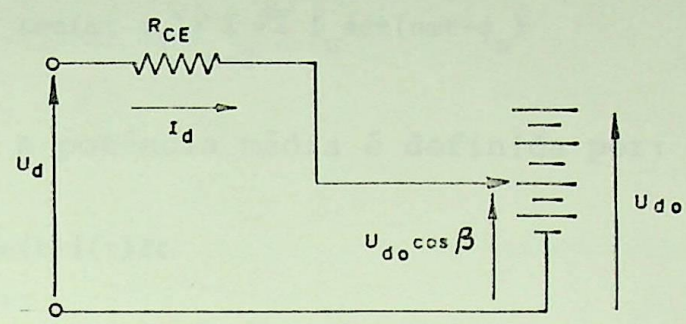


Figura 2.21 - Circuito equivalente para ponte inversora, considerando-se a sobreposição

2.3 - RELAÇÃO ENTRE O DESLOCAMENTO DE FASE E O ÂNGULO DE DISPARO

O deslocamento de fase  $\phi_1$  é o ângulo da componente fundamental da corrente de alimentação do conversor, com relação à tensão de alimentação. A Figura 2.22 ilustra.

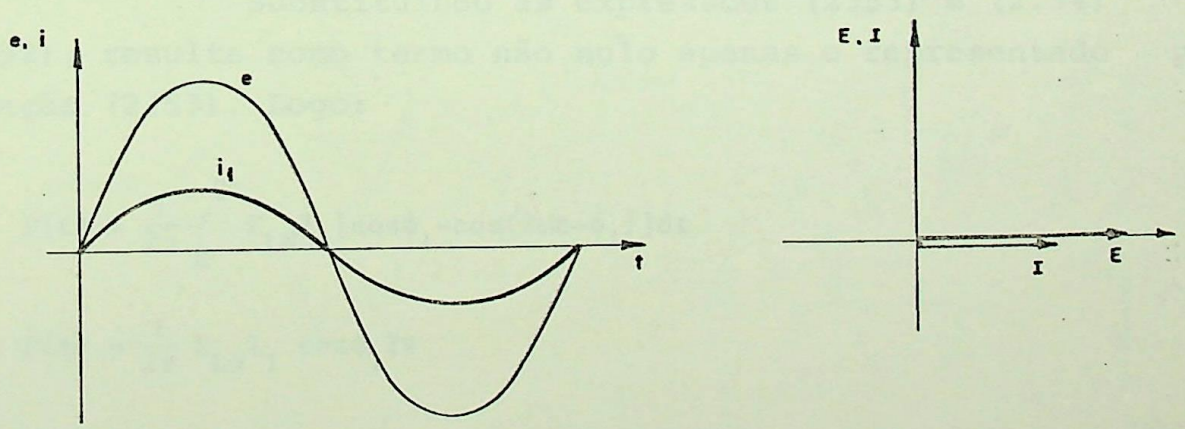


Figura 2.22 - Ângulo de deslocamento  $\phi_1=0^0$

Seja a tensão de alimentação dada por:

$$e(t) = \sqrt{2} E_{FN} \text{ sen}\omega t \tag{2.49}$$

A corrente não senoidal de alimentação pode ser decomposta em série trigonométrica de Fourier, conforme mostrado a seguir.

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \text{sen}(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_n \text{sen}(n\omega t - \phi_n) \quad (2.50)$$

A potência média é definida por:

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^t e(t)i(t)dt \quad (2.51)$$

Logo:

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2} E_{LN} \text{sen}\omega t [\sqrt{2} I_1 \text{sen}(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_n \text{sen}(n\omega t - \phi_n)] dt$$

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [2E_{LN} I_1 \text{sen}\omega t \text{sen}(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} 2I_n \text{sen}(n\omega t - \phi_n) \text{sen}\omega t] dt \quad (2.52)$$

Também:

$$2\text{sen}\omega t \text{sen}(\omega t - \phi_1) = \cos\phi_1 - \cos(2\omega t - \phi_1) \quad (2.53)$$

$$2\text{sen}(n\omega t - \phi_n) \text{sen}\omega t = \cos[(n-1)\omega t - \phi_n] - \cos[(n+1)\omega t - \phi_n] \quad (2.54)$$

Substituindo as expressões (2.53) e (2.54) em (2.52), resulta como termo não nulo apenas o representado pela equação (2.53). Logo:

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{LN} I_1 [\cos\phi_1 - \cos(2\omega t - \phi_1)] dt$$

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} E_{LN} I_1 \cos\phi_1 2\pi$$

$$P(t) = E_{LN} I_1 \cos\phi_1 \quad (2.55)$$

Nota-se através da equação (2.55) que apenas a componente fundamental é relevante do ponto de vista de potência ativa. Os demais harmônicos causam apenas um consumo de potência reativa.

Considerando o conversor sem perdas, a parcela

de potência ativa suprida ao mesmo deve ser igual à potência en tregue no lado DC, logo:

$$3 \frac{E_m}{\sqrt{2}} I_{a1} \cos \phi_1 = U_{do} I_d \cos \alpha \quad (2.56)$$

Por outro lado, conforme [1]:

$$I_{a1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2.57)$$

Sendo  $I_{a1}$ : valor eficaz da componente fundamental da corrente de alimentação fase a.

Substituindo em (2.56):

$$3 \frac{E_m}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \cos \phi_1 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \alpha I_d \quad (2.58)$$

$$\cos \phi_1 = \cos \alpha \quad (2.58)$$

$$\phi_1 = \alpha \quad (2.59)$$

A Figura 2.23 ilustra o ângulo entre a tensão de alimentação e a componente fundamental da corrente de alimentação.

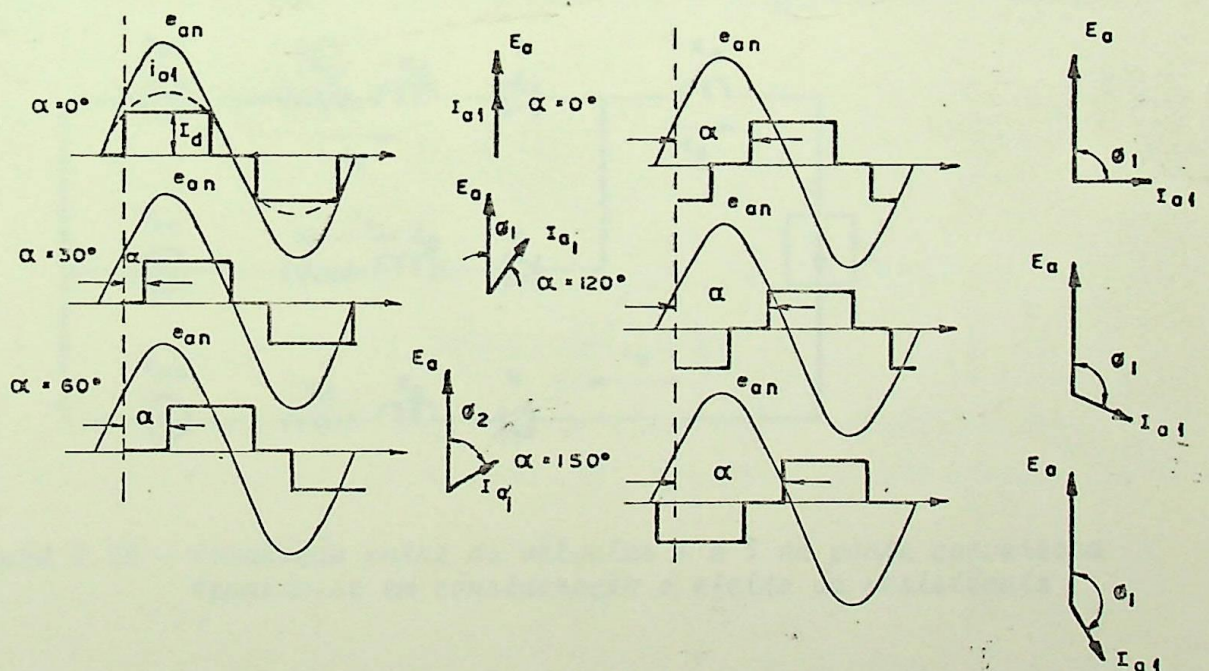


Figura 2.23 - Ângulo entre a tensão de alimentação e a componente fundamental da corrente de alimentação - fase a

A Figura 2.23 mostra para vários ângulos de disparo as formas de onda da tensão de alimentação e da corrente de

alimentação da ponte conversora. O defasamento entre a tensão e a componente fundamental da corrente depende do ângulo de disparo, conforme pode ser verificado também pelos diagramas fasoriais apresentados na figura.

A relação apresentada na equação 2.59 é aproximada, pois o ângulo de comutação foi desprezado nos cálculos. Uma relação exata entre o ângulo de deslocamento  $\phi_1$  e o ângulo de disparo é dado conforme [1].

$$\operatorname{tg}\phi_1 = \frac{2\mu + \operatorname{sen}2\alpha - \operatorname{sen}2\delta}{\cos2\alpha - \cos2\delta} \quad (2.60)$$

## 2.4 - O PROCESSO DE COMUTAÇÃO CONSIDERANDO SE O EFEITO DA RESISTÊNCIA

### 2.4.1 - Determinação da Corrente de Comutação

A Figura 2.24 ilustra o circuito da ponte conversora durante a comutação da válvula 1 para a válvula 5, considerando-se o efeito da resistência da comutação.

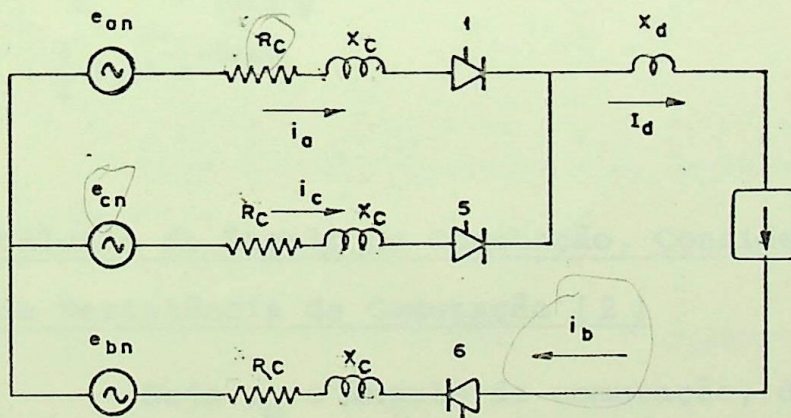


Figura 2.24 - Comutação entre as válvulas 1 e 5 na ponte conversora levando-se em consideração o efeito da resistência

Para o ângulo de disparo igual a zero graus, tem-se segundo equacionamento apresentado no Apêndice I:

$$i_a(\theta) = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 \psi} [e^{-\theta \operatorname{tg} \psi} + \operatorname{tg} \psi \operatorname{sen} \theta - \cos \theta] + \frac{1}{2} I_d [1 - e^{-\theta \operatorname{tg} \psi}] \quad (2.61)$$

Sendo  $\theta = \omega t$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{R_c}{X_c} \quad (2.62)$$

Onde  $R_c$ : resistência de comutação.

Para  $\operatorname{tg} \psi = 0$ , o que significa considerar  $R_c = 0$ , os resultados conduzem a:

$$i_a(\theta) = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} (1 - \cos \theta) \quad (2.63)$$

Este resultado coincide evidentemente com o apresentado na equação 2.21.

Considerando-se ângulo de disparo diferente de zero graus, a equação (2.61) pode ser escrita segundo [2]:

$$i_a(\theta) = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 \psi} [(\cos \alpha - \operatorname{tg} \psi \operatorname{sen} \alpha) e^{-\theta \operatorname{tg} \psi} + \operatorname{tg} \psi \operatorname{sen}(\theta + \alpha) - \cos(\theta + \alpha)] + \frac{1}{2} I_d (1 - e^{-\theta \operatorname{tg} \psi}) \quad (2.64)$$

#### 2.4.2 - Cálculo do Ângulo de Comutação, Considerando-se o Efeito da Resistência de Comutação [2]

Seja  $\mu_0$  o ângulo de comutação, desprezando-se o efeito da resistência, para  $\alpha = 0^\circ$ . Da equação (2.31), vem:

$$\frac{E_m \sqrt{3}}{X_c} \frac{1}{2} = \frac{I_d}{1 - \cos \mu_0}$$

$$(1 - \cos \mu_0) = \frac{2 X_c I_d}{\sqrt{3} E_m}$$

$$\cos \mu_0 = 1 - \frac{2 X_c I_d}{\sqrt{3} E_m}$$

$$\mu_o = \cos^{-1} \left[ 1 - \frac{2X_c I_d}{\sqrt{3} E_m} \right] \quad (2.65)$$

Também:

$$1 - \cos \mu_o = \frac{2X_c I_d}{\sqrt{3} E_m}$$

$$\frac{I_d}{1 - \cos \mu_o} = \frac{\sqrt{3} E_m}{2 X_c} \quad (2.66)$$

Para calcular o ângulo de comutação é necessário substituir  $i_a(\theta) = I_d$ ;  $\theta = \mu$  na equação (2.64). Substituindo também (2.66) em (2.64) resulta:

$$I_d = \frac{I_d}{1 - \cos \mu_o} \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \psi} [(\cos \alpha - \text{tg} \psi \text{sen} \alpha) e^{-\mu \text{tg} \psi} + \text{tg} \psi \text{sen}(\alpha + \mu) - \cos(\alpha + \mu)] +$$

$$+ \frac{1}{2} I_d (1 - e^{-\mu \text{tg} \psi})$$

$$1 = \frac{1}{1 - \cos \mu_o} \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \psi} [(\cos \alpha - \text{tg} \psi \text{sen} \alpha) e^{-\mu \text{tg} \psi} + \text{tg} \psi \text{sen}(\alpha + \mu) - \cos(\alpha + \mu)] +$$

$$+ \frac{1}{2} (1 - e^{-\mu \text{tg} \psi}) \quad (2.67)$$

Para cálculo iterativo do ângulo  $\mu$  deve-se determinar a função  $f(\mu)$ .

$$f(\mu) = \frac{1}{1 - \cos \mu_o} \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \psi} [(\cos \alpha - \text{tg} \psi \text{sen} \alpha) e^{-\mu \text{tg} \psi} + \text{tg} \psi \text{sen}(\alpha + \mu) - \cos(\alpha + \mu)] -$$

$$- \frac{1}{2} e^{-\mu \text{tg} \psi} - \frac{1}{2} \quad (2.68)$$

Para se utilizar o método de Newton Raphson deve-se determinar  $f'(\mu)$ . Logo:

$$f'(\mu) = \frac{1}{1 - \cos \mu_o} \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \psi} [-\text{tg} \psi (\cos \alpha - \text{tg} \psi \text{sen} \alpha) e^{-\mu \text{tg} \psi} + \text{tg} \psi \cos(\alpha + \mu) +$$

$$+ \text{sen}(\alpha + \mu)] + \frac{1}{2} \text{tg} \psi e^{-\mu \text{tg} \psi} \quad (2.69)$$

$$\mu_{i+1} = \mu_i - \frac{f(\mu)}{f'(\mu)} \quad (2.70)$$

O algoritmo para cálculo do ângulo de comutação é apresentado na Figura 2.25.

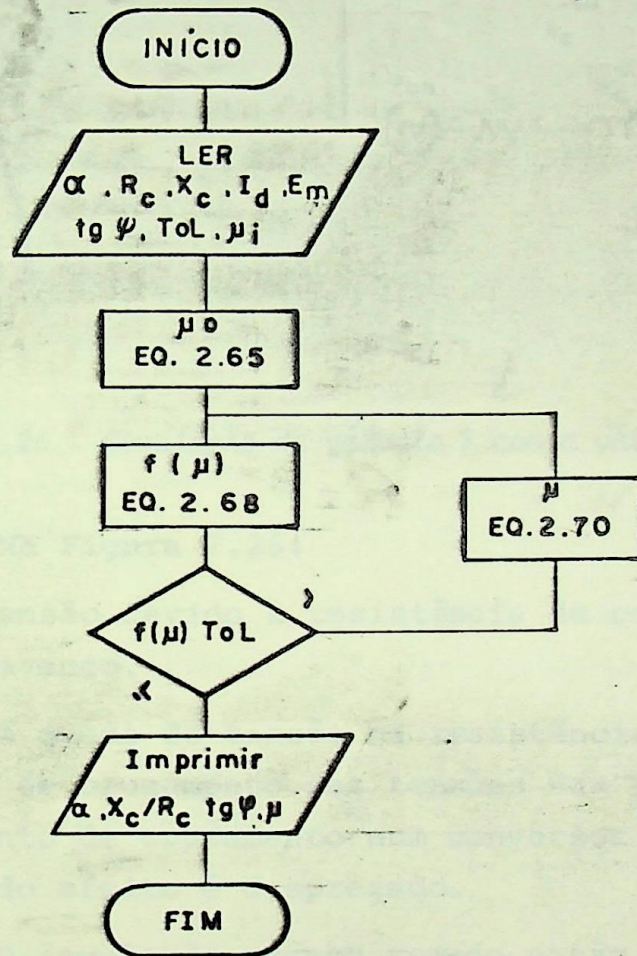


Figura 2.25 - Algoritmo para cálculo iterativo do ângulo de comutação  $\mu$

Na Figura 2.25, tem-se:

$\mu_i$ : estimativa inicial do ângulo  $\mu$ ;

TOL: tolerância lida para cálculo iterativo do ângulo de comutação.

A Figura 2.26 ilustra a comutação da válvula 1 com a válvula 5.

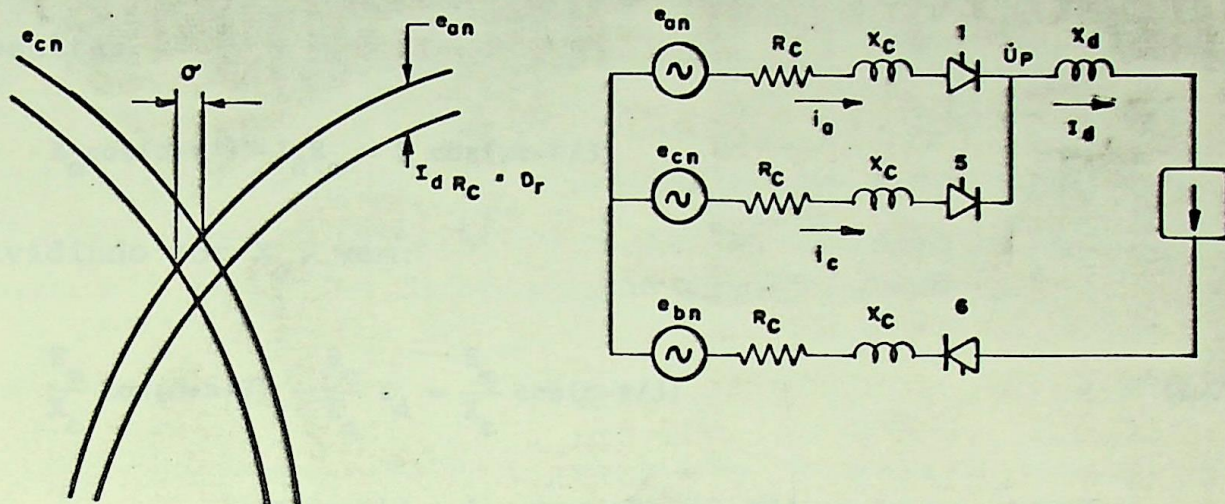


Figura 2.26 - Comutação da válvula 1 com a válvula 5

Na Figura 2.26:

$D_r$  = queda de tensão devido à resistância de comutação;  
 $\sigma$  = ângulo de avanço.

A queda de tensão na resistência de comutação faz com que o ponto de cruzamento das tensões das fases a e c ocorram antes do ponto de cruzamento num conversor não controlado, quando o referido efeito é desprezado.

O ângulo de avanço tomado então com sinal negativo pode ser calculado a seguir.

Tem-se:

$$e_{cn} - I_d R_c = e_{an} \quad (2.71)$$

$$E_m \sin(\omega t - 7\pi/6) - I_d R_c = E_m \sin(\omega t + \pi/6)$$

mas

$$\omega t = \sigma$$

Considerando ainda:

$$\text{sen}(\omega t - 7\pi/6) = \cos(\omega t + \pi/3)$$

$$\text{sen}(\omega t + \pi/6) = \cos(\omega t - \pi/3)$$

Resulta:

$$E_m \cos(\sigma + \pi/3) - I_d R_c = E_m \cos(\omega t - \pi/3)$$

Dividindo por  $X_c$ , vem:

$$\frac{E_m}{X_c} \cos(\sigma + \pi/3) - \frac{R_c}{X_c} I_d = \frac{E_m}{X_c} \cos(\sigma - \pi/3) \quad (2.72)$$

A partir da equação (2.31) pode-se obter:

$$\frac{E_m}{X_c} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{1 - \cos \mu_o} \quad (2.73)$$

Substituindo em (2.72):

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{1 - \cos \mu_o} \cos(\sigma + \pi/3) - \text{tg} \psi I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{1 - \cos \mu_o} \cos(\sigma - \pi/3)$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\cos(\sigma + \pi/3)}{1 - \cos \mu_o} - \text{tg} \psi = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\cos(\sigma - \pi/3)}{1 - \cos \mu_o}$$

$$2 \cos(\sigma + \pi/3) - \sqrt{3}(1 - \cos \mu_o) \text{tg} \psi = 2 \cos(\sigma - \pi/3)$$

$$2[\cos(\sigma + \pi/3) - \cos(\sigma - \pi/3)] = \sqrt{3}(1 - \cos \mu_o) \text{tg} \psi$$

$$2[-2 \text{sen} \sigma \text{sen} \pi/3] = \sqrt{3}(1 - \cos \mu_o) \text{tg} \psi$$

$$-2 \text{sen} \sigma \sqrt{3} = \sqrt{3}(1 - \cos \mu_o) \text{tg} \psi$$

$$\text{sen} \sigma = -\frac{1}{2} \text{tg} \psi (1 - \cos \mu_o) \quad (2.74)$$

Substituindo  $\alpha = \sigma$  na equação (2.67) vem:

$$1 = \frac{1}{(1 - \cos \mu_0)(1 + \operatorname{tg}^2 \psi)} [(\cos \sigma - \operatorname{tg} \psi \operatorname{sen} \sigma) e^{-\mu \operatorname{tg} \psi} + \operatorname{tg} \psi \operatorname{sen}(\sigma + \mu) - \cos(\sigma + \mu)] + \frac{1}{2} [1 - e^{-\mu \operatorname{tg} \psi}] \tag{2.75}$$

O ângulo  $\mu$  pode então ser calculado iterativamente.

O ângulo  $\mu_0$ , conforme já definido anteriormente, é o ângulo de comutação sem o efeito da resistência para  $\alpha = 0^\circ$ . A Tabela 2.1 ilustra a influência do ângulo de avanço.

```

*****
*          *          *          *          *
*  XC/RC   *  TANFI   *  ALFA    *  SIGMA   *
*****
*  4.0000  *  .2500   *  -.9600  *  30.6486 *
*****
*  1.3333  *  .7500   *  -2.8797 *  32.0358 *
*****
*  .5000   *  2.0000  *  -7.6990 *  36.1452 *
*****
*  .2500   *  4.0000  *  -15.5470 *  45.0618 *
*****
    
```

Tabela 2.1 - Efeito do ângulo de avanço  $\sigma$  ( $\mu_0 = 30^\circ$ )

A Tabela 2.2 ilustra os ângulos de comutação  $\mu$  para ângulo de disparo igual a 30 graus.

```

*****
*          *          *          *          *
*  XC/RC   *  TANFI   *  ALFA    *  MU      *
*****
*  4.0000  *  .2500   *  30.0000  *  12.9306 *
*****
*  1.3333  *  .7500   *  30.0000  *  12.9216 *
*****
*  .5000   *  2.0000  *  30.0000  *  13.0044 *
*****
*  .2500   *  4.0000  *  30.0000  *  13.4725 *
*****
    
```

Tabela 2.2 - Ângulos de comutação  $\mu$ . ( $\alpha = 30^\circ$ )

A tabela 2.3 ilustra os ângulos de comutação  $\mu$  para ângulo de disparo igual a 45 graus.

```

*****
*           *           *           *           *
*   XC/RC   *   TANFI   *   ALFA   *   MU   *
*****
*   4,0000  *   ,2550   *   45,0000 *   10,0289 *
*****
*   1,3333  *   ,7550   *   45,0000 *   10,0308 *
*****
*   ,5000   *   2,0000   *   45,0000 *   10,0883 *
*****
*   ,2500   *   4,0000   *   45,0000 *   10,3488 *
*****
    
```

Tabela 2.3 - Ângulos de comutação  $\mu(\alpha=45^\circ)$

A tabela 2.4 ilustra os ângulos de comutação  $\mu$  para ângulo de disparo igual a 60 graus.

```

*****
*           *           *           *           *
*   XC/RC   *   TANFI   *   ALFA   *   MU   *
*****
*   4,0000  *   ,2500   *   60,0000 *   8,9927 *
*****
*   1,3333  *   ,7500   *   60,0000 *   8,9964 *
*****
*   ,5000   *   2,0000   *   60,0000 *   9,0475 *
*****
*   ,2500   *   4,0000   *   60,0000 *   9,2554 *
*****
    
```

Tabela 2.4 - Ângulos de comutação  $\mu(\alpha=60^\circ)$

A tabela 2.5 ilustra os ângulos de comutação  $\mu$  para ângulo de disparo igual a 0 graus.

```

*****
*           *           *           *           *
*   XC/RC   *   TANFI   *   ALFA   *   MU   *
*****
*   4,0000  *   ,2550   *   ,0000   *   29,7036 *
*****
*   1,3333  *   ,7550   *   ,0000   *   29,2670 *
*****
*   ,5000   *   2,0000   *   ,0000   *   28,9454 *
*****
*   ,2500   *   4,0000   *   ,0000   *   30,3140 *
*****
    
```

Tabela 2.5 - Ângulos de comutação  $\mu(\alpha=0^\circ)$

### 2.4.3 - Modelo Utilizando a Influência da Resistência de Comutação

#### 2.4.3.1 - Tensão durante o período de comutação

Da Figura 2.26, pode-se escrever:

$$U_p = e_{an} - R_c i_a - L_c \frac{d i_a}{dt} \quad (2.76)$$

$$U_p = e_{cn} - R_c i_c - L_c \frac{d i_c}{dt} \quad (2.77)$$

$$i_a + i_c = I_d \quad (2.78)$$

$$\frac{d i_a}{dt} + \frac{d i_c}{dt} = 0 \quad \therefore \quad \frac{d i_c}{dt} = - \frac{d i_a}{dt}$$

Somando as equações (2.76) e (2.77) resulta:

$$2U_p = e_{an} + e_{cn} - R_c (i_a + i_c)$$

$$2U_p = -e_{bn} - R_c I_d$$

$$U_p = -\frac{1}{2} e_{bn} - \frac{R_c I_d}{2} \quad (2.79)$$

Mas:

$$D_r = R_c I_d \quad (2.80)$$

$$U_p = -\frac{1}{2} e_{bn} - \frac{D_r}{2} \quad (2.81)$$

Pode-se então concluir por intermédio da equação (2.81) que a tensão catodo-neutro das válvulas em comutação é igual a  $-1/2$  da tensão fase neutro da válvula em condução que não está comutando  $-1/2$  da queda de tensão na resistência de comutação.

#### 2.4.3.2 - Valor médio da tensão de saída

O valor médio da tensão de saída considerando-se o efeito da resistência pode ser obtido através da Figura 2.27.

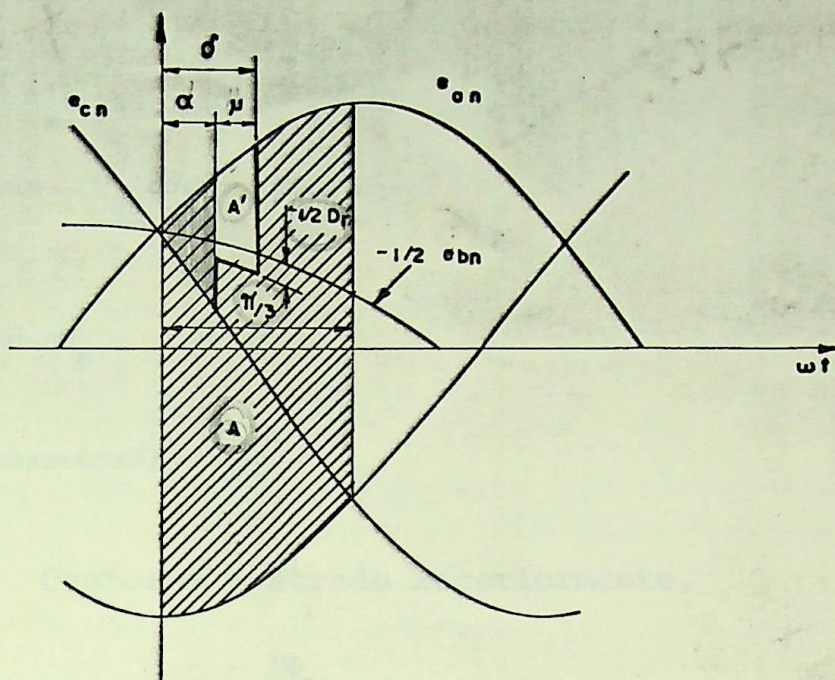


Figura 2.27 - Queda de tensão causada pela comutação considerando-se o efeito da resistência

Tem-se:

$$A_o = U_{do} (\pi/3)$$

$$A = \Delta U_d (\pi/3)$$

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \left[ (e_{an} - \frac{e_{an} + e_{cn}}{2}) - \frac{R_c I_d}{2} \right] d\theta$$

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \left( \frac{e_{ac}}{2} - \frac{D_r}{2} \right) d\theta$$

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \text{sen}\theta - \frac{D_r}{2} \right) d\theta$$

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m [-\cos\theta]_{\alpha}^{\delta} - \frac{D_r}{2} \theta \Big|_{\alpha}^{\delta}$$

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m (\cos\alpha - \cos\delta) - \frac{R_c I_d}{2} (\delta - \alpha)$$

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m (\cos\alpha - \cos\delta) - \frac{R_c I_d}{2} \cdot \mu$$

$$\Delta U_d = \frac{3}{\pi} A$$

$$\Delta U_d = \frac{3}{\pi} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} E_m (\cos\alpha - \cos\delta) - \frac{R_c I_d}{2} \mu \right)$$

$$\Delta U_d = \frac{U_{do} \cos\alpha}{2} - \frac{U_{do} \cos\delta}{2} - \frac{3R_c I_d \mu}{2\pi} \quad (2.82)$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - \Delta U_d$$

$$U_d = \frac{U_{do}}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) - \frac{3R_c I_d \mu}{2\pi} \quad (2.83)$$

Conforme mostrado anteriormente,

$$\frac{U_{do}}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) = U_{do} \cos\alpha - \frac{3X_c}{\pi} I_d$$

Substituindo na equação (2.83):

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - I_d \left[ \frac{3X_c}{\pi} + \frac{3\mu R_c}{2\pi} \right]$$

$$U_d = U_{do} \cos\alpha - R_{cr} I_d \quad (2.84)$$

Onde:

$$R_{cr} = \frac{3X_c}{\pi} + \frac{3\mu R_c}{2\pi} \quad (2.85)$$

$R_{cr}$ : resistência equivalente considerando-se o efeito da resistência de comutação.

A Figura 2.28 ilustra o modelo para ponte retificadora.

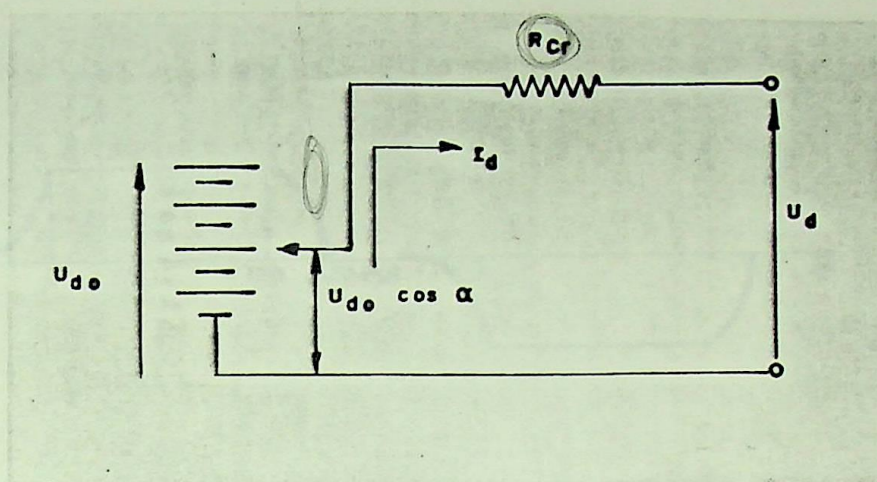


Figura 2.28 - Circuito equivalente para ponte retificadora considerando-se o efeito da resistência de comutação

A Figura 2.29 ilustra o circuito equivalente para ponte inversora.

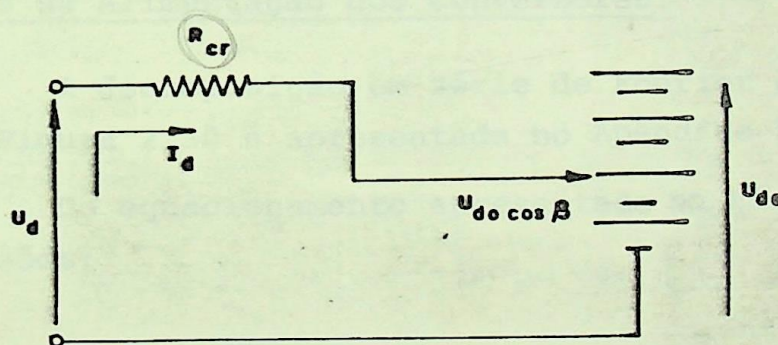


Figura 2.29 - Circuito equivalente para ponte inversora considerando-se o efeito da resistência de comutação

## 2.5 - HARMÔNICOS NO SISTEMA CONVERSOR

### 2.5.1 - Considerações Iniciais

A corrente de alimentação dos conversores é não senoidal e, quando decomposta em série trigonométrica de Fourier, aparecem harmônicos. A Figura 2.30 mostra a corrente de alimentação do conversor.

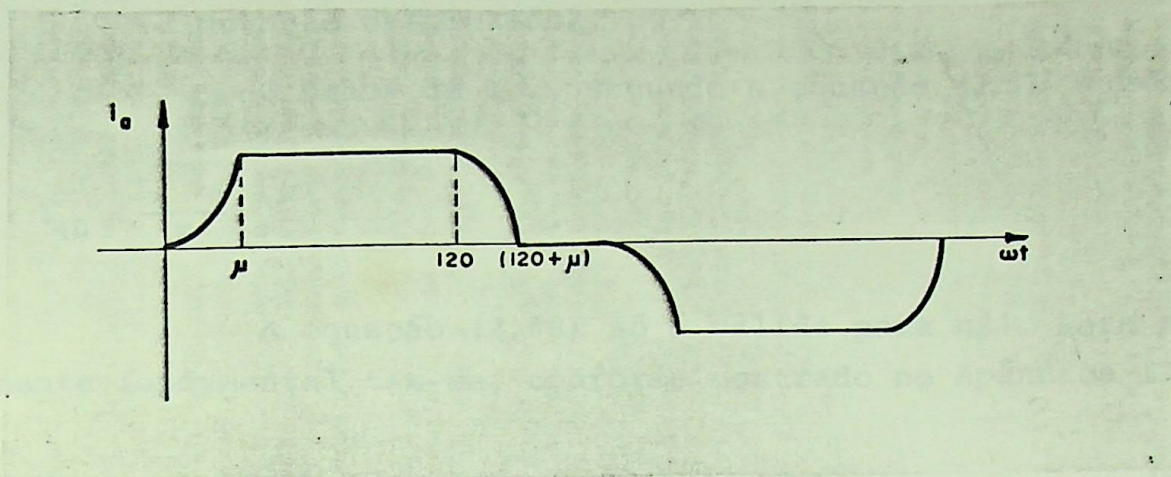


Figura 2.30 - Corrente de alimentação do conversor - fase a

O equacionamento é apresentado no item a seguir.

### 2.5.2 - Decomposição em Série Trigonométrica de Fourier da Corrente de Alimentação dos Conversores

A decomposição em série de Fourier da corrente  $i$  ilustrada na Figura 2.30 é apresentada no Apêndice II.

Do equacionamento apresentado no Apêndice II obtêm-se as expressões:

$$H = \left[ \frac{\text{sen } \frac{(n+1)\mu}{2}}{n+1} \right] \quad (2.86)$$

$$K = \left[ \frac{\text{sen } \frac{(n-1)\mu}{2}}{n-1} \right] \quad (2.87)$$

$$\frac{I_n}{I_{10}} = \frac{\sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{n(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (2.88)$$

$$\frac{I_n}{I_{no}} = \frac{\sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (2.89)$$

Sendo  $I_n$  = valor eficaz da componente harmônica da ordem n.

$I_{10}$  = valor eficaz da componente fundamental (efeito da comutação desprezado).

O valor de  $I_{10}$ , segundo a equação (2.57) é dado por:

$$I_{10} = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi}$$

A equação (2.88) só é válida para  $n \neq 1$ . Para a componente fundamental tem-se, conforme mostrado no Apêndice II.

$$H_1 = \cos 2\alpha - \cos 2\delta \quad (2.90)$$

$$K_1 = \sin 2\delta - \sin 2\alpha - 2\mu \quad (2.91)$$

$$\frac{I_1}{I_{10}} = \frac{\sqrt{H_1^2 + K_1^2}}{4(\cos \alpha - \cos \delta)} \quad (2.92)$$

A componente fundamental conforme mostrado no Apêndice II é dada por:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3} I_d}{2\pi(\cos \alpha - \cos \delta)} [(\cos 2\alpha - \cos 2\delta) - j(2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2\delta)] \quad (2.93)$$

Os harmônicos existentes obedecem à relação  $6K \pm 1$ ,  $K=1,2,3,4,\dots$ . Estes harmônicos são chamados de característicos, podendo-se citar, por exemplo, o 5º, 7º, 11º, 13º, 17º, 19º,...

O fluxograma do programa desenvolvido para cálculo dos fatores de redução dos harmônicos é apresentado na Figura 2.31.

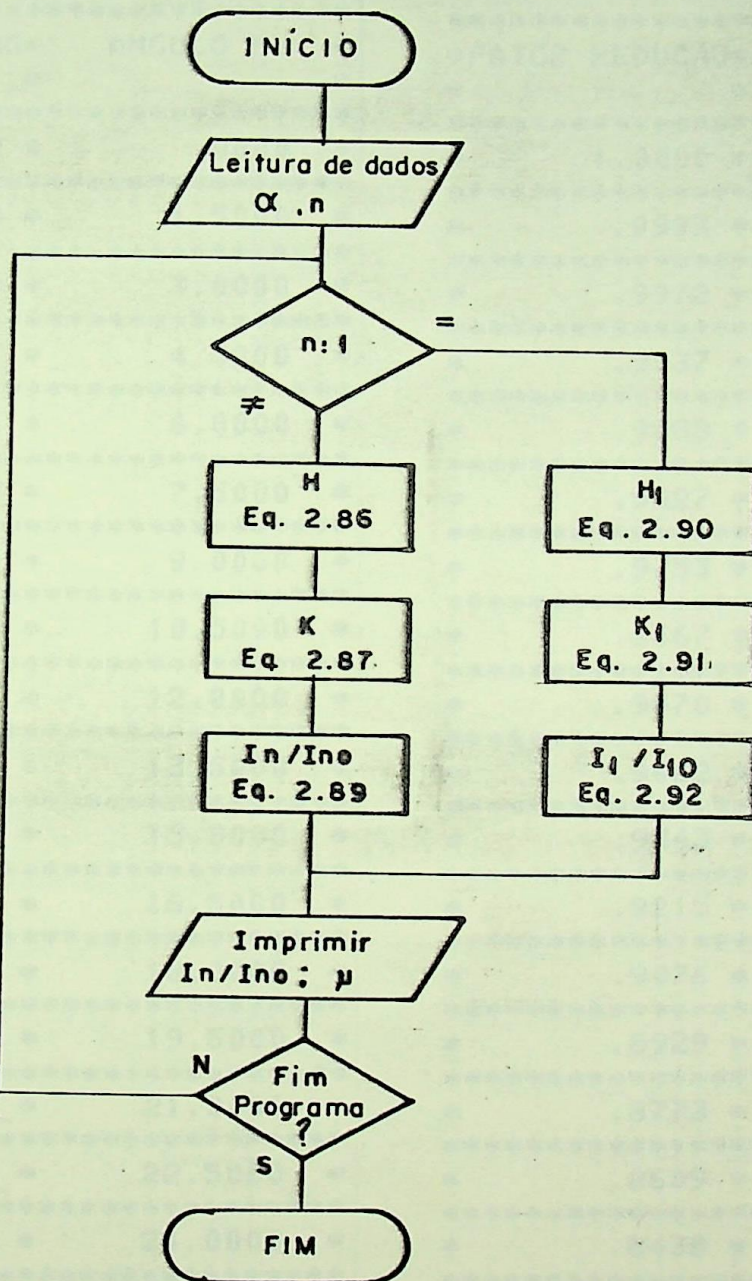


Figura 2.31 - Fluxograma para cálculo dos fatores de redução dos harmônicos

Os fatores de redução dos harmônicos, considerando-se o efeito da comutação, são apresentados nas tabelas a seguir. Os ângulos de disparo considerados são, por exemplo,  $10^\circ$  e  $30^\circ$ .

```

*****
*           ALFA=10.00 GRAUS           *
*                                       *
*           HARMONICO= 1.00            *
*                                       *
*****
*FATOR REDUCAO*   ANGULO MU   *
*           *           *
* 1.0000 *           .0000 *
*****
* 1.0000 *           1.5000 *
*****
* .9999 *           3.0000 *
*****
* .9997 *           4.5000 *
*****
* .9996 *           6.0000 *
*****
* .9993 *           7.5000 *
*****
* .9990 *           9.0000 *
*****
* .9987 *          10.5000 *
*****
* .9983 *          12.0000 *
*****
* .9978 *          13.5000 *
*****
* .9973 *          15.0000 *
*****
* .9968 *          16.5000 *
*****
* .9962 *          18.0000 *
*****
* .9956 *          19.5000 *
*****
* .9949 *          21.0000 *
*****
* .9942 *          22.5000 *
*****
* .9934 *          24.0000 *
*****
* .9926 *          25.5000 *
*****
* .9918 *          27.0000 *
*****
* .9909 *          28.5000 *
*****
* .9899 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.6 - Fator redução x MU  
 $\alpha=10^\circ$ ;  $n=1$

```

*****
*           ALFA=10.00 GRAUS           *
*                                       *
*           HARMONICO= 5.00            *
*                                       *
*****
*FATOR REDUCAO*   ANGULO MU   *
*           *           *
* 1.0000 *           .0000 *
*****
* .9993 *           1.5000 *
*****
* .9972 *           3.0000 *
*****
* .9937 *           4.5000 *
*****
* .9888 *           6.0000 *
*****
* .9827 *           7.5000 *
*****
* .9753 *           9.0000 *
*****
* .9667 *          10.5000 *
*****
* .9570 *          12.0000 *
*****
* .9462 *          13.5000 *
*****
* .9343 *          15.0000 *
*****
* .9215 *          16.5000 *
*****
* .9076 *          18.0000 *
*****
* .8929 *          19.5000 *
*****
* .8773 *          21.0000 *
*****
* .8609 *          22.5000 *
*****
* .8438 *          24.0000 *
*****
* .8259 *          25.5000 *
*****
* .8074 *          27.0000 *
*****
* .7882 *          28.5000 *
*****
* .7685 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.7 - Fator redução x MU  
 $\alpha=10^\circ$ ;  $n=5$

```

*****
*      ALFA=10.00  GRAUS      *
*                               *
*      HARMONICO= 7.00      *
*                               *
*****
*FATOR REDUCAO*  ANGULO MU  *
*                               *
*****
*      1.0000 *      .0000 *
*****
*      .9986 *      1.5000 *
*****
*      .9944 *      3.0000 *
*****
*      .9876 *      4.5000 *
*****
*      .9782 *      6.0000 *
*****
*      .9662 *      7.5000 *
*****
*      .9520 *      9.0000 *
*****
*      .9355 *     10.5000 *
*****
*      .9169 *     12.0000 *
*****
*      .8963 *     13.5000 *
*****
*      .8740 *     15.0000 *
*****
*      .8499 *     16.5000 *
*****
*      .8244 *     18.0000 *
*****
*      .7975 *     19.5000 *
*****
*      .7693 *     21.0000 *
*****
*      .7401 *     22.5000 *
*****
*      .7100 *     24.0000 *
*****
*      .6791 *     25.5000 *
*****
*      .6477 *     27.0000 *
*****
*      .6158 *     28.5000 *
*****
*      .5837 *     30.0000 *
*****

```

Tabela 2.8 - Fator redução x MU  
 $\alpha=10^\circ$ ;  $n=7$

```

*****
*      ALFA=10.00  GRAUS      *
*                               *
*      HARMONICO=11.00      *
*                               *
*****
*FATOR REDUCAO*  ANGULO MU  *
*                               *
*****
*      1.0000 *      .0000 *
*****
*      .9966 *      1.5000 *
*****
*      .9863 *      3.0000 *
*****
*      .9695 *      4.5000 *
*****
*      .9466 *      6.0000 *
*****
*      .9179 *      7.5000 *
*****
*      .8840 *      9.0000 *
*****
*      .8454 *     10.5000 *
*****
*      .8028 *     12.0000 *
*****
*      .7567 *     13.5000 *
*****
*      .7078 *     15.0000 *
*****
*      .6569 *     16.5000 *
*****
*      .6045 *     18.0000 *
*****
*      .5514 *     19.5000 *
*****
*      .4984 *     21.0000 *
*****
*      .4462 *     22.5000 *
*****
*      .3956 *     24.0000 *
*****
*      .3475 *     25.5000 *
*****
*      .3029 *     27.0000 *
*****
*      .2629 *     28.5000 *
*****
*      .2286 *     30.0000 *
*****

```

Tabela 2.9 - Fator redução x MU  
 $\alpha=10^\circ$ ;  $n=11$

```

*****
*           ALFA=10.00  GRAUS           *
*                                           *
*           HARMONICO=13.00           *
*                                           *
*****
*FATOR REDUCAO*   ANGULO MU   *
*           *           *
*****
*           1.0000 *           .0000 *
*****
*           .9952 *           1.5000 *
*****
*           .9809 *           3.0000 *
*****
*           .9576 *           4.5000 *
*****
*           .9259 *           6.0000 *
*****
*           .8865 *           7.5000 *
*****
*           .8404 *           9.0000 *
*****
*           .7885 *          10.5000 *
*****
*           .7319 *          12.0000 *
*****
*           .6717 *          13.5000 *
*****
*           .6090 *          15.0000 *
*****
*           .5451 *          16.5000 *
*****
*           .4813 *          18.0000 *
*****
*           .4188 *          19.5000 *
*****
*           .3591 *          21.0000 *
*****
*           .3037 *          22.5000 *
*****
*           .2547 *          24.0000 *
*****
*           .2142 *          25.5000 *
*****
*           .1846 *          27.0000 *
*****
*           .1678 *          28.5000 *
*****
*           .1633 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.10 - Fator redução x MU  
 $\alpha=10^{\circ}$ ;  $n=13$

```

*****
*           ALFA=10.00  GRAUS           *
*                                           *
*           HARMONICO=17.00           *
*                                           *
*****
*FATOR REDUCAO*   ANGULO MU   *
*           *           *
*****
*           1.0000 *           .0000 *
*****
*           .9918 *           1.5000 *
*****
*           .9675 *           3.0000 *
*****
*           .9282 *           4.5000 *
*****
*           .8754 *           6.0000 *
*****
*           .8109 *           7.5000 *
*****
*           .7372 *           9.0000 *
*****
*           .6565 *          10.5000 *
*****
*           .5717 *          12.0000 *
*****
*           .4854 *          13.5000 *
*****
*           .4008 *          15.0000 *
*****
*           .3211 *          16.5000 *
*****
*           .2504 *          18.0000 *
*****
*           .1943 *          19.5000 *
*****
*           .1596 *          21.0000 *
*****
*           .1503 *          22.5000 *
*****
*           .1604 *          24.0000 *
*****
*           .1782 *          25.5000 *
*****
*           .1951 *          27.0000 *
*****
*           .2069 *          28.5000 *
*****
*           .2120 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.11 - Fator redução x MU  
 $\alpha=10^{\circ}$ ;  $n=17$

```

*****
*      ALFA=30.00  GRAUS      *
*      *      *      *
*      HARMONICO= 1.00      *
*      *      *      *
*****
*FATOR REDUCAO*  ANGULO MU *
*      *      *      *
*****
*      1.0000 *      .0000 *
*****
*      1.0000 *      1.5000 *
*****
*      .9999 *      3.0000 *
*****
*      .9997 *      4.5000 *
*****
*      .9995 *      6.0000 *
*****
*      .9993 *      7.5000 *
*****
*      .9990 *      9.0000 *
*****
*      .9986 *      10.5000 *
*****
*      .9982 *      12.0000 *
*****
*      .9977 *      13.5000 *
*****
*      .9972 *      15.0000 *
*****
*      .9966 *      16.5000 *
*****
*      .9960 *      18.0000 *
*****
*      .9953 *      19.5000 *
*****
*      .9945 *      21.0000 *
*****
*      .9937 *      22.5000 *
*****
*      .9929 *      24.0000 *
*****
*      .9920 *      25.5000 *
*****
*      .9910 *      27.0000 *
*****
*      .9900 *      28.5000 *
*****
*      .9890 *      30.0000 *
*****

```

Tabela 2.12 - Fator redução x MU  
 $\alpha=30^{\circ}$ ;  $n=1$

```

*****
*      ALFA=30.00  GRAUS      *
*      *      *      *
*      HARMONICO= 5.00      *
*      *      *      *
*****
*FATOR REDUCAO*  ANGULO MU *
*      *      *      *
*****
*      1.0000 *      .0000 *
*****
*      .9993 *      1.5000 *
*****
*      .9971 *      3.0000 *
*****
*      .9936 *      4.5000 *
*****
*      .9886 *      6.0000 *
*****
*      .9823 *      7.5000 *
*****
*      .9746 *      9.0000 *
*****
*      .9656 *      10.5000 *
*****
*      .9553 *      12.0000 *
*****
*      .9438 *      13.5000 *
*****
*      .9310 *      15.0000 *
*****
*      .9170 *      16.5000 *
*****
*      .9019 *      18.0000 *
*****
*      .8857 *      19.5000 *
*****
*      .8685 *      21.0000 *
*****
*      .8503 *      22.5000 *
*****
*      .8312 *      24.0000 *
*****
*      .8112 *      25.5000 *
*****
*      .7904 *      27.0000 *
*****
*      .7688 *      28.5000 *
*****
*      .7465 *      30.0000 *
*****

```

Tabela 2.13 - Fator redução x MU  
 $\alpha=30^{\circ}$ ;  $n=5$

```

*****
*   ALFA=30.00 GRAUS   *
*   *                   *
*   HARMONICO= 7.00    *
*   *                   *
*****
*FATOR REDUCAO*  ANGULO MU *
*   *                   *
*****
*   1.0000 *           .0000 *
*****
*   .9986 *           1.5000 *
*****
*   .9944 *           3.0000 *
*****
*   .9875 *           4.5000 *
*****
*   .9778 *           6.0000 *
*****
*   .9655 *           7.5000 *
*****
*   .9506 *           9.0000 *
*****
*   .9333 *          10.5000 *
*****
*   .9136 *          12.0000 *
*****
*   .8916 *          13.5000 *
*****
*   .8675 *          15.0000 *
*****
*   .8414 *          16.5000 *
*****
*   .8134 *          18.0000 *
*****
*   .7838 *          19.5000 *
*****
*   .7526 *          21.0000 *
*****
*   .7200 *          22.5000 *
*****
*   .6863 *          24.0000 *
*****
*   .6515 *          25.5000 *
*****
*   .6160 *          27.0000 *
*****
*   .5797 *          28.5000 *
*****
*   .5430 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.14 - Fator redução x MU  
 $\alpha=30^{\circ}$ ;  $n=7$

```

*****
*   ALFA=30.00 GRAUS   *
*   *                   *
*   HARMONICO=11.00    *
*   *                   *
*****
*FATOR REDUCAD*  ANGULO MU *
*   *                   *
*****
*   1.0000 *           .0000 *
*****
*   .9965 *           1.5000 *
*****
*   .9862 *           3.0000 *
*****
*   .9692 *           4.5000 *
*****
*   .9458 *           6.0000 *
*****
*   .9162 *           7.5000 *
*****
*   .8808 *           9.0000 *
*****
*   .8402 *          10.5000 *
*****
*   .7949 *          12.0000 *
*****
*   .7454 *          13.5000 *
*****
*   .6924 *          15.0000 *
*****
*   .6367 *          16.5000 *
*****
*   .5788 *          18.0000 *
*****
*   .5196 *          19.5000 *
*****
*   .4597 *          21.0000 *
*****
*   .4000 *          22.5000 *
*****
*   .3413 *          24.0000 *
*****
*   .2843 *          25.5000 *
*****
*   .2303 *          27.0000 *
*****
*   .1803 *          28.5000 *
*****
*   .1367 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.15 - Fator redução x MU  
 $\alpha=30^{\circ}$ ;  $n=11$

```

*****
*           ALFA=30.00  GRAUS           *
*                                         *
*           HARMONICO=13.00            *
*                                         *
*****
*FATOR REDUCAO*   ANGULO MU   *
*           *                       *
*****
*           1.0000 *           .0000 *
*****
*           .9952 *           1.5000 *
*****
*           .9808 *           3.0000 *
*****
*           .9572 *           4.5000 *
*****
*           .9248 *           6.0000 *
*****
*           .8841 *           7.5000 *
*****
*           .8360 *           9.0000 *
*****
*           .7813 *          10.5000 *
*****
*           .7210 *          12.0000 *
*****
*           .6561 *          13.5000 *
*****
*           .5879 *          15.0000 *
*****
*           .5175 *          16.5000 *
*****
*           .4462 *          18.0000 *
*****
*           .3752 *          19.5000 *
*****
*           .3058 *          21.0000 *
*****
*           .2397 *          22.5000 *
*****
*           .1786 *          24.0000 *
*****
*           .1260 *          25.5000 *
*****
*           .0890 *          27.0000 *
*****
*           .0800 *          28.5000 *
*****
*           .0975 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.16 - Fator redução x MU  
 $\alpha=30^\circ$ ;  $n=13$

```

*****
*           ALFA=30.00  GRAUS           *
*                                         *
*           HARMONICO=17.00            *
*                                         *
*****
*FATOR REDUCAO*   ANGULO MU   *
*           *                       *
*****
*           1.0000 *           .0000 *
*****
*           .9918 *           1.5000 *
*****
*           .9673 *           3.0000 *
*****
*           .9275 *           4.5000 *
*****
*           .8734 *           6.0000 *
*****
*           .8068 *           7.5000 *
*****
*           .7298 *           9.0000 *
*****
*           .6445 *          10.5000 *
*****
*           .5535 *          12.0000 *
*****
*           .4596 *          13.5000 *
*****
*           .3655 *          15.0000 *
*****
*           .2741 *          16.5000 *
*****
*           .1889 *          18.0000 *
*****
*           .1155 *          19.5000 *
*****
*           .0707 *          21.0000 *
*****
*           .0826 *          22.5000 *
*****
*           .1216 *          24.0000 *
*****
*           .1587 *          25.5000 *
*****
*           .1869 *          27.0000 *
*****
*           .2047 *          28.5000 *
*****
*           .2119 *          30.0000 *
*****

```

Tabela 2.17 - Fator redução x MU  
 $\alpha=30^\circ$ ;  $n=17$

Os gráficos dos componentes harmônicos de corrente  $I_n$ , normalizadas pela componente fundamental  $I_{10}$ , em função do ângulo de comutação são apresentados nas figuras a seguir. O ângulo  $\alpha$  é tomado como parâmetro em cada curva.

A Figura 2.32 ilustra o gráfico  $\frac{I_5}{I_{10}} \% \times MU$ .

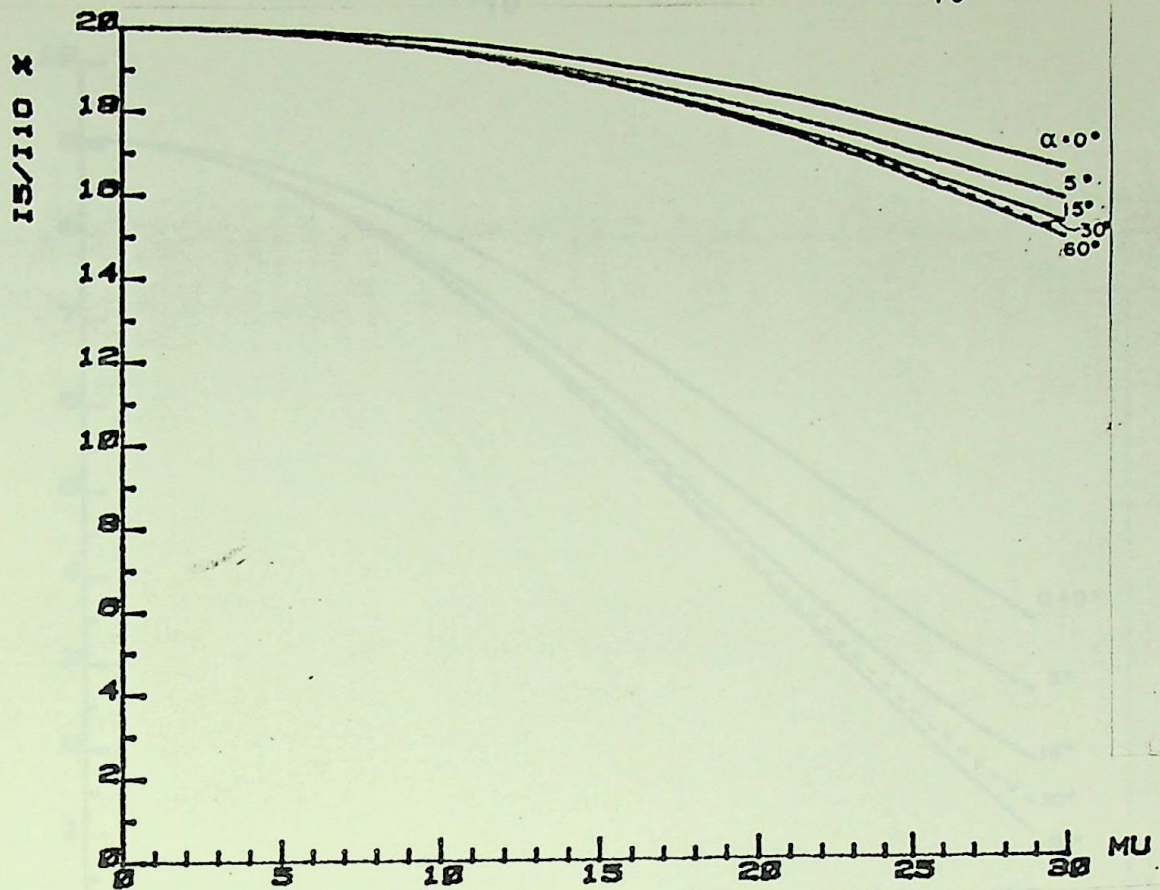


Figura 2.32 -  $\frac{I_5}{I_{10}} \% \times MU$

O gráfico  $\frac{I_7}{I_{10}} \% \times MU$  é mostrado na Figura 2.33.



Figura 2.33 -  $\frac{I_7}{I_{10}} \% \times MU$

O gráfico  $\frac{I_{11}}{I_{10}} \times MU$  é apresentado na Figura 2.34.

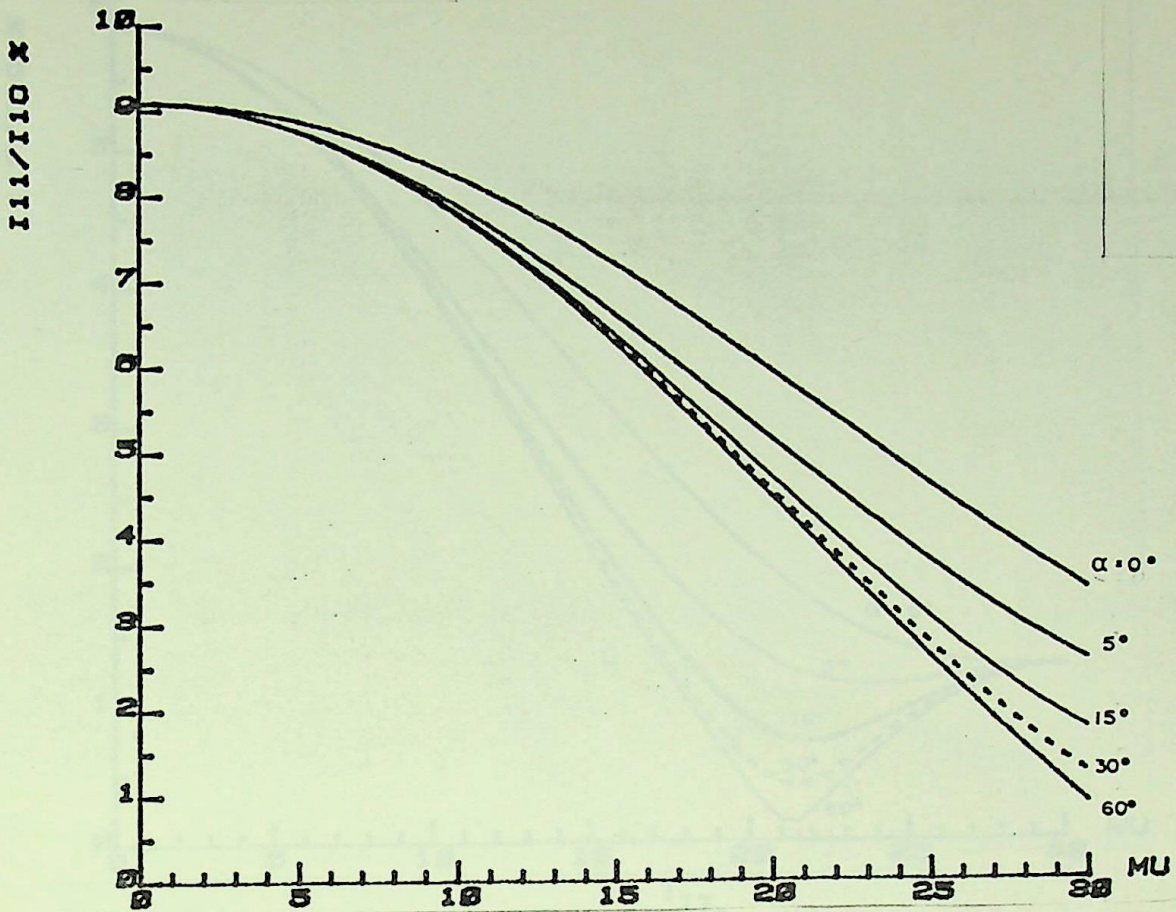


Figura 2.34 -  $\frac{I_{11}}{I_{10}} \times MU$

A Figura 2.35 ilustra o gráfico  $\frac{I_{13}}{I_{10}} \times MU$ .

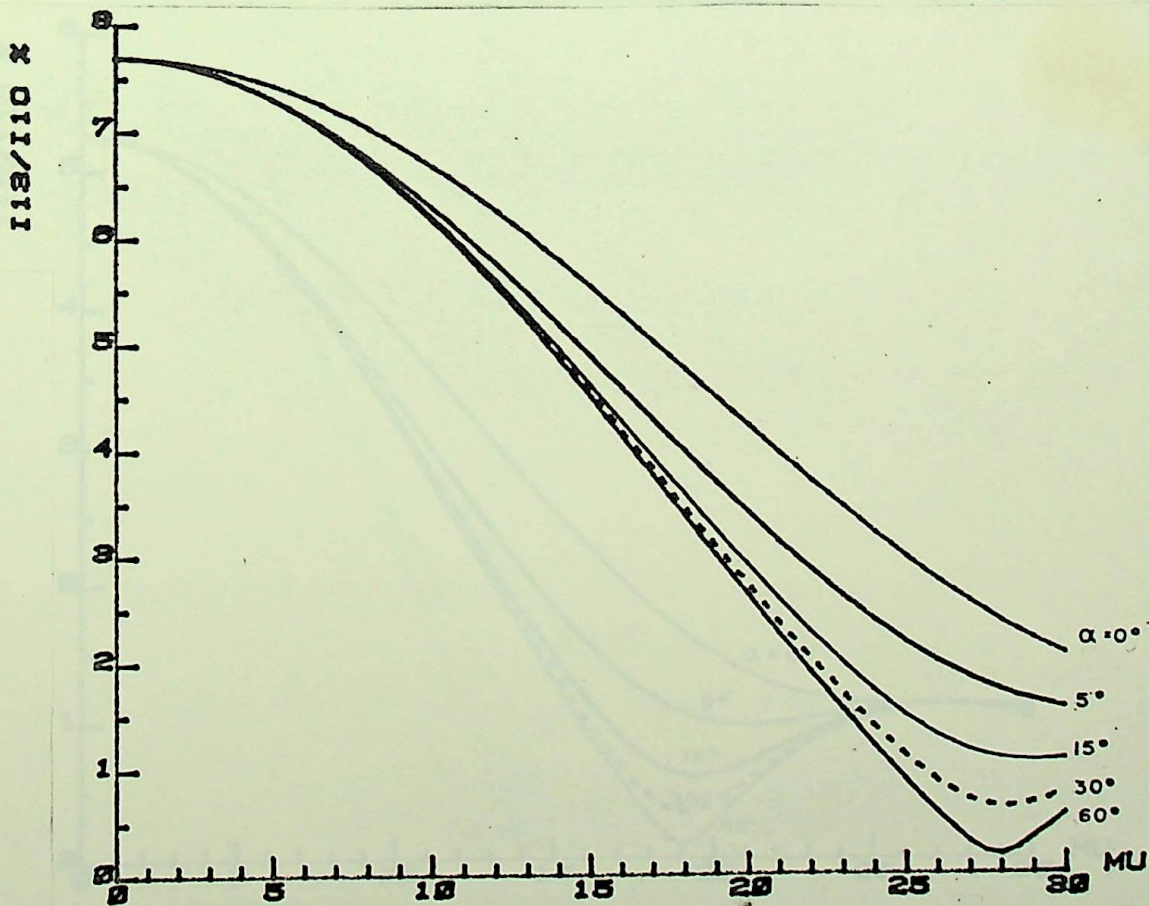


Figura 2.35 -  $\frac{I_{13}}{I_{10}} \times MU$

O gráfico  $\frac{I_{17}}{I_{10}}\%$  é mostrado na Figura 2.36.

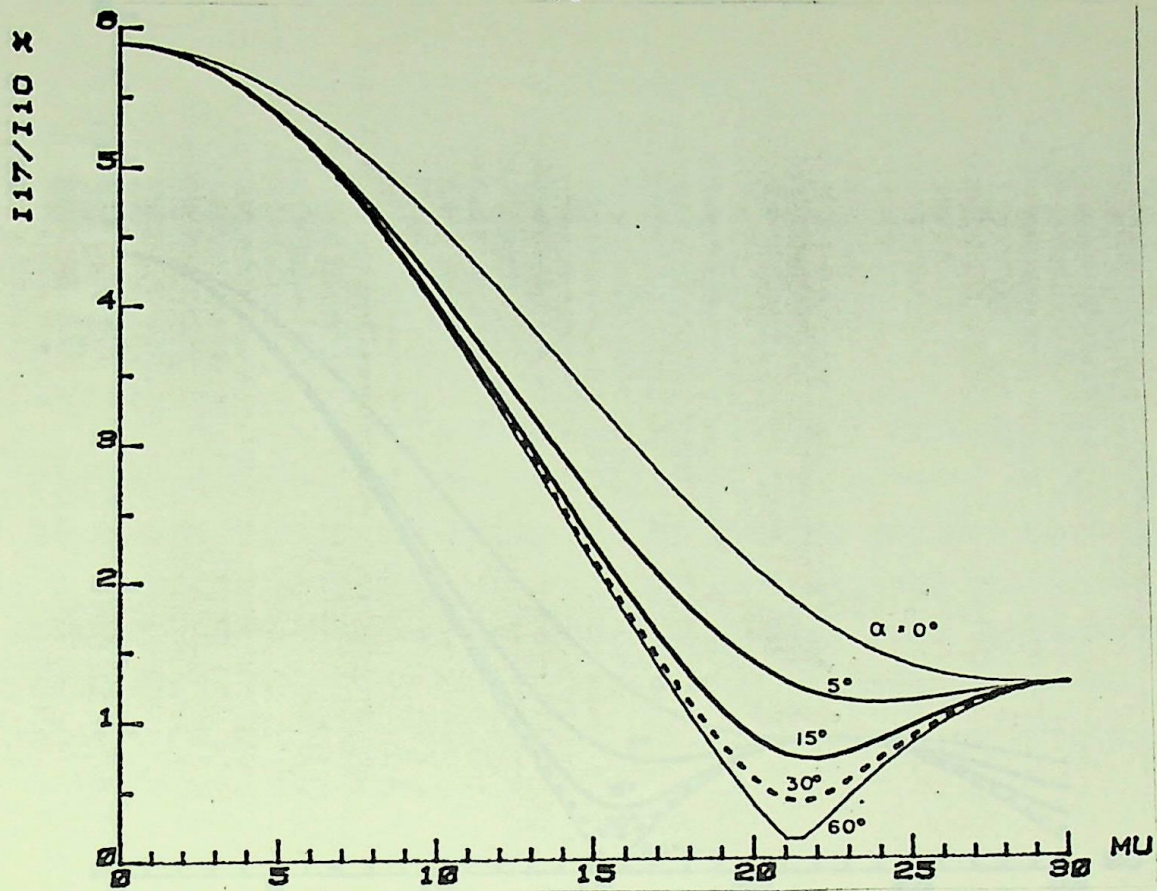


Figura 2.36 -  $\frac{I_{17}}{I_{10}}\% \times MU$

A Figura 2.37 ilustra o gráfico  $\frac{I_{19}}{I_{10}}\% \times MU$ .

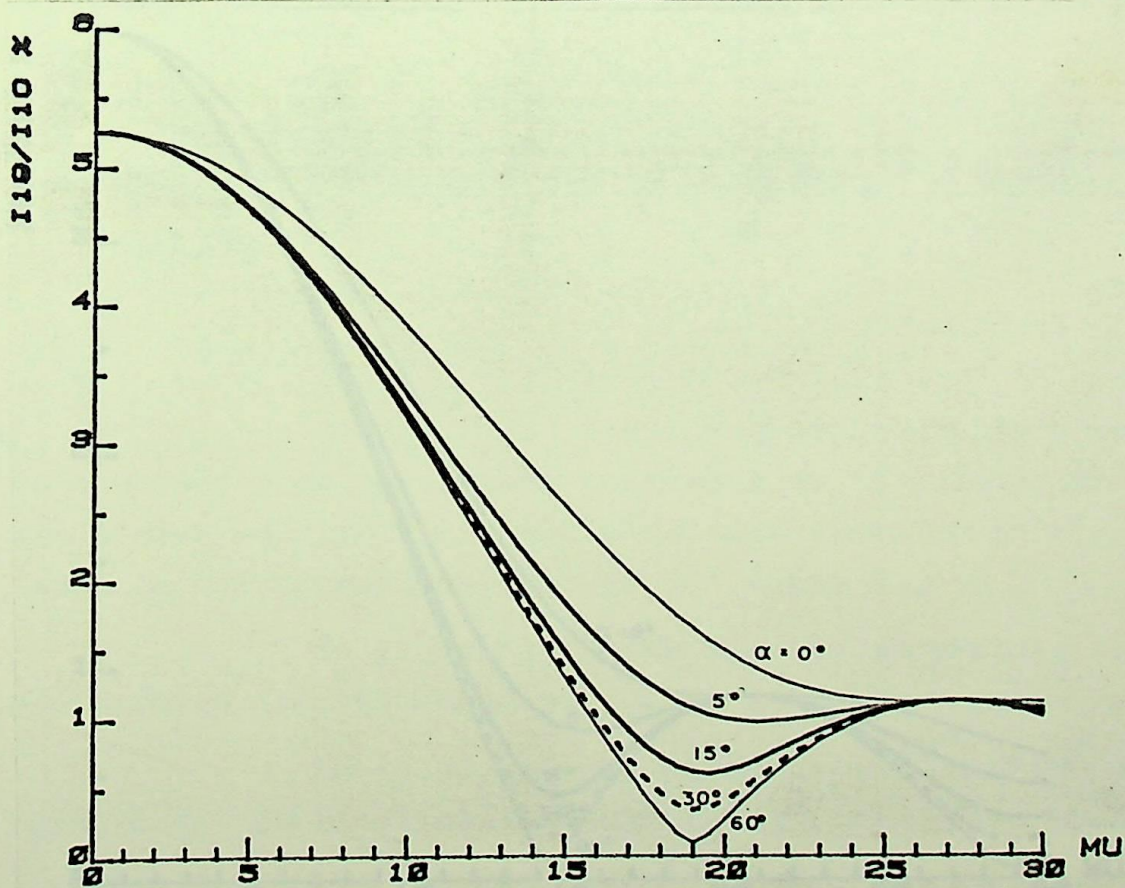


Figura 2.37 -  $\frac{I_{19}}{I_{10}}\% \times MU$

O gráfico  $\frac{I_{23}}{I_{10}} \times MU$  é ilustrado na Figura 2.38.

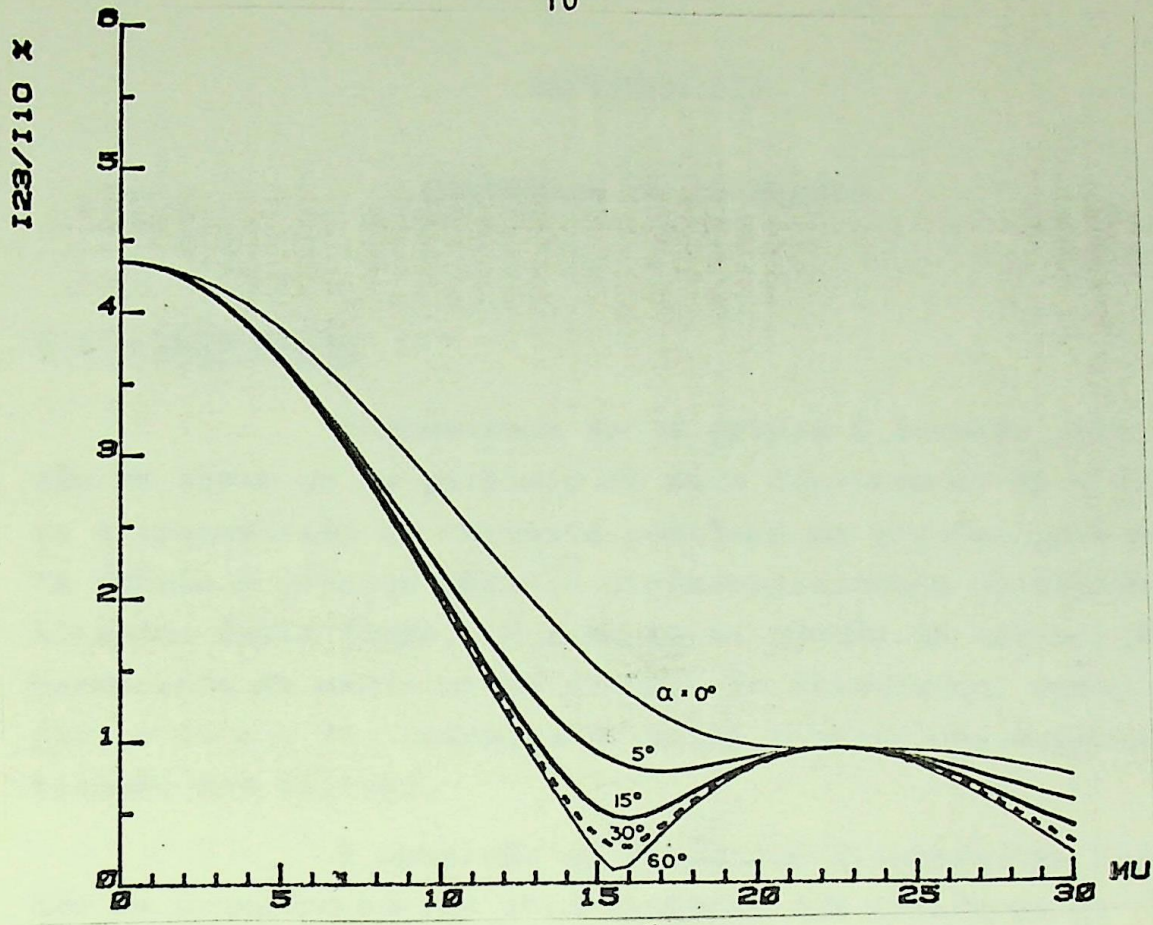


Figura 2.38 -  $\frac{I_{23}}{I_{10}} \times MU$

O gráfico  $\frac{I_{25}}{I_{10}} \times MU$  é mostrado na Figura 2.39.

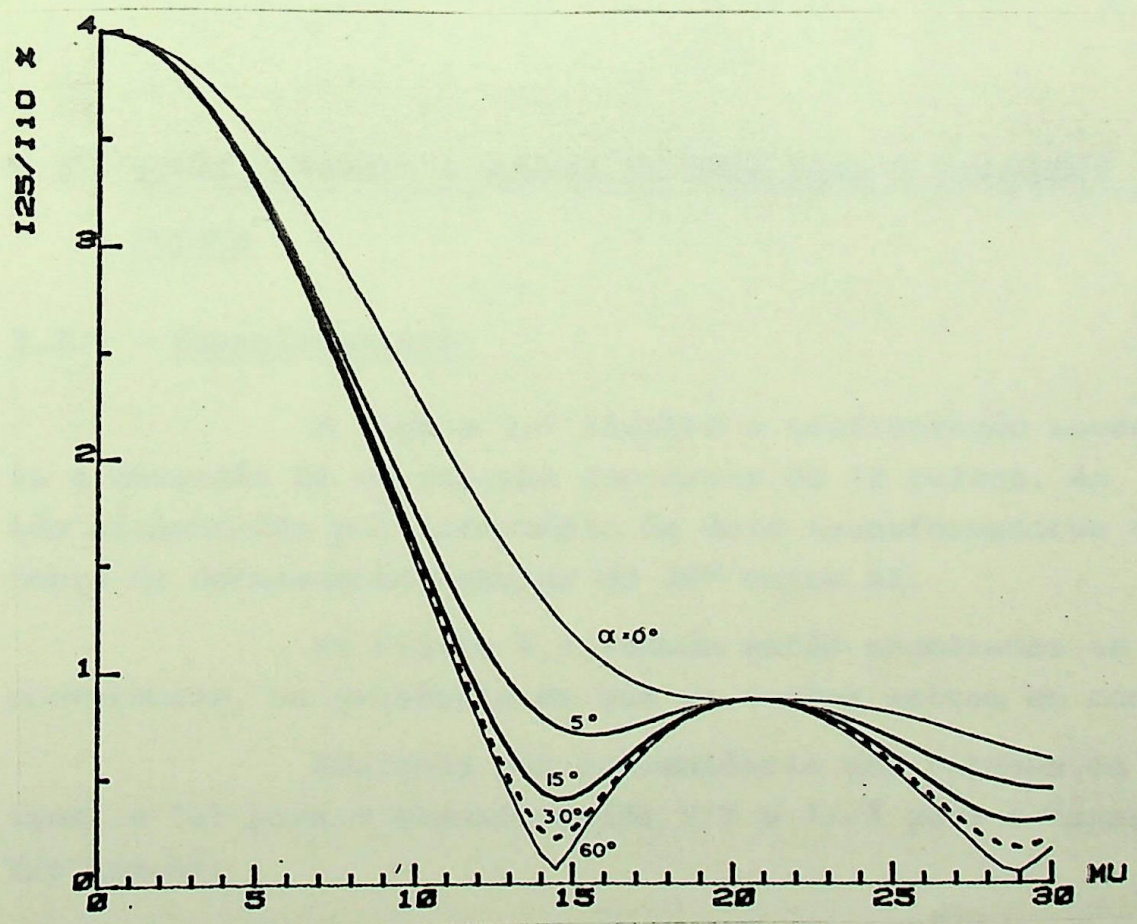


Figura 2.39 -  $\frac{I_{25}}{I_{10}} \times MU$

## CAPÍTULO III

## CONVERSOR DE 12 PULSOS

3.1 - INTRODUÇÃO

O conversor de 12 pulsos é formado pela associação em série ou em paralelo de dois conversores de 6 pulsos. Para a transmissão em corrente contínua de grandes potências em alta tensão o arranjo série é preferencialmente utilizado, possibilitando, desta forma, um aumento na tensão de transmissão. Os harmônicos de menor ordem também são eliminados, como, por exemplo, o 5º e o 7º. Consegue-se desta maneira uma economia na instalação dos filtros.

A operação em 12 pulsos é conseguida pela utilização de transformadores alimentadores com diferença de defasamento angular de  $30^\circ$  entre si.

A conexão paralela é mais utilizada em sistemas industriais de alta corrente.

### 3.2 - EQUACIONAMENTO E FORMAS DE ONDA PARA O CONVERSOR DE 12 PULSOS

#### 3.2.1 - Equacionamento

A Figura 3.1 ilustra a configuração necessária para a obtenção de um sistema conversor de 12 pulsos. As pontes são alimentadas por intermédio de dois transformadores com diferença de defasamento angular de  $30^\circ$  entre si.

Na Figura 3.1 também estão enumeradas as válvulas conversoras, na sequência em que as mesmas entram em condução.

Adotando por conveniência uma relação de espiras igual a 1:1 para o transformador Y/Y e  $1:\sqrt{3}$  para o transformador Y/ $\Delta$  tem-se:

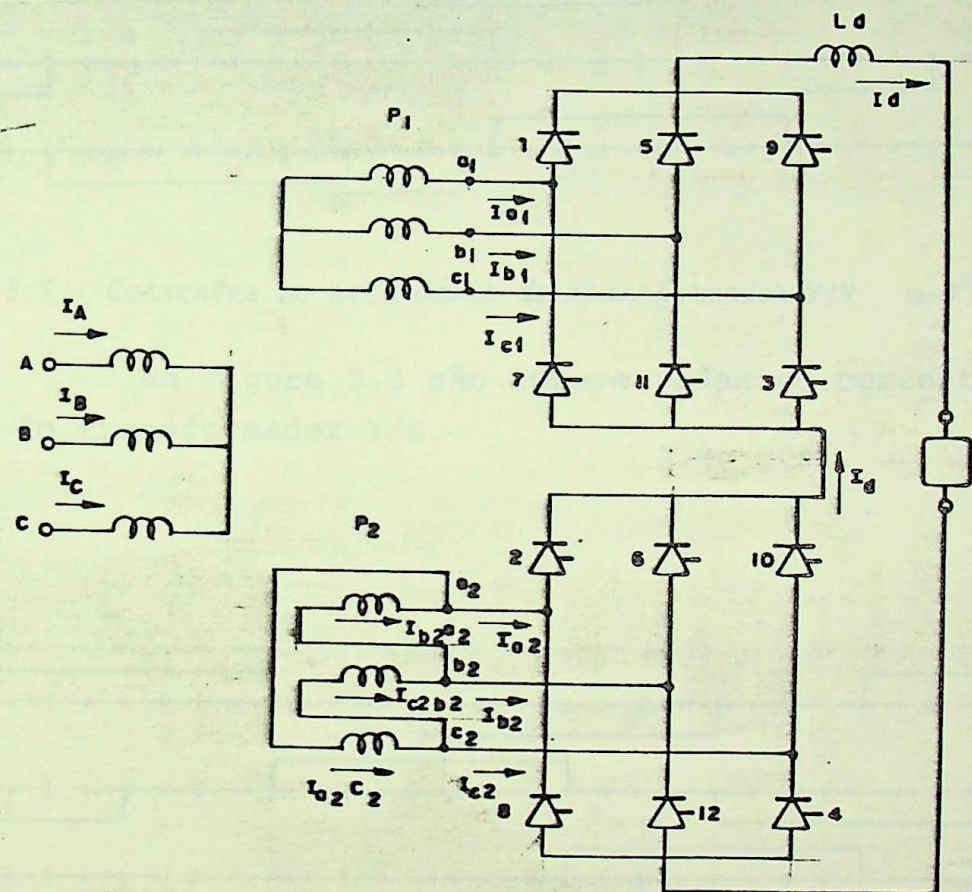


Figura 3.1 - Conversor de 12 pulsos

$$I_A = I_{a_1} + (I_{b_2 a_2})\sqrt{3} \quad (3.1)$$

$$I_B = I_{b_1} + (I_{c_2 b_2})\sqrt{3} \quad (3.2)$$

$$I_C = I_{c_1} + (I_{a_2 c_2})\sqrt{3} \quad (3.3)$$

A seguir serão ilustradas as formas de onda de corrente obtidas a partir das equações deduzidas, para ângulo de disparo igual a zero graus e ângulo de comutação também igual a zero graus.

As correntes  $I_{a_1}$ ,  $I_{b_1}$  e  $I_{c_1}$  são apresentadas no gráfico da Figura 3.2.

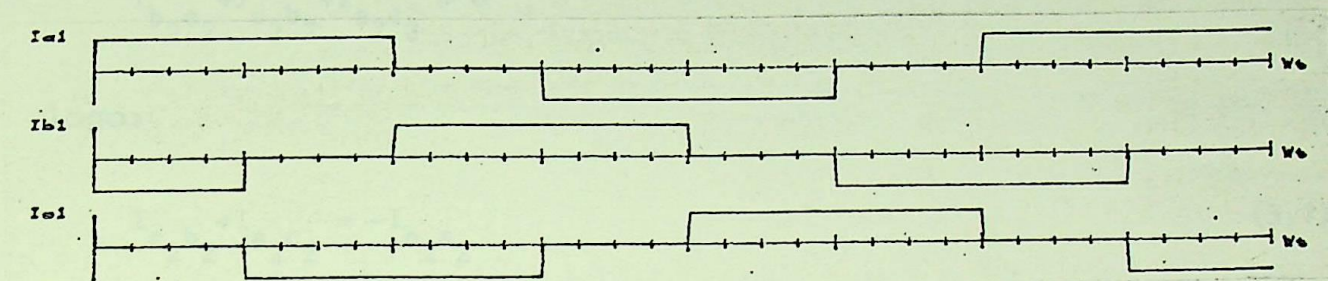


Figura 3.2 - Correntes no secundário do transformador Y/Y  $\alpha=0^0$ ,  $\mu=0^0$

Na Figura 3.3 são apresentadas as correntes no secundário do transformador Y/ $\Delta$ .

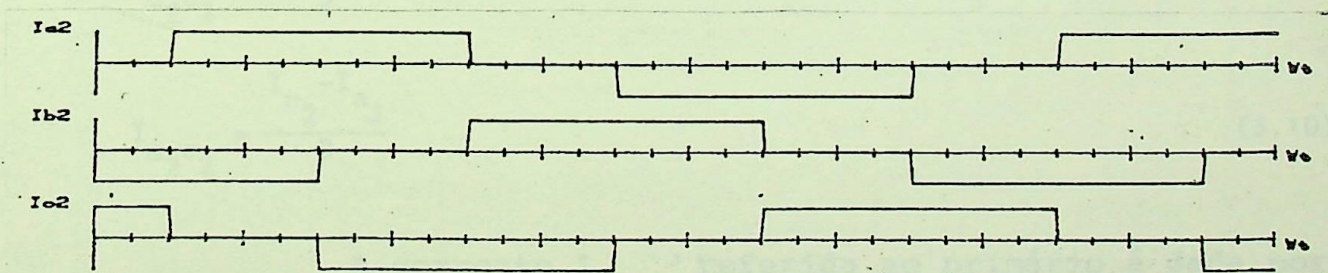


Figura 3.3 - Correntes no secundário do transformador Y/ $\Delta$   $\alpha=0^0$ ,  $\mu=0^0$

Pode-se perceber que as correntes da Figura 3.3 estão atrasadas de  $30^0$  com relação às da Figura 3.2.

Equacionando-se as correntes da ponte  $P_2$ , tem-se:

$$I_{a_2} = I_{b_2 a_2} - I_{a_2 c_2} \quad (3.4)$$

$$I_{b_2} = I_{c_2 b_2} - I_{b_2 a_2} \quad (3.5)$$

$$I_{c_2} = I_{a_2 c_2} - I_{c_2 b_2} \quad (3.6)$$

(3.5)-(3.4) resulta:

$$I_{b_2} - I_{a_2} = -2I_{b_2 a_2} + I_{c_2 b_2} + I_{a_2 c_2}$$

Mas:

$$I_{b_2 a_2} + I_{c_2 b_2} + I_{a_2 c_2} = 0$$

logo:

$$I_{c_2 b_2} + I_{a_2 c_2} = -I_{b_2 a_2} \quad (3.7)$$

$$I_{b_2} - I_{a_2} = -3I_{b_2 a_2}$$

$$I_{b_2 a_2} = \frac{I_{a_2} - I_{b_2}}{3} \quad (3.8)$$

Analogamente:

$$I_{c_2 b_2} = \frac{I_{b_2} - I_{c_2}}{3} \quad (3.9)$$

$$I_{a_2 c_2} = \frac{I_{c_2} - I_{a_2}}{3} \quad (3.10)$$

A corrente  $I_{b_2 a_2}'$  referida ao primário é dada por:

$$I_{b_2 a_2}' = \sqrt{3} \left( -\frac{I_{a_2} - I_{b_2}}{3} \right) \quad (3.11)$$

A Figura 3.4 ilustra os gráficos de  $I_{a_2}$ ,  $I_{b_2}$  e  $I_{b_2 a_2}'$ .

A corrente de linha no primário do transformador pode ser obtida como:

$$I_A = I_{a_1} + \sqrt{3} (I_{b_2 a_2}') \quad (3.12)$$

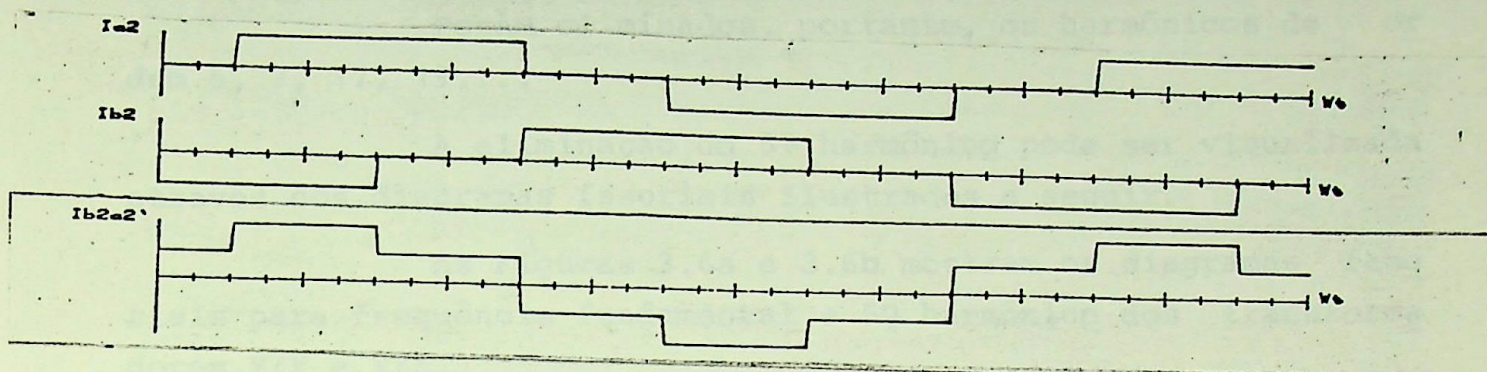


Figura 3.4 - Correntes  $I_{a_2}$ ,  $I_{b_2}$  e  $I_{b_2a_2}'$   $\alpha=0^\circ$ ;  $\mu=0^\circ$

A corrente  $I_A$  dada pela soma de  $I_{a_1}$  e  $I_{b_2a_2}'$  é ilustrada na Figura 3.5.

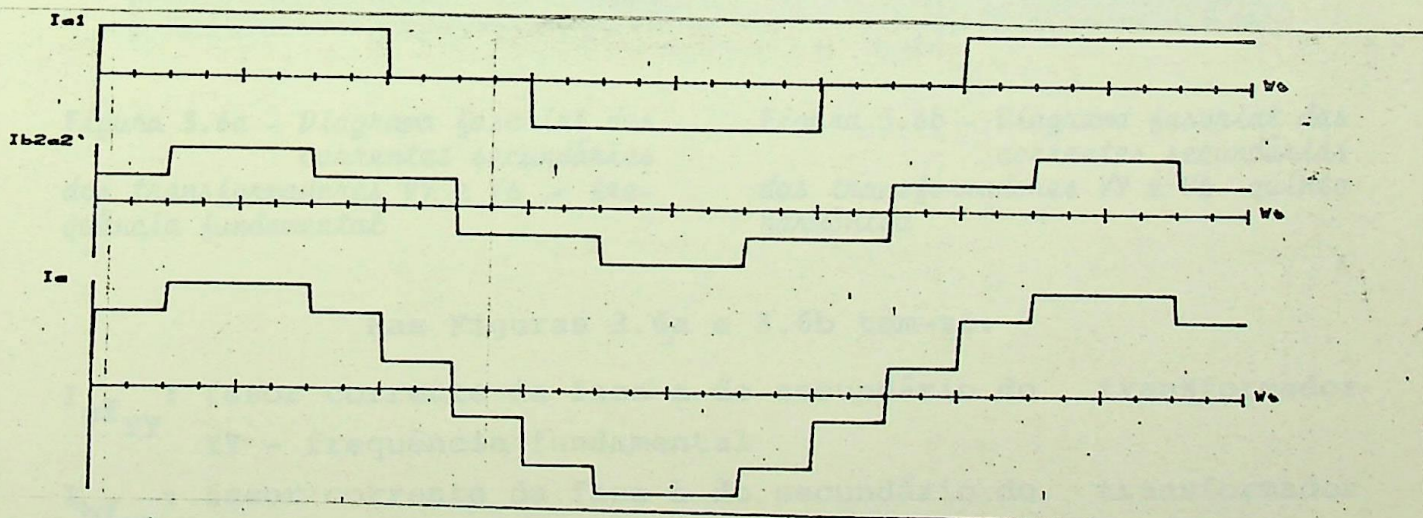


Figura 3.5 - Correntes  $I_{a_1}$ ,  $I_{b_2a_2}'$  e  $I_A$   $\alpha=0^\circ$ ;  $\mu=0^\circ$

A corrente ilustrada na Figura 3.5 possui harmônicos obedecendo à relação  $12q \pm 1$ , sendo  $q=1,2,3,4,\dots$

Logo aparecerão apenas os harmônicos 11, 13, 23, 25,...

Foram eliminados, portanto, os harmônicos de ordem 5, 7, 17, 19,...

A eliminação do 5º harmônico pode ser visualizada através dos diagramas fasoriais ilustrados a seguir.

As Figuras 3.6a e 3.6b mostram os diagramas fasoriais para frequência fundamental e 5º harmônico dos transformadores Y/Y e Y/ $\Delta$ .

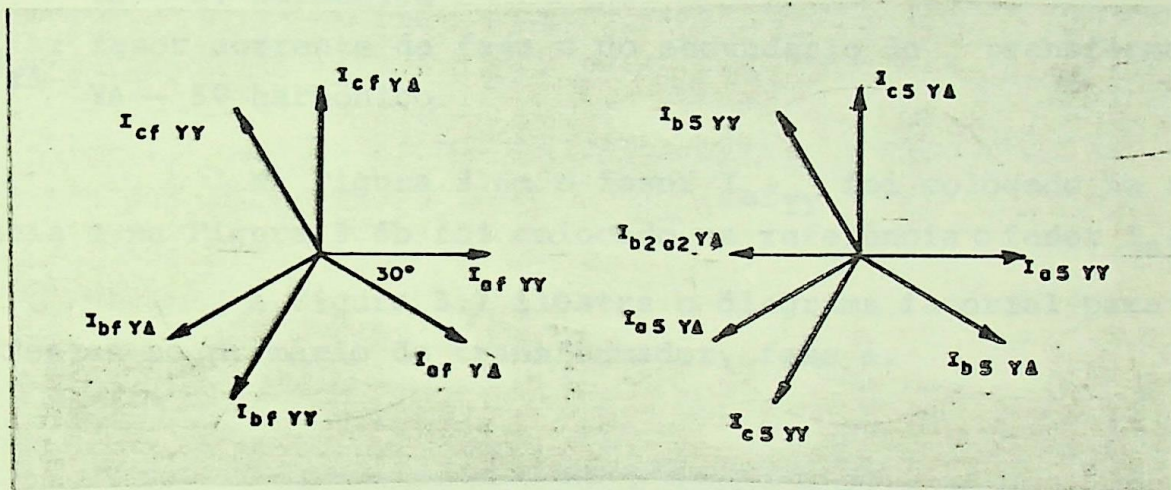


Figura 3.6a - Diagrama fasorial das correntes secundárias dos transformadores Y/Y e Y/ $\Delta$  - frequência fundamental

Figura 3.6b - Diagrama fasorial das correntes secundárias dos transformadores Y/Y e Y/ $\Delta$  - quinto harmônico.

Nas Figuras 3.6a e 3.6b tem-se:

- $I_{af\ YY}$  : fasor corrente da fase a do secundário do transformador YY - frequência fundamental
- $I_{bf\ YY}$  : fasor corrente da fase b do secundário do transformador YY - frequência fundamental
- $I_{cf\ YY}$  : fasor corrente da fase c do secundário do transformador YY - frequência fundamental
- $I_{af\ Y\Delta}$  : fasor corrente da fase a do secundário do transformador Y/ $\Delta$  - frequência fundamental

$I_{bf_{Y\Delta}}$	: fasor corrente da fase b do secundário do transformador Y $\Delta$ - frequência fundamental
$I_{cf_{Y\Delta}}$	: fasor corrente da fase c do secundário do transformador Y $\Delta$ - frequência fundamental
$I_{a5_{YY}}$	: fasor corrente da fase a do secundário do transformador YY - 5 $\varphi$ harmônico
$I_{b5_{YY}}$	: fasor corrente da fase b do secundário do transformador YY - 5 $\varphi$ harmônico
$I_{c5_{YY}}$	: fasor corrente da fase c do secundário do transformador YY - 5 $\varphi$ harmônico
$I_{a5_{Y\Delta}}$	: fasor corrente da fase a do secundário do transformador Y $\Delta$ - 5 $\varphi$ harmônico
$I_{b5_{Y\Delta}}$	: fasor corrente da fase b do secundário do transformador Y $\Delta$ - 5 $\varphi$ harmônico
$I_{c5_{Y\Delta}}$	: fasor corrente da fase c do secundário do transformador Y $\Delta$ - 5 $\varphi$ harmônico

Na Figura 3.6a o fasor  $I_{af_{YY}}$  foi colocado na referência e na Figura 3.6b foi colocado na referência o fasor  $I_{a5_{YY}}$ .

A Figura 3.7 ilustra o diagrama fasorial para as correntes no primário do transformador, fase a.

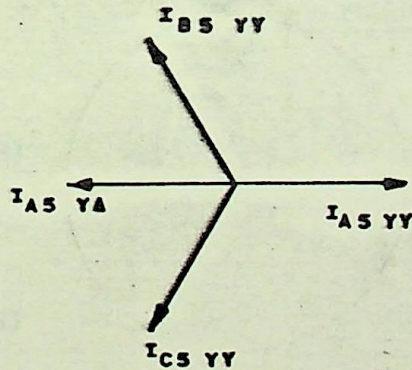


Figura 3.7 - Diagrama fasorial para as correntes no primário do transformador - fase a

Sendo:

$I_{A5_{YY}}$  : fasor corrente da fase a do primário do transformador YY-  
5 $\varphi$  harmônico

$I_{A5_{Y\Delta}}$  : fasor corrente de fase a do primário do transformador  $Y\Delta$ -  
5 $\varphi$  harmônico

Na Figura 3.7:

$$|I_{A5_{Y\Delta}}| = \sqrt{3} |I_{b_2a_2_{Y\Delta}}|$$

A corrente  $I_{b_2a_2_{Y\Delta}}$  se encontra representada na Figura 3.6b.

Pode-se perceber que a corrente resultante de 5 $\varphi$  harmônica é nula ficando desta forma mostrado por intermédio dos diagramas fasoriais a eliminação do 5 $\varphi$  harmônico em um sistema conversor de 12 pulsos.

### 3.2.2 - Formas de Onda

Sejam as tensões fase neutro e fase fase de ali-  
mentação dos conversores 1 e 2:

conversor 1

$$e_{an_1} = E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6) \quad (3.13)$$

$$e_{bn_1} = E_m \text{sen}(\omega t - \pi/2) \quad (3.14)$$

$$e_{cn_1} = E_m \text{sen}(\omega t - 7\pi/6) \quad (3.15)$$

$$e_{ab_1} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t + \pi/3) \quad (3.16)$$

$$e_{ac_1} = \sqrt{3} E_m \text{sen}\omega t \quad (3.17)$$

$$e_{bc_1} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - \pi/3) \quad (3.18)$$

$$e_{ba_1} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) \quad (3.19)$$

$$e_{ca_1} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - \pi) \quad (3.20)$$

$$e_{cb_1} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) \quad (3.21)$$

conversor 2

$$e_{an_2} = E_m \text{sen}\omega t \quad (3.22)$$

$$e_{bn_2} = E_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) \quad (3.23)$$

$$e_{cn_2} = E_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) \quad (3.24)$$

$$e_{ab_2} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6) \quad (3.25)$$

$$e_{ac_2} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - \pi/6) \quad (3.26)$$

$$e_{bc_2} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - \pi/2) \quad (3.27)$$

$$e_{ba_2} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 5\pi/6) \quad (3.28)$$

$$e_{ca_2} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 7\pi/6) \quad (3.29)$$

$$e_{cb_2} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 9\pi/6) \quad (3.30)$$

A Figura 3.8 ilustra as tensões nos conversores 1 e 2 para  $\alpha=30^\circ$  e  $\mu=15^\circ$ , bem como a tensão de saída no conversor de 12 pulsos.

As tensões nos intervalos considerados resultam:

- intervalo 1:  $0^\circ < \omega t < 15^\circ$

$$UPN_1 = e_{cb_1}$$

$$UPN_2 = 1,5 e_{cn_2}$$

$$UPN = UPN_1 + UPN_2$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) + \frac{3}{2} E_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3)$$

$$UPN = (\sqrt{3} + \frac{3}{2}) E_m \text{sen}(\omega t - 16\pi/12)$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 16\pi/12)$$

- intervalo 2:  $15^\circ < \omega t < 30^\circ$

$$UPN_1 = e_{cb_1}$$

$$UPN_2 = e_{cb_2}$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) + \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 9\pi/6)$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m [\text{sen}(\omega t - 4\pi/3) + \text{sen}(\omega t - 9\pi/6)]$$

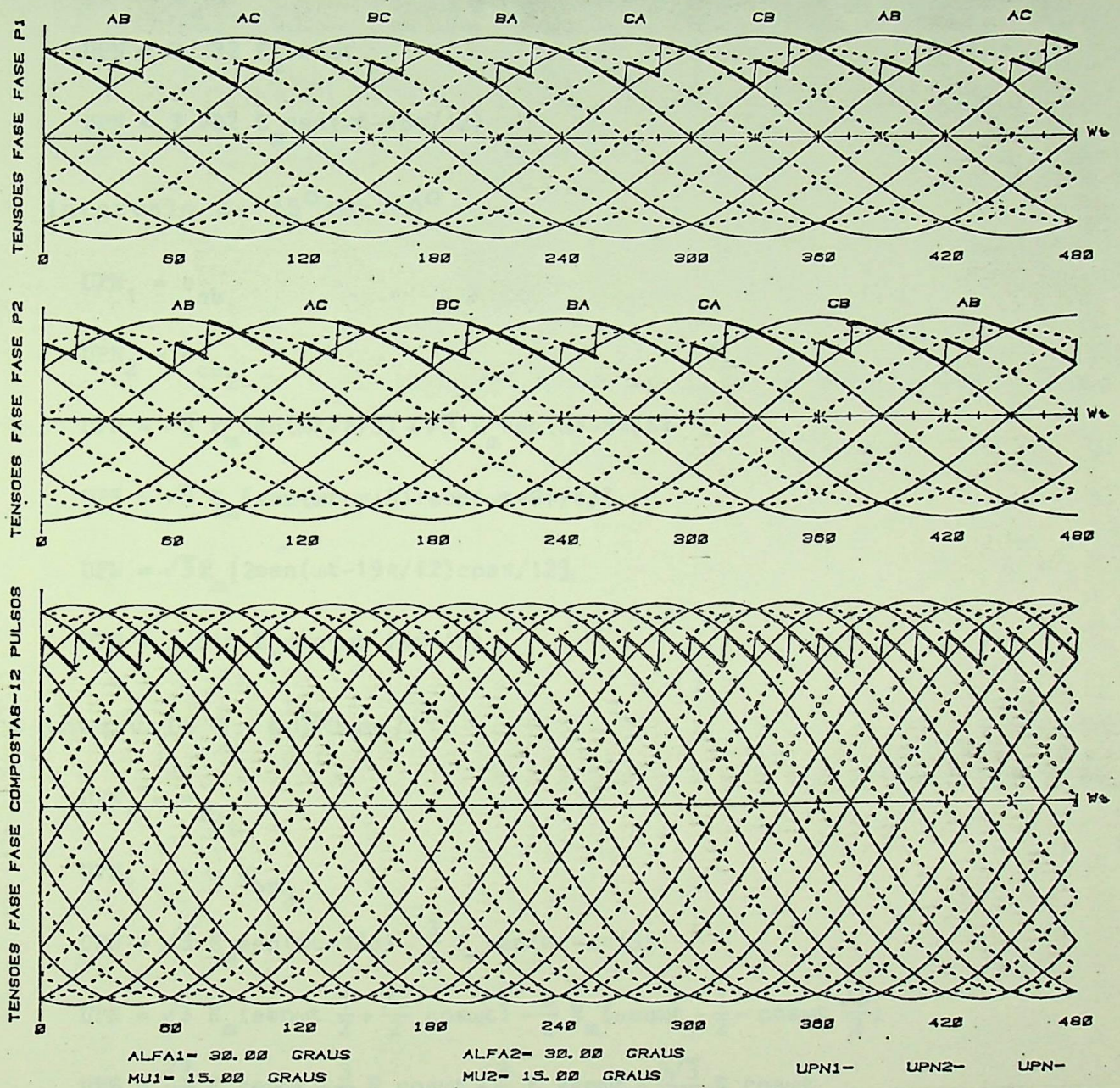


Figura 3.8 - Tensão de saída no conversor de 12 pulsos  $\alpha=30^\circ$ ,  $\mu=15^\circ$

$$UPN = \sqrt{3} E_m [2 \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) \cos\pi/12]$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 17\pi/12)$$

- intervalo 3:  $30^\circ < \omega t < 45^\circ$

$$UPN_1 = -\frac{3}{2} e_{bn_1}$$

$$UPN_2 = e_{cb_2}$$

$$UPN = -\frac{3}{2} E_m \text{sen}(\omega t - \pi/2) + \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 9\pi/6)$$

$$UPN = -\frac{3}{2} E_m (\text{sen}\omega t \times 0 - 1 \cos\omega t) + \sqrt{3} E_m (\text{sen}\omega t \times 0 + 1 \cos\omega t)$$

$$UPN = \frac{3}{2} E_m \cos\omega t + \sqrt{3} E_m \cos\omega t$$

$$UPN = 3.232 E_m \cos\omega t$$

$$UPN = 3.232 E_m \text{sen}(\omega t - 18\pi/12)$$

- intervalo 4:  $45^\circ < \omega t < 60^\circ$

$$UPN_1 = e_{ab_1}$$

$$UPN_2 = e_{cb_2}$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t + \pi/3) + \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 9\pi/6)$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m [\text{sen}(\omega t + \pi/3) + \text{sen}(\omega t - 9\pi/6)]$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m [2 \text{sen}(\omega t - 19\pi/12) \cos\pi/12]$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 19\pi/12)$$

- intervalo 5:  $60^\circ < \omega t < 75^\circ$

$$UPN_1 = e_{ab_1}$$

$$UPN_2 = -\frac{3}{2} e_{bn_2}$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t + \pi/3) - \frac{3}{2} E_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3)$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m (\text{sen}\omega t \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\omega t) - \frac{3}{2} E_m (\text{sen}\omega t - \frac{1}{2} - \cos\omega t \frac{\sqrt{3}}{2})$$

$$UPN = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \text{sen}\omega t + \frac{3}{2} E_m \cos\omega t + \frac{3}{4} E_m \text{sen}\omega t + \frac{3\sqrt{3}}{4} E_m \cos\omega t$$

$$UPN = (\text{sen}\omega t \times 1,6160 + 2,80 \cos\omega t) E_m$$

$$UPN = 3,232 E_m (\text{sen}\omega t \times 0,50 + \cos\omega t \times 0,866)$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t + \pi/3)$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 20\pi/12)$$

- intervalo 6:  $75^\circ < \omega t < 90^\circ$

$$UPN_1 = e_{ab_1}$$

$$UPN_2 = e_{ab_2}$$

$$UPN = e_{ab_1} + e_{ab_2}$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t + \pi/3) + \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6)$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m [\text{sen}(\omega t + \pi/3) + \text{sen}(\omega t + \pi/6)]$$

$$UPN = \sqrt{3} E_m [2 \text{sen}(\omega t + \pi/4) \cos \pi/12]$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 21\pi/12)$$

Procedendo analogamente para os demais intervalos tem-se:

- intervalo 7:  $90^\circ < \omega t < 105^\circ$

$$UPN_1 = \frac{3}{2} e_{an_1}$$

$$UPN_2 = e_{ab_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 22\pi/12)$$

- intervalo 8:  $105^\circ < \omega t < 120^\circ$

$$UPN_1 = e_{ac_1}$$

$$UPN_2 = e_{ab_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 23\pi/12)$$

- intervalo 9:  $120^\circ < \omega t < 135^\circ$

$$UPN_1 = e_{ac_1}$$

$$UPN_2 = \frac{3}{2} e_{an_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 24\pi/12)$$

- intervalo 10:  $135^{\circ} < \omega t < 150^{\circ}$

$$UPN_1 = e_{ac_1}$$

$$UPN_2 = e_{ac_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 25\pi/12)$$

- intervalo 11:  $150^{\circ} < \omega t < 165^{\circ}$

$$UPN_1 = -\frac{3}{2} e_{cn_1}$$

$$UPN_2 = e_{ac_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 26\pi/12)$$

- intervalo 12:  $165^{\circ} < \omega t < 180^{\circ}$

$$UPN_1 = e_{bc_1}$$

$$UPN_2 = e_{ac_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 27\pi/12)$$

- intervalo 13:  $180^{\circ} < \omega t < 195^{\circ}$

$$UPN_1 = e_{bc_1}$$

$$UPN_2 = -\frac{3}{2} e_{cn_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 28\pi/12)$$

- intervalo 14:  $195^{\circ} < \omega t < 210^{\circ}$

$$UPN_1 = e_{bc_1}$$

$$UPN_2 = e_{bc_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 29\pi/12)$$

- intervalo 15:  $210^{\circ} < \omega t < 225^{\circ}$

$$UPN_1 = e_{bn_1}$$

$$UPN_2 = e_{bc_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 30\pi/12)$$

- intervalo 16:  $225^\circ < \omega t < 240^\circ$

$$UPN_1 = e_{ba_1}$$

$$UPN_2 = e_{bc_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 31\pi/12)$$

- intervalo 17:  $240^\circ < \omega t < 255^\circ$

$$UPN_1 = e_{ba_1}$$

$$UPN_2 = \frac{3}{2} e_{bn_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 32\pi/12)$$

- intervalo 18:  $255^\circ < \omega t < 260^\circ$

$$UPN_1 = e_{ba_1}$$

$$UPN_2 = e_{ba_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 33\pi/12)$$

- intervalo 19:  $260^\circ < \omega t < 275^\circ$

$$UPN_1 = -\frac{3}{2} e_{an_1}$$

$$UPN_2 = e_{ba_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 34\pi/12)$$

- intervalo 20:  $275^\circ < \omega t < 290^\circ$

$$UPN_1 = e_{ca_1}$$

$$UPN_2 = e_{ba_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 35\pi/12)$$

- intervalo 21:  $290^\circ < \omega t < 305^\circ$

$$UPN_1 = e_{ca_1}$$

$$UPN_2 = -\frac{3}{2} e_{an_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 36\pi/12)$$

- intervalo 22:  $305^\circ < \omega t < 320^\circ$

$$UPN_1 = e_{ca_1}$$

$$UPN_2 = e_{ca_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 37\pi/12)$$

- intervalo 23:  $320^\circ < \omega t < 335^\circ$

$$UPN_1 = \frac{3}{2} e_{cn_1}$$

$$UPN_2 = e_{ca_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 38\pi/12)$$

- intervalo 24:  $335^\circ < \omega t < 350^\circ$

$$UPN_1 = e_{cb_1}$$

$$UPN_2 = e_{ca_2}$$

$$UPN = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 39\pi/12)$$

- intervalo 25:  $350^\circ < \omega t < 365^\circ$

$$UPN_1 = e_{cb_1}$$

$$UPN_2 = \frac{3}{2} e_{cn_2}$$

$$UPN = 3,232 E_m \text{sen}(\omega t - 40\pi/12)$$

Para o traçado do gabarito das curvas do conver  
sor de 12 pulsos, e considerando-se  $E_m = 180$  [V], tem-se:

- curvas de tensões fase-fase compostas

$$Y_1 = 602,292 \text{sen}(\theta - 17\pi/12)$$

$$Y_2 = 602,292 \text{sen}(\theta - 19\pi/12)$$

$$Y_3 = 602,292 \text{sen}(\theta - 21\pi/12)$$

$$Y_4 = 602,292\text{sen}(\theta - 23\pi/12)$$

$$Y_5 = 602,292\text{sen}(\theta - 25\pi/12)$$

$$Y_6 = 602,292\text{sen}(\theta - 27\pi/12)$$

$$Y_7 = 602,292\text{sen}(\theta - 29\pi/12)$$

$$Y_8 = 602,292\text{sen}(\theta - 31\pi/12)$$

$$Y_9 = 602,292\text{sen}(\theta - 33\pi/12)$$

$$Y_{10} = 602,292\text{sen}(\theta - 35\pi/12)$$

$$Y_{11} = 602,292\text{sen}(\theta - 37\pi/12)$$

$$Y_{12} = 602,292\text{sen}(\theta - 39\pi/12)$$

- curvas de comutação

$$Y_{13} = 581,769\text{sen}(\theta - 16\pi/12)$$

$$Y_{14} = 581,769\text{sen}(\theta - 18\pi/12)$$

$$Y_{15} = 581,769\text{sen}(\theta - 20\pi/12)$$

$$Y_{16} = 581,769\text{sen}(\theta - 22\pi/12)$$

$$Y_{17} = 581,769\text{sen}(\theta - 24\pi/12)$$

$$Y_{18} = 581,769\text{sen}(\theta - 26\pi/12)$$

$$Y_{19} = 581,769\text{sen}(\theta - 28\pi/12)$$

$$Y_{20} = 581,769\text{sen}(\theta - 30\pi/12)$$

$$Y_{21} = 581,769\text{sen}(\theta - 32\pi/12)$$

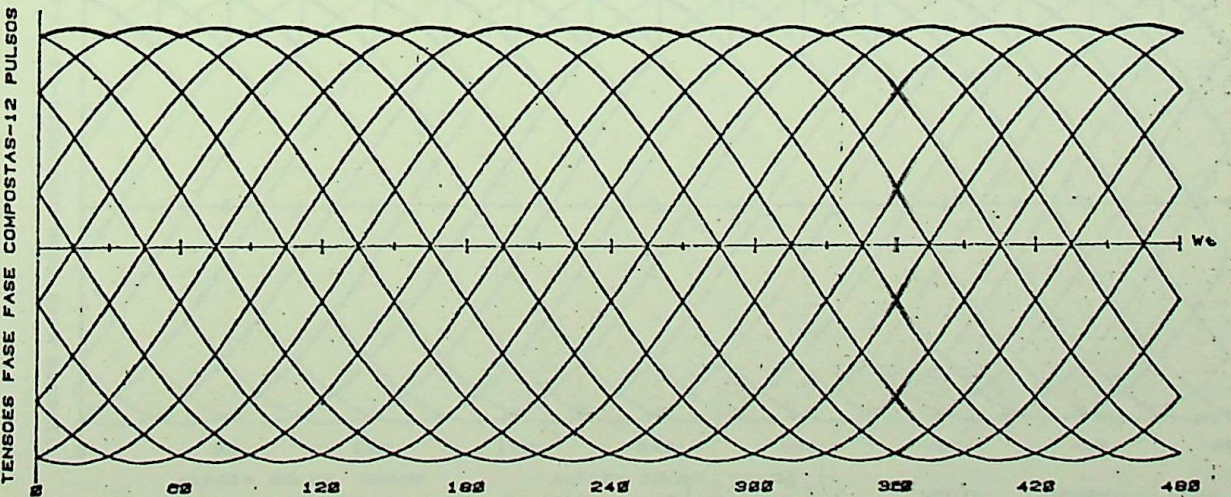
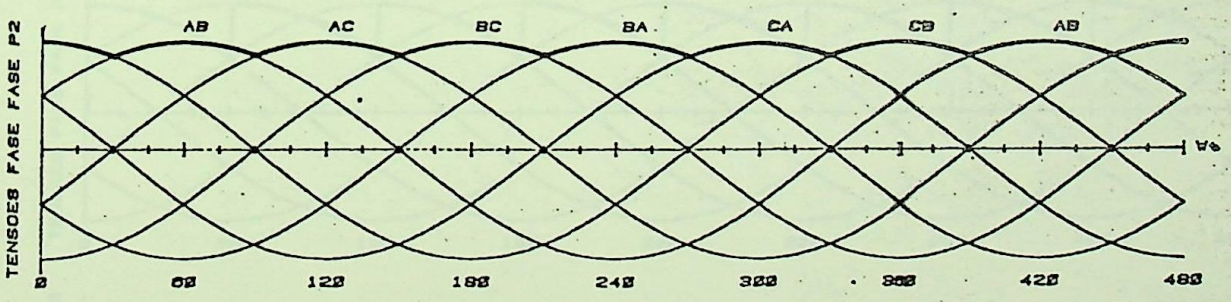
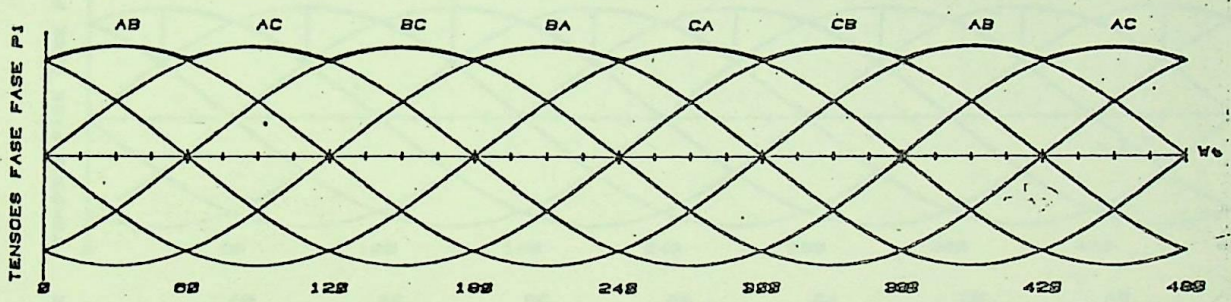
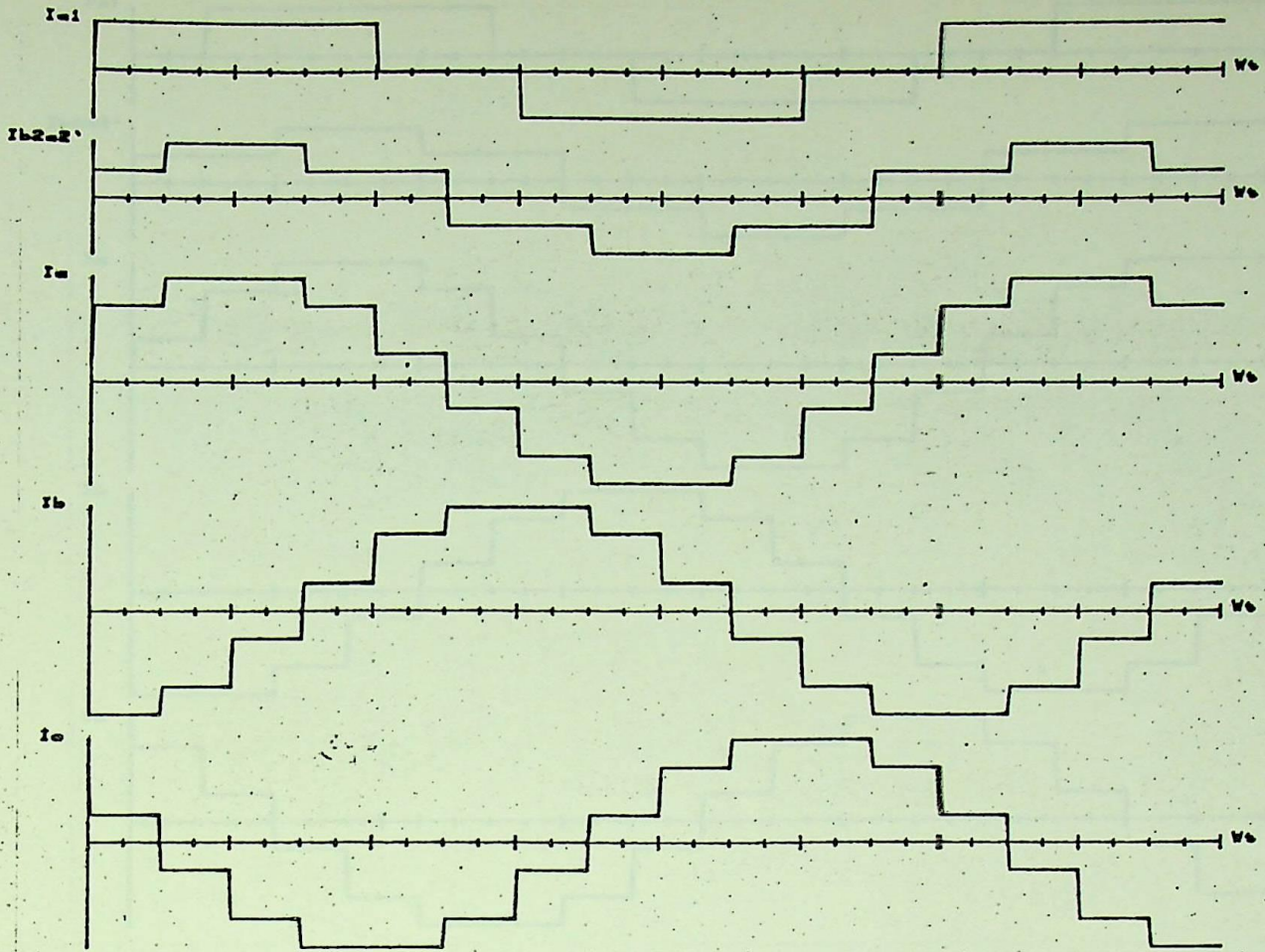
$$Y_{22} = 581,769\text{sen}(\theta - 34\pi/12)$$

$$Y_{23} = 581,769\text{sen}(\theta - 36\pi/12)$$

$$Y_{24} = 581,769\text{sen}(\theta - 38\pi/12)$$

As Figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 ilustram as formas de onda desprezando-se o efeito de comutação respectivamente para ângulos de disparo  $\alpha$  iguais a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $150^\circ$ .

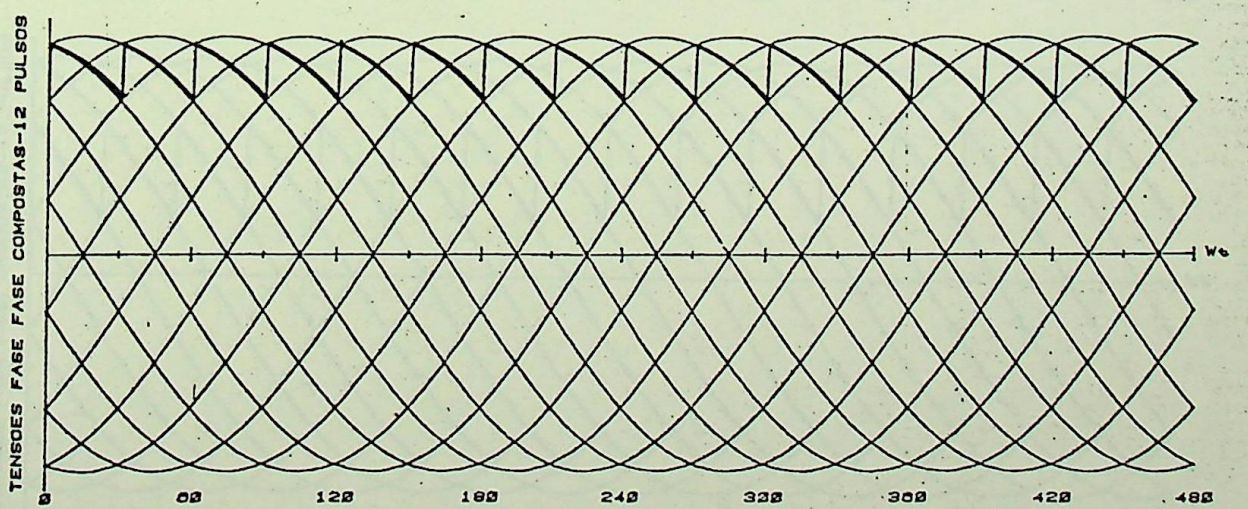
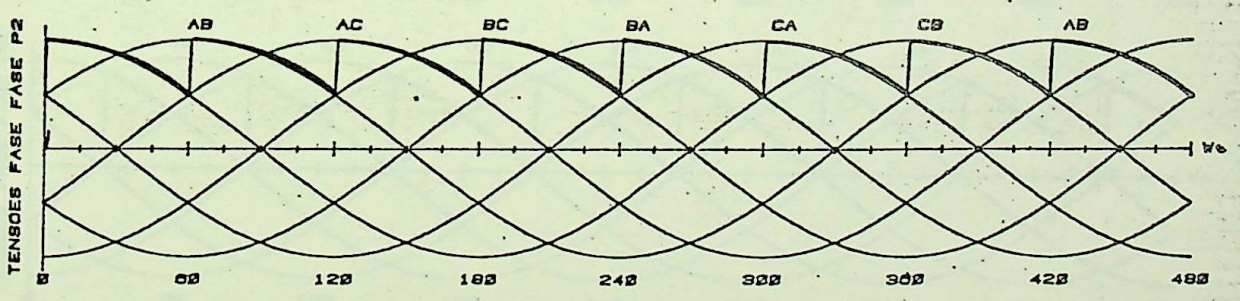
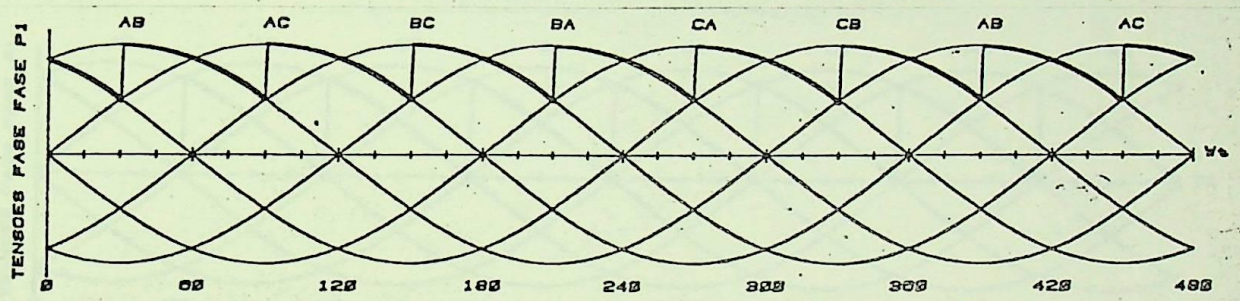
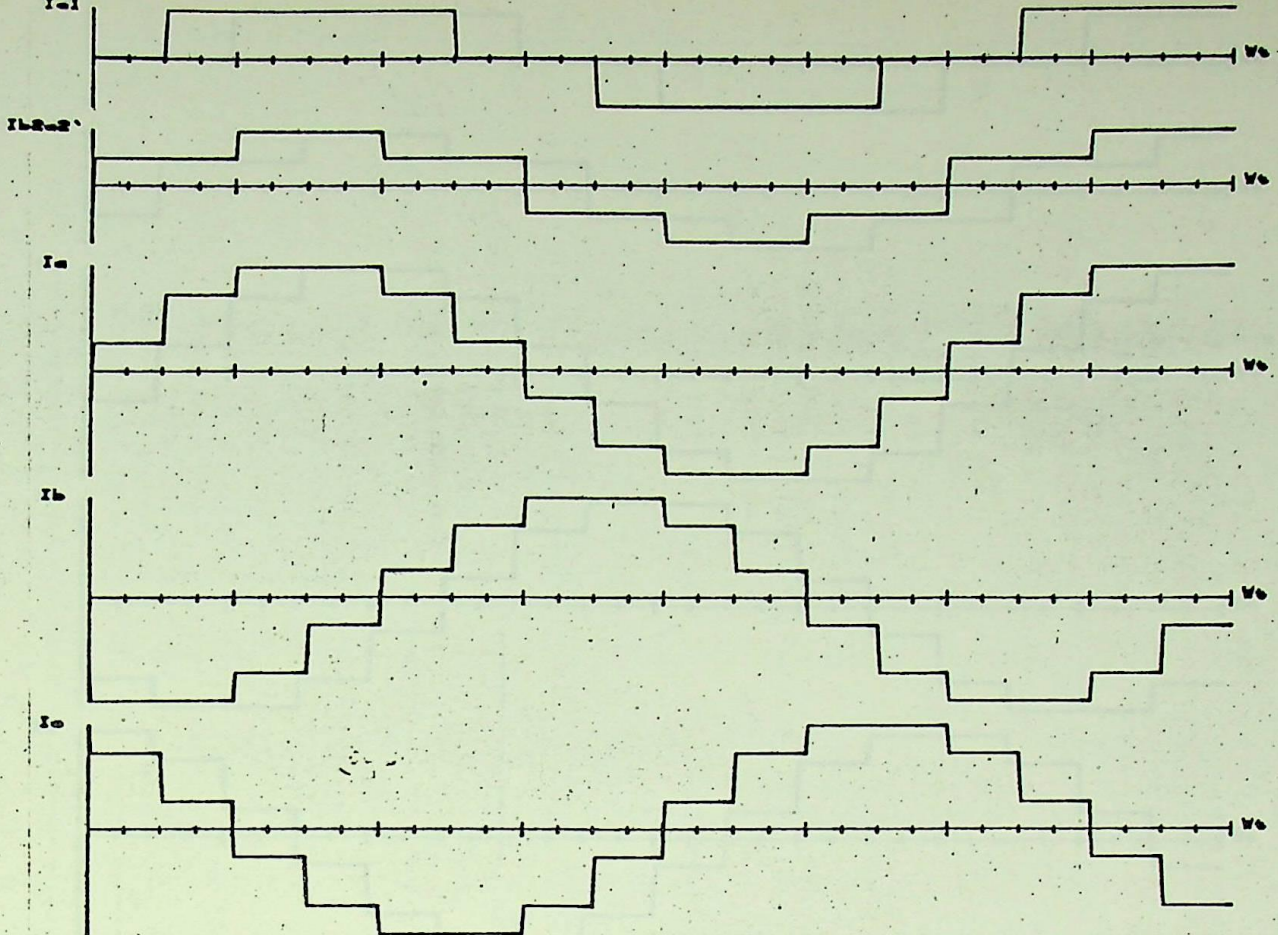
As Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20 ilustram as formas de onda quando o efeito da comutação é considerado para os mesmos ângulos de disparo referidos.



ALFA1= .00 GRAUS      ALFA2= .00 GRAUS      UPN1=      UPN2=      UPN=

MU1= .00 GRAUS      MU2= .00 GRAUS

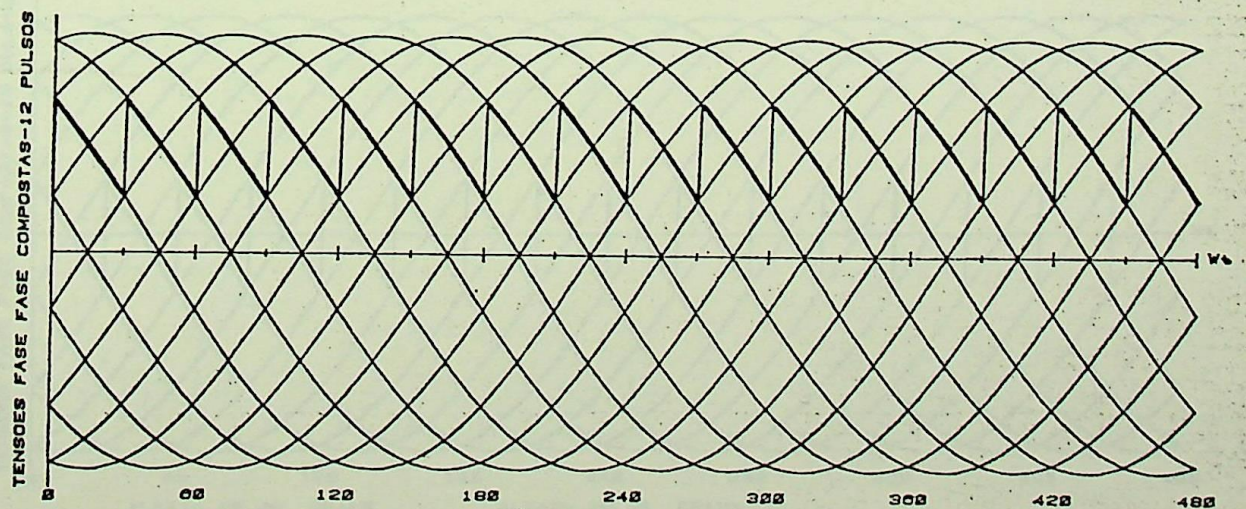
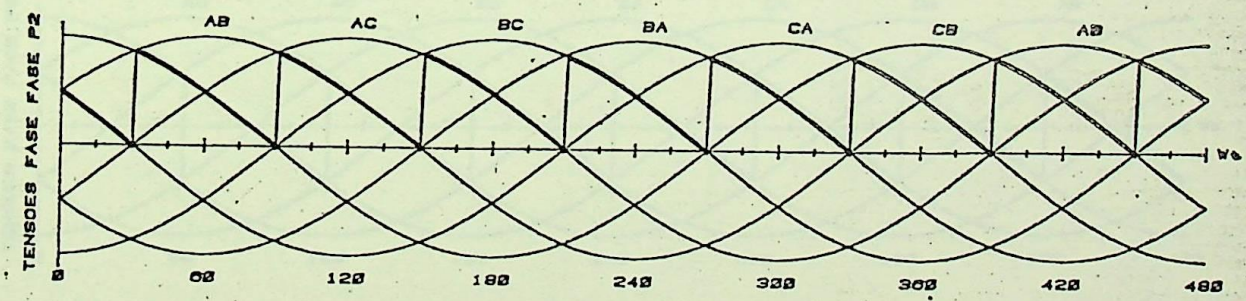
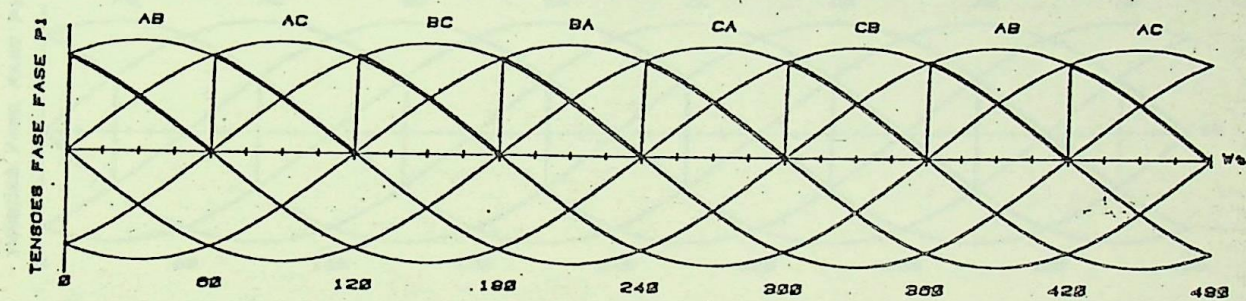
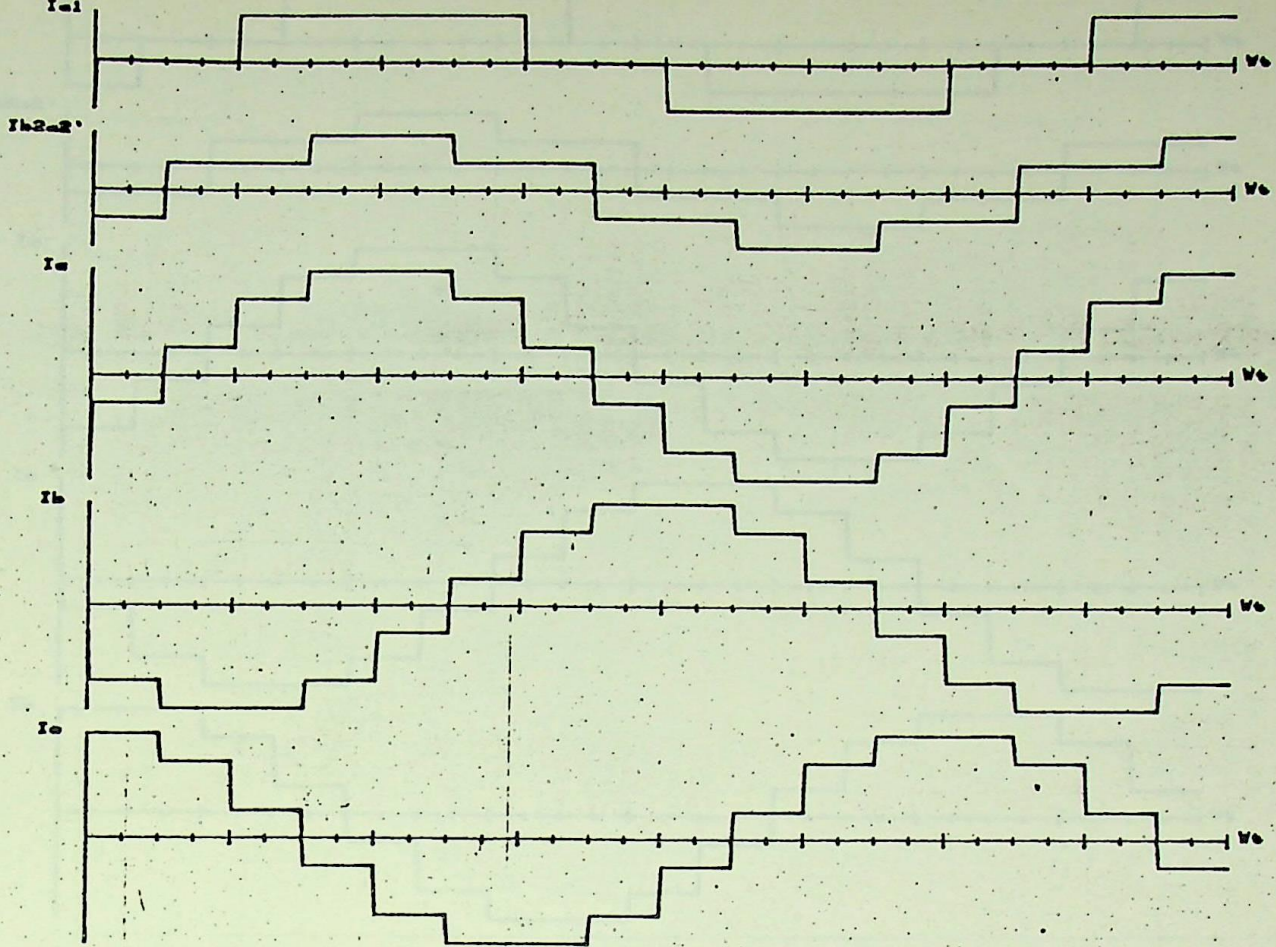
Figura 3.9 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=0^\circ$   $\mu=0^\circ$



ALFA1= 30.00 GRAUS      ALFA2= 30.00 GRAUS      UPN1-      UPN2-      UPN-

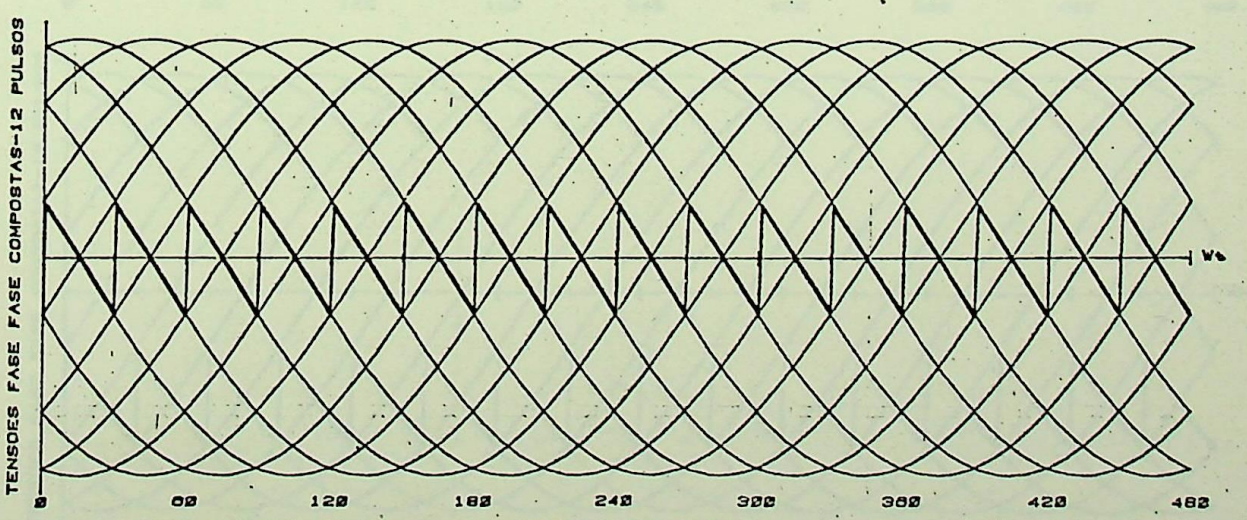
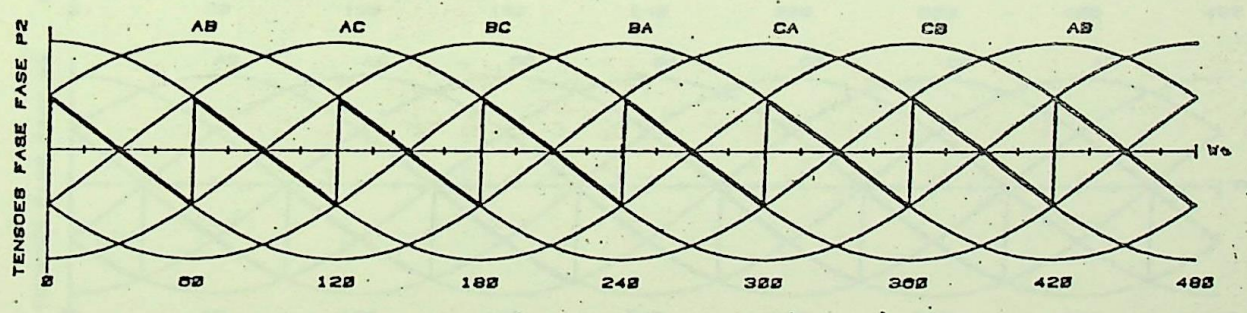
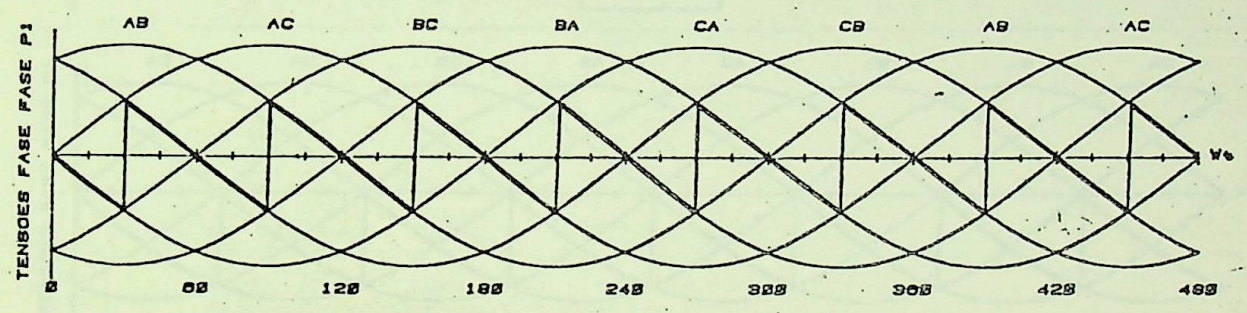
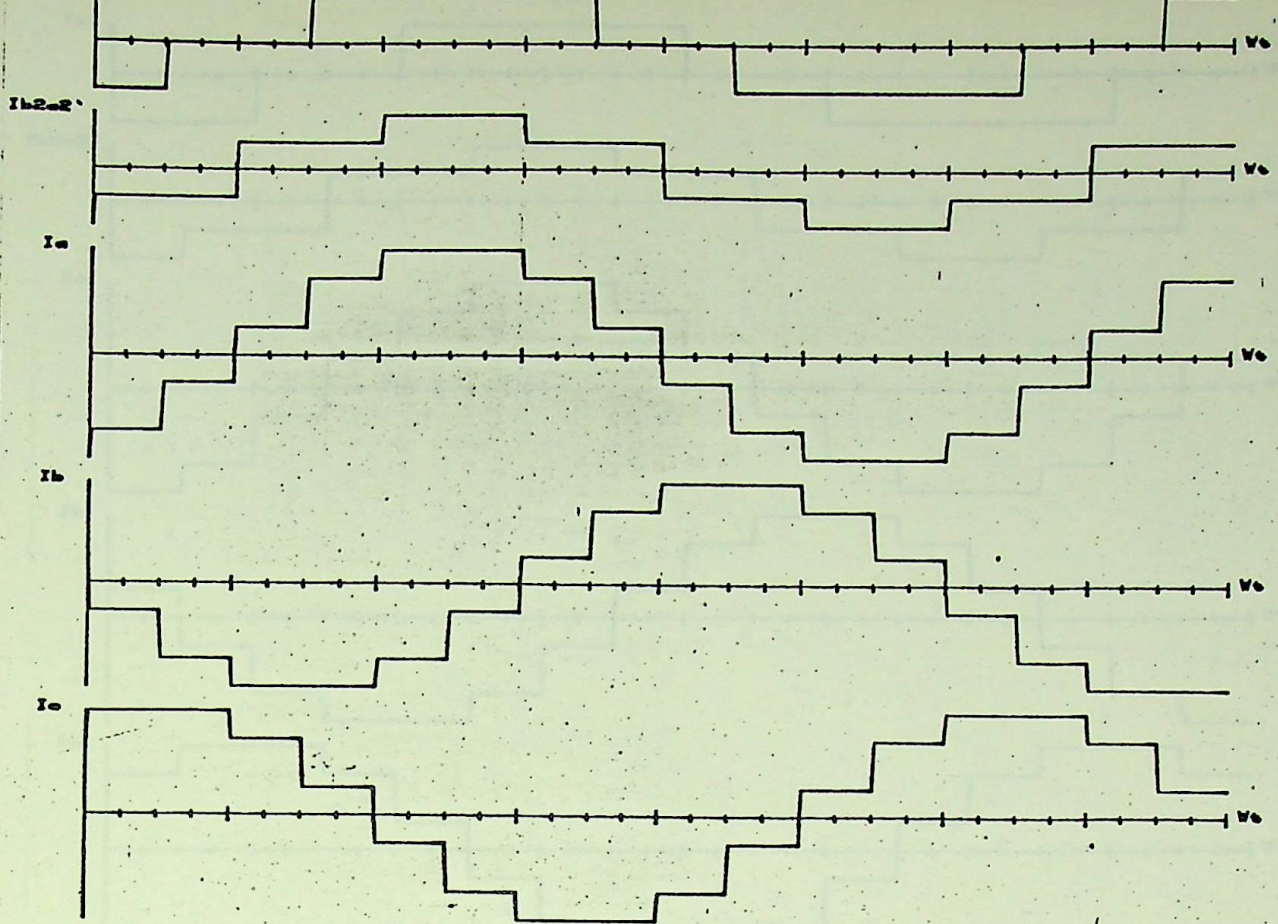
MU1= .00 GRAUS      MU2= .00 GRAUS

Figura 3.10 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=30^{\circ}$   $\mu=0^{\circ}$



ALFA1= 60.00 GRAUS ALFA2= 60.00 GRAUS UPN1- UPN2- UPN-  
 MU1= .00 GRAUS MU2= .00 GRAUS

Figura 3.11 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=60^\circ$   $\mu=0^\circ$



ALFA1- 00.00 GRAUS      ALFA2- 00.00 GRAUS      UPN1-      UPN2-      UPN-

MU1- .00 GRAUS      MU2- .00 GRAUS

Figura 3.12 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=90^{\circ}$   $\mu=0^{\circ}$

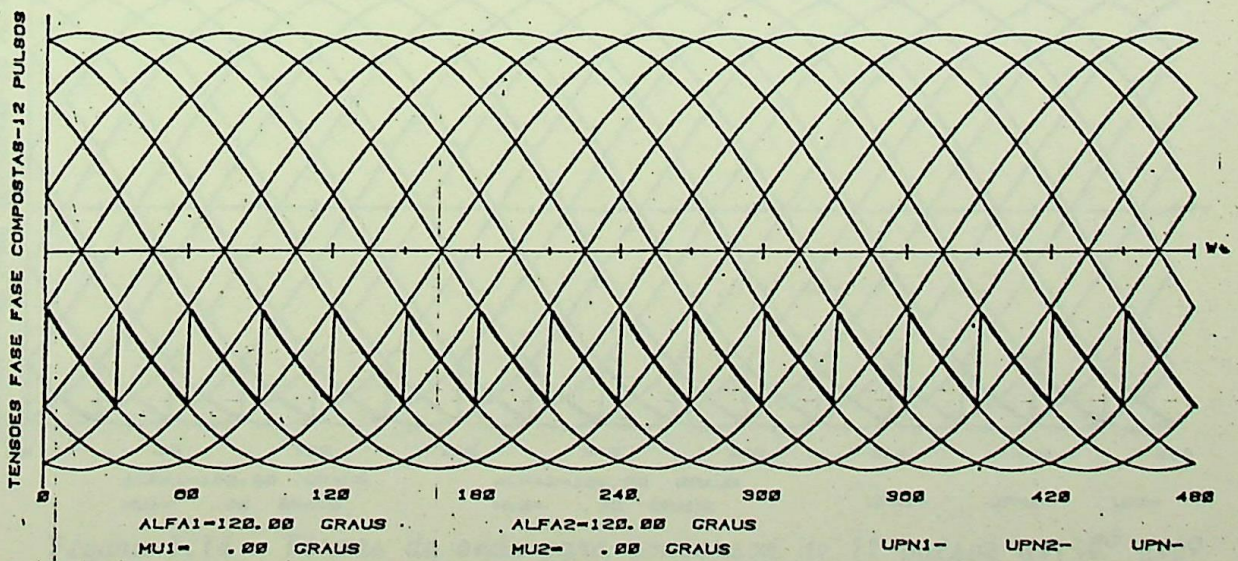
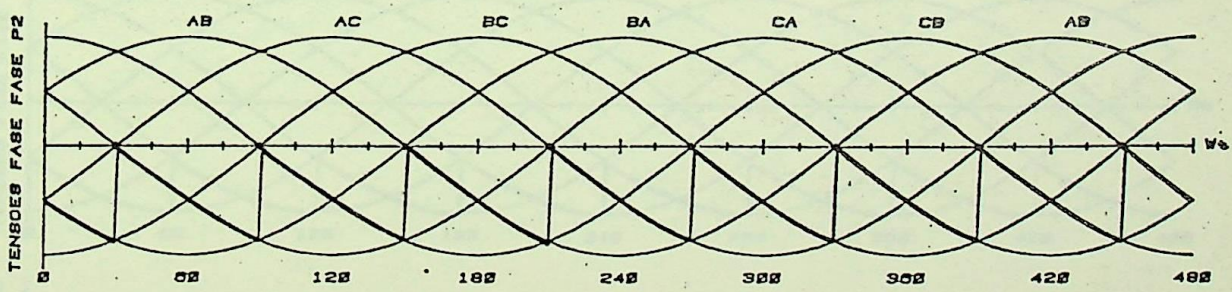
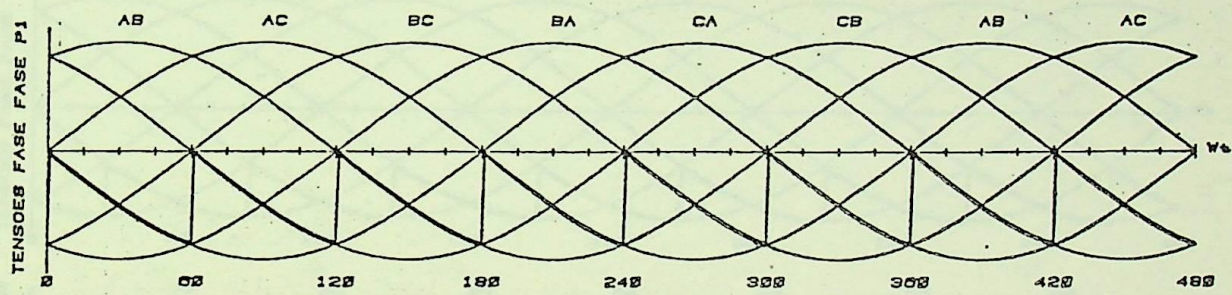
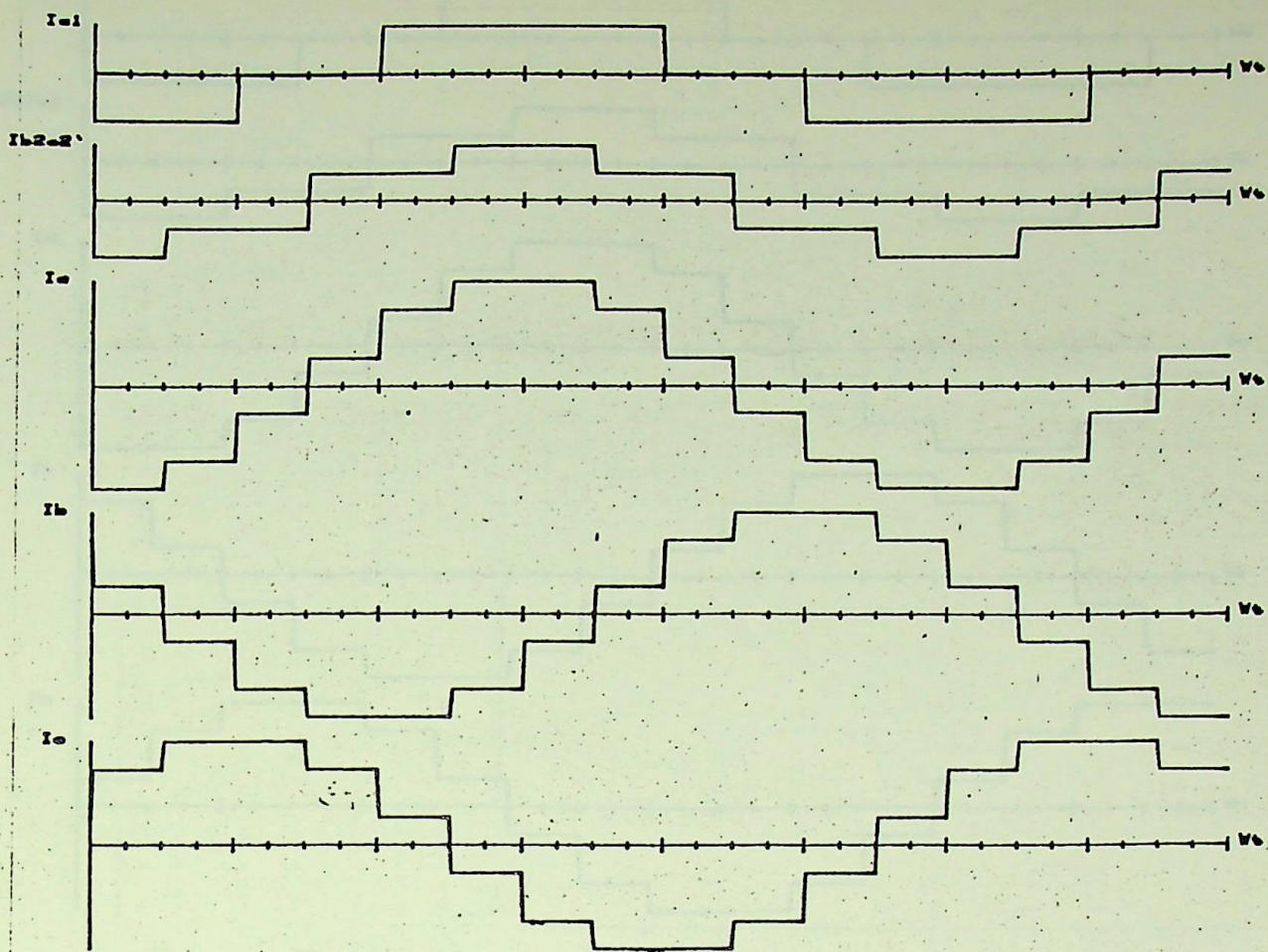


Figura 3.13 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=120^\circ$   $\mu=0^\circ$

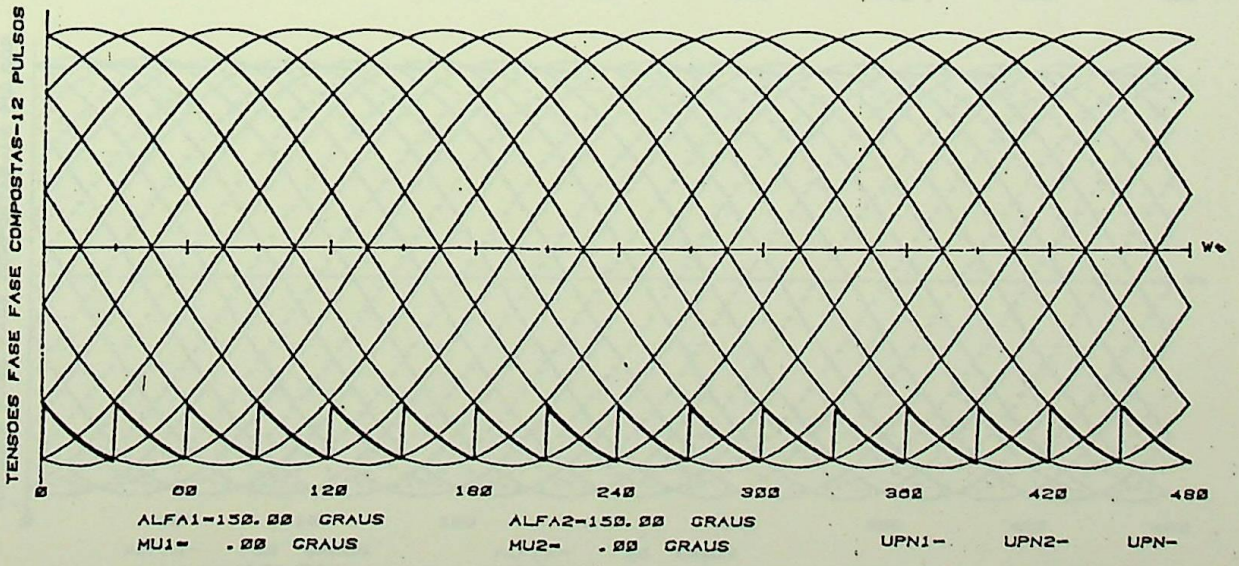
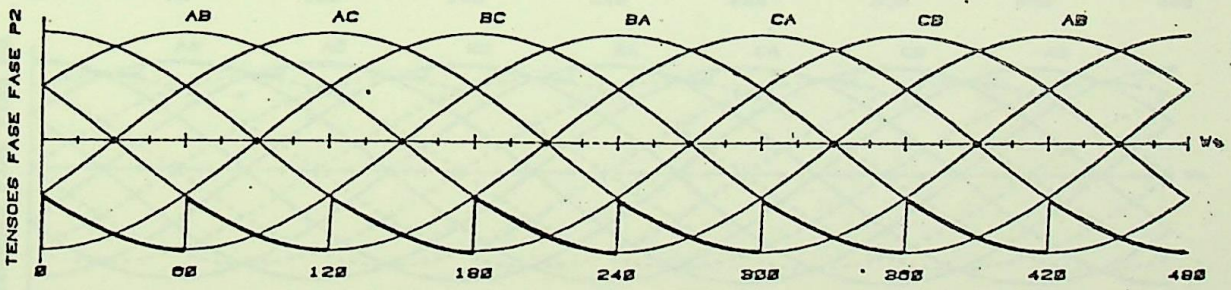
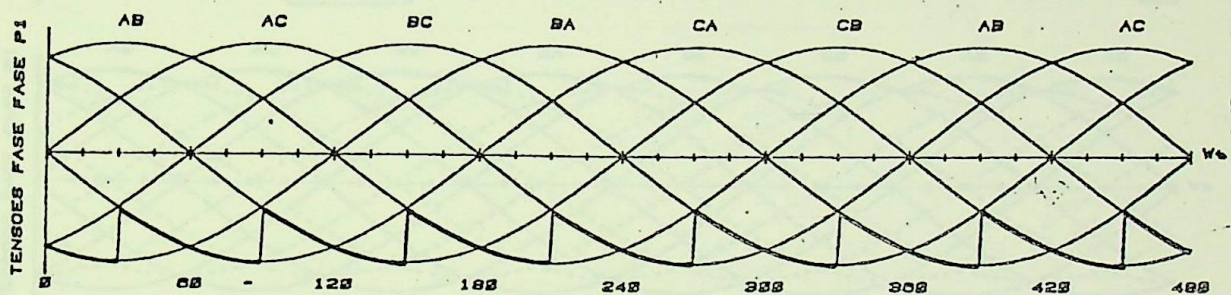
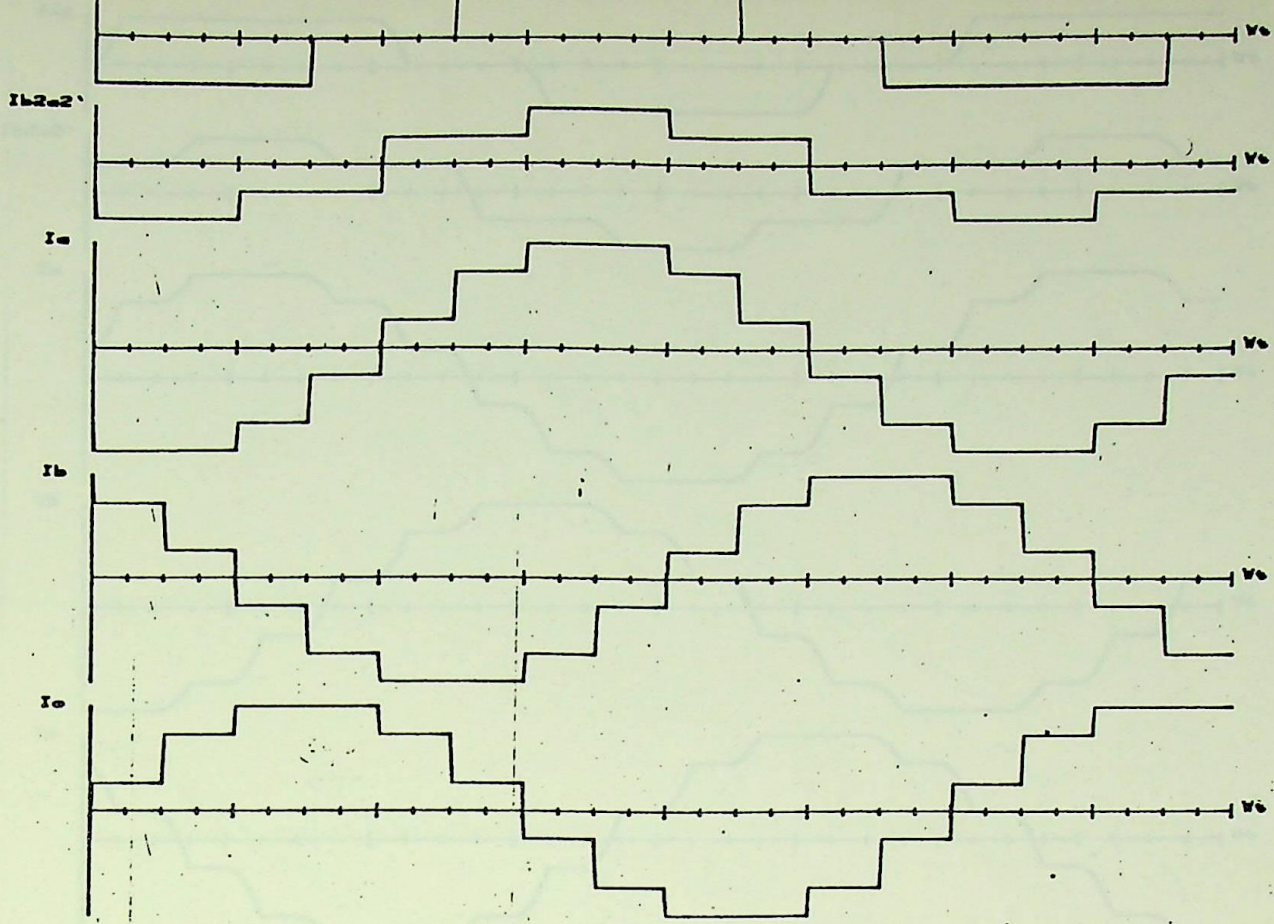


Figura 3.14 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=150^\circ$   $\mu=0^\circ$

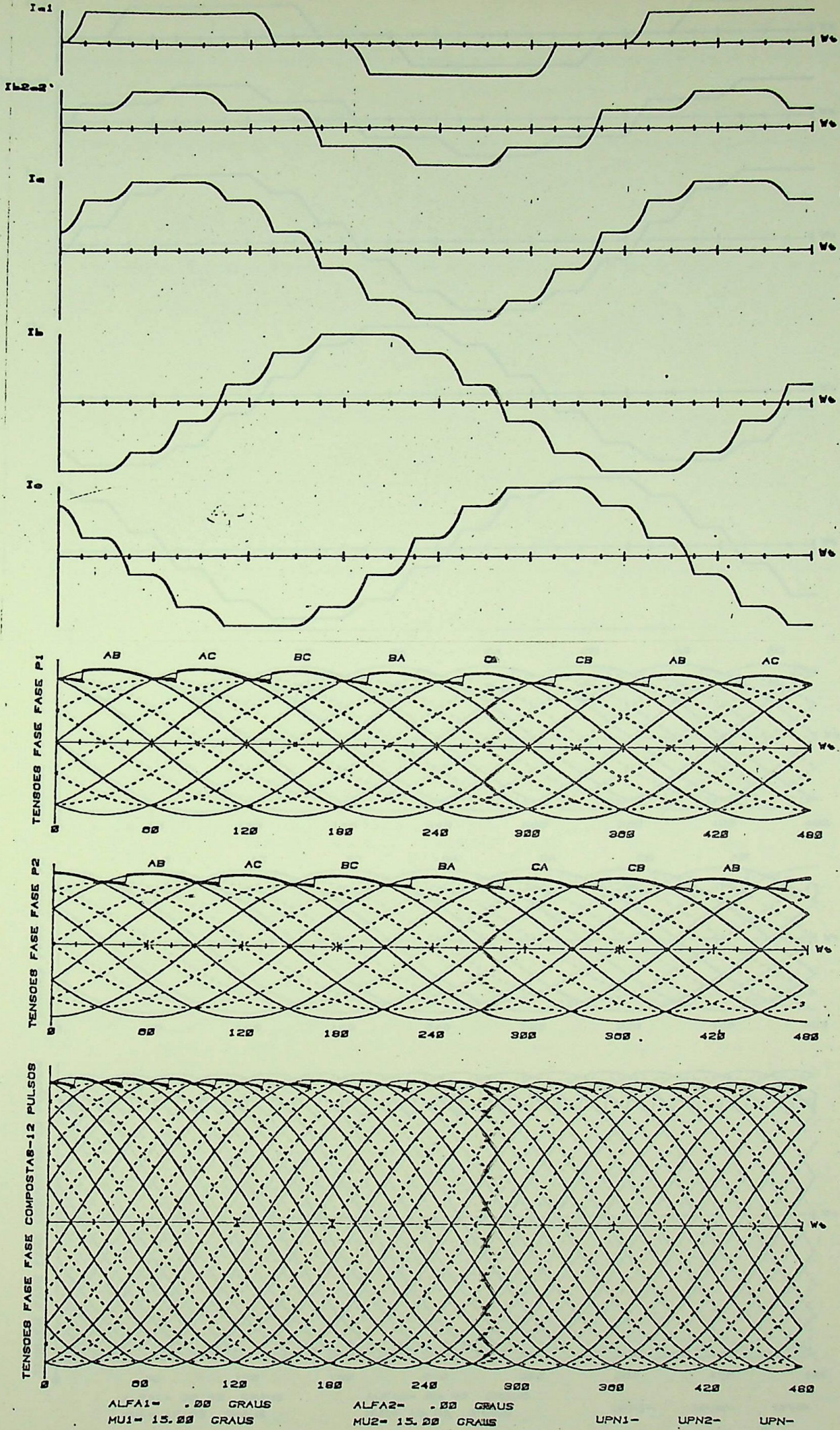
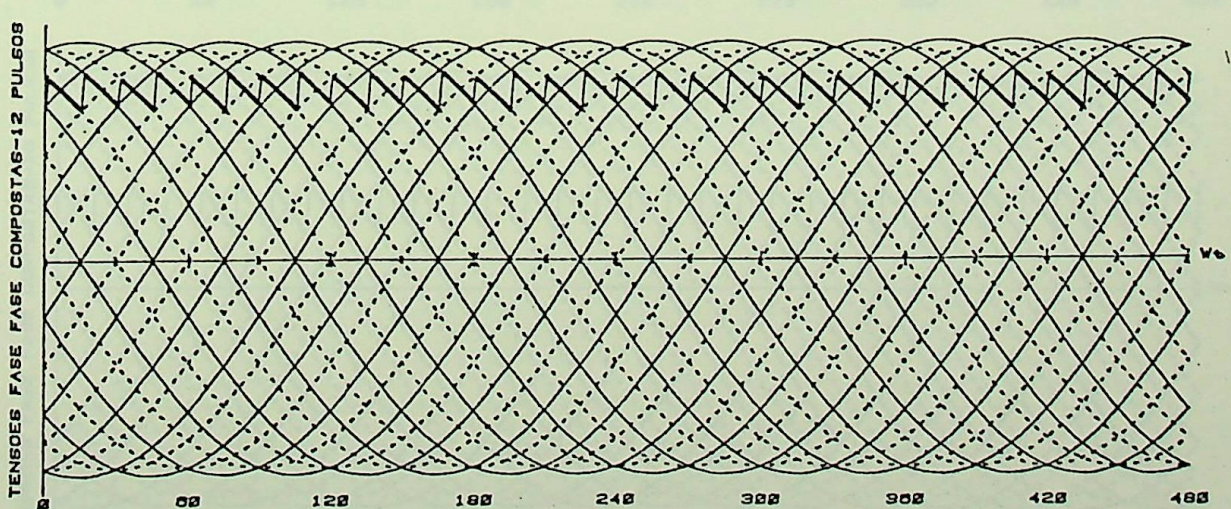
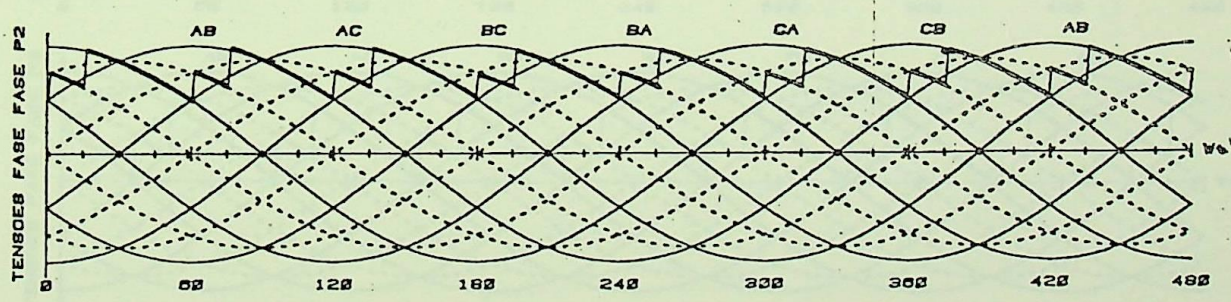
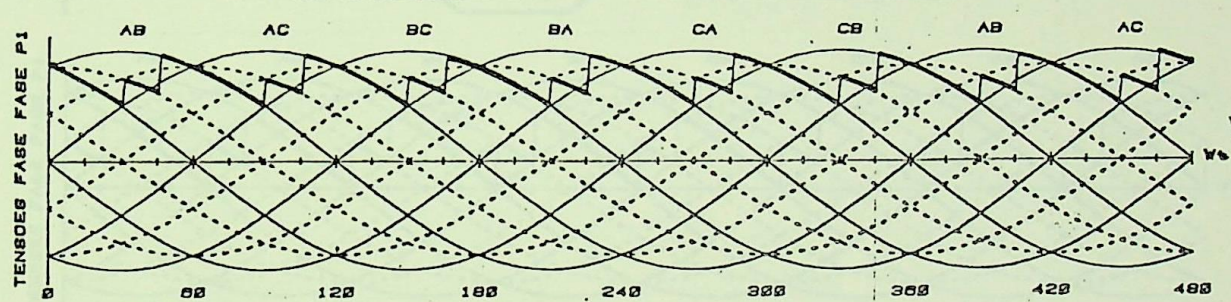
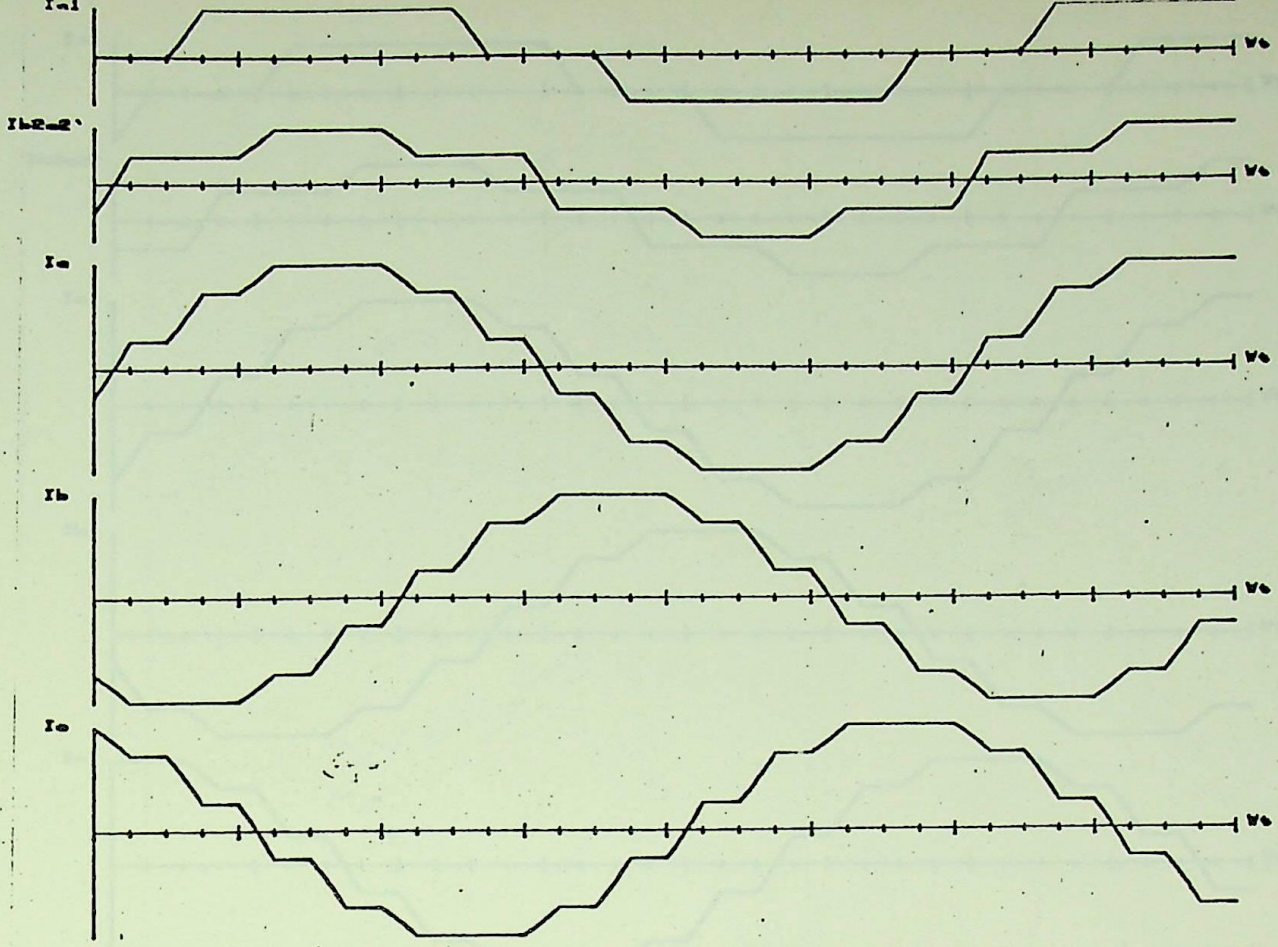


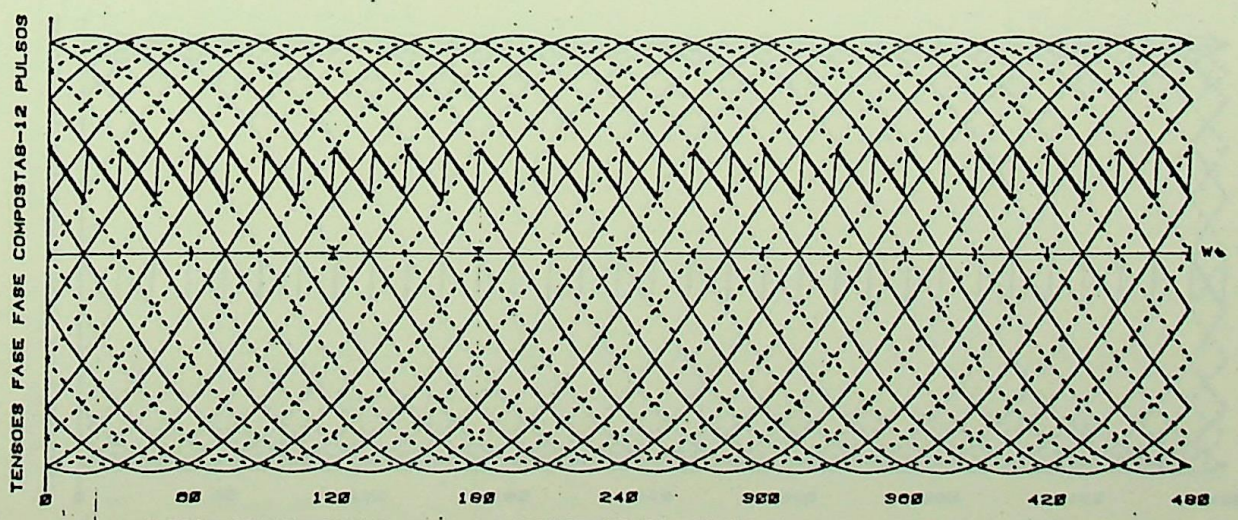
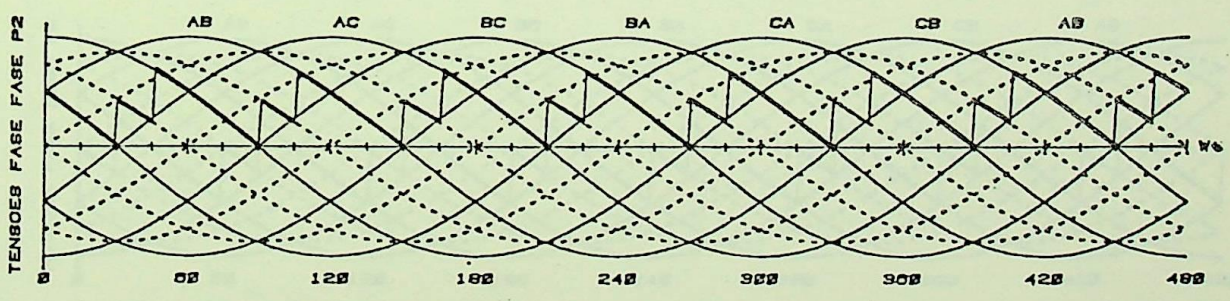
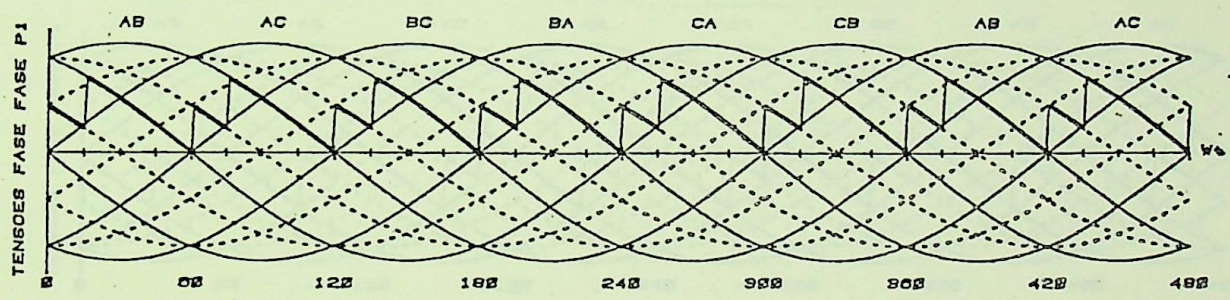
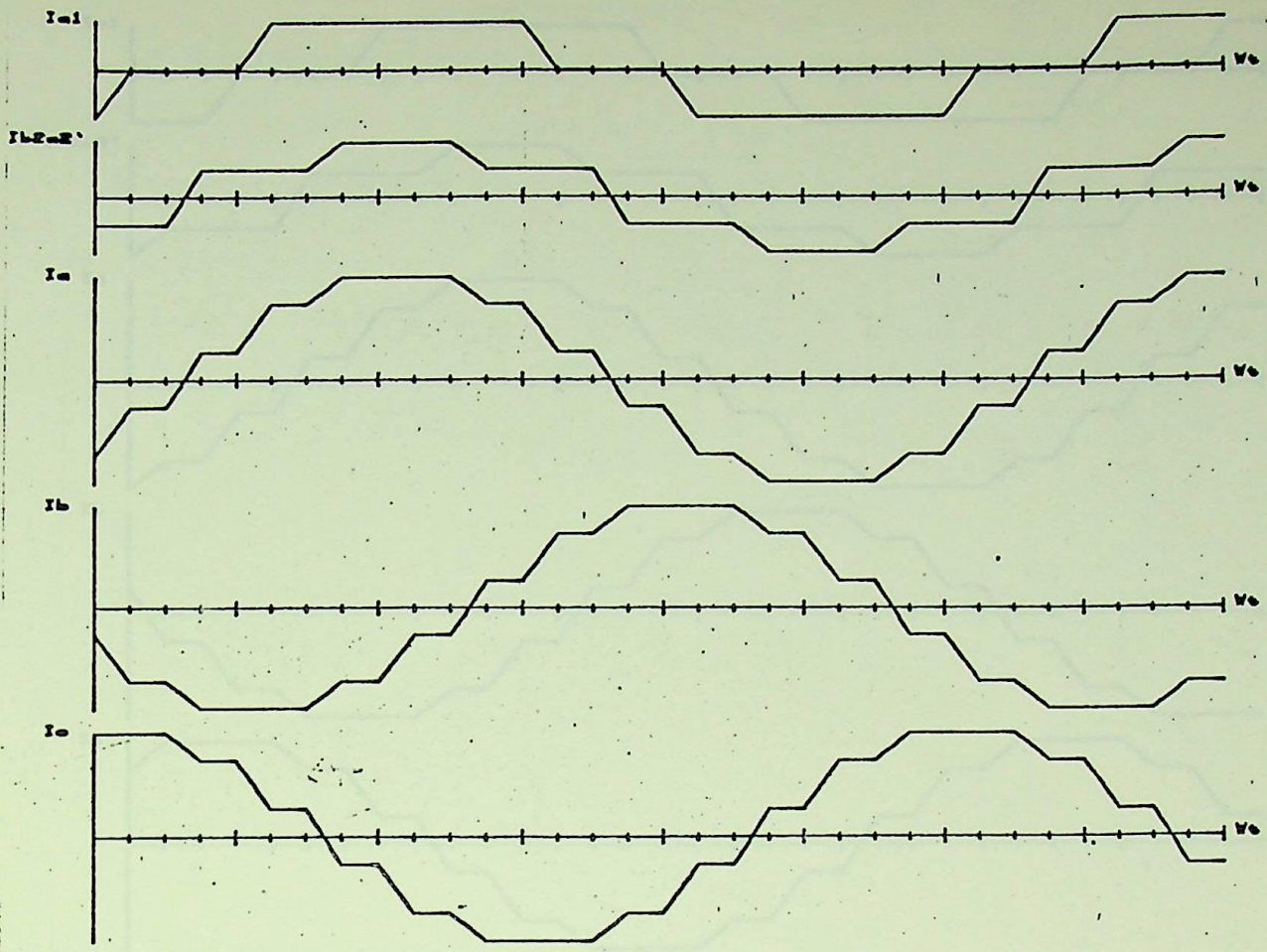
Figura 3.15 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=0^{\circ}$   $\mu=15^{\circ}$



ALFA1= 30.00 GRAUS      ALFA2= 30.00 GRAUS      UPN1=      UPN2=      UPN=

MU1= 15.00 GRAUS      MU2= 15.00 GRAUS

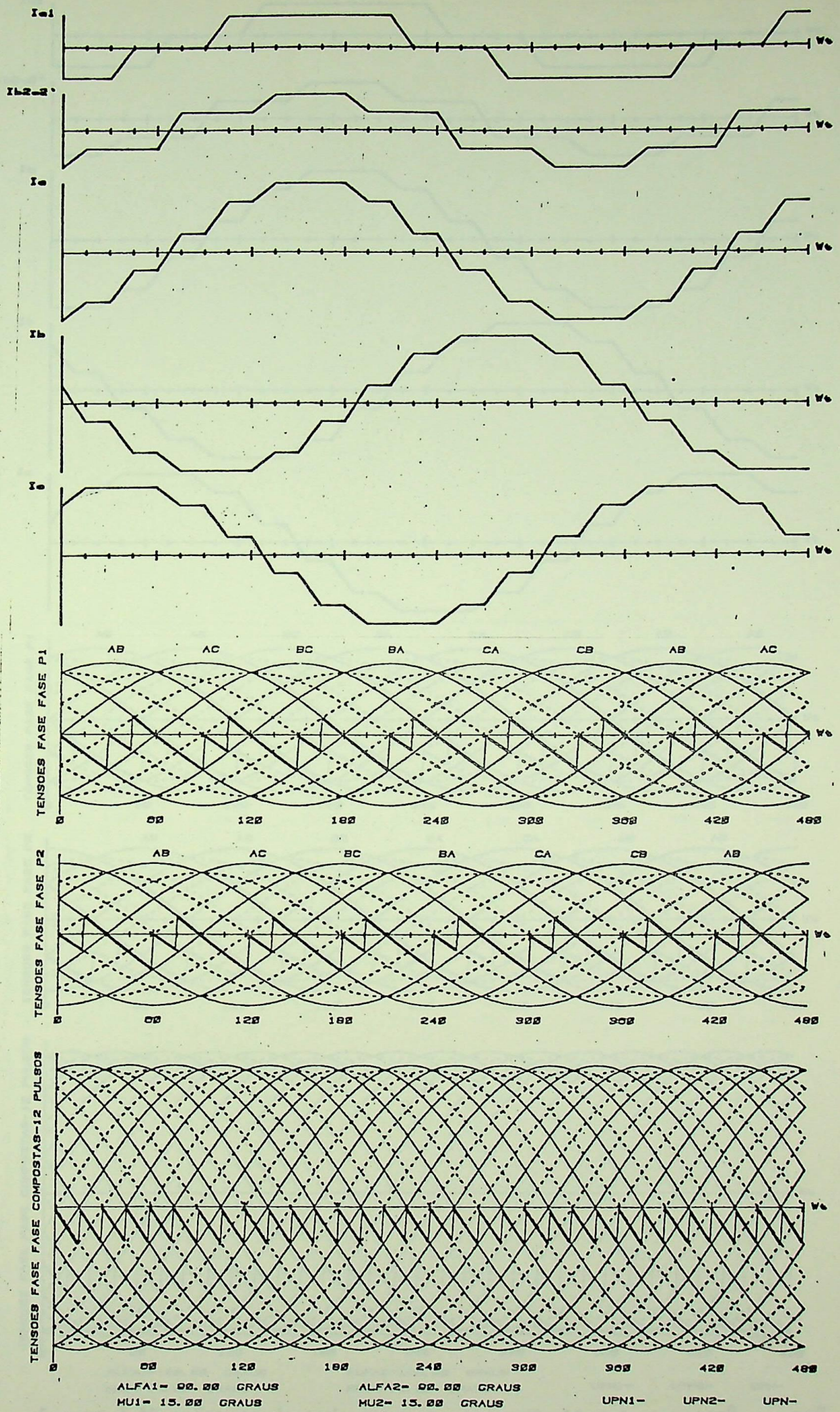
Figura 3.16 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=30^{\circ}$   $\mu=15^{\circ}$



ALFA1- 00.00 GRAUS      ALFA2- 00.00 GRAUS      UPN1-      UPN2-      UPN-

MU1- 15.00 GRAUS      MU2- 15.00 GRAUS

Figura 3.17 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=60^\circ$   $\mu=15^\circ$



ALFA1= 00.00 GRAUS      ALFA2= 00.00 GRAUS      UPN1-      UPN2-      UPN-  
 MU1= 15.00 GRAUS      MU2= 15.00 GRAUS

Figura 3.18 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=90^\circ$   $\mu=15^\circ$

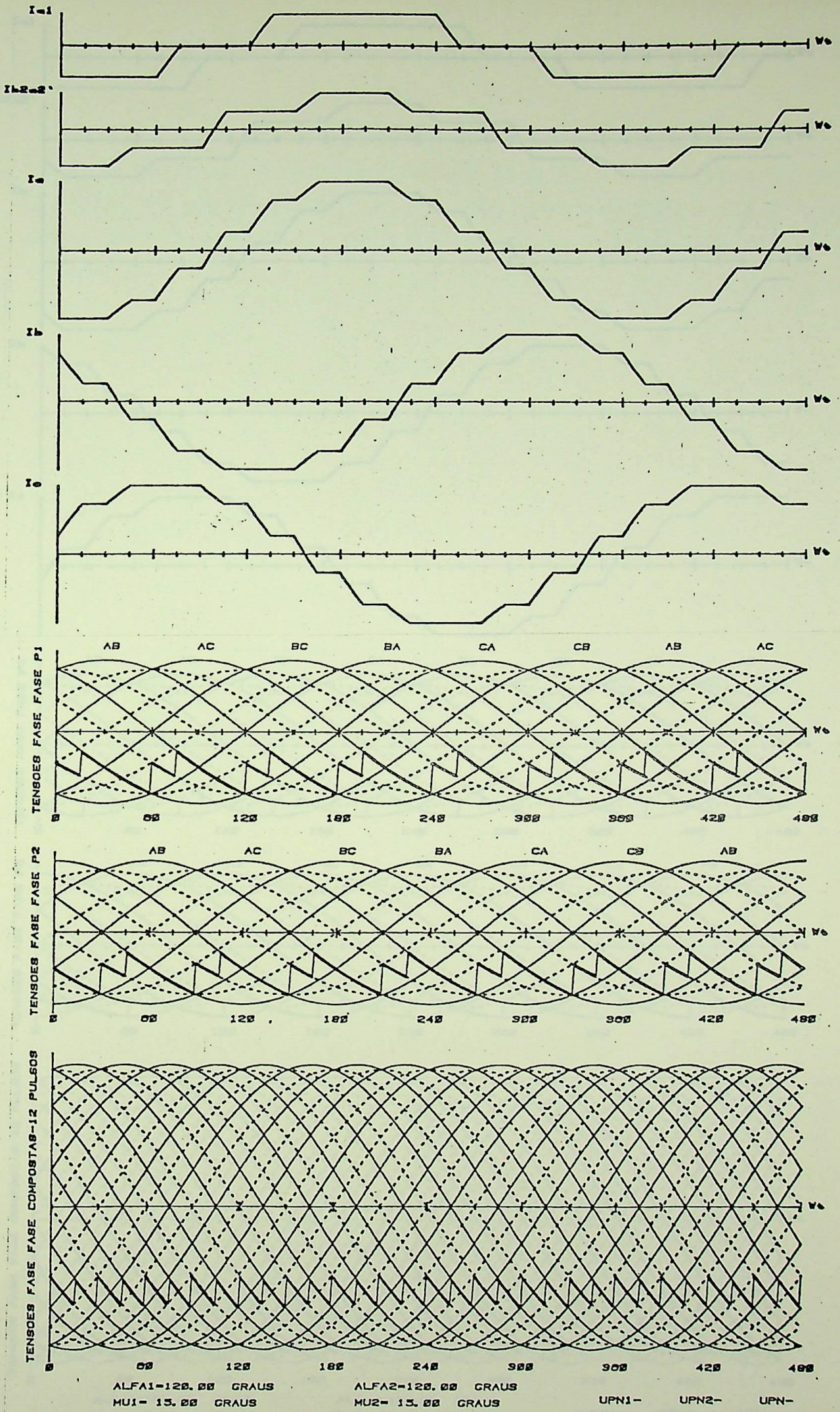


Figura 3.19 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=120^0$   $\mu=15^0$

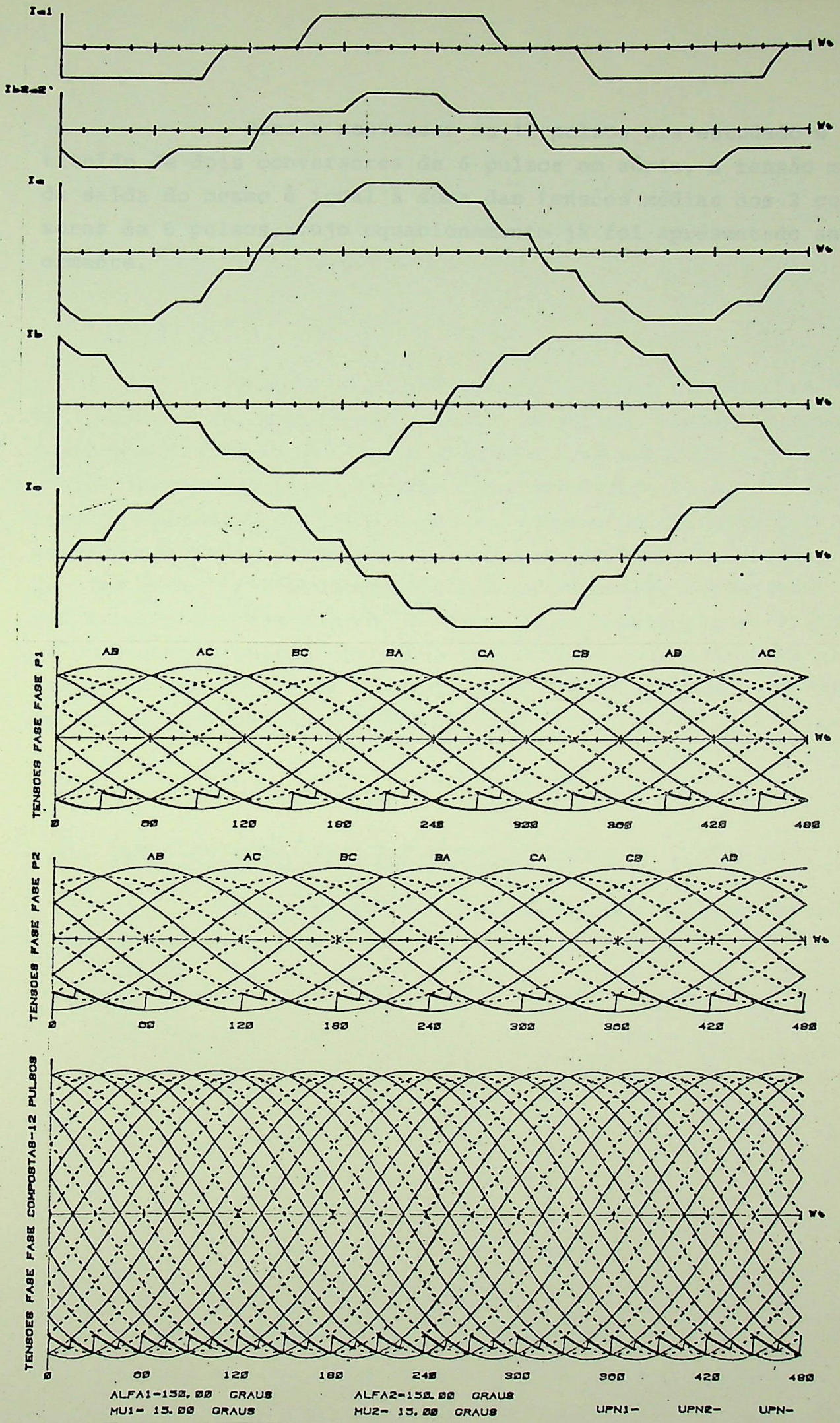


Figura 3.20 - Formas de onda para conversor de 12 pulsos  $\alpha=150^\circ$   $\mu=15^\circ$

Como o conversor de 12 pulsos ora estudado é constituído de dois conversores de 6 pulsos em série, a tensão média de saída do mesmo é igual à soma das tensões médias dos 2 conversores de 6 pulsos, cujo equacionamento já foi apresentado anteriormente.

4.1 - INTRODUÇÃO

Quando se considera um sistema de conversão de energia elétrica, a primeira preocupação é a obtenção de uma tensão de saída adequada para alimentar as cargas. Para isso, é necessário utilizar um conversor de potência que seja capaz de converter a tensão de entrada em uma tensão de saída desejada. Este conversor pode ser de tensão ou de corrente, dependendo da aplicação. No caso de um conversor de tensão, a tensão de saída é controlada pela razão de transformação do transformador ou pelo ciclo de condução dos dispositivos de potência. No caso de um conversor de corrente, a corrente de saída é controlada pelo ciclo de condução dos dispositivos de potência. A escolha do tipo de conversor depende das características da carga e das condições de operação do sistema.

4.2 - EQUACIONAMENTO PARA A PONTE CONVERSORA DE 6 PULSOS

A Figura 4.1 ilustra a constituição de um conversor de 6 pulsos. Este conversor é formado por seis dispositivos de potência (IGBTs ou MOSFETs) conectados em uma configuração de ponte. A tensão de saída é controlada pelo ciclo de condução dos dispositivos de potência.

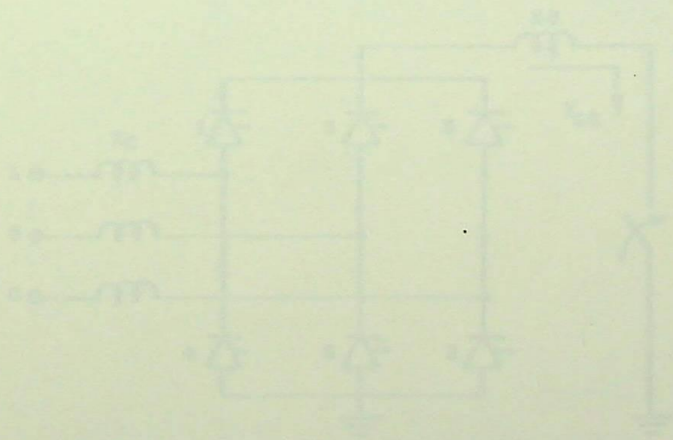


Figura 4.1 - Constituição de um conversor de 6 pulsos.

## CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM CORRENTE CONTÍNUA FACE A CURTO CIRCUITO4.1 - INTRODUÇÃO

Quando da ocorrência de um curto circuito na ponte retificadora, a corrente aumenta, ocorrendo também um aumento do ângulo de comutação. Neste capítulo será estudado o efeito do curto circuito na ponte retificadora, excluindo-se a ação do sistema de controle. Ocorrida a falta, a mesma permanecerá por intervalos de tempo definidos, após o qual as válvulas serão bloqueadas e os tiristores em condução permanecerão conduzindo até que a corrente caia a zero. O instante da ocorrência da falta será considerado quando estiverem iniciando a comutação duas válvulas da ponte, pois este é o caso mais crítico. Serão estudadas faltas em sistemas de 6 e 12 pulsos.

4.2 - EQUACIONAMENTO PARA A PONTE CONVERSORA DE 6 PULSOS

A Figura 4.1 ilustra a ocorrência de um curto circuito em um sistema conversor de 6 pulsos.

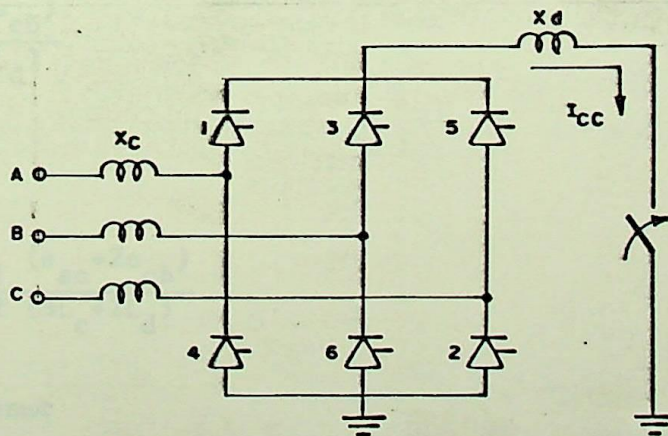


Figura 4.1 - Ocorrência de um curto circuito na ponte retificadora de 6 pulsos

A Figura 4.2 ilustra a ocorrência de uma falta durante a comutação das válvulas 1 e 5.

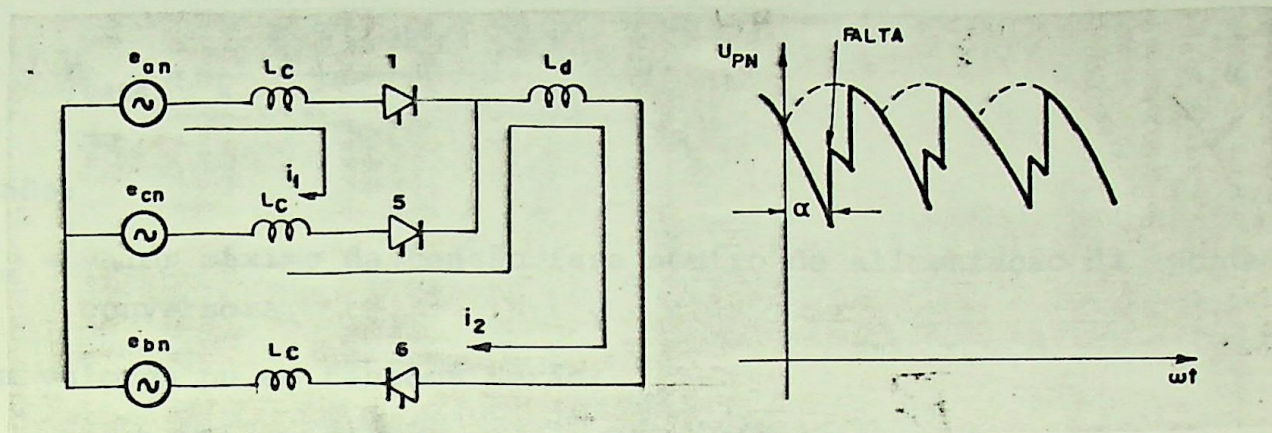


Figura 4.2 - Ocorrência da falta quando estiverem comutando as válvulas 1 e 5

$$e_{ac} = 2L_c \frac{di_1}{dt} - L_c \frac{di_2}{dt} \quad (4.1)$$

$$e_{cb} = -L_c \frac{di_1}{dt} + (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.2)$$

$$(4.2) \times 2 \rightarrow 2e_{cb} = -2L_c \frac{di_1}{dt} + (4L_c + 2L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.3)$$

$$(4.1) + (4.3) \rightarrow e_{ac} + 2e_{cb} = (3L_c + 2L_d) \frac{di_2}{dt}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{(e_{ac} + 2e_{cb})}{(3L_c + 2L_d)} \quad (4.4)$$

De (4.1):

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{e_{ac}}{2L_c} + \frac{1}{2} \frac{(e_{ac} + 2e_{cb})}{(3L_c + 2L_d)} \quad (4.5)$$

$$e_{ac} = \sqrt{3} E_m \sin \omega t$$

$$e_{cb} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

Para que as tensões sejam convertidas para valores (pu) é necessário se definir uma tensão base. O valor desta será adotado igual à tensão de saída da ponte retificadora com ângulo de disparo igual a zero graus. Logo:

$$U_{\text{base}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{E_m \sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \frac{3E_m \sqrt{3}}{\pi} \quad (4.6)$$

onde:

$E_m$  - valor máximo da tensão fase neutro de alimentação da ponte conversora.

Em valores pu as tensões serão:

$$e_{\text{ac}}(\text{pu}) = \frac{\sqrt{3} E_m \text{sen}\omega t}{\frac{3E_m \sqrt{3}}{\pi}} = \frac{\pi}{3} \text{sen}\omega t \quad (4.7)$$

$$e_{\text{cb}}(\text{pu}) = \frac{\pi}{3} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) \quad (4.8)$$

As reatâncias também serão consideradas em valores (pu). Logo:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\pi}{3} \frac{\text{sen}\omega t}{2L_c} + \frac{1}{2} \frac{\pi/3 \text{sen}\omega t + 2\pi/3 \text{sen}(\omega t - 4\pi/3)}{3L_c + 2L_d}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \left[ \frac{\pi}{6L_c} + \frac{\pi}{6(3L_c + 2L_d)} \right] \text{sen}\omega t + \frac{\pi}{3[3L_c + 2L_d]} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3)$$

$$di_1 = \left[ \frac{\pi}{6L_c} + \frac{\pi}{6(3L_c + 2L_d)} \right] \text{sen}\omega t dt + \frac{\pi}{3[3L_c + 2L_d]} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) dt$$

integrando:

$$i_1 \Big|_0^t = \left[ \frac{\pi}{6L_c} + \frac{\pi}{6(3L_c + 2L_d)} \right] \left[ -\frac{\cos\omega t}{\omega} \right]_{\alpha/\omega}^t + \frac{\pi}{3[3L_c + 2L_d]} \left[ -\frac{\cos(\omega t - 4\pi/3)}{\omega} \right]_{\alpha/\omega}^t$$

$$i_1 = \left[ \frac{\pi}{6X_c} + \frac{\pi}{6(3X_c + 2X_d)} \right] (\cos\alpha - \cos\omega t) + \frac{\pi}{3[3X_c + 2X_d]} [\cos(\alpha - 4\pi/3) - \cos(\omega t - 4\pi/3)]$$

$$i_1 = \left[ \frac{\pi}{6X_c} + \frac{\pi}{6(3X_c + 2X_d)} \right] \cos \alpha + \frac{\pi}{3[3X_c + 2X_d]} \cos(\alpha - 4\pi/3) - \cos \omega t \left[ \frac{\pi}{6X_c} + \frac{\pi}{6(3X_c + 2X_d)} \right] - \cos(\omega t - 4\pi/3) \left[ \frac{\pi}{3(3X_c + 2X_d)} \right] \quad (4.9)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\pi/3 \operatorname{sen} \omega t + 2\pi/3 \operatorname{sen}(\omega t - 4\pi/3)}{(3L_c + 2L_d)}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\pi}{3[3L_c + 2L_d]} \operatorname{sen} \omega t + \frac{2\pi}{3[3L_c + 2L_d]} \operatorname{sen}(\omega t - 4\pi/3)$$

$$di_2 = \frac{\pi}{3(3L_c + 2L_d)} \operatorname{sen} \omega t dt + \frac{2\pi}{3(3L_c + 2L_d)} \operatorname{sen}(\omega t - 4\pi/3) dt$$

integrando:

$$i_2 \Big|_{I_d}^{t} = \frac{\pi}{3(3L_c + 2L_d)} \left[ -\frac{\cos \omega t}{\omega} \right]_{\alpha/\omega}^t + \frac{2\pi}{3(3L_c + 2L_d)} \left[ -\frac{\cos(\omega t - 4\pi/3)}{\omega} \right]_{\alpha/\omega}^t$$

$$i_2 - I_d = \frac{\pi}{3(3X_c + 2X_d)} (\cos \alpha - \cos \omega t) + \frac{2\pi}{3(3X_c + 2X_d)} [\cos(\alpha - 4\pi/3) - \cos(\omega t - 4\pi/3)]$$

$$i_2 = I_d + \frac{\pi}{3(3X_c + 2X_d)} [\cos \alpha - \cos \omega t] + \frac{2\pi}{3(3X_c + 2X_d)} [\cos(\alpha - 4\pi/3) - \cos(\omega t - 4\pi/3)] \quad (4.10)$$

Fazendo:

$$A = \left[ \frac{\pi}{6X_c} + \frac{\pi}{6(3X_c + 2X_d)} \right] \quad (4.11)$$

$$B = \frac{\pi}{3[3X_c + 2X_d]} \quad (4.12)$$

tem-se, de (4.9):

$$i_1 = A \cos \alpha + B \cos(\alpha - 4\pi/3) - A \cos \omega t - B \cos(\omega t - 4\pi/3) \quad (4.13)$$

de (4.10):

$$i_2 = I_d + B \cos \alpha + 2B \cos(\alpha - 4\pi/3) - B \cos \omega t - 2B \cos(\omega t - 4\pi/3) \quad (4.14)$$

O cálculo do ângulo de comutação pode ser feito igualando-se as correntes  $i_1$  e  $i_2$ . Assim:

$$i_1 = i_2$$

$$\begin{aligned} A \cos \alpha + B \cos(\alpha - 4\pi/3) - A \cos \omega t - B \cos(\omega t - 4\pi/3) = \\ = I_d + B \cos \alpha + 2B \cos(\alpha - 4\pi/3) - B \cos \omega t - 2B \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

$$(A-B) \cos \alpha - B \cos(\alpha - 4\pi/3) - I_d + (B-A) \cos \omega t + B \cos(\omega t - 4\pi/3) = f(\omega t)$$

fazendo:

$$(A-B) \cos \alpha - B \cos(\alpha - 4\pi/3) = F \quad (4.15)$$

$$f(\omega t) = F - I_d + (B-A) \cos \omega t + B \cos(\omega t - 4\pi/3) \quad (4.16)$$

Resolvendo por Newton-Raphson:

$$f'(\omega t) = (A-B) \sin \omega t - B \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

$$\omega t_{(i+1)} = \omega t_i - \frac{f(\omega t)_i}{f'(\omega t)_i} \quad (4.17)$$

Mas  $\omega t = \delta$ , logo:

$$\delta_{(i+1)} = \delta_i - \frac{F - I_d + (B-A) \cos \delta_i + B \cos(\delta_i - 4\pi/3)}{(A-B) \sin \delta_i - B \sin(\delta_i - 4\pi/3)} \quad (4.18)$$

Uma vez que a cada comutação o valor da corrente inicial vai aumentando, é conveniente se definir:

$$G = F - I_p \quad (4.19)$$

Sendo  $I_p$ : valor inicial da corrente de comutação. Esse valor só é igual a  $I_d$  quando da ocorrência da primeira comutação. Logo:

$$f(\omega t) = G + (B-A) \cos \delta_i - B \cos(\delta_i - 4\pi/3) \quad (4.20)$$

$$\delta_{(i+1)} = \delta_i - \frac{G + (B-A)\cos\delta_i + B\cos(\delta_i - 4\pi/3)}{(A-B)\sin\delta_i - B\sin(\delta_i - 4\pi/3)} \quad (4.21)$$

As válvulas obedecem a uma ordem cíclica de condução na ponte. Assim, após a condução das válvulas 1, 5, 6, conduzirão: 1, 6; 2, 6, 1; 1, 2; 3, 1, 2; 2, 3; 2, 3, 4; 3, 4; 3, 4, 5; 4, 5; 4, 5, 6; 5, 6. Os circuitos equivalentes são:

- Válvulas 1 e 6 conduzindo

A Figura 4.3 ilustra.

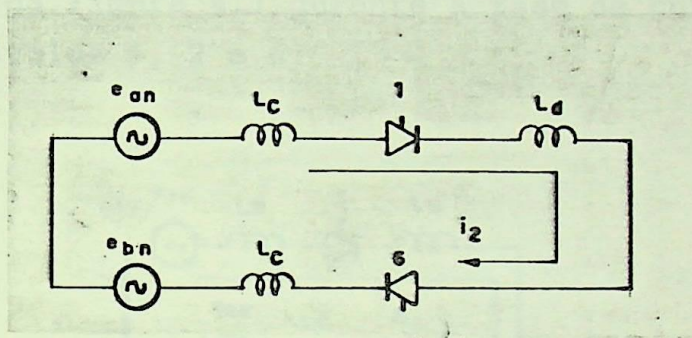


Figura 4.3 - Válvulas 1 e 6 em condução quando da ocorrência de curto circuito

Equacionando, tem-se:

$$e_{ab} = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.22)$$

$$\frac{\pi}{3} \sin(\omega t + \pi/3) = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt}$$

$$di_2 = \frac{\pi}{3(2L_c + L_d)} \sin(\omega t + \pi/3) dt$$

integrando:

$$i_2 \Big|_{I_p}^{i_2} = \frac{\pi}{3(2L_c + L_d)} \left[ -\frac{\cos(\omega t + \pi/3)}{\omega} \right]_{\delta}^{\omega t}$$

$$i_2 - I_p = \frac{\pi}{3(2X_c + X_d)} [\cos(\delta + \pi/3) - \cos(\omega t + \pi/3)] \quad (4.23)$$

fazendo:

$$C = \frac{\pi}{3(2X_c + X_d)} \quad (4.24)$$

resulta:

$$i_2 = I_p + C[\cos(\delta + \pi/3) - \cos(\omega t + \pi/3)] \quad (4.25)$$

- Válvulas 2, 6 e 1 conduzindo:

A Figura 4.4 ilustra o circuito equivalente extraído daquele da Figura 4.1 durante a fase de curto circuito envolvendo as válvulas 1, 2 e 6.

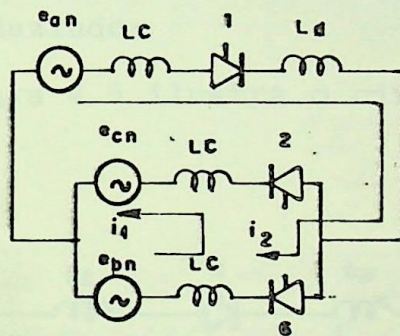


Figura 4.4 - Válvulas 2, 6 e 1 em condução

Equacionando-se o circuito mostrado na Figura 4.4, tem-se:

$$e_{ab} = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (4.26)$$

$$e_{bc} = -L_c \frac{di_2}{dt} + 2L_c \frac{di_1}{dt} \quad (4.27)$$

$$(4.26) \times 2 \rightarrow 2e_{ab} = (4L_c + 2L_d) \frac{di_2}{dt} - 2L_c \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{bc} = -L_c \frac{di_2}{dt} + 2L_c \frac{di_1}{dt}$$

Somando:

$$2e_{ab} + e_{bc} = (3L_c + 2L_d) \frac{di_2}{dt}$$

$$\frac{di_2}{dt} = -\left[\frac{(e_{cb} + 2e_{ba})}{(3L_c + 2L_d)}\right] \quad (4.28)$$

De (4.27):

$$\frac{di_1}{dt} = -\left[\frac{e_{cb}}{2L_c} + \frac{1}{2} \frac{(e_{cb} + 2e_{ba})}{(3L_c + 2L_d)}\right] \quad (4.29)$$

As resoluções de (4.28) e (4.29) análogas às de (4.4) e (4.5) conduzirão a:

$$i_1 = -[A \cos(\alpha - \pi) + B \cos(\alpha - \pi/3) - A \cos(\omega t - 4\pi/3) - B \cos(\omega t - 2\pi/3)] \quad (4.30)$$

$$i_2 = -[B \cos(\alpha - \pi) + 2B \cos(\alpha - \pi/3) - B \cos(\alpha - 4\pi/3) - 2B \cos(\omega t - 2\pi/3) + I_p] \quad (4.31)$$

- Válvulas 1 e 2 conduzindo:

A Figura 4.5 ilustra o circuito equivalente.

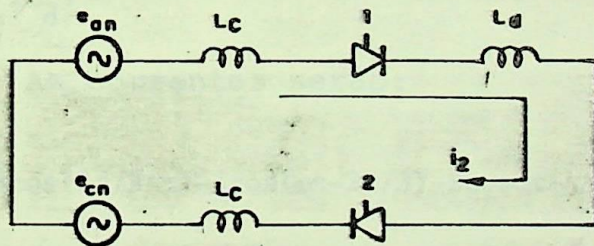


Figura 4.5 - Válvulas 1 e 2 conduzindo

Neste caso:

$$e_{ac} = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.32)$$

Esta equação diferencial análoga à equação (4.22) conduz ao resultado:

$$i_2 = I_p + C[\cos(\delta + \pi/3) - \cos \omega t] \quad (4.33)$$

- Válvulas 3, 1 e 2 conduzindo:

A Figura 4.6 ilustra, analogamente à anterior, a

condição de curto circuito, envolvendo as válvulas 1, 2 e 3.

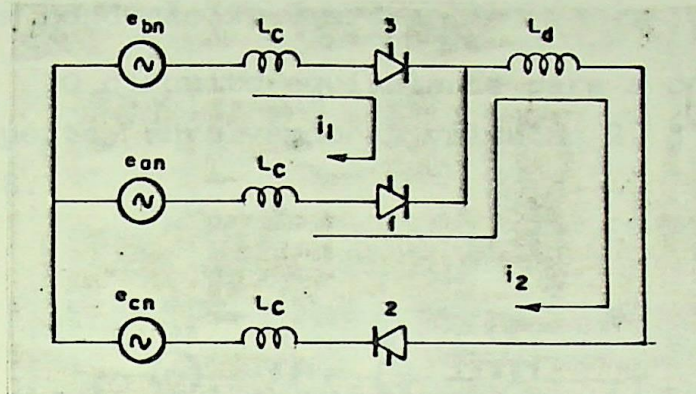


Figura 4.6 - Válvulas 3, 1 e 2 conduzindo

As equações diferenciais são:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{e_{ba}}{2L_c} + \frac{1}{2} \frac{(e_{ba} + 2e_{ac})}{(3L_c + 2L_d)} \quad (4.34)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{(e_{ba} + 2e_{ac})}{(3L_c + 2L_d)} \quad (4.35)$$

As correntes serão:

$$i_1 = A \cos \alpha + B \cos(2\pi/3 + \alpha) - A \cos(\omega t - 2\pi/3) - B \cos \omega t \quad (4.36)$$

$$i_2 = I_p + B \cos \alpha + 2B \cos(2\pi/3 + \alpha) - B \cos(\omega t - 2\pi/3) - 2B \cos \omega t \quad (4.37)$$

- Válvulas em condução 2, 3:

A Figura 4.7 ilustra o caso em pauta, envolvendo apenas duas válvulas: 2 e 3.

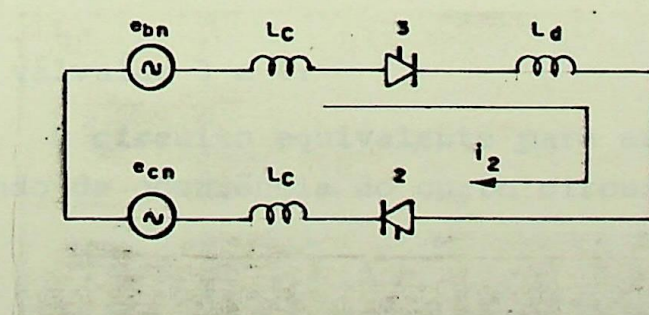


Figura 4.7 - Válvulas 2 e 3 em condução

$$e_{bc} = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.38)$$

$$i_2 = I_p + C[\cos(\delta + \pi/3) - \cos(\omega t - \pi/3)] \quad (4.39)$$

- Válvulas em condução 2, 3 e 4:

O circuito equivalente para a condição de curto circuito na ponte, envolvendo as válvulas 2, 3 e 4, é mostrado na Figura 4.8.

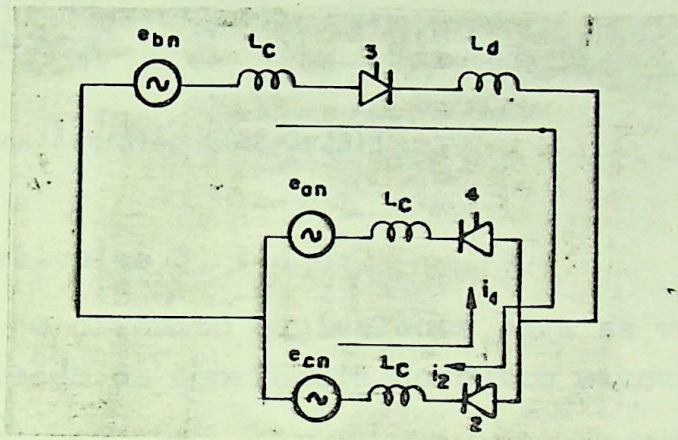


Figura 4.8 - Válvulas 3, 4 e 2 em condução

Tem-se:

$$\frac{di_1}{dt} = -\left[ \frac{e_{ac}}{2L_c} + \frac{1}{2} \frac{(e_{ac} + 2e_{cb})}{(3L_c + 2L_d)} \right] \quad (4.40)$$

$$\frac{di_2}{dt} = -\left[ \frac{(e_{ac} + 2e_{cb})}{(3L_c + 2L_d)} \right] \quad (4.41)$$

$$i_1 = -[A \cos(\pi + \alpha) + B \cos(\alpha - \pi/3) - A \cos \omega t - B \cos(\omega t - 4\pi/3)] \quad (4.42)$$

$$i_2 = I_p - [B \cos(\pi + \alpha) + 2B \cos(\alpha - \pi/3) - B \cos \omega t - 2B \cos(\omega t - 4\pi/3)] \quad (4.43)$$

- Conduzindo válvulas 3 e 4:

O circuito equivalente para as válvulas 3 e 4 em condução quando da ocorrência do curto circuito é mostrado na Figura 4.9.

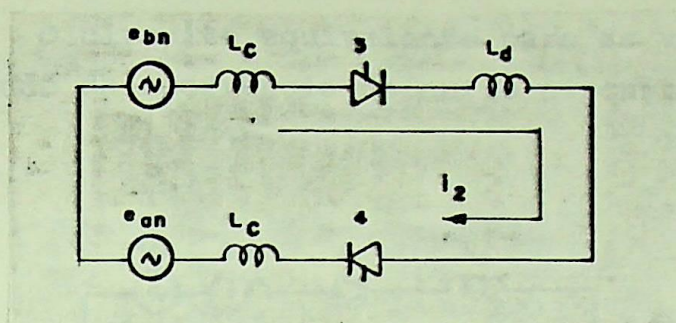


Figura 4.9 - Válvulas 3 e 4 em condução

$$e_{ba} = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.44)$$

$$i_2 = I_p + C[\cos(\delta + \pi/3) - \cos(\omega t - 2\pi/3)] \quad (4.45)$$

- Conduzindo válvulas 3, 4 e 5:

O circuito equivalente para as válvulas 3, 4 e 5 em condução quando da ocorrência do curto circuito é apresentado na Figura 4.10.

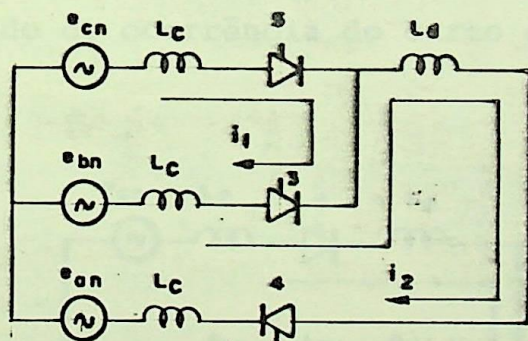


Figura 4.10 - Válvulas 5, 3 e 4 conduzindo

$$\frac{di_1}{dt} = \left[ \frac{e_{cb}}{2L_c} + \frac{1}{2} \frac{(e_{cb} + 2e_{ba})}{(3L_c + 2L_d)} \right] \quad (4.46)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{(e_{cb} + 2e_{ba})}{(3L_c + 2L_d)} \quad (4.47)$$

$$i_1 = A \cos(\alpha) + B \cos(\alpha + 2\pi/3) - A \cos(\omega t - 4\pi/3) - B \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (4.48)$$

$$i_2 = I_p + B \cos(\alpha) + 2B \cos(\alpha + 2\pi/3) - B \cos(\omega t - 4\pi/3) - 2B \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (4.49)$$

- Conduzindo válvulas 4 e 5:

O circuito equivalente para as válvulas 4 e 5 em condução, quando da ocorrência de curto circuito, é ilustrado na Figura 4.11.

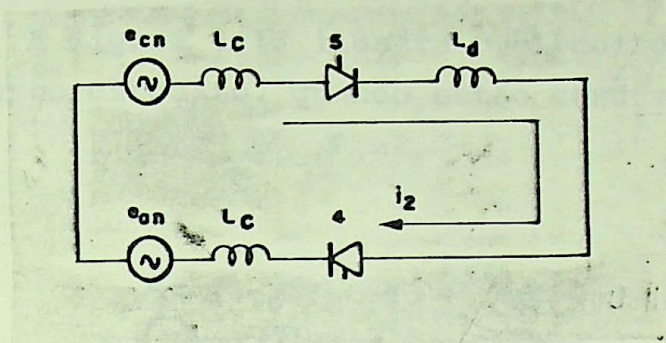


Figura 4.11 - Válvulas 4 e 5 conduzindo

$$e_{ca} = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.50)$$

$$i_2 = I_p + C[\cos(\delta + \pi/3) - \cos(\omega t - \pi)] \quad (4.51)$$

- Conduzindo válvulas 4, 5 e 6:

O circuito equivalente para as válvulas 4, 5 e 6, em condução quando de ocorrência do curto circuito é ilustrado na Figura 4.12.

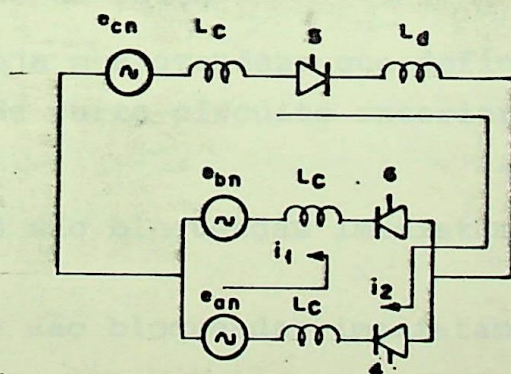


Figura 4.12 - Válvulas conduzindo 5, 6 e 4

$$\frac{di_1}{dt} = - \left[ \frac{e_{ba}}{2L_c} + \frac{1}{2} \frac{(e_{ba} + 2e_{ac})}{(3L_c + 2L_d)} \right] \quad (4.52)$$

$$\frac{di_2}{dt} = - \left[ \frac{(e_{ba} + 2e_{ac})}{(3L_c + 2L_d)} \right] \quad (4.53)$$

$$i_1 = -[A\cos(\alpha+\pi)+B\cos(\alpha+5\pi/3)-A\cos(\omega t-2\pi/3)-B\cos(\omega t)] \quad (4.54)$$

$$i_2 = I_p - [B\cos(\alpha+\pi)+2B\cos(\alpha+5\pi/3)-B\cos(\omega t-2\pi/3)-2B\cos(\omega t)] \quad (4.55)$$

- Conduzindo válvulas 5 e 6:

A Figura 4.13 ilustra o circuito equivalente na condição de curto circuito, quando estão conduzindo as válvulas 5 e 6.

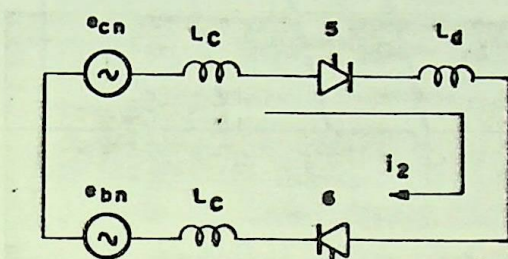


Figura 4.13 - Válvulas 5 e 6 conduzindo

$$e_{cb} = (2L_c + L_d) \frac{di_2}{dt} \quad (4.56)$$

$$i_2 = I_p + C[\cos(\delta+\pi/3) - \cos(\omega t - 4\pi/3)] \quad (4.57)$$

- Tempo de duração da falta

Seja  $m$  a grandeza que define o tempo de persistência da corrente de curto circuito anteriormente do bloqueio das válvulas.

$m=0$  → As válvulas são bloqueadas imediatamente após a 1ª comutação.

$m=1$  → As válvulas são bloqueadas imediatamente após a 2ª comutação.

$m=2$  → As válvulas são bloqueadas imediatamente após a 3ª comutação.

A Figura 4.14 ilustra.

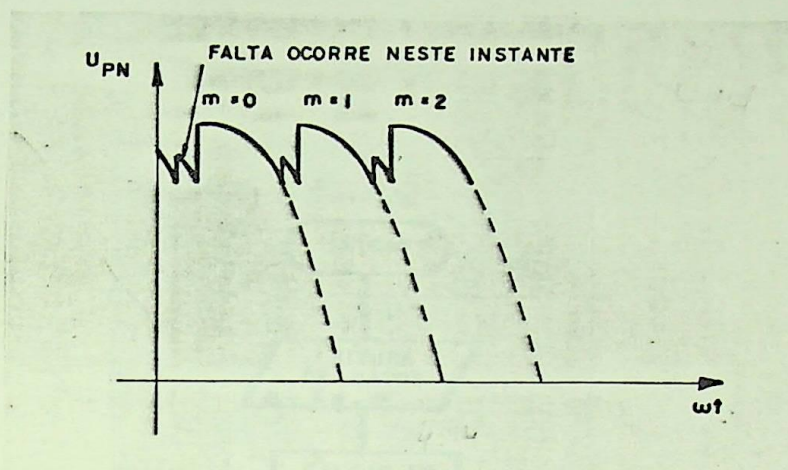


Figura 4.14 - Tensão de saída da ponte para  $m=0$ ;  $m=1$  e  $m=2$

Para  $m=1$ , o tempo de duração da falta anteriormente ao bloqueio é de  $\frac{1}{360}$  [s], ou seja,  $\frac{1}{6}$  de ciclo. Para  $m=2$  a falta persiste por  $\frac{2}{360}$  [s], ( $\frac{2}{6}$  ciclo), após o qual as válvulas serão bloqueadas e permanecerão em condução, até que a corrente se anule, apenas aquelas que estavam conduzindo imediatamente após o bloqueio.

Um programa para simulação digital da corrente de curto circuito foi desenvolvido. O programa utiliza as equações dos circuitos equivalentes apresentados anteriormente. O fluxograma é apresentado na Figura 4.15.

curto circuito, para os seguintes dados:  $\alpha = 60^\circ$ ;  $m = 2$ ;  $X_d = 0$  (pu)  
 $X_q = 1,0$  (pu).



Figura 4.15 - Fluxograma para cálculo da corrente de falta.

As figuras a seguir ilustram alguns casos de corrente de curto circuito.

A Figura 4.16 apresenta as formas de onda de corrente e tensão na ponte retificadora, quando da ocorrência de um

curto circuito, para os seguintes dados:  $\alpha=0^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0$  (pu) ;  
 $X_d=1,0$  (pu).

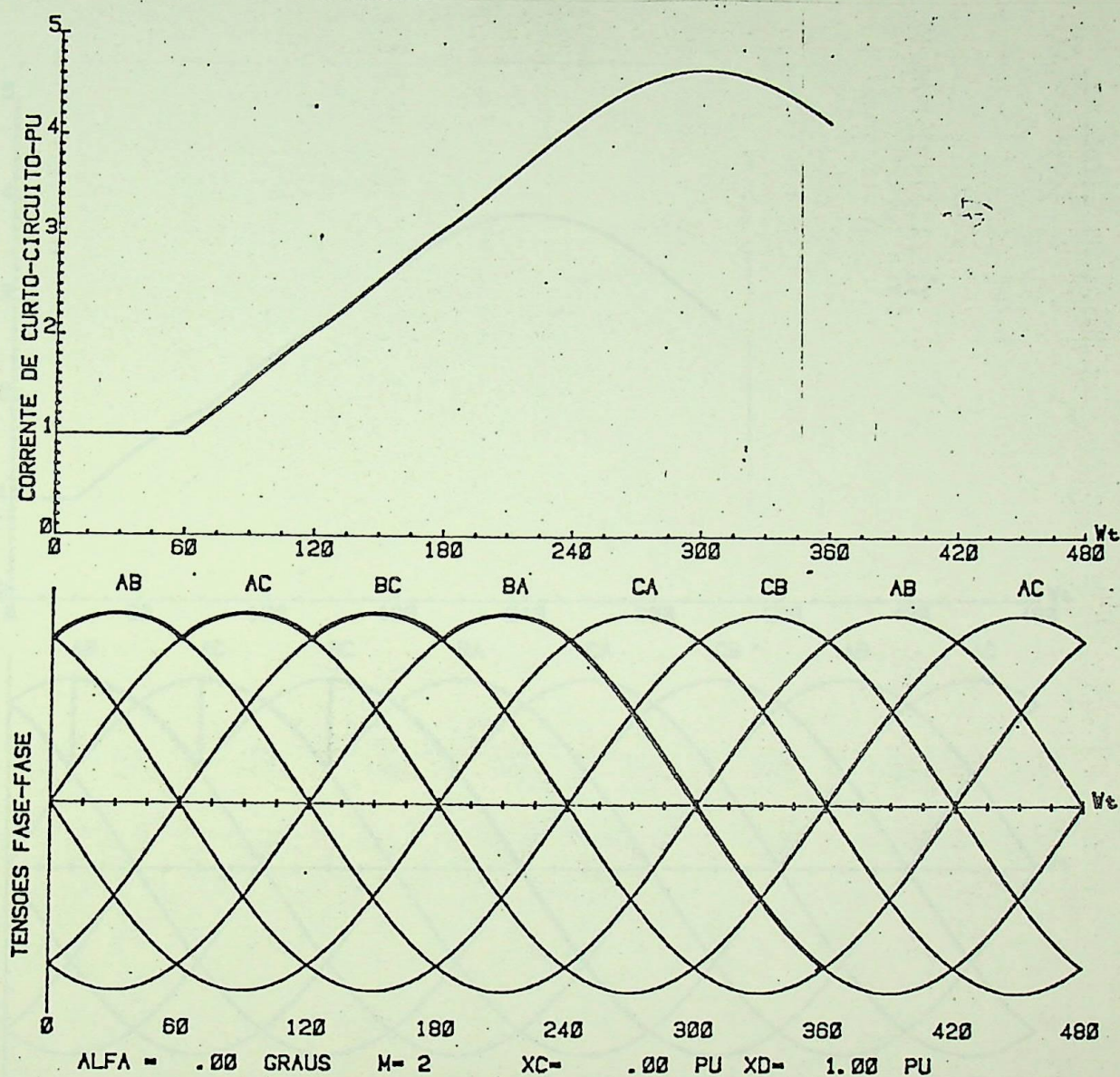


Figura 4.16 - Formas de onda de corrente e tensão na ponte retificadora quando da ocorrência de um curto circuito  $\alpha=0^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu)

A Figura 4.17 mostra as mesmas formas de onda referidas na figura anterior para  $\alpha=30^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu).

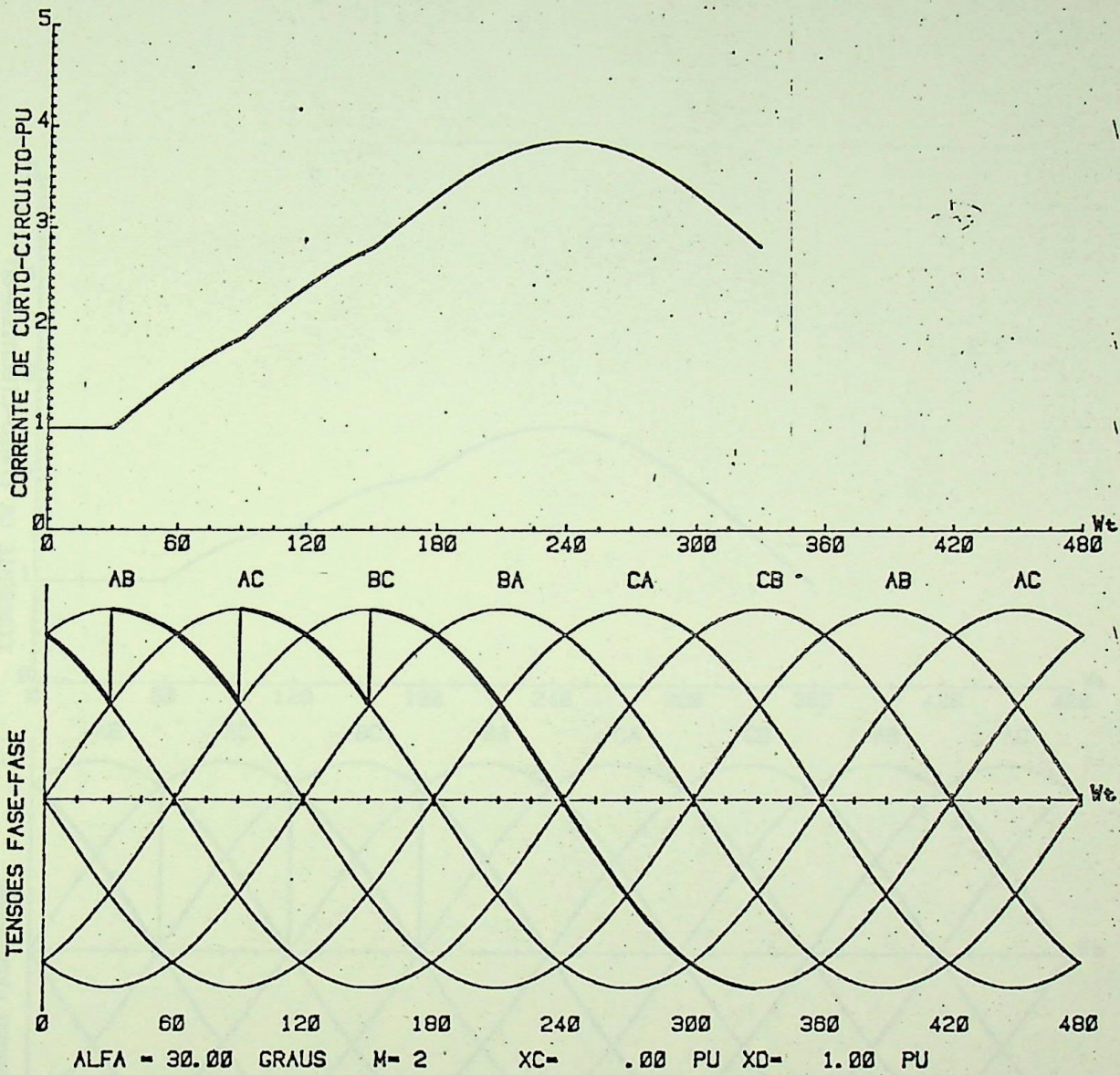


Figura 4.17 - Formas de onda de corrente e tensão na ponte retificadora quando da ocorrência de um curto circuito  $\alpha=30^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu)

A Figura 4.18 ilustra as formas de onda de corrente e tensão quando da ocorrência do curto circuito para  $\alpha=60^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu).

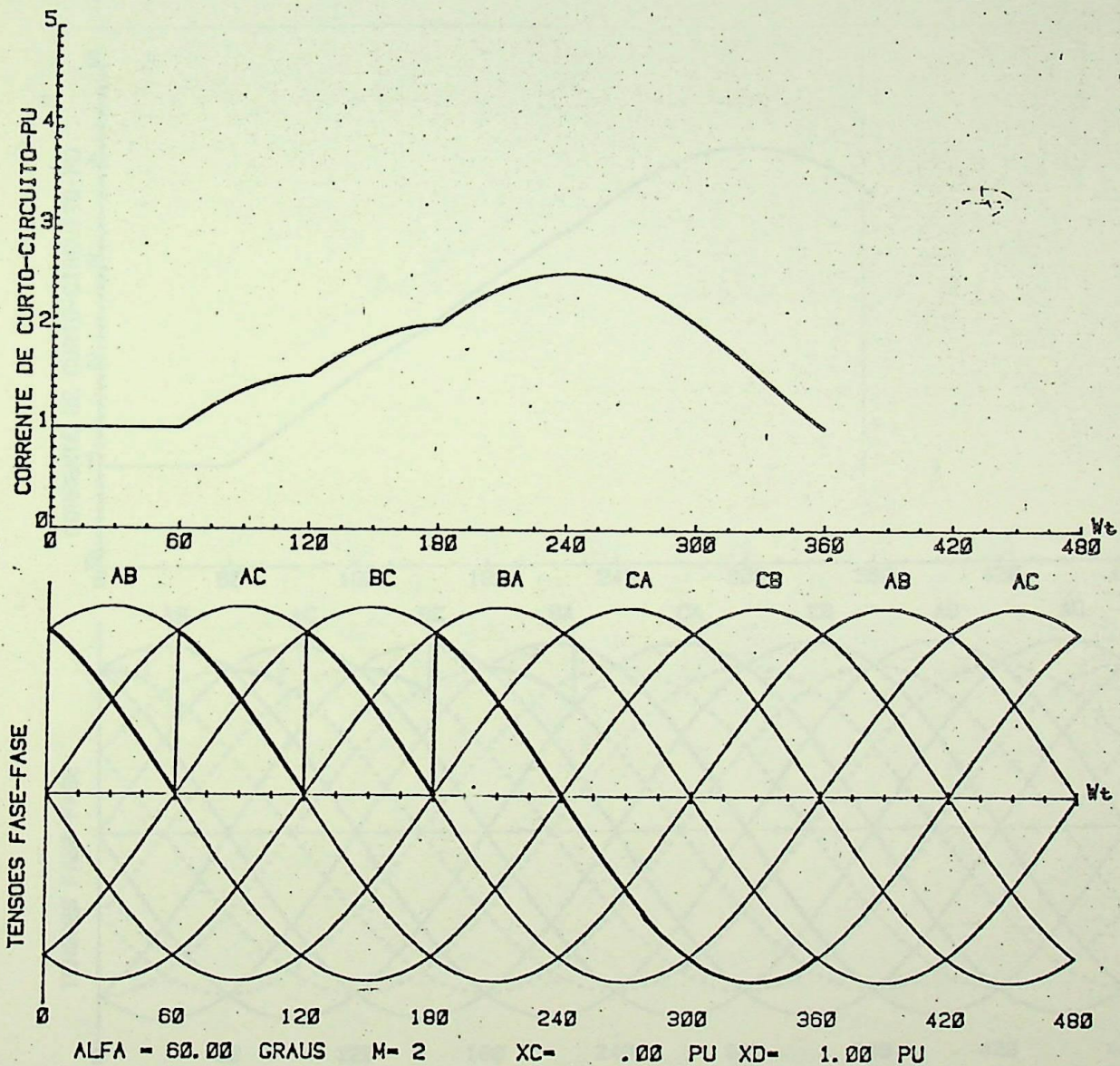


Figura 4.18 - Formas de onda de corrente e tensão na ponte retificadora quando da ocorrência de um curto circuito  $\alpha=60^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu)

A Figura 4.19 ilustra as formas de onda de corrente e tensão na ponte retificadora quando a reatância de comutação é considerada. Neste caso, o ângulo de comutação  $\mu$  é diferente de zero graus. Na Figura 4.19 tem-se:  $\alpha = 0^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0,04$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu).

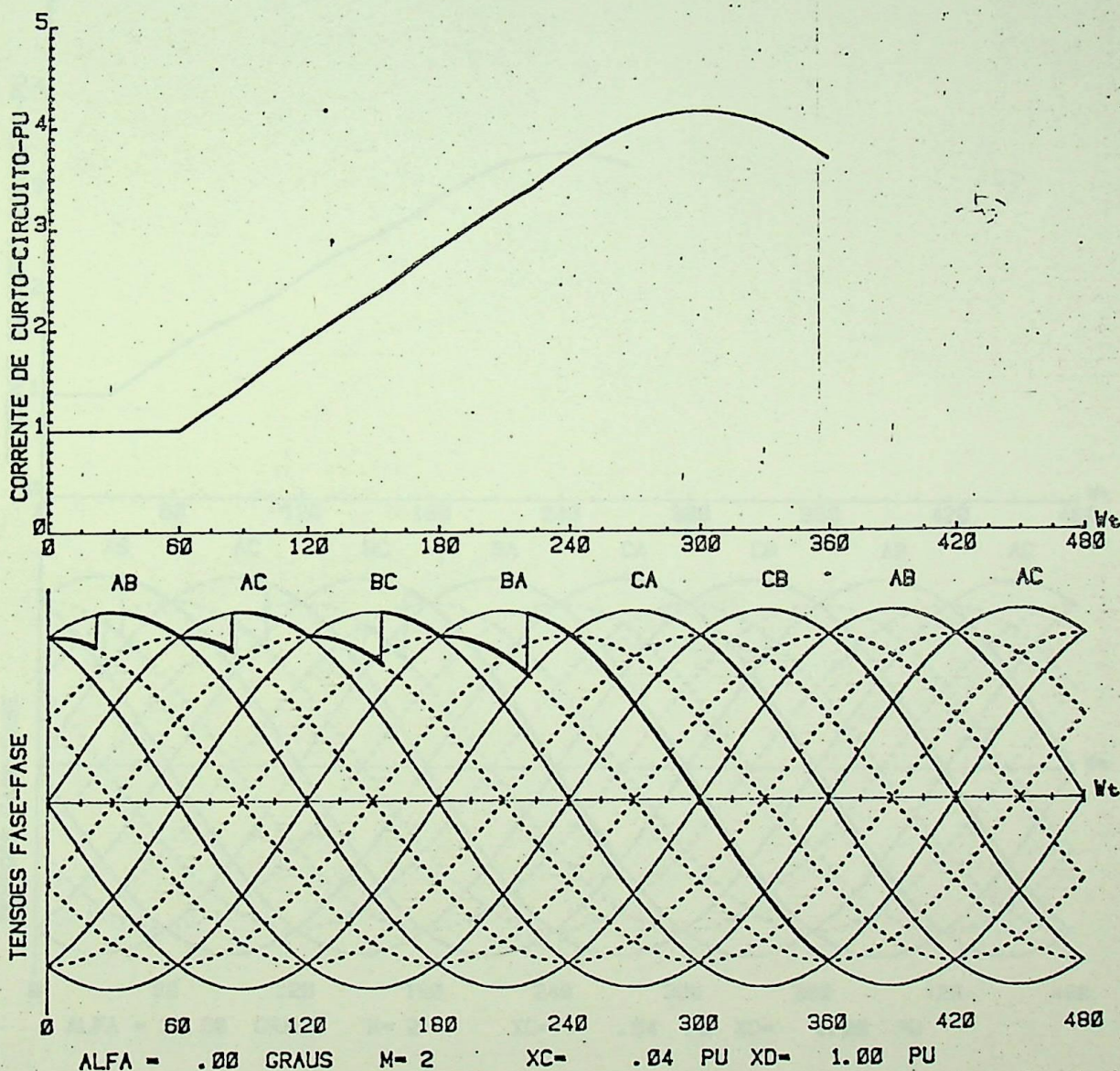


Figura 4.19 - Formas de onda de corrente e tensão quando da ocorrência de um curto circuito na ponte retificadora  $\alpha=0^\circ$ ;  $X_c=0,04$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu);  $m=2$

A Figura 4.20 ilustra as formas de onda de corrente e tensão quando da ocorrência de curto circuito para  $\alpha=30^\circ$  ;  $m=2$  ;  $X_c=0,04$  (pu) ;  $X_d=1$  (pu).

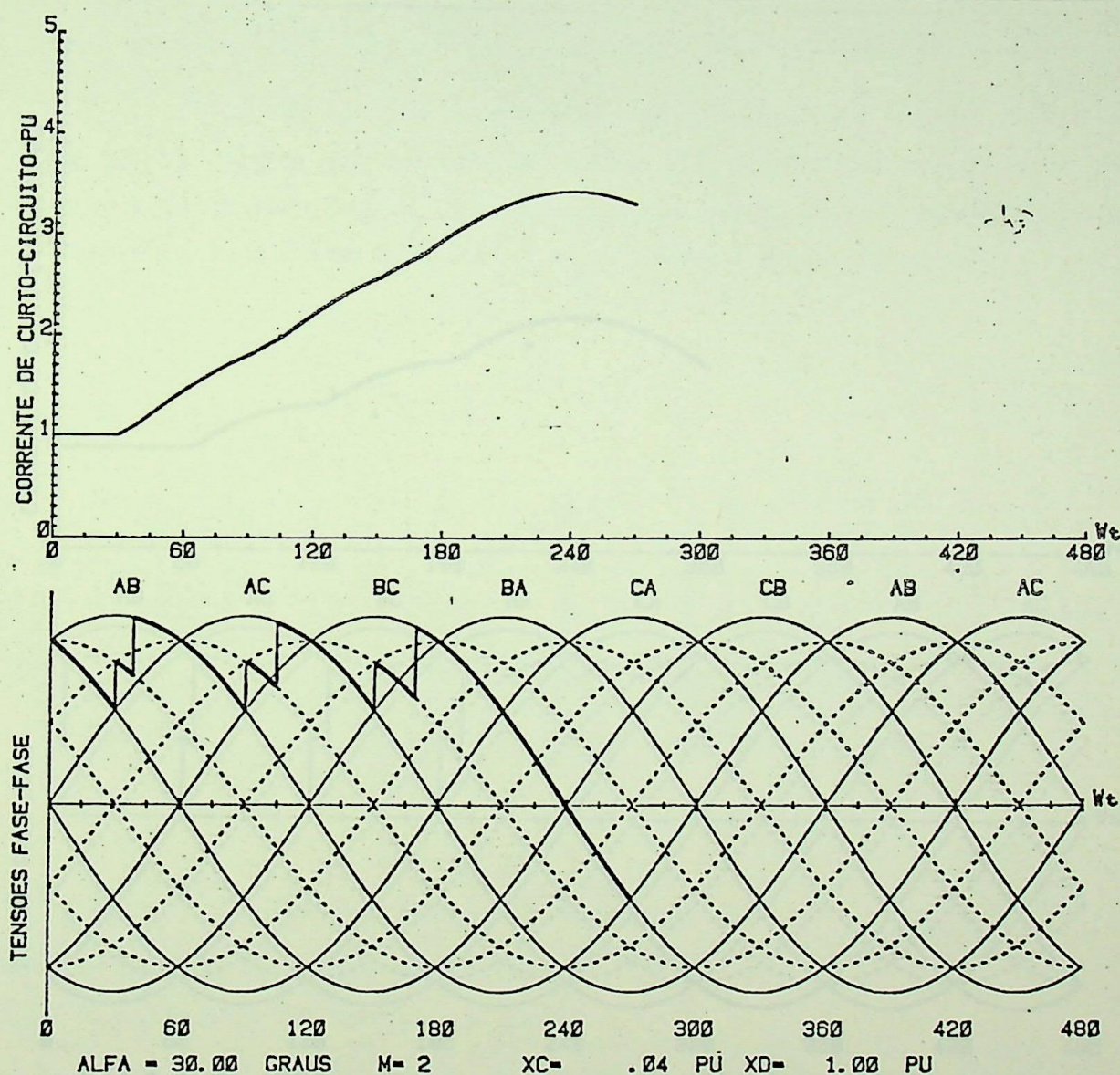


Figura 4.20 - Formas de onda de corrente e tensão na ponte retificadora quando da ocorrência de um curto-circuito  $\alpha=30^\circ$  ;  $m=2$  ;  $X_c=0,04$  (pu) ;  $X_d=1,0$  (pu)

Na Figura 4.21 estão apresentadas as formas de onda da corrente e tensão quando da ocorrência de curto circuito na ponte retificadora para  $\alpha=60^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0,04$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu).

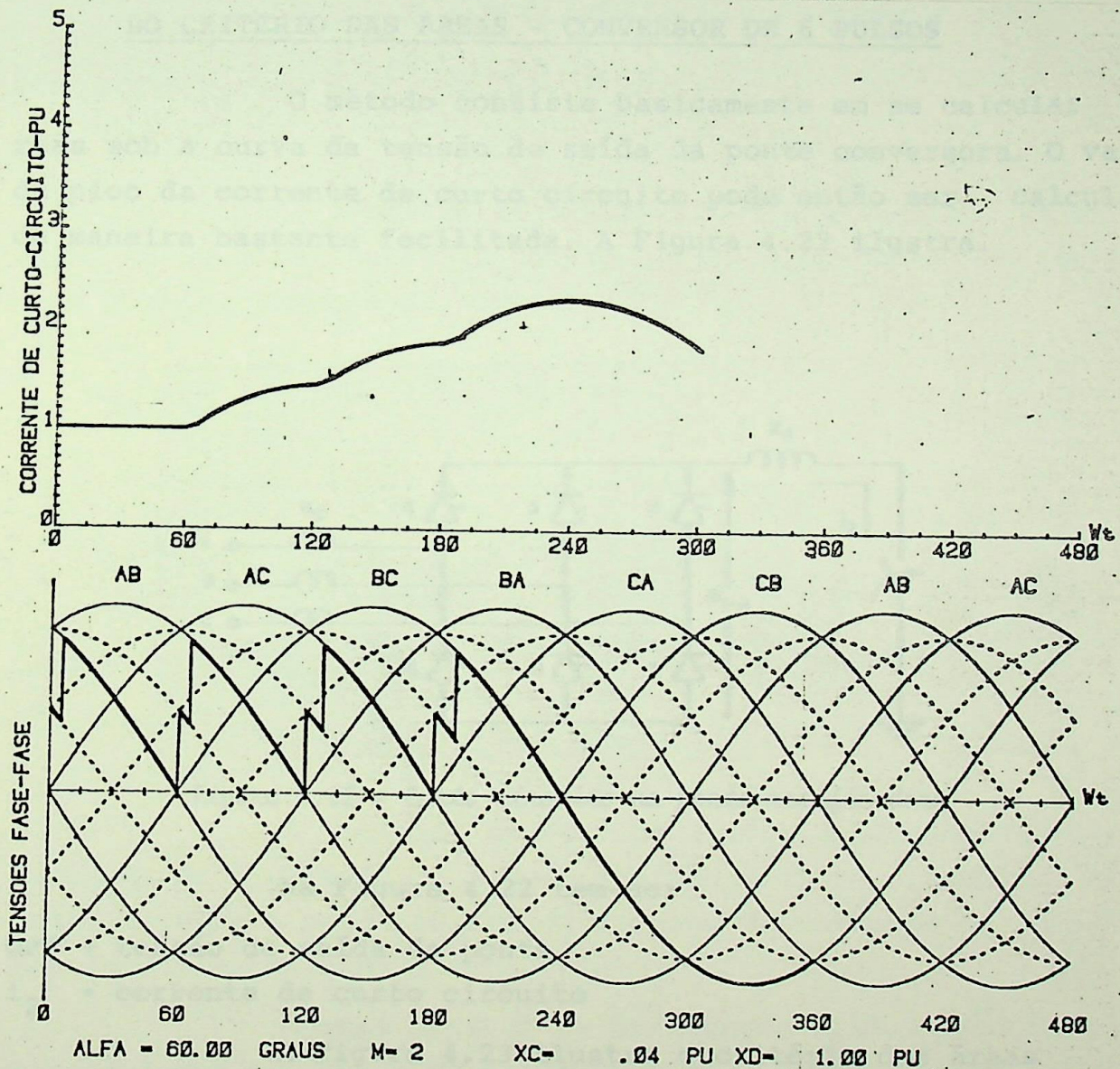


Figura 4.21 - Formas de onda da corrente e tensão na ponte retificadora quando da ocorrência de curto circuito  $\alpha=60^\circ$ ;  $m=2$ ;  $X_c=0,04$  (pu);  $X_d=1,0$  (pu)

Nas Figuras 4.16 a 4.21 a tensão polo positivo - polo negativo de saída da ponte também foi traçada. Pode-se perceber o aumento do ângulo de comutação e também a ocorrência do máximo da corrente coincidente com a passagem da tensão por zero. Este fato será provado no item a seguir.

#### 4.3 - CÁLCULO DO VALOR DE PICO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO PELO CRITÉRIO DAS ÁREAS - CONVERSOR DE 6 PULSOS

O método consiste basicamente em se calcular  $\hat{a}$  reas sob a curva da tensão de saída da ponte conversora. O valor de pico da corrente de curto circuito pode então ser calculado de maneira bastante facilitada. A Figura 4.22 ilustra.

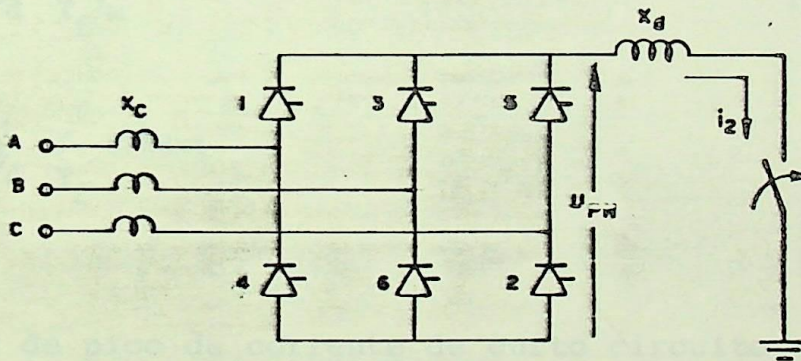


Figura 4.22 - Curto circuito na ponte retificadora

Na Figura 4.22 tem-se:

UPN → tensão de saída da ponte

$i_2$  → corrente de curto circuito

A Figura 4.23 ilustra o critério das áreas

A → área sob a curva de tensão de saída UPN.

Equacionando o circuito da Figura 4.22 para a condição de falta, tem-se:

$$UPN = L_d \frac{di_2}{dt} \quad (4.58)$$

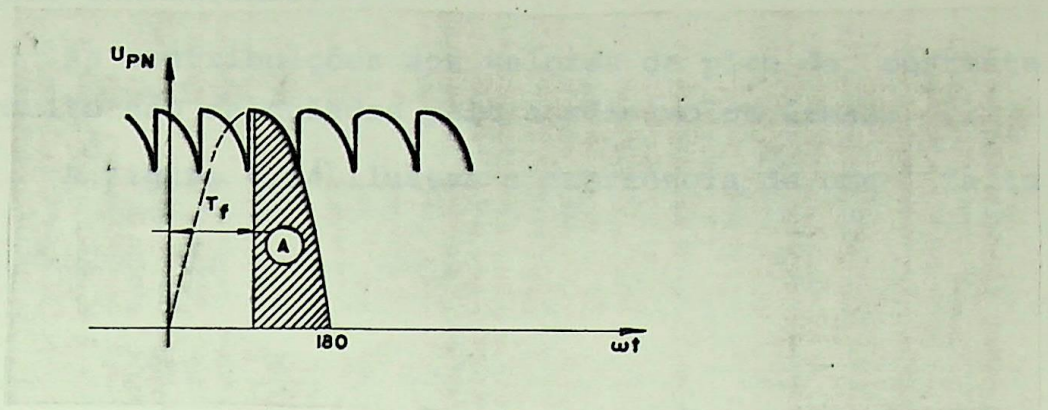


Figura 4.23 - Cálculo do valor de pico da corrente

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{UPN}{L_d} \quad (4.59)$$

A corrente de curto circuito atingirá o valor máximo, ou de pico, quando a tensão de saída da ponte UPN for igual a zero. Integrando, tem-se:

$$i_{2m} = \frac{1}{L_d} \int_{T_f/\omega}^{\pi/\omega} UPN dt$$

ou

$$i_{2m} = \frac{1}{X_d} \int_{T_f}^{\pi} UPN d\omega t \quad (4.60)$$

Sendo:

$i_{2m}$ : valor de pico da corrente de curto circuito;

$T_f$ : instante da ocorrência da falta.

A integral da Equação (4.60) representa a área A mostrada na Figura 4.22. A contribuição efetiva é igual a  $A/X_d$ . Desta maneira o valor máximo ou de pico da corrente de falta é facilmente calculado.

Apenas o valor da indutância  $L_d$  é levado em consideração para o cálculo do valor de pico, desprezando-se neste cálculo o valor da indutância  $L_c$ , conforme pode ser verificado através da equação (4.59). Este fato torna o método conservador, pois desprezando-se  $L_c$ , a corrente de curto circuito assume valores teoricamente maiores.

Para cálculo do ângulo de comutação, o valor de

$L_c$  é entretanto considerado.

As contribuições aos valores de pico da corrente de curto circuito são calculadas pelo acréscimo de áreas.

A Figura 4.24 ilustra a ocorrência de uma falta com  $m=2$ .

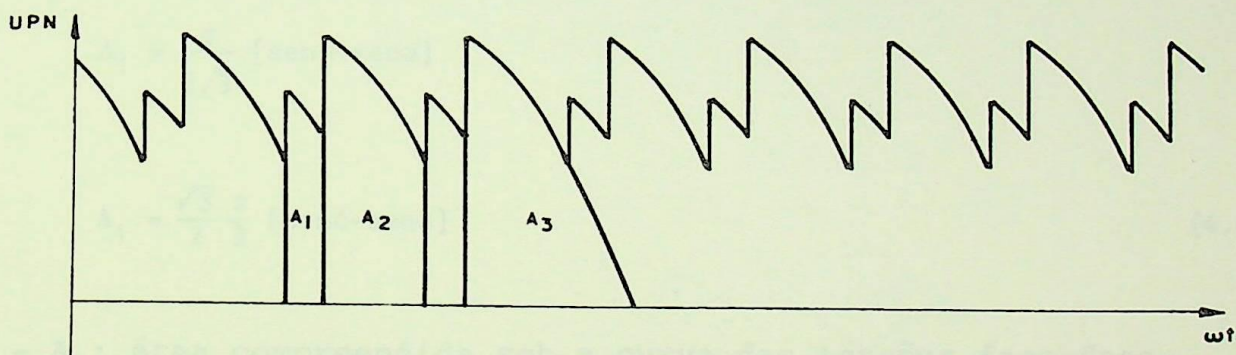


Figura 4.24 - Falta com intervalo de duração  $m=1$ .

Os três tipos básicos de áreas para cálculo das contribuições de curto circuito são ilustrados na Figura 4.24. Assim:

-  $A_1$ : área compreendida sob a curva de comutação

$$A_1 = \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi/3+\delta} \frac{3}{2} e_{an} d\omega t \quad (4.61)$$

$$A_1 = \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi/3+\delta} E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6) d\omega t$$

$$A_1 = \frac{3}{2} E_m [-\cos(\omega t + \pi/6)]_{\pi/3+\alpha}^{\pi/3+\delta}$$

$$A_1 = \frac{3}{2} E_m [\cos(\alpha + \pi/2) - \cos(\delta + \pi/2)]$$

$$A_1 = \frac{3}{2} E_m [\text{sen}\delta - \text{sen}\alpha] \quad (4.62)$$

Em valores (pu), dividindo pelo valor da tensão base dada pela equação (4.6), vem:

$$A_1 = \frac{\frac{3}{2} E_m}{\frac{3E_m \sqrt{3}}{\pi}} [\text{sen}\delta - \text{sen}\alpha]$$

$$A_1 = \frac{3}{2} E_m \frac{\pi}{3E_m \sqrt{3}} [\text{sen}\delta - \text{sen}\alpha]$$

$$A_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} [\text{sen}\delta - \text{sen}\alpha]$$

$$A_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\pi}{3} [\text{sen}\delta - \text{sen}\alpha] \quad (4.63)$$

-  $A_2$ : área compreendida sob a curva das tensões fase-fase

$$A_2 = \int_{\pi/3+\delta}^{2\pi/3+\alpha} \sqrt{3} E_m \text{sen}\omega t d\omega t$$

Em valores pu:

$$A_2 = \int_{\pi/3+\delta}^{2\pi/3+\alpha} \frac{\pi}{3} \text{sen}\omega t d\omega t$$

$$A_2 = \frac{\pi}{3} [-\cos\omega t] \int_{\pi/3+\delta}^{2\pi/3+\alpha}$$

$$A_2 = \frac{\pi}{3} [\cos(\pi/3+\delta) - \cos(2\pi/3+\alpha)] \quad (4.64)$$

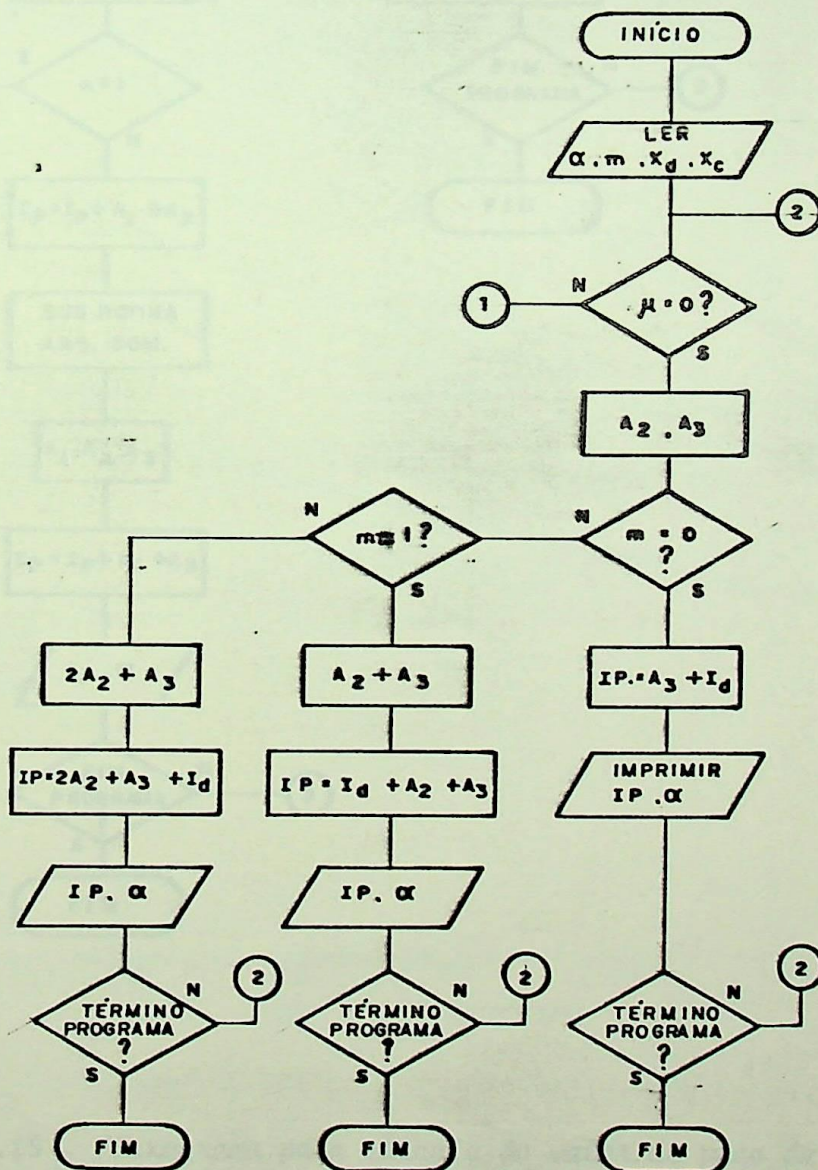
-  $A_3$ : área compreendida sob a curva das tensões fase-fase

$$A_3 = \int_{\pi/3+\delta}^{\pi} \frac{\pi}{3} \text{sen}\omega t d\omega t$$

$$A_3 = \frac{\pi}{3} [-\text{cos}\omega t]_{\pi/3+\delta}^{\pi}$$

$$A_3 = \frac{\pi}{3} [\text{cos}(\pi/3 + \delta) - \text{cos}\pi] \quad (4.65)$$

Um programa de simulação digital foi desenvolvido para cálculo dos valores de pico da corrente de falta. O fluxo grama é apresentado na Figura 4.25.



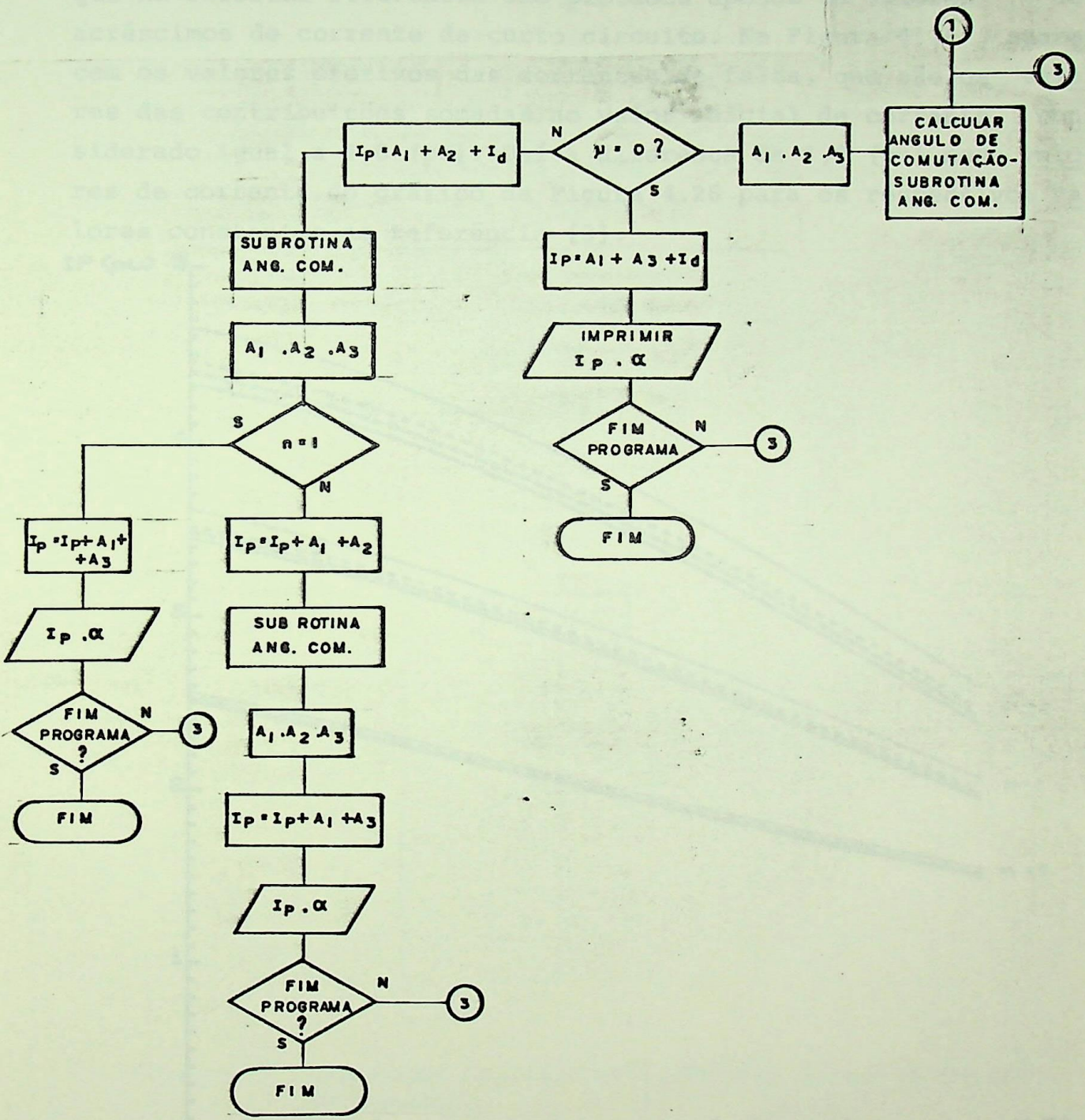


Figura 4.25 - Fluxograma para cálculo do valor de pico da corrente de curto circuito

A Figura 4.26 ilustra o gráfico dos valores de pico das correntes de curto circuito.

Ao comparar os resultados com a referência [3], nota-se uma equivalência dos valores obtidos, lembrando-se apenas que na referida referência são plotados apenas os valores de acréscimos de corrente de curto circuito. Na Figura 4.26 aparecem os valores efetivos das correntes de falta, que são os valores das contribuições somadas ao valor inicial de corrente, considerado igual a 1,0 (pu). Daí a diferença de 1,0 (pu) nos valores de corrente do gráfico da Figura 4.26 para os respectivos valores constantes na referência [3].

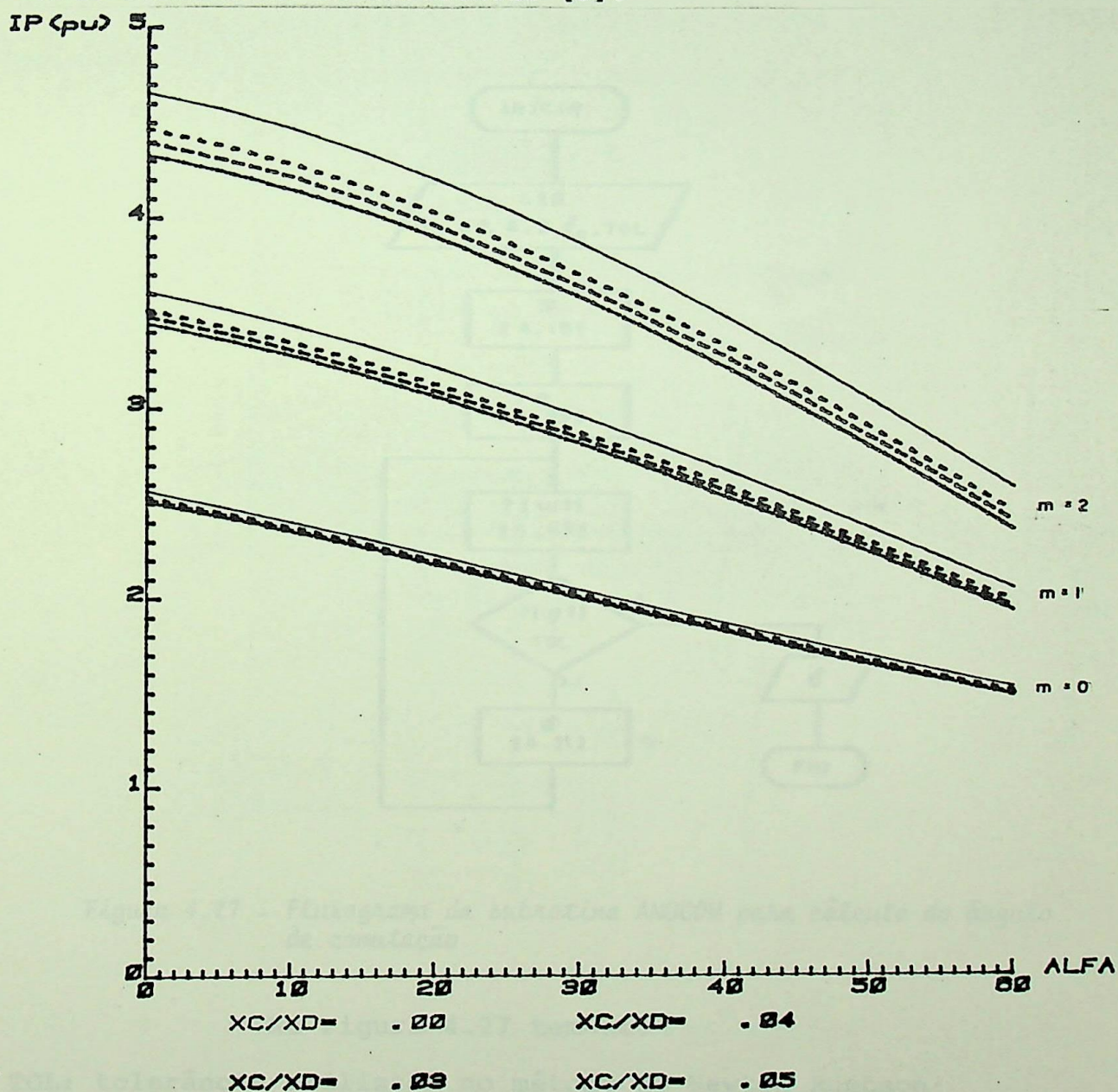


Figura 4.26 - Gráfico dos valores de pico das correntes de curto circuito - sistema conversor de 6 pulsos

Os valores de pico são calculados em função do ângulo de disparo  $\alpha$ , do tempo de resistência de falta  $m$ , e dos valores das reatâncias  $X_d$  e  $X_c$ .

Os valores dos ângulos de comutação são calculados através da subrotina ANGCOS.

A subrotina calcula os ângulos de comutação através do método iterativo de Newton Raphson. Para isto as equações (4.11), (4.12), (4.15), (4.18) e (4.19) são utilizadas.

A Figura 4.27 ilustra o fluxograma da subrotina ANGCOS.

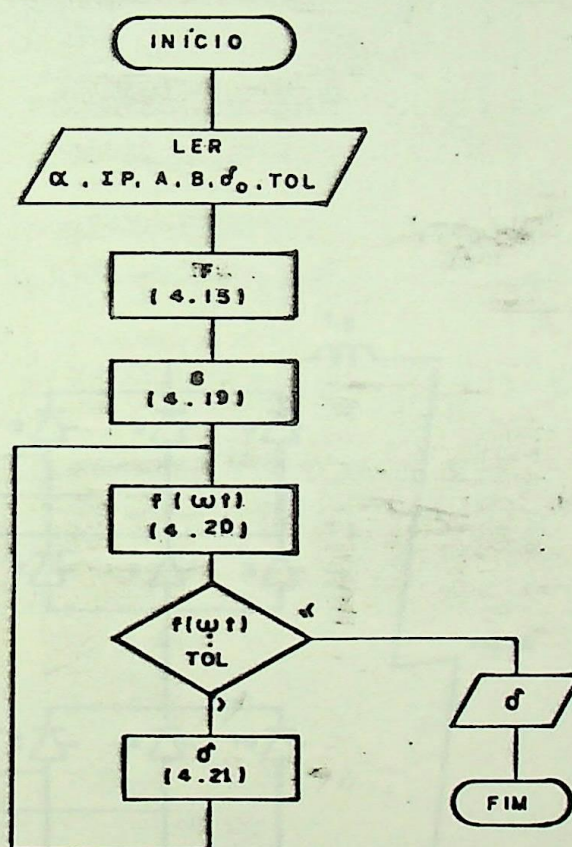


Figura 4.27 - Fluxograma da subrotina ANGCOS para cálculo do ângulo de comutação

Na Figura 4.27 tem-se:

TOL: tolerância utilizada no método de Newton Raphson;

$\delta_0$ : estimativa inicial

O ângulo de comutação pode ser obtido fazendo-se:

$$\mu = \delta - \alpha$$

Entretanto, o ângulo utilizado nos cálculos é o ângulo  $\delta$ , razão pela qual se calculou diretamente este ângulo a através da subrotina ANGCOM.

#### 4.4 - CÁLCULO DOS VALORES DE PICO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO EM SISTEMAS CONVERSORES DE 12 PULSOS

A Figura 4.28 ilustra um sistema conversor de 12 pulsos.

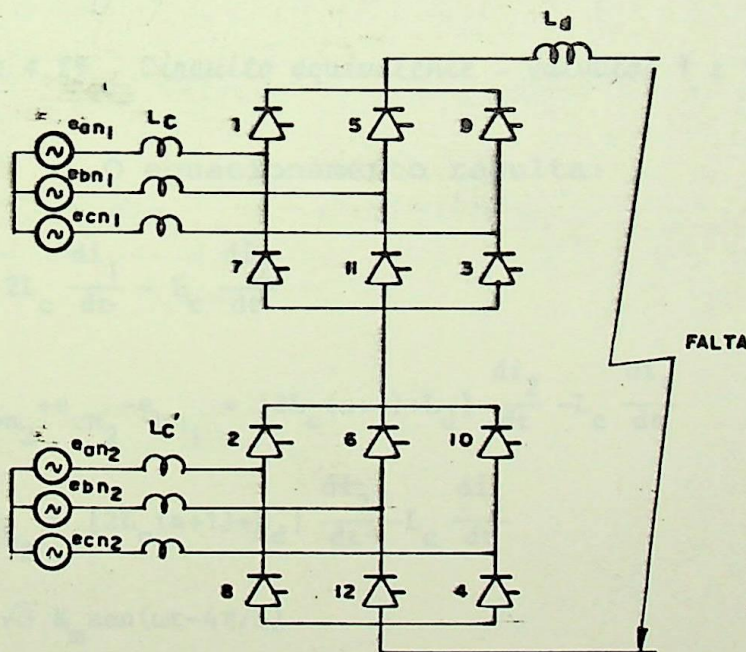


Figura 4.28 - Sistema conversor de 12 pulsos

Seja:

$$L'_c = aL_c$$

(4.66)

Para maior facilidade no equacionamento os secundários foram considerados ligados em estrela.

O circuito equivalente para as válvulas 1 e 9 comutando na ponte superior é mostrado na Figura 4.29.

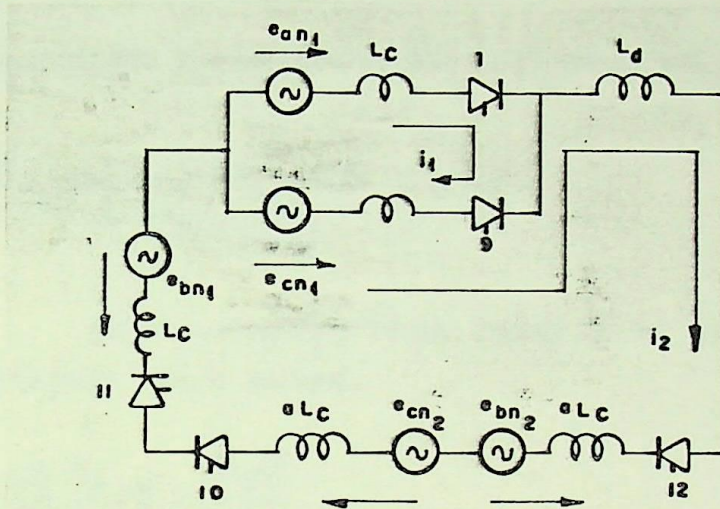


Figura 4.29 - Circuito equivalente - válvulas 1 e 9 comutando

O equacionamento resulta:

$$e_{ac_1} = 2L_c \frac{di_1}{dt} - L_c \frac{di_2}{dt} \quad (4.67)$$

$$e_{cn_1} - e_{bn_2} + e_{cn_2} - e_{bn_1} = [2L_c(a+1) + L_d] \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{cb_1} + e_{cb_2} = [2L_c(a+1) + L_d] \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (4.68)$$

$$e_{cb_1} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 4\pi/3)$$

$$e_{cb_2} = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t - 9\pi/6)$$

$$e_{cb_1} + e_{cb_2} = 3,346 E_m \text{sen}(\omega t - 17\pi/12)$$

(4.68)x2:

$$6,692 E_m \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) = [(4L_c(a+1) + 2L_d) \frac{di_2}{dt} - 2L_c \frac{di_1}{dt}] \quad (4.69)$$

$$\sqrt{3} E_m \text{sen}\omega t = 2L_c \frac{di_1}{dt} - L_c \frac{di_2}{dt} \quad (4.70)$$

$$6,692 E_m \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) = -2L_c \frac{di_1}{dt} + [4L_c(a+1) + 2L_d] \frac{di_2}{dt} \quad (4.71)$$

(4.70)+(4.71):

$$[\sqrt{3} E_m \text{sen}\omega t + 6,692 E_m \text{sen}(\omega t - 17\pi/12)] = [L_c(4a+3) + 2L_d] \frac{di_2}{dt}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\sqrt{3} E_m \text{sen}\omega t + 6,692 E_m \text{sen}(\omega t - 17\pi/12)}{[L_c(4a+3) + 2L_d]} \quad (4.72)$$

Seja a tensão base igual à de saída da ponte com ângulo de disparo zero graus.

$$U_{\text{base}} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \frac{E_m}{\sqrt{2}} \sqrt{3} = \frac{6E_m \sqrt{3}}{\pi} \quad (4.73)$$

Em valores (pu) a equação (4.72) pode ser escrita:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{(\pi/6) \text{sen}\omega t + \frac{\pi \times 6,692}{\sqrt{3} \times 6} \text{sen}(\omega t - 17\pi/12)}{L_c(4a+3) + 2L_d}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\pi/6 \text{sen}\omega t + 2,023 \text{sen}(\omega t - 17\pi/12)}{L_c(4a+3) + 2L_d} \quad (4.74)$$

Escrevendo (4.70) em (pu) tem-se:

$$\frac{\pi}{6} \text{sen}\omega t = 2L_c \frac{di_1}{dt} - L_c \frac{di_2}{dt}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\pi}{12L_c} \text{sen}\omega t + \frac{1}{2} \frac{di_2}{dt}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\pi}{12L_c} \text{sen}\omega t + \frac{1}{2} \left[ \frac{\pi/6 \text{sen}\omega t + 2,023 \text{sen}(\omega t - 17\pi/12)}{L_c(4a+3) + 2L_d} \right] \quad (4.75)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \text{sen}\omega t \left[ \frac{\pi}{12L_c} + \frac{\pi}{6[(8a+6)L_c + 4L_d]} \right] + \left[ \frac{2,023}{(8a+6)L_c + 4L_d} \right] \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) \quad (4.76)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\pi}{6[(4a+3)L_c + 2L_d]} \text{sen}\omega t + \left[ \frac{2,023}{L_c(4a+3) + 2L_d} \right] \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) \quad (4.77)$$

Multiplicando por  $\omega$  os numeradores e os denominadores das equações (4.76) e (4.77) e fazendo:

$$A = \left\{ \frac{\pi}{12X_d} + \frac{\pi}{6[(8a+6)X_c + 4X_d]} \right\} \quad (4.78)$$

$$B = \frac{2,023}{(8a+6)X_c + 4X_d} \quad (4.79)$$

$$C = \frac{\pi}{6[(4a+3)X_c + 2X_d]} \quad (4.80)$$

Resulta:

$$\frac{di_1}{dt} = A\omega \text{sen}\omega t + B\omega \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) \quad (4.81)$$

$$\frac{di_2}{dt} = C\omega \text{sen}\omega t + 2B\omega \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) \quad (4.82)$$

$$di_1 = A\omega \text{sen}\omega t dt + B\omega \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) dt$$

integrando:

$$di_1 = \int A\omega \text{sen}\omega t dt + \int B\omega \text{sen}(\omega t - 17\pi/12) dt$$

$$i_1 = A \left[ -\cos\omega t \right]_{\alpha/\omega}^t + B \left[ -\cos(\omega t - 17\pi/12) \right]_{\alpha/\omega}^t$$

$$i_1 = A(\cos\alpha - \cos\omega t) + B[\cos(\alpha - 17\pi/12) - \cos(\omega t - 17\pi/12)] \quad (4.83)$$

Analogamente:

$$i_1 = I_p + C(\cos\alpha - \cos\omega t) + 2B[\cos(\alpha - 17\pi/12) - \cos(\omega t - 17\pi/12)] \quad (4.84)$$

Para cálculo do ângulo de comutação deve-se igualar as correntes  $i_1$  e  $i_2$ . Logo:

$$\begin{aligned}
 & A(\cos\alpha - \cos\omega t) + B[\cos(\alpha - 17\pi/12) - \cos(\omega t - 17\pi/12)] = \\
 & = I_p + C(\cos\alpha - \cos\omega t) + 2B[\cos(\alpha - 17\pi/12) - \cos(\omega t - 17\pi/12)] \\
 & (A-C)\cos\alpha - B\cos(\alpha - 17\pi/12) + (C-A)\cos\omega t + B\cos(\omega t - 17\pi/12) - I_p = f(\omega t) \quad (4.85)
 \end{aligned}$$

Ainda:

$$(A-C)\cos\alpha - B\cos(\alpha - 17\pi/12) = F \quad (4.86)$$

$$G = F - I_p \quad (4.87)$$

$$f(\omega t) = G + (C-A)\cos\omega t + B\cos(\omega t - 17\pi/12) \quad (4.88)$$

$$f'(\omega t) = (A-C)\sin\omega t - B\sin(\omega t - 17\pi/12) \quad (4.89)$$

Resolvendo por Newton Raphson:

$$\begin{aligned}
 \omega t_{(i+1)} &= \omega t_i - \frac{f(\omega t)}{f'(\omega t)} \\
 \omega t_{(i+1)} &= \omega t_i - \frac{G + (C-A)\cos\omega t + B\cos(\omega t - 17\pi/12)}{(A-C)\sin\omega t - B\sin(\omega t - 17\pi/12)} \quad (4.90)
 \end{aligned}$$

mas  $\omega t = \delta$ , logo:

$$\delta_{(i+1)} = \delta_i - \frac{(C-A)\cos\omega t + B\cos(\omega t - 17\pi/12) + G}{(A-C)\sin\omega t - B\sin(\omega t - 17\pi/12)} \quad (4.91)$$

No caso do ângulo  $\delta$  maior que  $30^\circ$ , haverá instantes em que válvulas estão comutando nas duas pontes.

O circuito da Figura 4.29 é válido apenas para ângulo  $\delta$  menor que  $30^\circ$ . Para ângulo  $\delta$  maior que  $30^\circ$  o circuito se modifica para o mostrado na Figura 4.30.

O circuito das válvulas em comutação do conversor 2 (Figura 4.30) foi substituído pelo circuito equivalente na Figura 4.31.

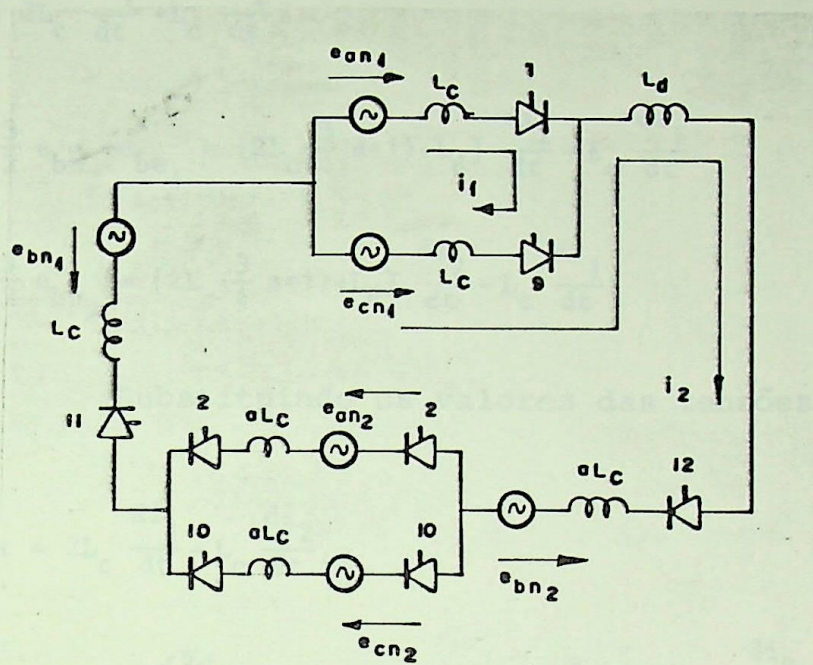


Figura 4.30 - Circuito equivalente para ângulo de comutação  $\mu$  maior que  $30^\circ$  - 12 pulsos

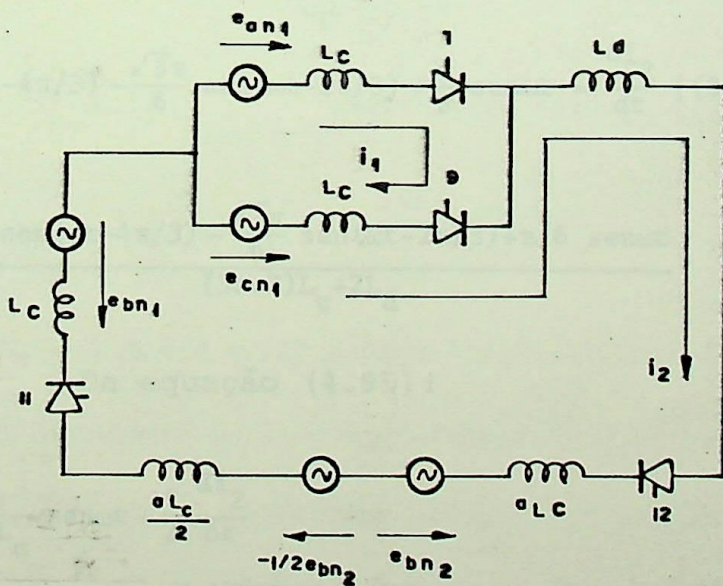


Figura 4.31 - Circuito equivalente para ângulo de comutação  $\mu$  maior que  $30^\circ$  - 12 pulsos

Equacionando-se o circuito mostrado na Figura 4.31, tem-se:

$$e_{ac_1} = 2L_c \frac{di_1}{dt} - L_c \frac{di_2}{dt} \quad (4.92)$$

$$e_{cn_1} - \frac{3}{2} e_{bn_2} - e_{bn_1} = [2L_c (\frac{3}{4} a+1) + L_d] \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (4.93)$$

$$e_{cb_1} - \frac{3}{2} e_{bn_2} = [2L_c (\frac{3}{4} a+1) + L_d] \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (4.94)$$

Substituindo os valores das tensões em (pu), resulta:

$$\frac{\pi}{6} \text{sen}\omega t = 2L_c \frac{di_1}{dt} - L_c \frac{di_2}{dt} \quad (4.95)$$

$$\frac{\pi}{6} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{\sqrt{3}\pi}{12} \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) = [2L_c (\frac{3}{4} a+1) + L_d] \frac{di_2}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (4.96)$$

Multiplicando a equação (4.96) por 2, resulta:

$$\frac{\pi}{3} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{\sqrt{3}\pi}{6} \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) = [4L_c (\frac{3}{4} a+1) + 2L_d] \frac{di_2}{dt} - 2L_c \frac{di_1}{dt} \quad (4.97)$$

Somando com a equação (4.95), vem:

$$\frac{\pi}{3} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{\sqrt{3}\pi}{6} \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) + \frac{\pi}{6} \text{sen}\omega t = \frac{di_2}{dt} [(3a+3)L_c + 2L_d] \quad (4.98)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\frac{\pi}{3} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{\sqrt{3}\pi}{6} \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) + \frac{\pi}{6} \text{sen}\omega t}{(3a+3)L_c + 2L_d} \quad (4.99)$$

Da equação (4.95):

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\pi}{12L_c} \text{sen}\omega t + \frac{1}{2} \frac{di_2}{dt} \quad (4.100)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\pi}{12L_c} \text{sen}\omega t + \left[ \frac{\frac{\pi}{3} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{\sqrt{3}\pi}{6} \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) + \frac{\pi}{6} \text{sen}\omega t}{(6a+6)L_c + 4L_d} \right] \quad (4.101)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \left\{ \frac{\pi}{12L_c} + \frac{\pi}{6[(6a+6)L_c + 4L_d]} \right\} \text{sen}\omega t + \frac{\pi}{3[(6a+6)L_c + 4L_d]} \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - \frac{\sqrt{3}\pi}{6[(6a+6)L_c + 4L_d]} \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) \quad (4.102)$$

Definindo-se:

$$A' = \left\{ \frac{\pi}{12X_c} + \frac{\pi}{6[(6a+6)X_c + 4X_d]} \right\} \quad (4.103)$$

$$B' = \frac{\pi}{3[(6a+6)X_c + 4X_d]} \quad (4.104)$$

$$C' = \frac{\sqrt{3}\pi}{6[(6a+6)X_c + 4X_d]} \quad (4.105)$$

As equações (4.99) e (4.102) podem ser escritas:

$$\frac{di_2}{dt} = 2B'\omega \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) + B'\omega \text{sen}\omega t - 2C'\omega \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) \quad (4.106)$$

$$\frac{di_1}{dt} = A'\omega \text{sen}\omega t + B'\omega \text{sen}(\omega t - 4\pi/3) - C'\omega \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) \quad (4.107)$$

$$i_2 \Big|_{I_p}^{i_2} = 2B' \left[ -\cos(\omega t - 4\pi/3) \right]_{(\alpha+\pi/6)/\omega}^t + B' \left[ -\cos\omega t \right]_{(\alpha+\pi/6)/\omega}^t - 2C' \left[ -\cos(\omega t - 2\pi/3) \right]_{(\alpha+\pi/6)/\omega}^t \quad (4.108)$$

$$i_1 \Big|_{I_{10}}^{i_1} = A' \left[ -\cos\omega t \right]_{(\alpha+\pi/6)/\omega}^t + B' \left[ -\cos(\omega t - 4\pi/3) \right]_{(\alpha+\pi/6)/\omega}^t - C' \left[ -\cos(\omega t - 2\pi/3) \right]_{(\alpha+\pi/6)/\omega}^t \quad (4.109)$$

$$i_2 - I_p = 2B' [\cos(\alpha+\pi/6-4\pi/3) - \cos(\omega t - 4\pi/3)] + B' [\cos(\alpha+\pi/6) - \cos\omega t] - 2C' [\cos(\alpha+\pi/6-2\pi/3) - \cos(\omega t - 2\pi/3)] \quad (4.110)$$

$$i_1 = A' [\cos(\alpha+\pi/6) - \cos\omega t] + B' [\cos(\alpha+\pi/6-4\pi/3) - \cos(\omega t - 4\pi/3)] - C' [\cos(\alpha+\pi/6-2\pi/3) - \cos(\omega t - 2\pi/3)] + I_{10} \quad (4.111)$$

sendo  $I_{10}$ : valor inicial da corrente  $i_1$ .

Para o cálculo do ângulo de comutação deve-se i gualar as correntes  $i_1$  e  $i_2$ . Logo:

$$\begin{aligned}
 & A' [\cos(\alpha+\pi/6) - \cos\omega t] + B' [\cos(\alpha+\pi/6-4\pi/3) - \cos(\omega t-4\pi/3)] - \\
 & - C' [\cos(\alpha+\pi/6-2\pi/3) - \cos(\omega t-2\pi/3)] + I_{10} = 2B' [\cos(\alpha+\pi/6-4\pi/3) - \\
 & - \cos(\omega t-4\pi/3)] + B' [\cos(\alpha+\pi/6) - \cos\omega t] - 2C' [\cos(\alpha+\pi/6-2\pi/3) - \\
 & - \cos(\omega t-2\pi/3)] + I_p
 \end{aligned} \tag{4.112}$$

Desenvolvendo a equação (4.112) resulta:

$$\begin{aligned}
 & (A'-B')\cos(\alpha+\pi/6) - B'\cos(\alpha+\pi/6-4\pi/3) + C'\cos(\alpha+\pi/6-2\pi/3) - I_p + I_{10} = \\
 & = (A'-B')\cos\omega t - B'\cos(\omega t-4\pi/3) + C'\cos(\omega t-2\pi/3)
 \end{aligned} \tag{4.113}$$

chamando:

$$F' = (A'-B')\cos(\alpha+\pi/6) - B'\cos(\alpha+\pi/6-4\pi/3) + C'\cos(\alpha-2\pi/3+\pi/6) + I_{10} \tag{4.114}$$

$$G' = F' - I_p \tag{4.115}$$

$$f(\omega t) = (A'-B')\cos\omega t - B'\cos(\omega t-4\pi/3) + C'\cos(\omega t-2\pi/3) - G' \tag{4.116}$$

Derivando (4.116):

$$f'(\omega t) = (B'-A')\text{sen}\omega t + B'\text{sen}(\omega t-4\pi/3) - C'\text{sen}(\omega t-2\pi/3) \tag{4.117}$$

Aplicando o método de Newton Raphson:

$$(\omega t)_{i+1} = (\omega t)_i - \frac{f(\omega t)}{f'(\omega t)} \tag{4.118}$$

mas  $\omega t = \delta$ , logo:

$$\delta_{i+1} = \delta_i - \frac{f(\omega t)}{f'(\omega t)} \tag{4.119}$$

No caso da ocorrência de um curto circuito na ponte conversora, o ângulo de comutação cresce, podendo atingir valores superiores a  $30^\circ$ . No Apêndice III é apresentado o equacio

namento e forma de onda da tensão de saída do conversor quando este fato ocorre.

A Figura 4.32 ilustra a tensão de saída do conversor para  $\alpha=30^\circ$  e  $\mu=15^\circ$ . As contribuições de áreas serão calculadas a seguir.

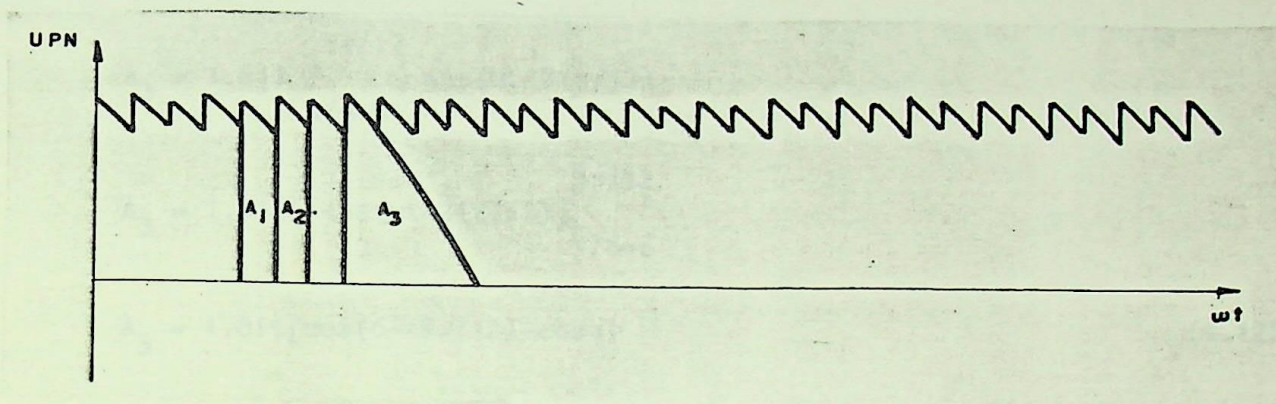


Figura 4.32 - Áreas de contribuição de curto circuito - 12 pulsos

-  $A_1$  (área compreendida sob a curva de comutação)

$$A_1 = \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\delta} 3,232E_m \text{sen}(\omega t - 20\pi/12) d\omega t$$

$$U_{\text{base}} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \frac{E_m}{\sqrt{2}} \sqrt{3} = \frac{6\sqrt{3}}{\pi} E_m \quad (\text{tensão de saída da ponte para o ângulo de disparo zero graus})$$

Em pu:

$$A_1 = \frac{3,232\pi}{6\sqrt{3}} [-\cos(\omega t - 20\pi/12)]_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\delta}$$

$$A_1 = 0,98 [\cos(\alpha - 18\pi/12) - \cos(\delta - 18\pi/12)] \quad (4.120)$$

-  $A_2$  (área sob as curvas de tensões fase-fase)

$$A_2 = \int_{\pi/6+\delta}^{2\pi/6+\alpha} 3,346E_m \text{sen}(\omega t - 21\pi/12) d\omega t$$

Em pu:

$$A_2 = 1.011[-\cos(\omega t - 21\pi/12)]^{\pi/3+\alpha}_{\pi/6+\delta}$$

$$A_2 = 1.011[\cos(\delta - 19\pi/12) - \cos(\alpha - 17\pi/12)] \quad (4.121)$$

-  $A_3$  (área compreendida sob as curvas de tensões fase-fase)

Em pu:

$$A_3 = 1.011 \int_{\pi/6+\delta}^{9\pi/12} \text{sen}(\omega t - 21\pi/12)$$

$$A_3 = 1.011[-\cos(\omega t - 21\pi/12)]^{\pi/6+\delta}_{9\pi/12}$$

$$A_3 = 1.011[\cos(\delta - 19\pi/12) - \cos\pi] \quad (4.122)$$

A Figura 4.33 ilustra a forma de onda da tensão de saída para  $\alpha=30^\circ$ ,  $\mu=45^\circ$ .

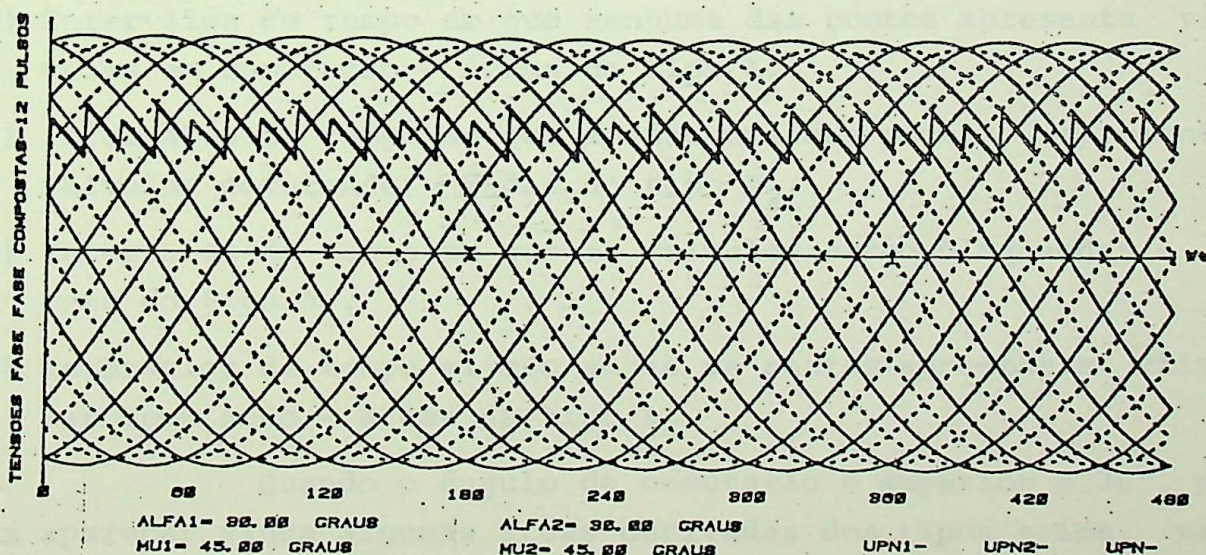


Figura 4.33 - Forma de onda de tensão de saída da ponte conversora  $\alpha=30^\circ$ ;  $\mu=45^\circ$

Quando o ângulo de comutação MU for maior que  $30^\circ$  haverá intervalos de tempo em que as duas pontes apresentam válvulas comutando.

A tensão de saída de  $0^\circ$  a  $(\text{MU}-30^\circ)$ , conforme mos

trado no Apêndice III é dada pela equação:

$$UPN = 2.898 E_m \text{ sen}(\omega t - 19\pi/12) \quad (4.123)$$

A área sob a curva desta tensão de saída e designada por  $A_4$  é dada pela equação:

$$A_4 = 2.898 E_m \int_0^{\mu - \pi/6} \text{sen}(\omega t - 19\pi/12) d\omega t \quad (4.124)$$

Um pu, dividindo pela tensão base, tem-se:

$$A_4 = \frac{2.898 E_m}{\frac{6\sqrt{3}}{\pi} E_m} [-\cos(\omega t - 19\pi/12)]_0^{\mu - \pi/6}$$

$$A_4 = 0.876 [\cos 19\pi/12 - \cos(\mu - 21\pi/12)] \quad (4.125)$$

Para a determinação dos valores de pico da corrente de curto circuito em sistemas conversores de 12 pulsos os seguintes tipos de áreas podem aparecer:

- 1º) Intervalos de tempo em que nenhuma das pontes apresenta válvulas em comutação - áreas do tipo  $A_1$ .
- 2º) Intervalos de tempo em que apenas uma das pontes apresenta válvulas comutando - áreas do tipo  $A_2$ .
- 3º) Intervalos de tempo em que as válvulas estão bloqueadas - áreas do tipo  $A_3$ .
- 4º) Intervalos de tempo em que ambas as pontes apresentam válvulas comutando - áreas do tipo  $A_4$ .

Quando o ângulo de comutação é superior a  $30^\circ$ , podem aparecer ainda algumas áreas derivadas dos tipos acima, mas com intervalos de duração diferentes.

$A_5$  - Área do tipo  $A_1$  (área compreendida sob a curva de comutação) com intervalo de duração igual a  $30^\circ$ .

$$A_5 = (0.98/XD) [\cos(\pi/6 + \alpha - 20\pi/12) - \cos(2\pi/6 + \alpha - 20\pi/12)] \quad (4.126)$$

$A_6$  - Área do tipo  $A_1$  com intervalo de duração igual a  $(2\pi/6 - \mu)$ .

$$A_6 = (0.98/XD)[\cos(-20/12+) - \cos(2/6+ -20/12)] \quad (4.127)$$

$A_7$  - Área do tipo  $A_1$  com intervalo de duração  $(\mu_{i+1} - \mu_i + 30^\circ)$

$$A_7 = (0.98/XD)[\cos(\alpha - 20\pi/12 + \mu_i) - \cos(\pi/6 + \mu_{i+1} - 20\pi/12)]$$

O valor de  $a$  será considerado igual a 1, uma vez que as correntes nas válvulas devem ser aproximadamente iguais, no sistema real.

A Figura 4.34 ilustra o fluxograma da subrotina ANGC0M 1 utilizada quando o ângulo de comutação é menor ou igual a  $30^\circ$ .

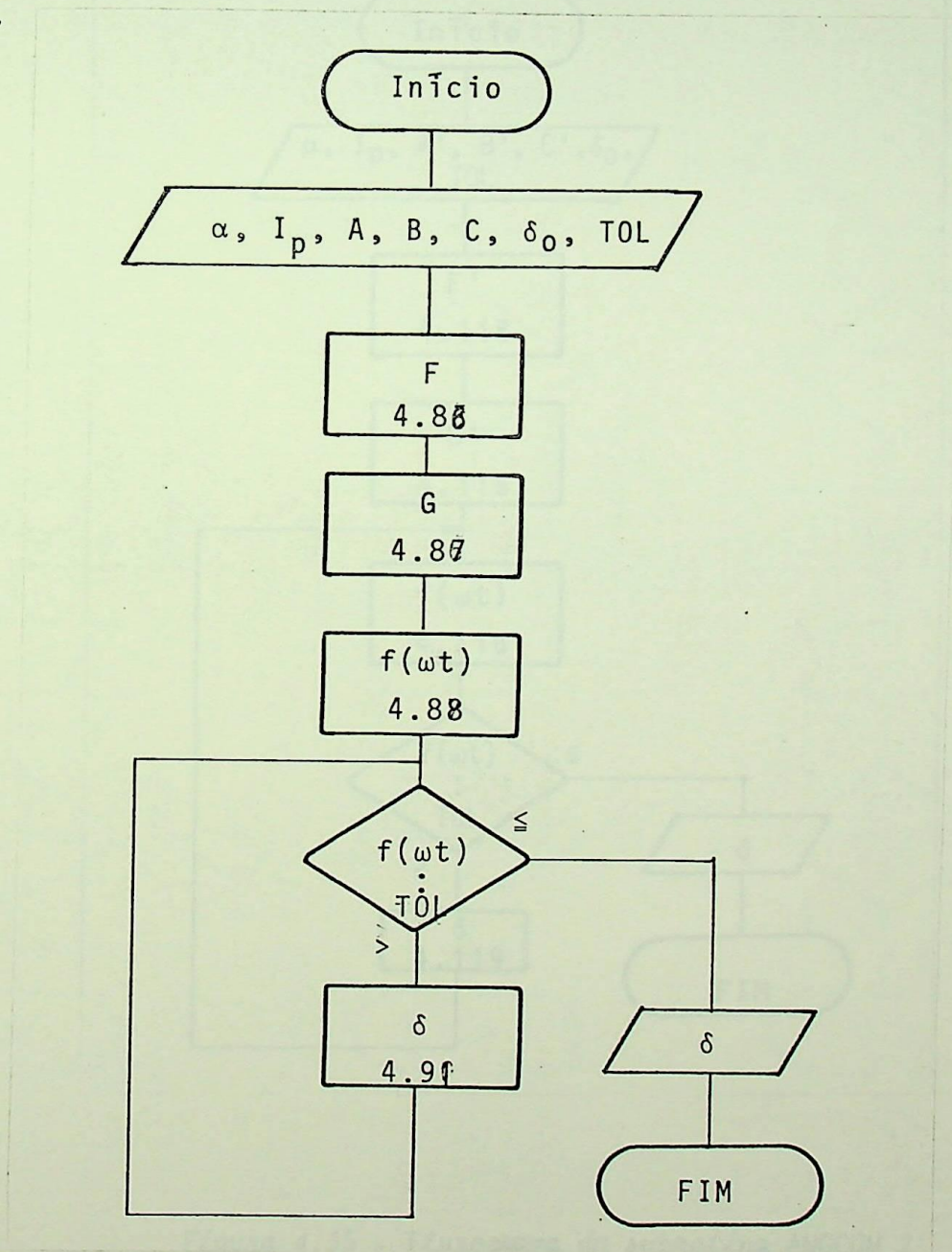


Figura 4.34 - Fluxograma da subrotina ANGC0M 1

A Figura 4.35 ilustra o fluxograma da subrotina ANGC0M 2, utilizada quando o ângulo de comutação é maior que  $30^\circ$ .

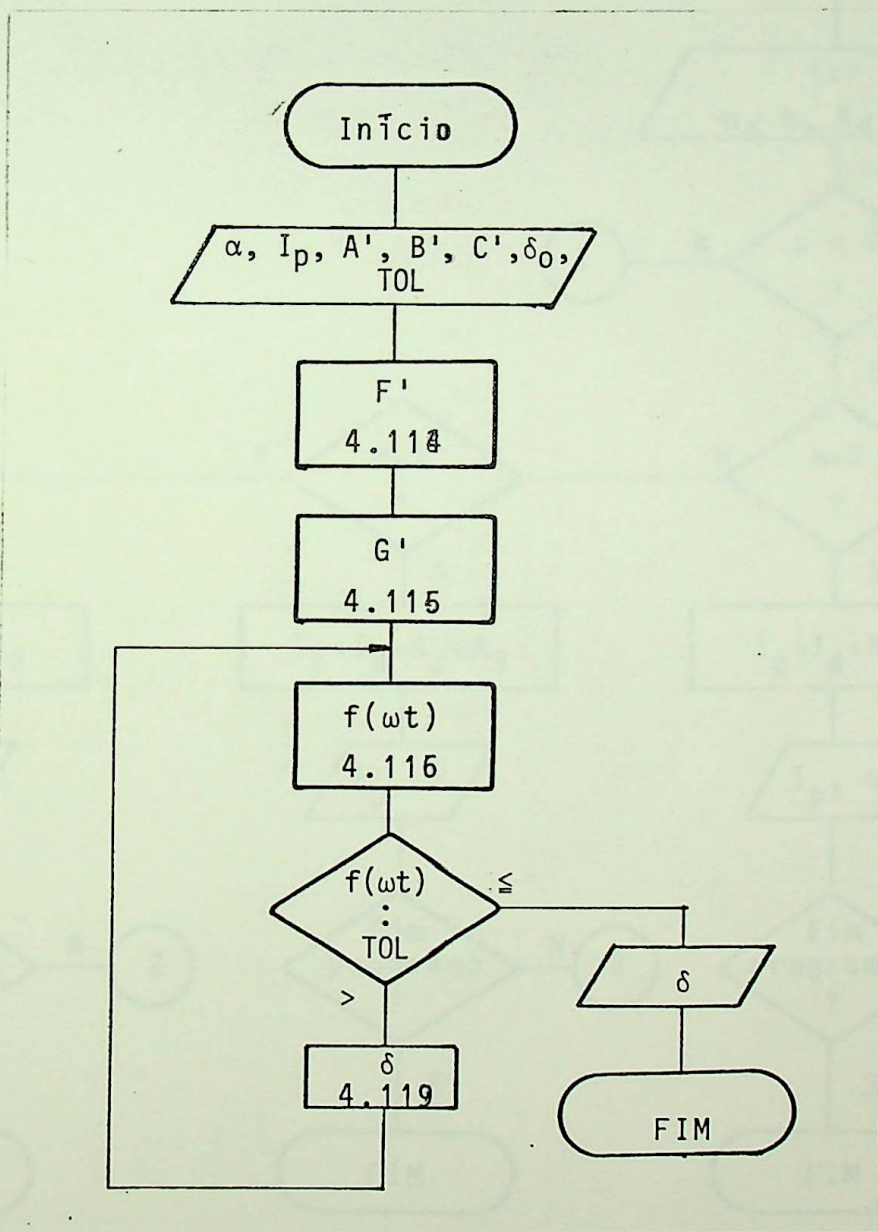
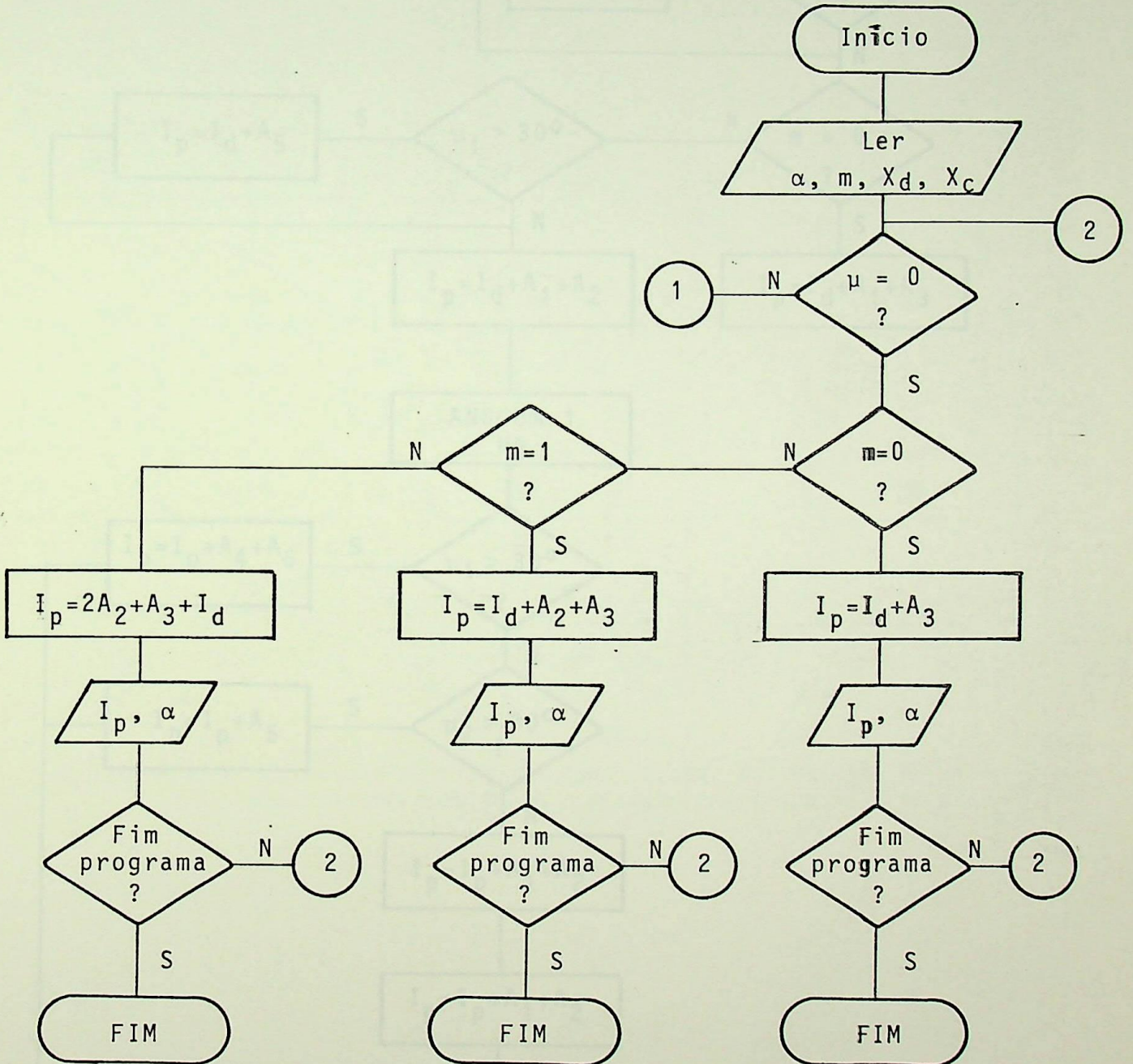
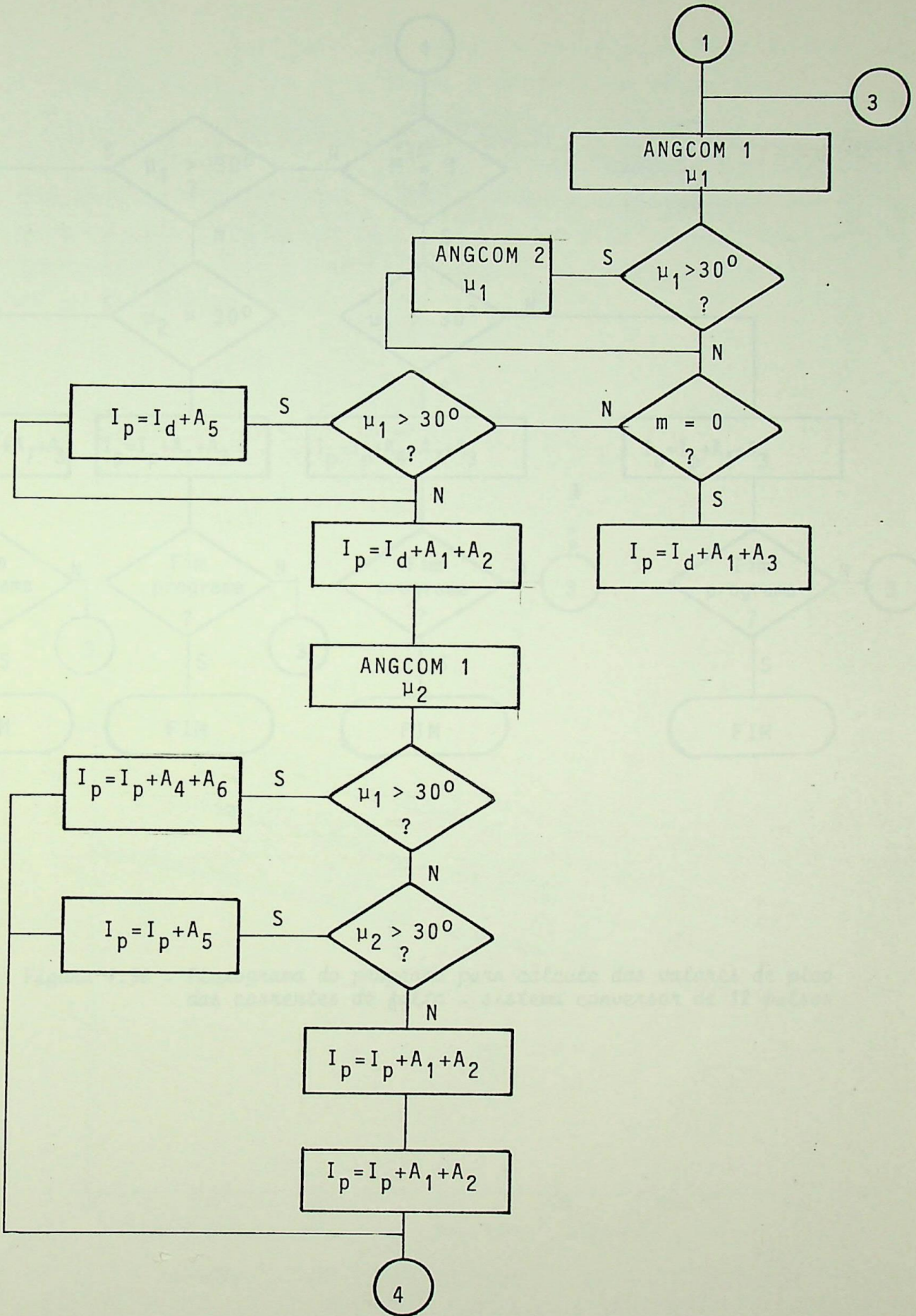


Figura 4.35 - Fluxograma da subrotina ANGC0M 2

A Figura 4.36 ilustra o fluxograma do programa utilizado para cálculo dos valores de pico das correntes de falta em sistemas conversores de 12 pulsos.





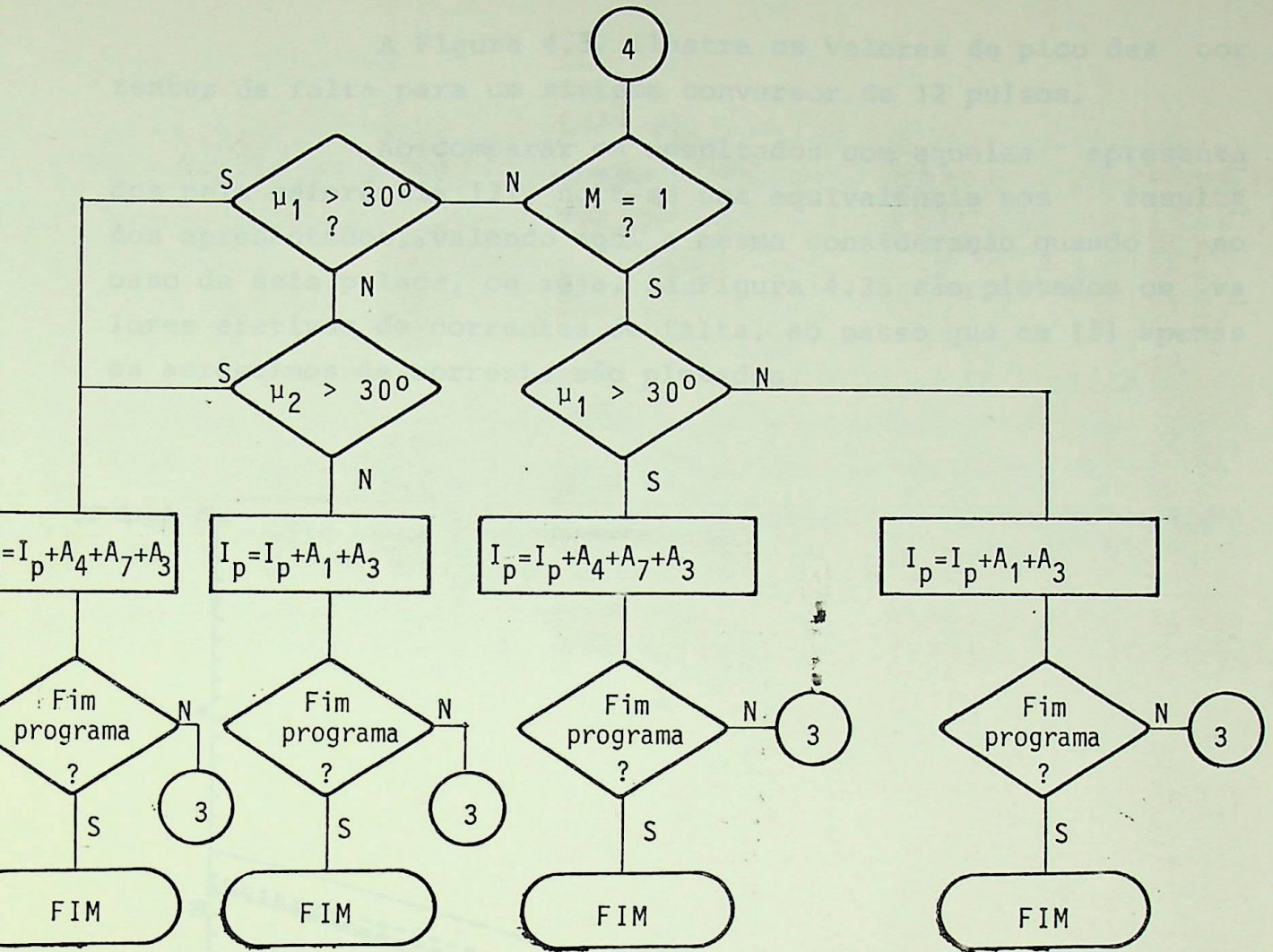


Figura 4.36 - Fluxograma do programa para cálculo dos valores de pico das correntes de falta - sistema conversor de 12 pulsos

A Figura 4.37 ilustra os valores de pico das correntes de falta para um sistema conversor de 12 pulsos.

Ao comparar os resultados com aqueles apresentados pela referência [3], nota-se uma equivalência nos resultados apresentados, valendo aqui a mesma consideração quando no caso de seis pulsos, ou seja, na Figura 4.35 são plotados os valores efetivos de correntes de falta, ao passo que em [3] apenas os acréscimos de corrente são plotados.

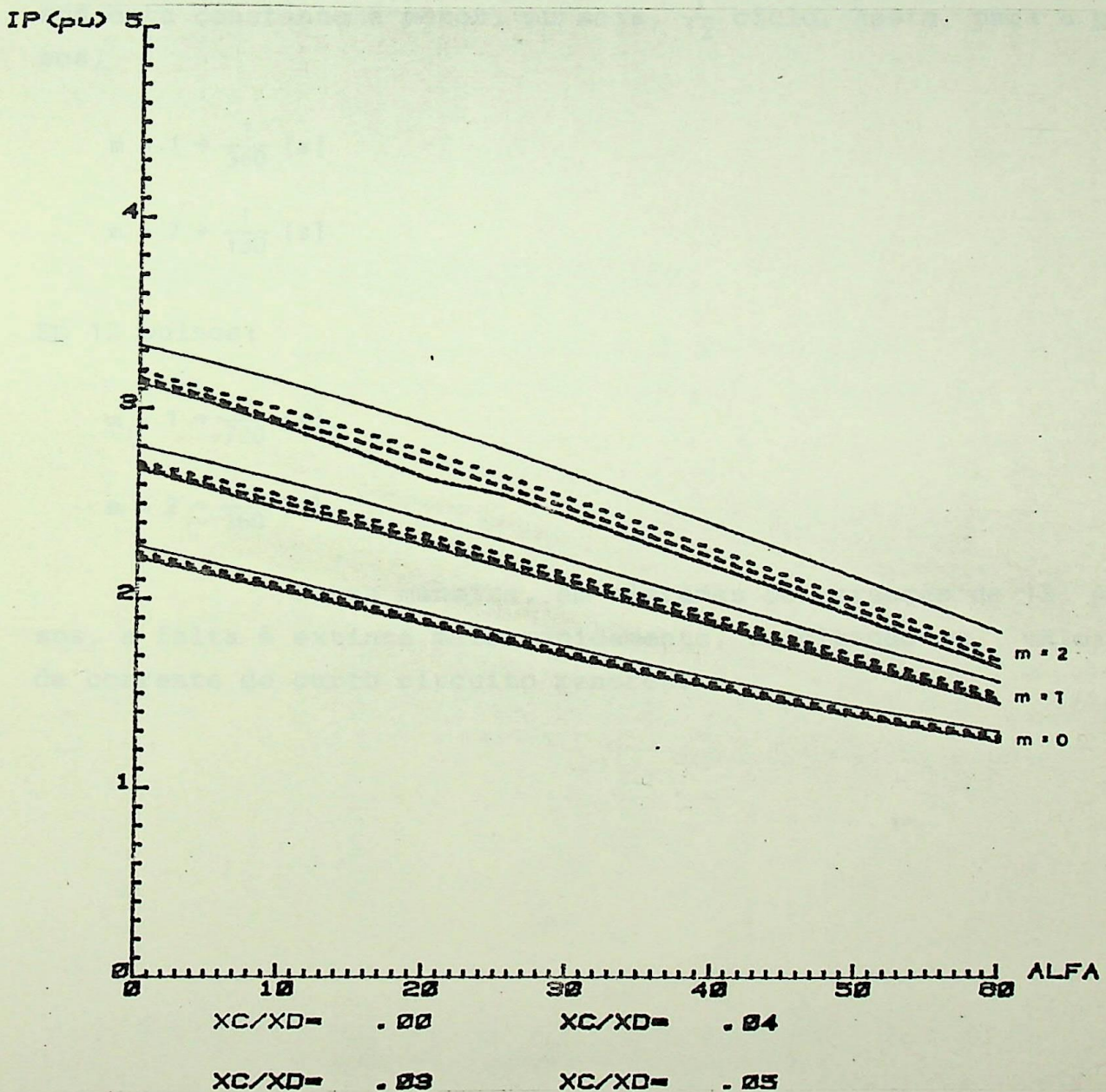


Figura 4.37 - Correntes de falta - sistema conversor de 12 pulsos

#### 4.5 - CONCLUSÕES

Pode-se perceber que ficou bastante facilitado o cálculo das correntes de falta (valores de pico) pelo emprego do método das áreas.

Em valores (pu) as correntes de falta em sistemas de 12 pulsos foram menores que aquela no de 6 pulsos. Isto deve-se ao menor tempo de permanência da falta na ponte conversora de 12 pulsos. Em outras palavras, para uma constante de tempo de  $\frac{1}{6}$  ciclo no sistema de seis pulsos, no sistema conversor de 12 pulsos esta constante é menor, ou seja,  $\frac{1}{12}$  ciclo. Assim, para 6 pulsos,

$$m = 1 \rightarrow \frac{1}{360} \text{ [s]}$$

$$m = 2 \rightarrow \frac{1}{180} \text{ [s]}$$

Em 12 pulsos:

$$m = 1 \rightarrow \frac{1}{720} \text{ [s]}$$

$$m = 2 \rightarrow \frac{1}{360} \text{ [s]}$$

Desta maneira, em sistemas conversores de 12 pulsos, a falta é extinta mais rapidamente, resultando em valores de corrente de curto circuito menores.

## CAPÍTULO V

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MÁQUINA  
DE CORRENTE CONTÍNUA

5.1 - INTRODUÇÃO

A máquina de corrente contínua possibilita um controle de velocidade de maneira eficiente dentro de uma grande faixa. A introdução dos reguladores de velocidade e corrente permitem respectivamente um ajuste de velocidade adequado e proteção do motor.

5.2 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO MOTOR

A Figura 5.1 ilustra a representação esquemática de um motor de corrente contínua excitação independente.

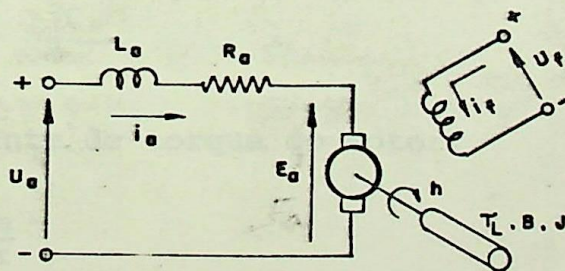


Figura 5.1 - Representação esquemática de um motor de corrente contínua - excitação independente

onde:

$L_a$  → indutância do circuito da armadura

$R_a$  → resistência do circuito da armadura

- $U_a$  → tensão contínua aplicada ao circuito da armadura  
 $E_a$  → força contra eletromotriz  
 $i_a$  → corrente no circuito da armadura  
 $U_f$  → tensão contínua aplicada ao circuito de campo  
 $i_f$  → corrente de campo ou de excitação  
 $J$  → momento de inércia total  
 $B$  → coeficiente de atrito do motor  
 $T_L$  → conjugado de carga  
 $n$  → rotação em [rad/s]

O conjugado de atrito é suposto proporcional à velocidade. Assim:

$$T_{e_o} = B \cdot n \quad (5.1)$$

Sendo:  $T_{e_o}$  - conjugado de atrito.

O conjugado de carga será também suposto proporcional à velocidade. Assim:

$$T_L = B' \cdot n \quad (5.2)$$

sendo  $B'$  - constante de torque da carga.

Equacionando o circuito da armadura tem-se:

$$U_a = E_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (5.3)$$

$$E_a = K_m \cdot n \quad (5.4)$$

sendo  $K_m$  - constante de torque do motor.

$$T_e = B'n + Bn + J \frac{dn}{dt} \quad (5.5)$$

onde:  $T_e$  - conjugado motor

$$T_e = K_m i_a \quad (5.6)$$

Escrevendo as equações (5.3), (5.4), (5.5) e (5.6) em transformada de Laplace:

$$U_a(s) = E_a(s) + R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) \quad (5.7)$$

$$E_a(s) = K_m \cdot N(s) \quad (5.8)$$

$$T_e(s) = B' N(s) + B N(s) + J s N(s) \quad (5.9)$$

$$T_e(s) = K_m \cdot I_a(s) \quad (5.10)$$

De (5.7) pode-se escrever:

$$I_a(s) = \frac{U_a(s) - E_a(s)}{R_a + sL_a} \quad (5.11)$$

Definindo-se a constante de tempo do circuito da armadura  $\tau_a$ , pode-se escrever:

$$\tau_a = L_a / R_a \quad (5.12)$$

$$I_a(s) = \frac{[U_a(s) - E_a(s)] 1/R_a}{1 + s\tau_a} \quad (5.13)$$

$$N(s) = \frac{(T_e(s) - T_L) 1/B}{1 + s\tau_m} \quad (5.14)$$

onde

$$\tau_m = J/B \quad (5.15)$$

$\tau_m$  → constante de tempo do motor

A Figura 5.2 ilustra o diagrama de blocos.

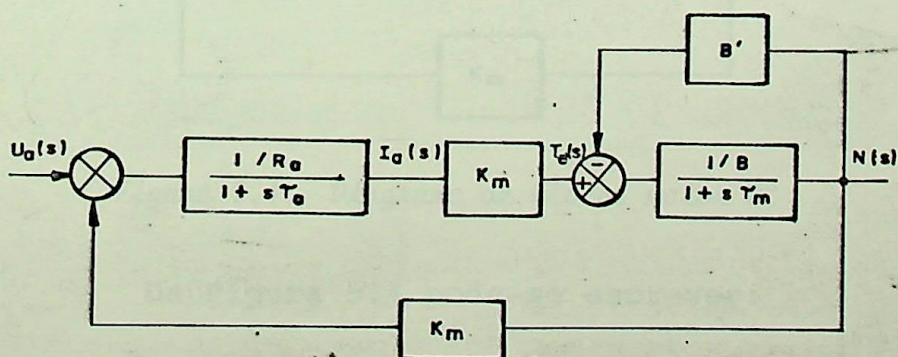


Figura 5.2 - Diagrama de blocos motor de corrente contínua

Aplicando a álgebra do diagrama de blocos tem-se:

$$\frac{N(s)}{T_e(s)} = \frac{\frac{1/B}{1+s\tau_m}}{1 + \frac{1/B}{1+s\tau_m} B'} = \frac{1/B}{1+s\tau_m + B'/B} = \frac{1/B}{1+B'/B+s\tau_m} \quad (5.16)$$

O diagrama de blocos resultante é apresentado na Figura 5.3.

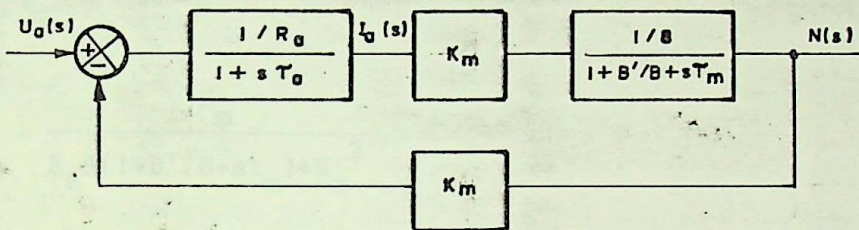


Figura 5.3 - Diagrama de blocos motor CC

A Figura 5.4 ilustra o diagrama de blocos da Figura 5.3, onde os três blocos superiores foram agrupados em apenas um bloco.

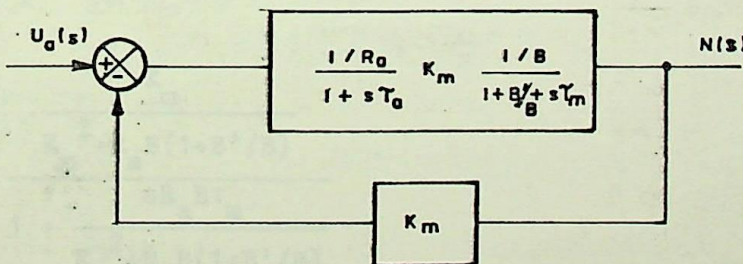


Figura 5.4 - Diagrama de blocos motor CC

Da Figura 5.4 pode-se escrever:

$$\frac{N(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{K_m}{R_a(1+s\tau_a)B(1+B'/B+s\tau_m)}}{1 + \frac{K_m^2}{R_a(1+s\tau_a)B(1+B'/B+s\tau_m)}}$$

$$\frac{N(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{R_a B(1+s\tau_a)(1+B'/B+s\tau_m) + K_m^2} \quad (5.17)$$

Como a constante de tempo da armadura  $\tau_a$  é muito menor que  $\tau_m$  pode-se escrever:

$$\tau_a \ll \tau_m$$

$$\frac{N(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{R_a B(1+B'/B+s\tau_m) + K_m^2} \quad (5.18)$$

$$\frac{N(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{R_a B(1+B'/B) + sR_a B\tau_m + K_m^2} \quad (5.19)$$

Seja:

$$\tau_{m1} = \frac{R_a B}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B)} \tau_m \quad (5.20)$$

$$K_r = \frac{K_m}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B)} \quad (5.21)$$

$$\frac{K_r}{1+s\tau_{m1}} = \frac{\frac{K_m}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B)}}{1 + \frac{sR_a B\tau_m}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B)}} \quad (5.22)$$

$$\frac{K_r}{1+s\tau_{m1}} = \frac{K_m}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B) + sR_a B\tau_m} \quad (5.23)$$

Comparando-se as equações (5.19) e (5.23) pode-se concluir:

$$\frac{N(s)}{U_a(s)} = \frac{K_r}{1+s\tau_{m1}} \quad (5.24)$$

Da Figura 5.3:

$$\frac{N(s)}{I_a(s)} = \frac{K_m/B}{1+B'/B+s\tau_m} \quad (5.25)$$

Logo:

$$\frac{I_a(s)}{U_a(s)} = \frac{N(s)}{U_a(s)} \frac{I_a(s)}{N(s)}$$

$$\frac{I_a(s)}{U_a(s)} = \frac{K_r}{K_m/B} \frac{(1+B'/B+s\tau_m)}{(1+s\tau_{m1})} \quad (5.26)$$

O diagrama de blocos da Figura 5.2 pode então ser representado conforme indicado na Figura 5.5.

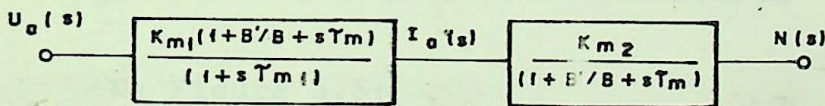


Figura 5.5 - Diagrama de blocos simplificado motor CC

Na Figura 5.5:

$$K_{m1} = \frac{K_r}{K_m/B}$$

$$K_{m1} = \frac{\frac{K_m}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B)}}{K_m/B}$$

$$K_{m1} = \frac{B}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B)} \quad (5.27)$$

$$K_{m2} = \frac{K_m}{B} \quad (5.28)$$

$$K_r = K_{m_1} K_{m_2} \quad (5.29)$$

### 5.3 - MALHA DE CONTROLE DE VELOCIDADE

A Figura 5.6 ilustra o diagrama de blocos com a inclusão do transdutor de velocidade e do regulador de velocidade, considerado neste caso como sendo do tipo proporcional.

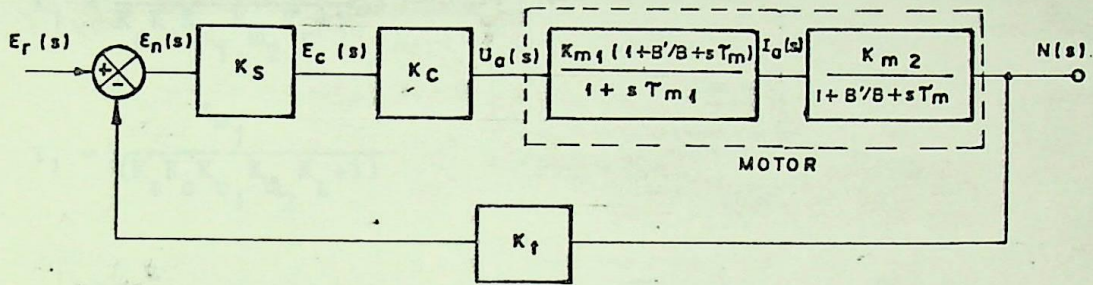


Figura 5.6 - Malha de controle de velocidade

Na Figura 5.6:

$K_s$ : ganho do regulador de velocidade

$K_c$ : ganho tensão de controle - tensão de saída da ponte conversora

$K_t$ : ganho do transdutor de velocidade

A constante de tempo do sistema conversor foi desprezada.

A função de transferência fica então:

$$\frac{N(s)}{E_r(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

onde:

$$G(s) = \frac{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2}}{1 + s\tau_{m_1}}$$

$$H(s) = K_t$$

$$\frac{N(s)}{E_r(s)} = \frac{\frac{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2}}{1+s\tau_{m_1}}}{1 + \frac{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2}}{1+s\tau_{m_1}} K_t}$$

$$\frac{N(s)}{E_r(s)} = \frac{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2}}{1+s\tau_{m_1} + K_s K_c K_{m_1} K_{m_2} K_t} \quad (5.30)$$

Chamando

$$K_1 = \frac{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2}}{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2} K_t + 1} \quad (5.31)$$

$$\tau_1 = \frac{\tau_{m_1}}{(K_s K_c K_{m_1} K_{m_2} K_t + 1)} \quad (5.32)$$

Tem-se:

$$\frac{K_1}{1+s\tau_1} = \frac{\frac{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2}}{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2} K_t + 1}}{1+s \frac{\tau_{m_1}}{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2} K_t + 1}}$$

$$\frac{K_1}{1+s\tau_1} = \frac{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2}}{K_s K_c K_{m_1} K_{m_2} K_t + 1+s\tau_{m_1}} \quad (5.33)$$

Comparando (5.30) e (5.33) pode-se escrever:

$$\frac{N(s)}{E_r(s)} = \frac{K_1}{1+s\tau_1} \quad (5.34)$$

Se:  $K_s K_c K_{m_1} K_{m_2} K_t \gg 1$

$$K_1 \approx \frac{1}{K_t} \quad (5.35)$$

A inclusão apenas do regulador de velocidade não

é conveniente pois a corrente pode atingir valores inadmissíveis. Para limitar a corrente num valor máximo pré-determinado, um regulador de corrente é acrescentado.

#### 5.4 - MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE

A Figura 5.7 ilustra o diagrama de blocos com a indução da malha de corrente. O transdutor de corrente possui ganho  $K_u$  e o regulador de corrente considerado do tipo proporcional possui ganho  $K_I$ .

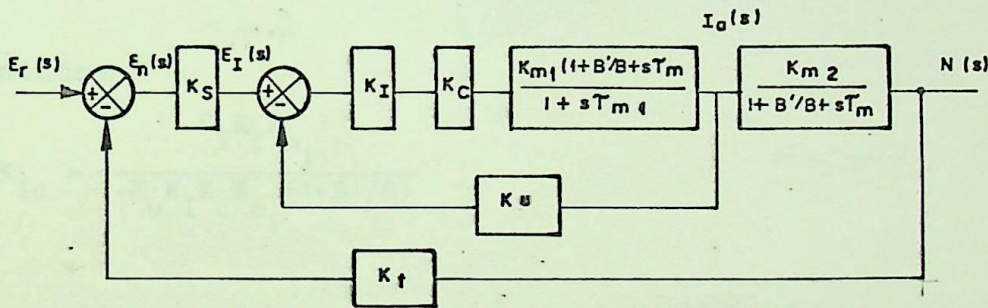


Figura 5.7 - Inclusão do regulador de corrente

A malha de corrente é apresentada na Figura 5.8.

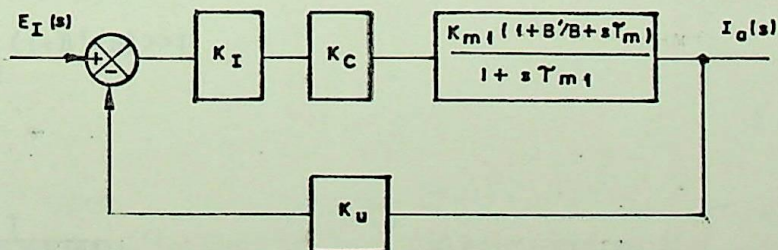


Figura 5.8 - Malha de controle de corrente

A função de transferência é dada por:

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} = \frac{K_I K_c K_{m_1} \frac{(1+B'/B+s\tau_m)}{1+s\tau_{m_1}}}{1+K_u K_I K_c K_{m_1} \frac{(1+B'/B+s\tau_m)}{1+s\tau_{m_1}}} \quad (5.36)$$

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} = \frac{K_I K_c K_{m_1} (1+B'/B+s\tau_m)}{1+s\tau_{m_1} + K_u K_I K_c K_{m_1} (1+B'/B+s\tau_m)}$$

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} = \frac{K_I K_c K_{m_1}}{1+K_u K_I K_c K_{m_1} (1+B'/B)} \frac{(1+B'/B+s\tau_m)}{(\tau_m K_u K_I K_c K_{m_1} + \tau_{m_1})s} \left[ 1 + \frac{(\tau_m K_u K_I K_c K_{m_1} + \tau_{m_1})s}{(1+K_u K_I K_c K_{m_1} (1+B'/B))} \right] \quad (5.37)$$

Definindo:

$$K_{IC} = \frac{K_I K_c K_{m_1}}{1+K_u K_I K_c K_{m_1} (1+B'/B)} \quad (5.38)$$

$$\tau_{m_2} = \frac{\tau_m K_u K_I K_c K_{m_1} + \tau_{m_1}}{1+K_u K_I K_c K_{m_1} (1+B'/B)} \quad (5.39)$$

Resulta:

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} = K_{IC} \frac{(1+B'/B+s\tau_m)}{1+s\tau_{m_2}} \quad (5.40)$$

Mas:  $K_u K_I K_c K_{m_1} (1+B'/B) \gg 1$

Logo:

$$K_{IC} \approx \frac{1}{K_u (1+B'/B)} \quad (5.41)$$

$$\tau_{m_2} \approx \frac{\tau_m}{(1+B'/B)} + \frac{\tau_{m_1}}{K_u K_I K_C K_{m_1} (1+B'/B)} \quad (5.42)$$

Também:  $\tau_m \gg \tau_{m_1}$

Logo:

$$\tau_{m_2} \approx \frac{\tau_m}{(1+B'/B)} \quad (5.43)$$

Logo:

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} \approx K_{IC} \frac{(1+B'/B + s\tau_m)}{(1+s\tau_m \frac{1}{1+B'/B})}$$

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} \approx K_{IC} \frac{(1+B'/B + s\tau_m)}{(1+B'/B + s\tau_m)} (1+B'/B)$$

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} \approx K_{IC} (1+B'/B)$$

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} \approx \frac{1}{K_u} \quad (5.44)$$

Seja:

$$K_{II_C} = \frac{1}{K_u} \quad (5.45)$$

Logo:

$$\frac{I_a(s)}{E_I(s)} = K_{II_C} \quad (5.46)$$

Como a corrente  $I_a$  é diretamente relacionada com a tensão  $E_I$ , uma limitação de  $E_I$  provocará efetivamente uma limitação da corrente.

A limitação de  $E_I$  é conseguida devido à tensão de

saturação na saída dos amplificadores operacionais. Definindo:

$$K_{m_3} = \frac{K_{m_2}}{1+B'/B} \quad (5.47)$$

$$\tau_{m_3} = \frac{\tau_m}{1+B'/B} \quad (5.48)$$

O diagrama de blocos resultante é representado na Figura 5.9.

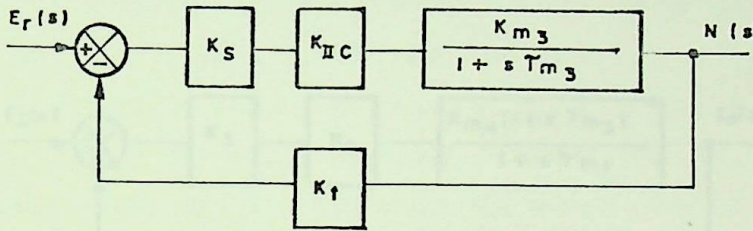


Figura 5.9 - Diagrama de blocos controle de velocidade motor CC

A função de transferência é dada por:

$$\frac{N(s)}{E_r(s)} = \frac{K_s K_{IIc} K_{m_3} \left( \frac{1}{1+s\tau_{m_3}} \right)}{K_t K_s K_{m_3} K_{IIc} + 1 + \frac{1}{(1+s\tau_{m_3})}} \quad (5.49)$$

$$\frac{N(s)}{E_r(s)} = \frac{K_s K_{m_3} K_{IIc}}{(1+K_t K_s K_{m_3} K_{IIc})} \frac{1}{s\tau_{m_3} + 1 + \frac{1}{1+K_t K_s K_{m_3} K_{IIc}}} \quad (5.50)$$

Seja:

$$K_2 = \frac{K_s K_{m_3} K_{IIc}}{1+K_t K_s K_{m_3} K_{IIc}} \quad (5.51)$$

$$\tau_2 = \frac{\tau_{m3}}{1 + K_t K_s K_{m3} K_{IIc}} \quad (5.52)$$

$$\frac{\dot{N}(s)}{E_r(s)} = \frac{K_2}{1 + s\tau_2} \quad (5.53)$$

### 5.5 - PROJETO DOS PARÂMETROS $K_{IIc}$ , $K_s$ , $E_I$

Seja a malha de controle de corrente mostrada na Figura 5.10.

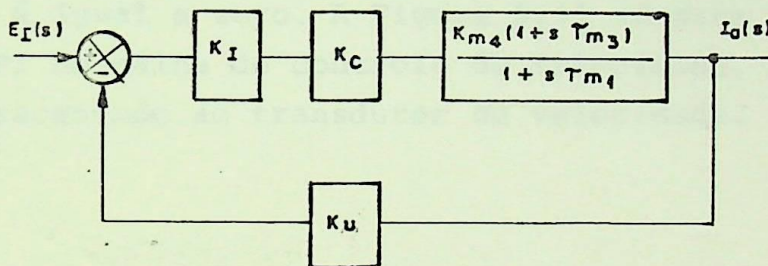


Figura 5.10 - Malha de controle de corrente

Na Figura 5.10:

$$K_{m4} = K_{m1} (1 + B'/B) \quad (5.54)$$

O erro em regime permanente é definido por:

$$\epsilon(\infty) = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \Big|_{s=0} \quad (5.55)$$

$$G(s) \Big|_{s=0} = K_I K_C K_{m4}$$

$$H(s) \Big|_{s=0} = K_u$$

Logo:

$$\varepsilon(\infty) = \frac{1}{1 + K_I K_C K_{m4} K_u}$$

$$\varepsilon(\infty) (1 + K_I K_C K_{m4} K_u) = 1$$

$$K_I = \frac{1/\varepsilon(\infty) - 1}{K_u K_{m4} K_C} \quad (5.56)$$

### 5.6 - MALHA DE CONTROLE DE VELOCIDADE

O regulador de velocidade será considerado do tipo proporcional integral (PI). Desta maneira o erro em regime permanente é igual a zero. A Figura 5.11 ilustra a inserção do regulador PI na malha de controle de velocidade. Um filtro foi também acrescentado ao transdutor de velocidade.

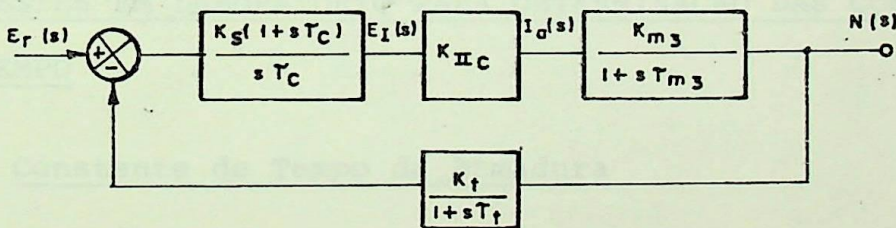


Figura 5.11 - Malha de controle de velocidade com acréscimo do filtro

Para a análise da malha tem-se:

$$KGH(s) = K_s K_{\Pi C} \frac{K_{m3}}{1+sT_{m3}} K_t \frac{(1+sT_c)}{sT_c(1+sT_t)}$$

Pode-se escrever:

$$KGH(s) = \frac{K_s (1+s\tau_c)}{s\tau_c} \frac{K_{IIc} K_{m3} K_t}{\tau_{m3}} \frac{1}{s(1+s\tau_t)} \quad (5.57)$$

$$KGH(s) = K_s \frac{1+s\tau_c}{s\tau_c} \frac{1}{\frac{s\tau_{m3}}{K_3} (1+s\tau_t)} \quad (5.58)$$

sendo:  $K_3 = K_{IIc} K_{m3} K_t$

Aplicando o método da otimização simétrica os parâmetros  $K_s$  e  $\tau_c$  podem ser obtidos conforme [4].

$$\tau_c = (\sqrt{2} + 1)^2 \tau_t \quad (5.59)$$

$$K_s = \left( \frac{1}{\sqrt{2} + 1} \right) \frac{\tau_{m3}}{K_3 \tau_t} \quad (5.60)$$

## 5.7 - TESTES EM LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DE TEMPO

### 5.7.1 - Constante de Tempo da Armadura

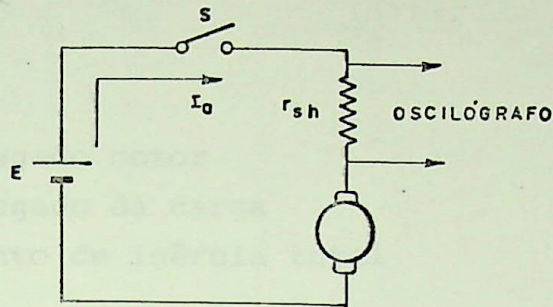
Conforme definida anteriormente é dada por:

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a}$$

sendo  $L_a$  → indutância do circuito da armadura;

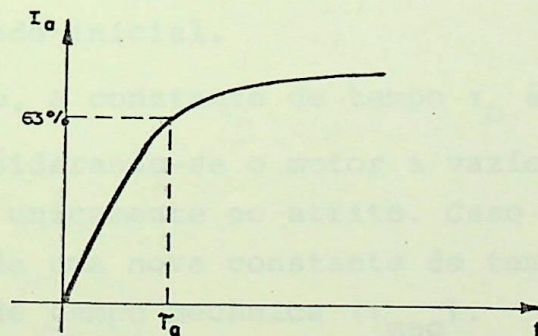
$R_a$  → resistência do circuito da armadura.

A Figura 5.12 ilustra a aplicação de um degrau de tensão ao circuito da armadura.



*Figura 5.12 - Aplicação de degrau de tensão ao circuito da armadura*

Por intermédio de um osciloscópio de memória ou oscilôgrafo, pode-se obter a corrente, conforme ilustrado na Figura 5.13.



*Figura 5.13 - Resposta ao degrau de tensão aplicado ao circuito da armadura*

A resistência do shunt inserida deve ser bem menor que a da armadura.

Para a determinação da constante de tempo determina-se o tempo correspondente a 63% do valor final da corrente, obtendo-se desta maneira a constante de tempo da armadura  $\tau_a$ .

### 5.7.2 - Constante de Tempo do Motor

Esta constante de tempo descreve a taxa de decrês

cimo de velocidade do motor quando a alimentação do mesmo é cortada.

Equacionando, tem-se:

$$T_e - T_L = J \frac{dn}{dt} \quad (5.61)$$

sendo:  $T_e$  → conjugado motor  
 $T_L$  → conjugado da carga  
 $J$  → momento de inércia total

Logo:

$$0 - Bn = J \frac{dn}{dt}$$

$$J \frac{dn}{dt} + Bn = 0$$

$$n = n_0 e^{-(B/J)t} \quad (5.62)$$

$$n = n_0 e^{-t/\tau_m} \quad (5.63)$$

sendo  $n_0$  → velocidade inicial.

Logo, a constante de tempo  $\tau_m$  é igual a  $J/B$ .

Considerando-se o motor a vazio, tem-se o conjugado de carga devido unicamente ao atrito. Caso o motor esteja com carga, será definida uma nova constante de tempo, que será chamada de constante de tempo mecânica ( $\tau_{mec}$ ).

$$\tau_{mec} = \frac{J}{(B+B')} \quad (5.64)$$

sendo  $B'$  → constante de torque da carga.

A Figura 5.14 ilustra a taxa de decréscimo da velocidade quando a alimentação da armadura é subitamente cortada.

A constante de tempo  $\tau_m$  pode ser determinada marcando-se no eixo das ordenadas 37% do valor inicial da velocidade de  $n_0$  e obtendo-se o tempo correspondente no eixo das abscissas.

O momento de inércia pode ser obtido a partir desta constante.

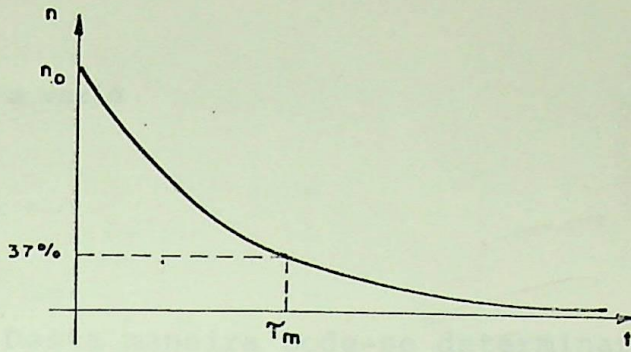


Figura 5.14 - Taxa de decrêscimo da velocidade quando a alimentação da armadura é subitamente cortada

Tem-se:

$$\tau_m = J/B$$

o coeficiente de atrito do motor pode ser determinado medindo-se a corrente do motor a vazio, estando o mesmo com fluxo nominal.

Tem-se:

$$\frac{T_{eo}}{T_n} = \frac{I_a}{I_n} \tag{5.65}$$

sendo:

- $T_{eo}$  : conjugado de atrito;
- $T_n$  : conjugado nominal;
- $I_a$  : corrente a vazio;
- $I_n$  : corrente nominal.

*T<sub>f</sub> = K<sub>t</sub> · i<sub>a</sub> → conj. devido somente ao atrito mecânico*  
*B.m → conj. devido ao atrito mecânico e ao atrito da ventilação*

O conjugado nominal pode ser determinado conforme ilustrado a seguir:

$$T_n = \frac{P_n}{n_n} \tag{5.66}$$

- sendo  $P_n$  : potência nominal do motor;
- $n_n$  : rotação nominal do motor. (rad/s)

Desta maneira:

$$T_{eo} = T_n \left( \frac{I_a}{I_n} \right) \tag{5.67}$$

mas:

$$T_{eo} = B \cdot n_o \quad (5.68)$$

$n_o$  = rotação a vazio

Logo:

$$B = \frac{T_{eo}}{n_o} \quad (5.69)$$

Desta maneira pode-se determinar o momento de i nércia  $J$ .

$$J = B \cdot \tau_m \quad (5.70)$$

### 5.8 - RESPOSTA PARA VARIAÇÕES DE CONJUGADO DE CARGA

A Figura 5.15 ilustra o diagrama de blocos completo.

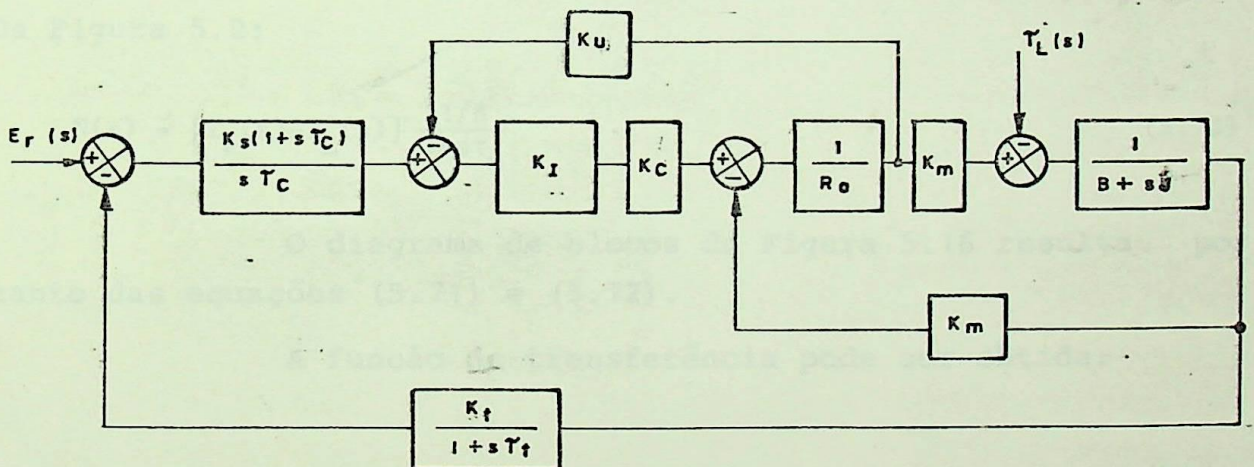


Figura 5.15 - Diagrama de blocos completo

A Figura 5.16 ilustra o diagrama de blocos simplificado.

Neste caso, considera-se apenas variações no con jugado de carga, desprezando-se as variações na tensão de refe rência, resultando, portanto, no diagrama de blocos da Figura 5.16.

O diagrama de blocos da Figura 5.16 foi obtido a partir dos diagramas de blocos das Figuras 5.2 e 5.11.

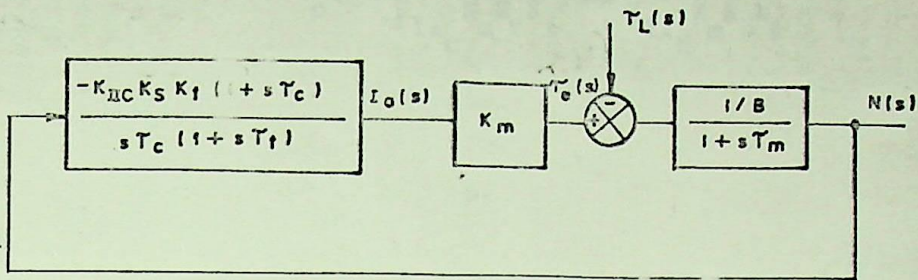


Figura 5.16 - Diagrama de blocos para estudo de variações da carga

Da Figura 5.11, desprezando-se variações em  $E_r(s)$ :

$$I_a(s) = -N(s) \frac{K_t}{1+s\tau_t} \frac{K_s(1+s\tau_c)}{s\tau_c} K_{IIc} \quad (5.71)$$

Da Figura 5.2:

$$N(s) = [T_e(s) - T_L(s)] \frac{1/B}{1+s\tau_m} \quad (5.72)$$

O diagrama de blocos da Figura 5.16 resulta por tanto das equações (5.71) e (5.72).

A função de transferência pode ser obtida:

$$\frac{N(s)}{T_L(s)} = \frac{\frac{-1}{B+Js}}{1 + K_{IIc} K_m K_s K_t \left(\frac{1+s\tau_c}{s\tau_c}\right) \left(\frac{1}{B+Js}\right)}$$

$$\frac{N(s)}{T_L(s)} = - \frac{s\tau_c}{s\tau_c(B+Js) + K_{IIc} K_m K_s K_t (1+s\tau_c)}$$

$$\frac{N(s)}{T_L(s)} = \frac{-s\tau_c}{K_{IIc} K_m K_s K_t + s\tau_c (K_{IIc} K_m K_s K_t + B) + s^2\tau_c J}$$

$$\frac{N(s)}{T_L(s)} = - \frac{\tau_c}{K_{II_c} K_m K_s K_t} \frac{s}{1 + \tau_c \left(1 + \frac{B}{K_{II_c} K_m K_s K_t}\right) s + \frac{s^2 \tau_c J}{K_{II_c} K_m K_s K_t}}$$

Mas:

$$J = B \tau_m$$

Logo:

$$\frac{N(s)}{T_L(s)} = - \frac{\tau_c}{K_{II_c} K_m K_s K_t} \frac{s}{1 + \tau_c \left(1 + \frac{B}{K_{II_c} K_m K_s K_t}\right) s + \frac{s^2 \tau_c B \tau_m}{K_{II_c} K_m K_s K_t}} \quad (5.73)$$

sendo  $K_{II_c} K_m K_s K_t \gg B$  pode-se escrever:

$$\frac{N(s)}{T_L(s)} = - \frac{\tau_c}{K_{II_c} K_m K_s K_t} \frac{s}{1 + s \tau_c + s^2 \tau_c \tau_3} \quad (5.74)$$

Sendo:

$$\tau_3 = \frac{\tau_m B}{K_t K_s K_{II_c} K_m} \quad (5.75)$$

ou

$$\tau_3 = \frac{\tau_m}{K_t K_s K_{II_c} K_{m2}} \quad (5.76)$$

Um gerador síncrono conectado no eixo do motor CC possibilita a variação de carga do motor. A Figura 5.17 ilustra.

A potência da carga é obtida por:

$$P = 3 \frac{U_s^2}{R} \quad (5.77)$$

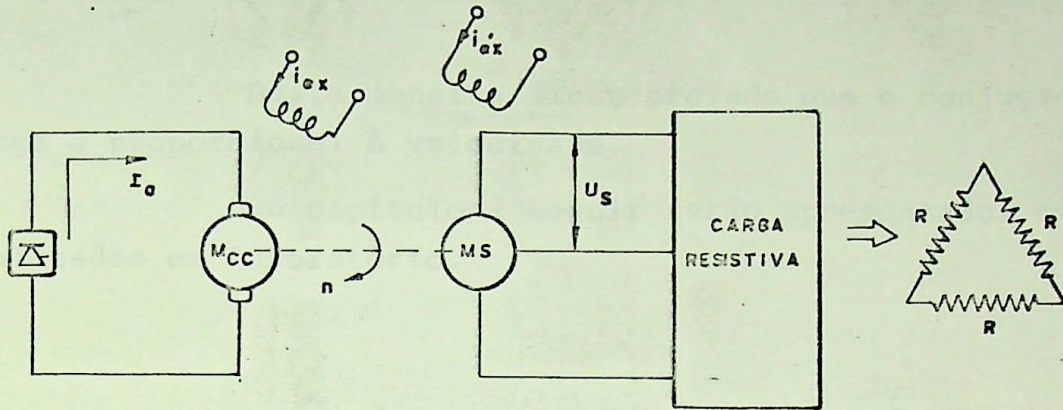


Figura 5.17 - Gerador síncrono alimentando resistência conectado ao eixo do motor CC

Sendo:

- $U_s$  → tensão de saída da máquina síncrona;
- $R$  → resistência em carga trifásica;
- $n$  → rotação em [rad/s].

mas:

$$U_s = K_4 i'_{ex} \cdot n \quad (5.78)$$

sendo  $i'_{ex}$  → corrente de excitação da máquina síncrona. Logo:

$$U_s = K_5 \cdot n \quad (5.79)$$

logo:

$$P = 3 \frac{K_5^2 n^2}{R} \quad (5.80)$$

Sendo:

$$\frac{3K_5^2}{R} = K_6 \quad (5.81)$$

resulta:

$$P = K_6 n^2 \quad (5.82)$$

O conjugado é dado por  $T = \frac{P}{n}$ . Logo:

$$T = K_6 \cdot n \quad (5.83)$$

Desta maneira ficou provado que o conjugado da carga é proporcional à velocidade.

No capítulo a seguir serão apresentados os testes realizados em laboratório.



Figura 4.1 - Tensão de saída da parte motriz controlada da máquina a 2000 rpm

## CAPÍTULO VI

## VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS EM LABORATÓRIO

6.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as formas de onda nos conversores e também os transitórios no sistema de controle da máquina de corrente contínua.

6.2 - FORMAS DE ONDA NOS CONVERSORES

As Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 ilustram as formas de onda da tensão de saída da ponte conversora controlada de 6 pulsos respectivamente para ângulos de disparo  $\alpha$  iguais a  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $150^\circ$ .

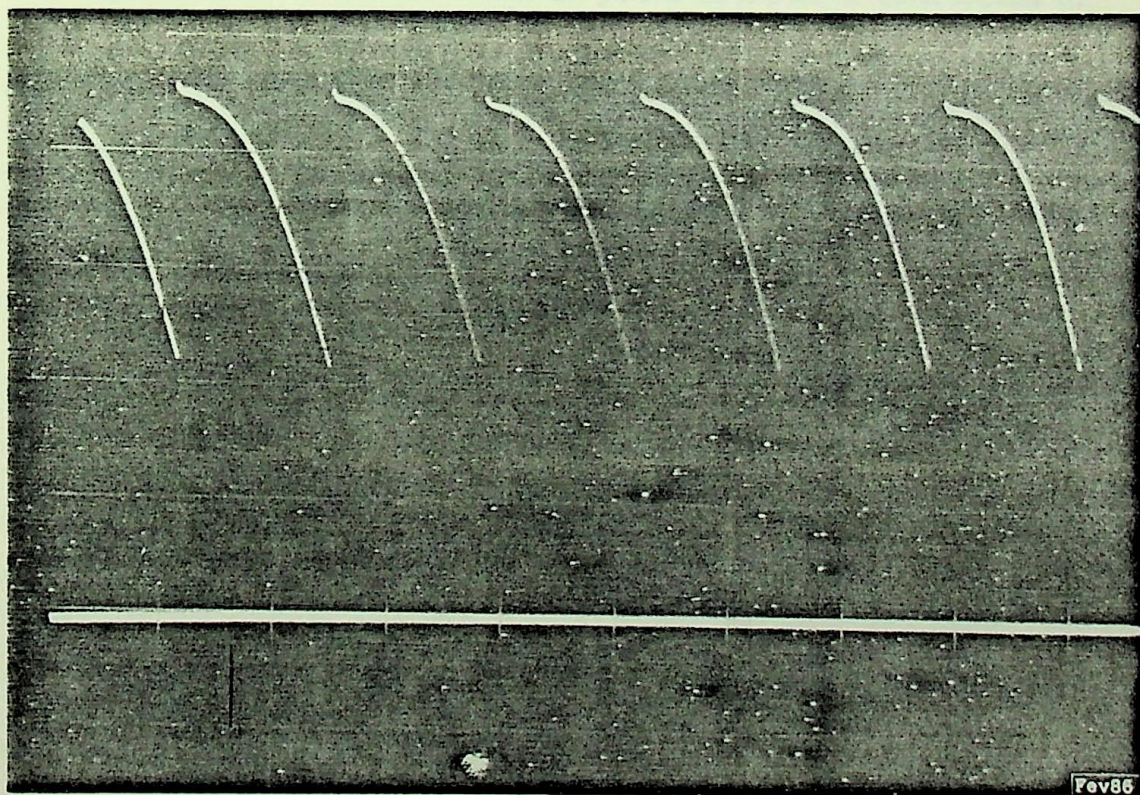


Figura 6.1 - Tensão de saída da ponte conversora controlada de 6 pulsos  $\alpha=30^\circ$

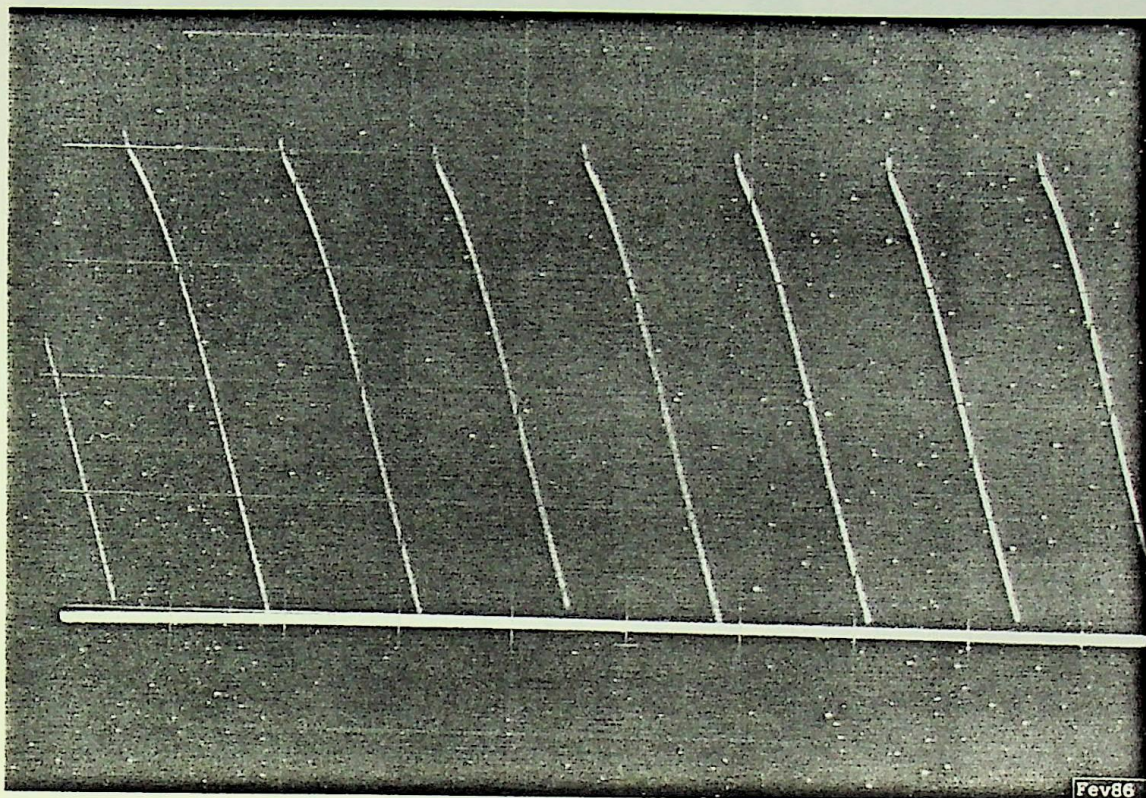


Figura 6.2 - Tensão de saída da ponte conversora controlada de 6 pulsos  $\alpha=60^\circ$

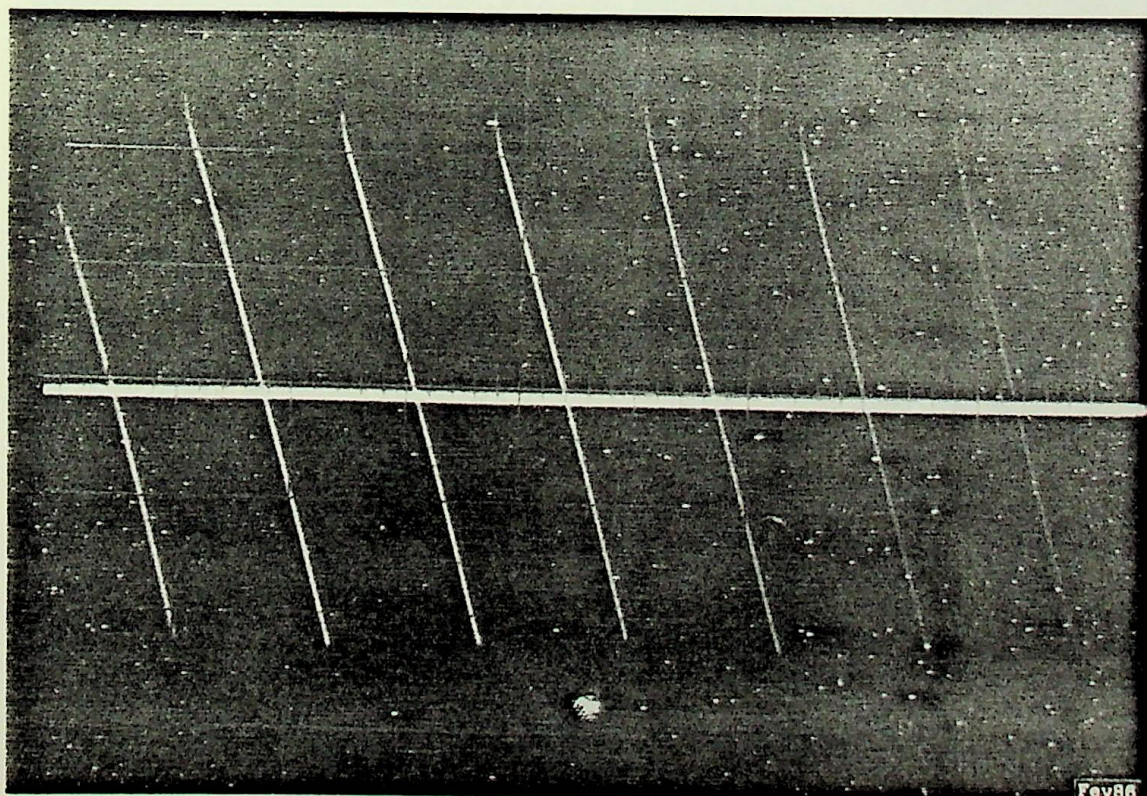


Figura 6.3 - Tensão de saída da ponte conversora controlada de 6 pulsos  $\alpha=90^\circ$

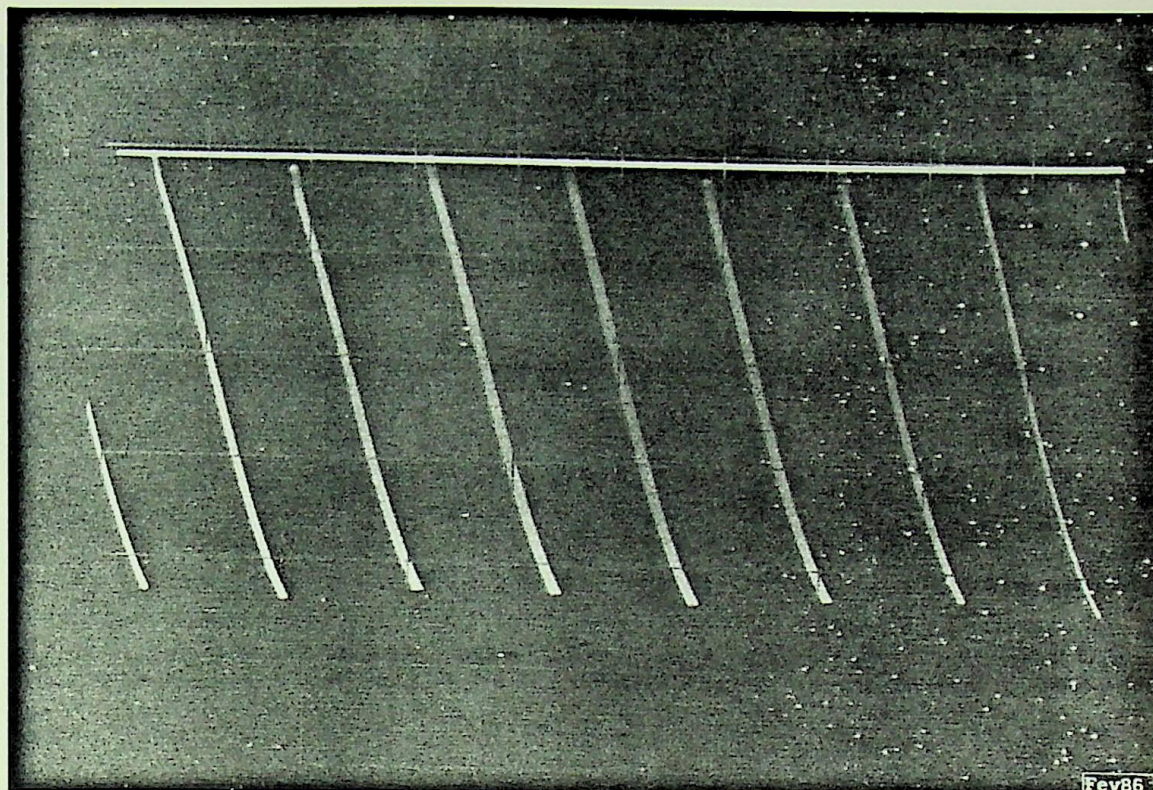


Figura 6.4 - Tensão de saída da ponte conversora controlada de 6 pulsos  $\alpha=120^\circ$

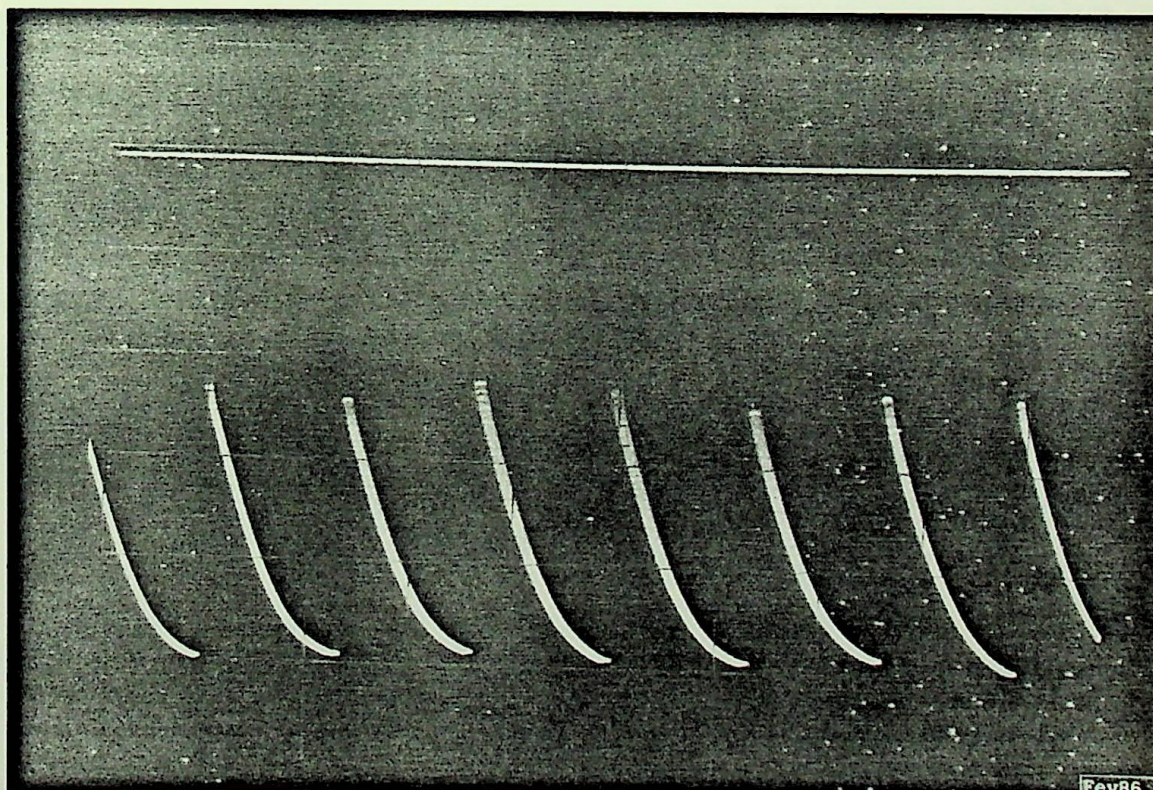


Figura 6.5 - Tensão de saída na ponte conversora controlada de 6 pulsos  $\alpha=150^\circ$

A Figura 6.6 ilustra a corrente na válvula da ponte conversora controlada de 6 pulsos.

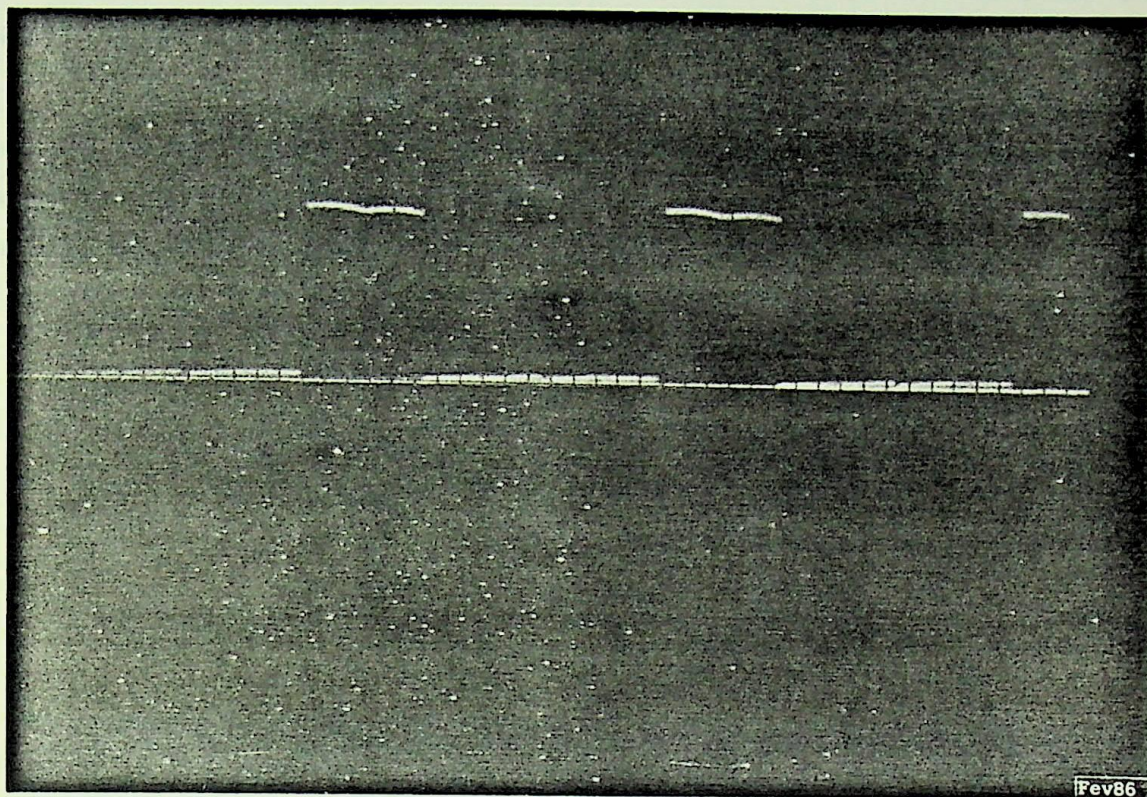


Figura 6.6 - Corrente na válvula da ponte conversora controlada de 6 pulsos

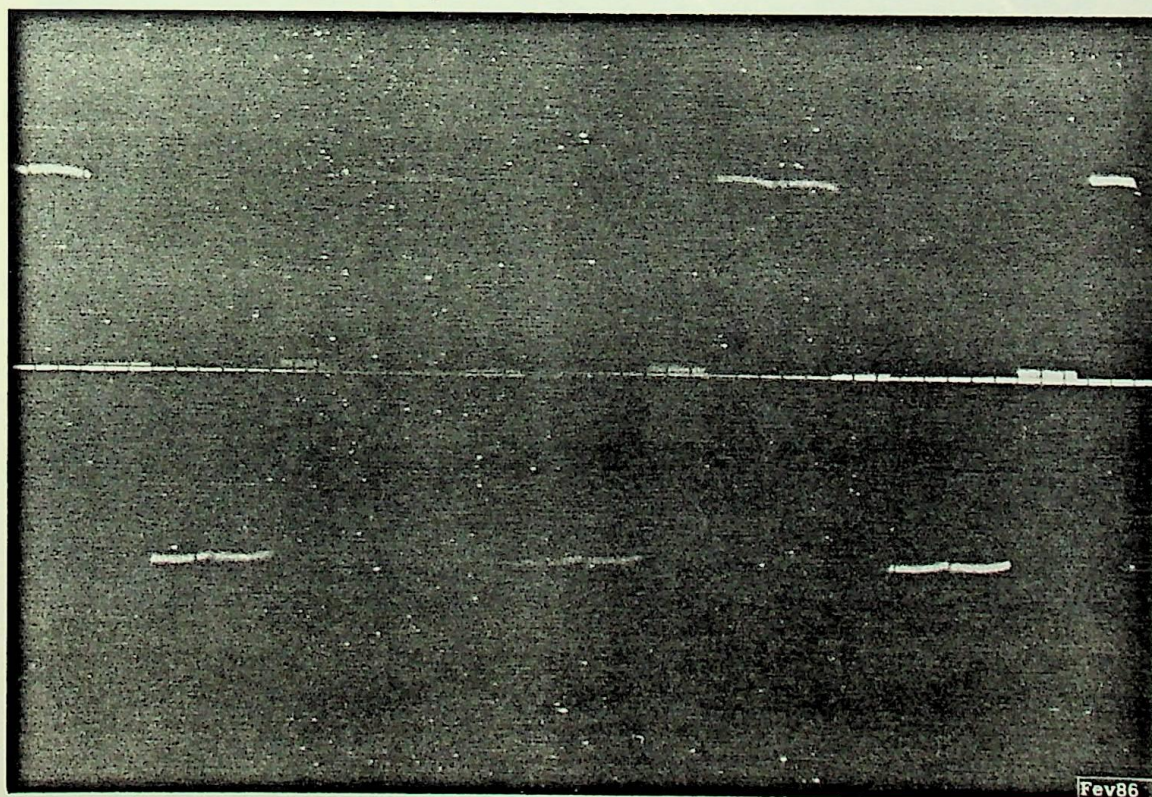


Figura 6.7 - Corrente na fase de alimentação da ponte conversora

Na Figura 6.6 pode-se constatar a condução da válvula durante  $120^\circ$ .

A Figura 6.7 ilustra a corrente na fase de alimentação da ponte conversora.

A ponte conversora controlada de 12 pulsos considerada neste trabalho é formada pela associação em série de duas pontes conversoras de 6 pulsos. As formas de onda da tensão de saída de cada uma das pontes conversoras para ângulo de disparo  $\alpha$  igual a  $60^\circ$  são ilustradas nas Figuras 6.8 e 6.9.

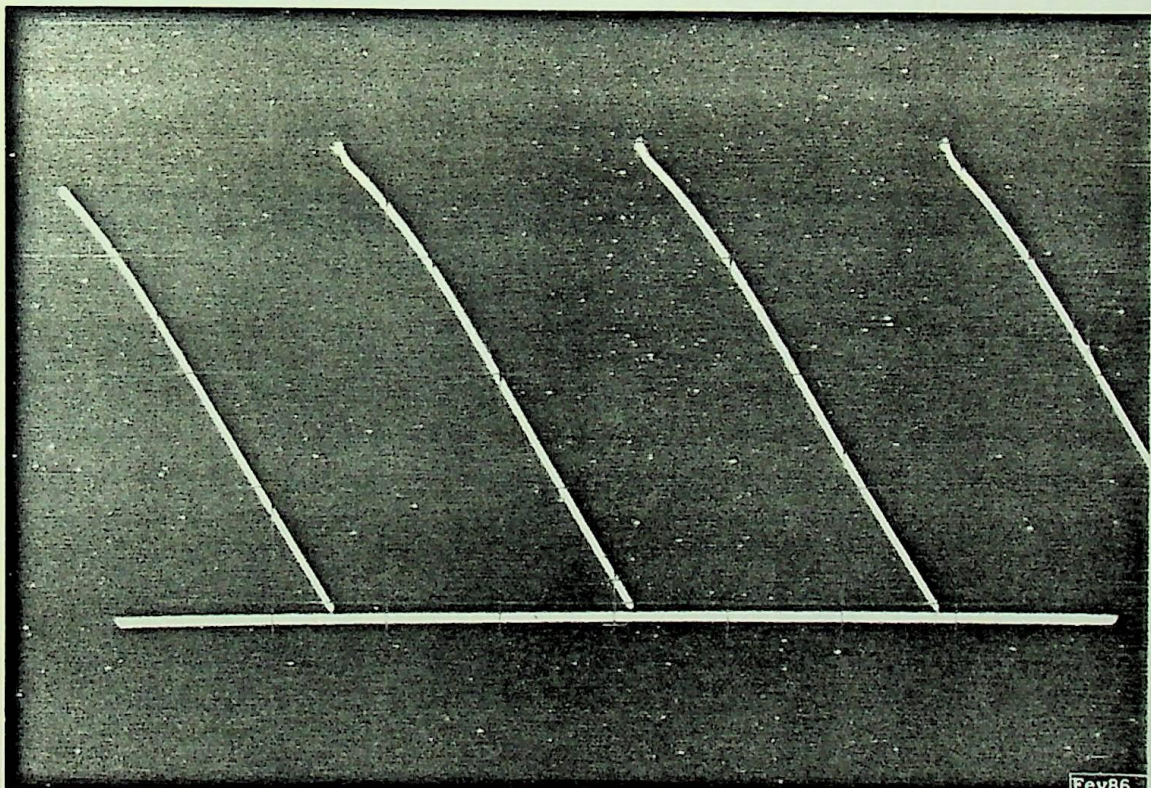


Figura 6.8 - Forma de onda da tensão de saída para ângulo de disparo  $\alpha$  igual a  $60^\circ$  - ponte  $P_1$

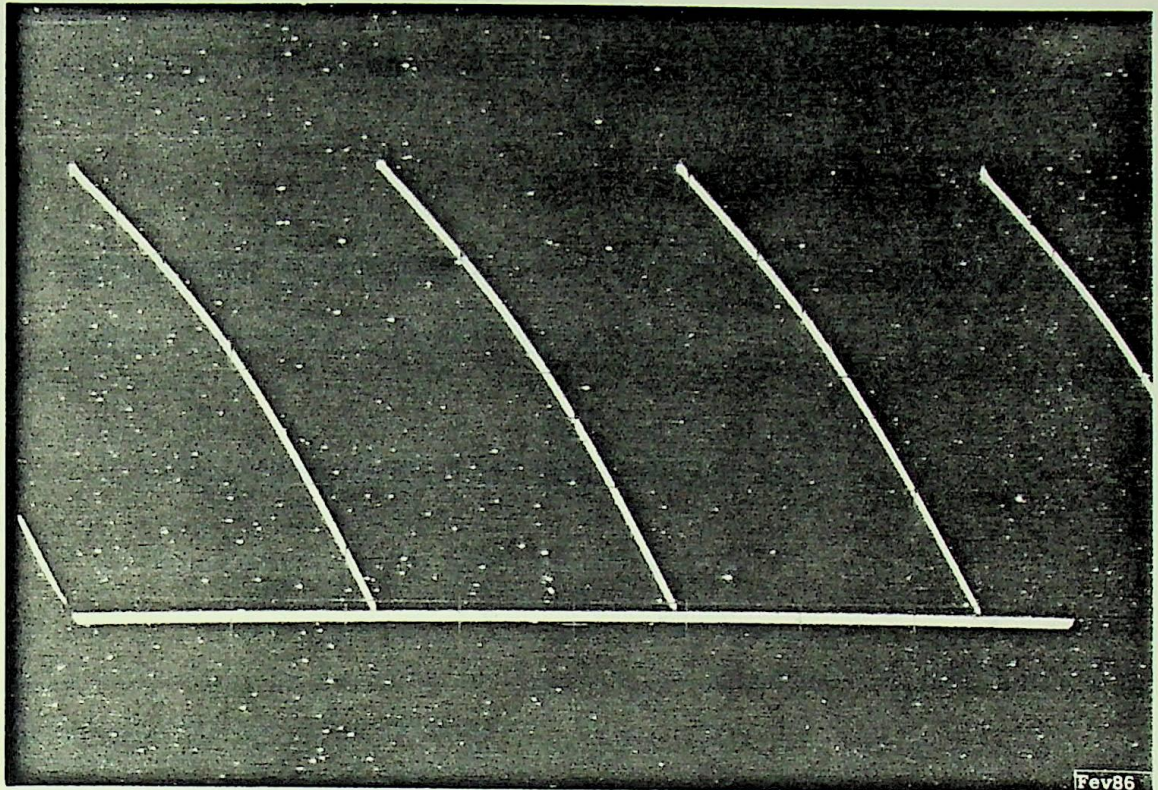


Figura 6.9 - Forma de onda de tensão de saída para ângulo de disparo  $\alpha$  igual a  $60^\circ$  - Ponte  $P_2$

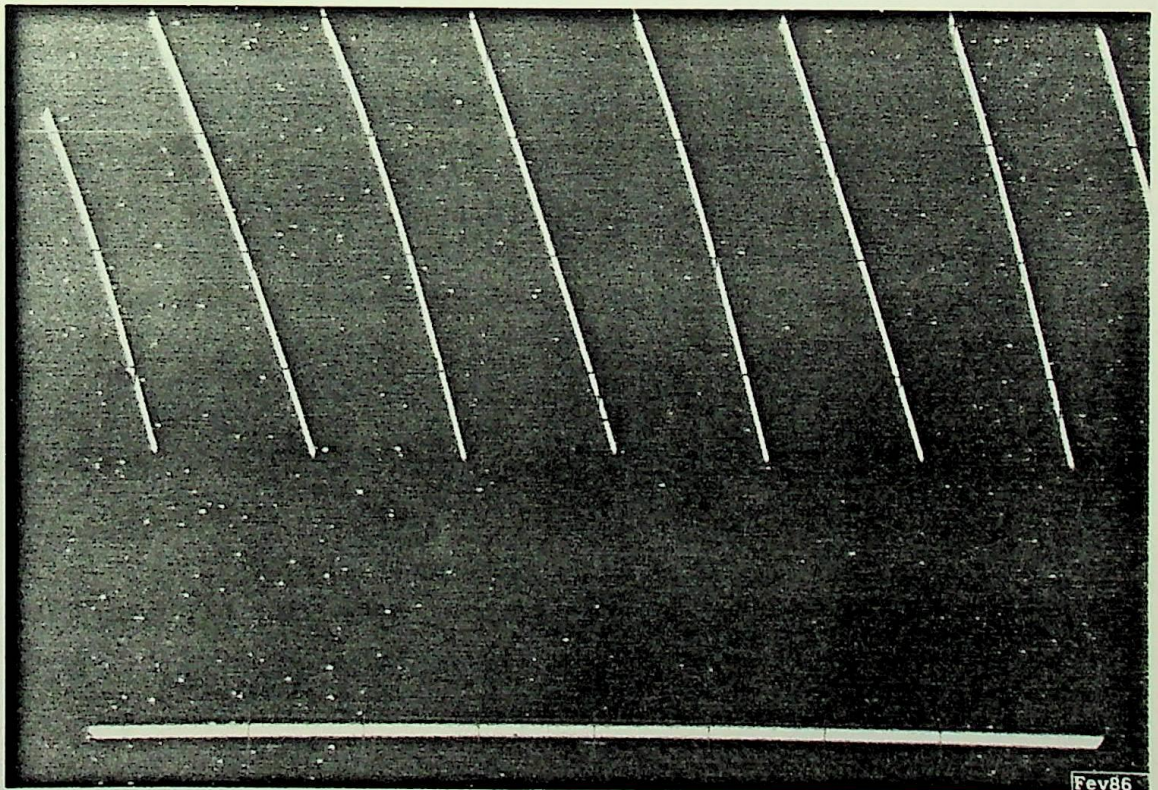


Figura 6.10 - Forma de onda de tensão de saída para ponte conversora controlada de 12 pulsos -  $\alpha=60^\circ$

A Figura 6.10 ilustra a forma de onda da tensão de saída para a ponte conversora controlada de 12 pulsos e ângulo de disparo igual a  $60^\circ$ . Pode-se perceber que a tensão resultante é igual à soma das tensões de saída das pontes  $P_1$  e  $P_2$ .

### 6.3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

#### 6.3.1 - Determinação das Constantes de Tempo

##### 6.3.1.1 - Constante de tensão da armadura

A constante de tempo da armadura  $\tau_a$  pode ser obtida aplicando-se um degrau de tensão ao circuito da armadura e oscilografando-se a corrente.

Em substituição ao oscilógrafo, foi utilizado um osciloscópio de memória.

A Figura 6.11 ilustra o resultado obtido.

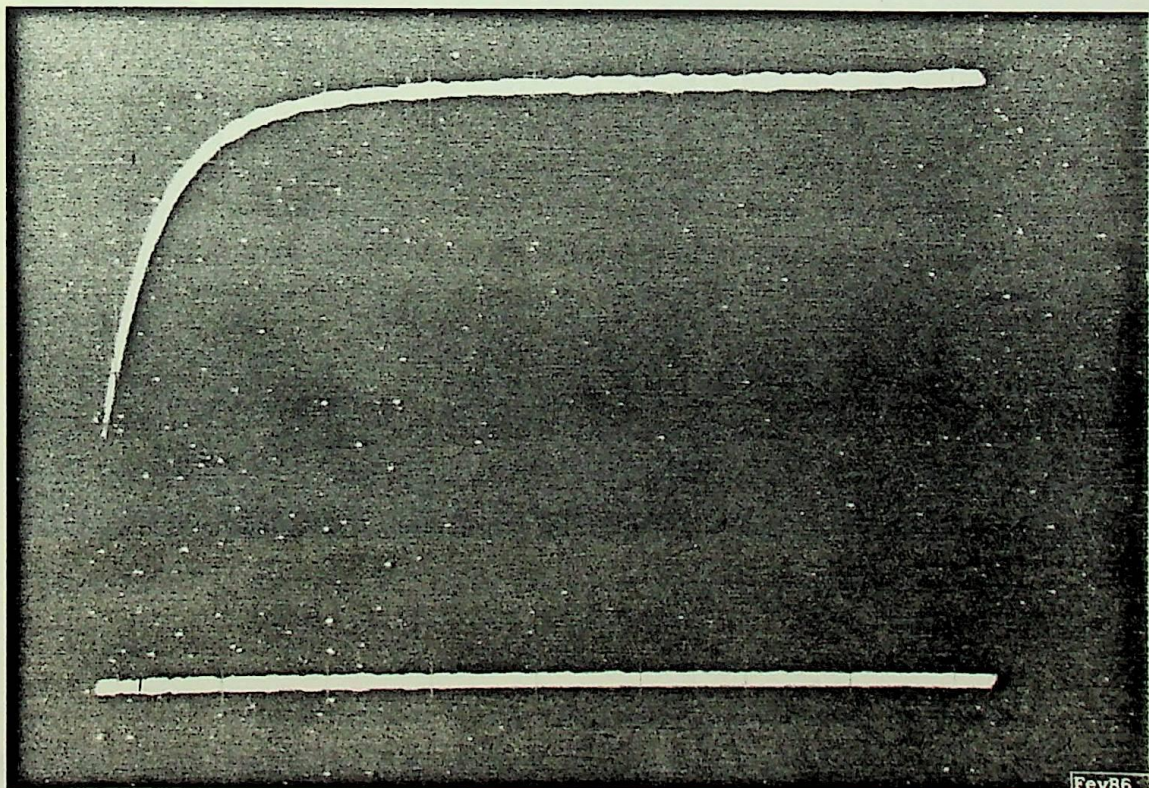


Figura 6.11 - Corrente no circuito de armadura quando da aplicação de um degrau de tensão

Marcando-se no eixo das ordenadas o valor igual a 63% do valor final e obtendo-se o tempo correspondente no eixo das abscissas, pode-se obter a constante de tempo da armadura. Logo:

$$\tau_a = 10 \text{ [ms]} \quad (6.1)$$

### 6.3.1.2 - Constante de tempo do motor

A constante de tempo do motor  $\tau_m$  pode ser obtida registrando-se o decaimento da velocidade quando a alimentação da armadura é subitamente interrompida e obtendo-se no eixo das abscissas o tempo correspondente a 37% do valor inicial. O motor opera neste caso a vazio.

A Figura 6.12 ilustra.

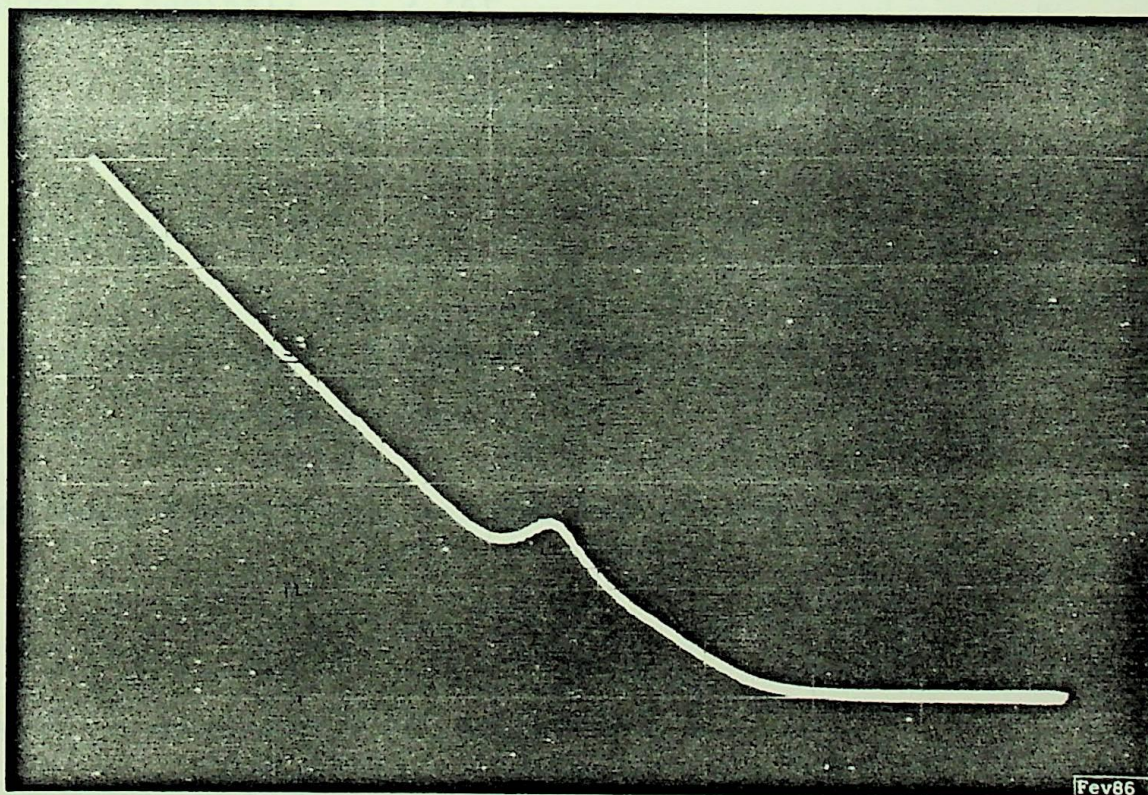


Figura 6.12 - Decrêscimo de velocidade quando a alimentação da armadura é subitamente interrompida - motor operando a vazio

Na Figura 6.12 pode-se constatar a curva constituída de duas partes distintas. A primeira parte, de aspecto linear, representa efetivamente o decaimento da velocidade. A se

gunda parte da curva representa a descarga dos capacitores do filtro do transdutor de velocidade, não sendo de interesse para a determinação da constante de tempo mecânica, pois o motor já estava parado.

A constante de tempo mecânica foi obtida igual a

$$\tau_m = 4,40 \text{ [s]} \quad (6.2)$$

### 6.3.2 - Dados do Motor de Corrente Contínua Utilizado

O motor de corrente contínua utilizado nos testes possui as seguintes características:

- potência nominal: 1.700 (W)
- rotação nominal : 1.500 (rpm)
- tensão nominal : 230 (V)
- corrente nominal: 7,7 [A]

A corrente nominal do motor é igual a 7,7 [A]. A corrente a vazio foi medida igual a 1,45 [A]. Tem-se:

$$\frac{\tau_n}{\tau_{eo}} = \frac{7,7}{1,45} \quad (6.3)$$

Sendo  $\tau_n$  → conjugado nominal do motor

$\tau_{eo}$  → conjugado a vazio

O conjugado nominal pode ser determinado por:

$$\tau_n = \frac{P_n}{N_n} \quad (6.4)$$

Sendo  $P_n$ : potência nominal do motor

$N_n$ : rotação nominal do motor em rad/s

Tem-se:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = \underline{\underline{157,08}}$$

$$\tau_n = \frac{1.700}{157,08}$$

$$\tau_n = 10,82 \text{ [N.m]} \quad (6.5)$$

Substituindo na equação (6.3), tem-se:

$$\tau_{eo} = \tau_n \frac{1,45}{7,72}$$

$$\tau_{eo} = 10,82 \frac{1,45}{7,72}$$

$$\tau_{eo} = 2,032 \text{ [N.m]} \quad (6.6)$$

Tem-se:

$$\tau_{eo} = B.n$$

Logo:

$$B = \frac{\tau_{eo}}{N}$$

$$B = \frac{2,032}{157,08}$$

$$B = 0,013 \text{ [N.m/rad/s]} \quad (6.7)$$

Sabe-se ainda:

$$\tau_m = J/B$$

logo:

$$J = B\tau_m$$

$$J = 0,013 \times 4,4$$

$$J = 0,0572 \text{ [Kg.m}^2\text{]} \quad (6.8)$$

A constante de torque pode ser obtida através da expressão:

$$\tau_n = K_m I_n \quad (6.9)$$

$$K_m = \frac{\tau_n}{I_n}$$

$$K_m = \frac{10,82}{7,7}$$

$$K_m = 1,40 \text{ [V/rad/s]}$$

As constantes  $K_{m1}$  e  $K_{m2}$  podem ser determinadas respectivamente de 5.27 e 5.28.

$$K_{m1} = \frac{B}{K_m^2 + R_a B(1+B'/B)}$$

Considerando a relação  $B'/B$  igual a 5,3 vem:

$$K_{m1} = \frac{0,013}{(1,4)^2 + 2,3 \times 0,013(6,3)}$$

$$K_{m1} = 0,0061 \text{ [A/V]}$$

A constante  $K_{m2}$  é igual a:

$$K_{m2} = \frac{K_m}{B}$$

$$K_{m2} = \frac{1,40}{0,013}$$

$$K_{m2} = 107 \text{ [rad/s/A]}$$

A constante  $K_{m4}$  pode também ser determinada. Tem-se de 5.54:

$$K_{m4} = (1+B'/B) K_{m1}$$

$$K_{m4} = 0,03843 \text{ [A/V]}$$

Os parâmetros dos reguladores podem ser determinados. Tem-se de 5.56:

$$K_I = \frac{1/\epsilon_{(\infty)} - 1}{K_u K_{m4} K_c}$$

Considerando a corrente de partida igual a 1,25 vezes a nominal tem-se:

$$K_u = 1/1,25$$

$$K_u = 0.8$$

Considerando  $\varepsilon(\infty) = 0,15$  e o ganho da ponte igual a 50, vem:

$$K_I = \frac{\frac{1}{0,15} - 1}{0,8 \times 0,03843 \times 50}$$

$$K_I \approx 3,5$$

O valor de  $K_S$  é dado segundo 5.60 por:

$$K_S = \left( \frac{1}{\sqrt{2}+1} \right) \frac{\tau_{m_3}}{K_3 \tau_t}$$

$$K_3 = K_{II_c} K_{m_3} K_t$$

$$K_{II_c} = 1,25$$

$$K_{m_3} = \frac{K_{m_2}}{1+B'/B}$$

$$K_{m_3} = \frac{107}{6,3}$$

$$K_{m_3} = 16,9$$

$$K_t = 0,058 \text{ [V/rad/s]}$$

Logo:

$$K_3 = 1,25 \times 16,9 \times 0,058$$

$$K_3 = 1,225$$

O valor de  $\tau_{m_3}$  é dado segundo 5.48 por:

$$\tau_{m_3} = \frac{\tau_m}{1+B'/B}$$

$$\tau_{m_3} = \frac{4,4}{6,3}$$

$$\tau_{m_3} = 0,70 \text{ (s)}$$

O valor da constante de tempo de filtro é igual a 15 [ms]. Logo:

$$K_S = \left( \frac{1}{\sqrt{2}+1} \right) \frac{700}{1,225 \times 15}$$

$$K_S \cong 15$$

O valor de  $\tau_c$  conforme 5.59 é:

$$\tau_c = (\sqrt{2}+1)^2 \tau_t$$

$$\tau_c = 87 \text{ [ms]}$$

A figura 6.13 ilustra a tensão de saída da ponte conversora na partida.

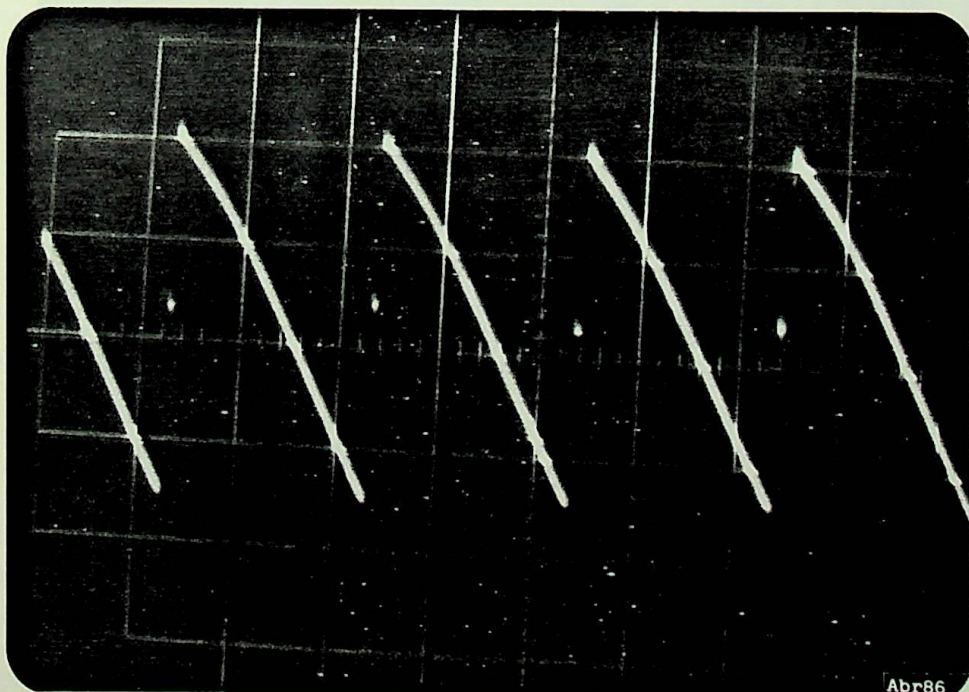


Figura 6.13 - Tensão de saída da ponte conversora na partida

As formas de onda da tensão e corrente na partida são ilustradas na Figura 6.14.

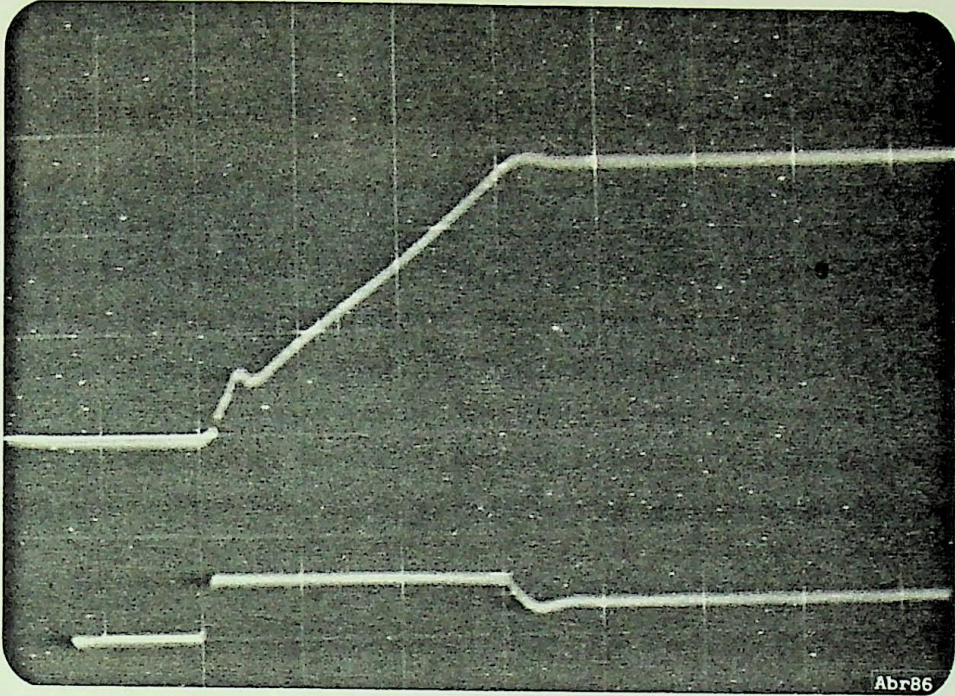


Figura 6.14 - Formas de onda da velocidade e corrente na partida do motor.

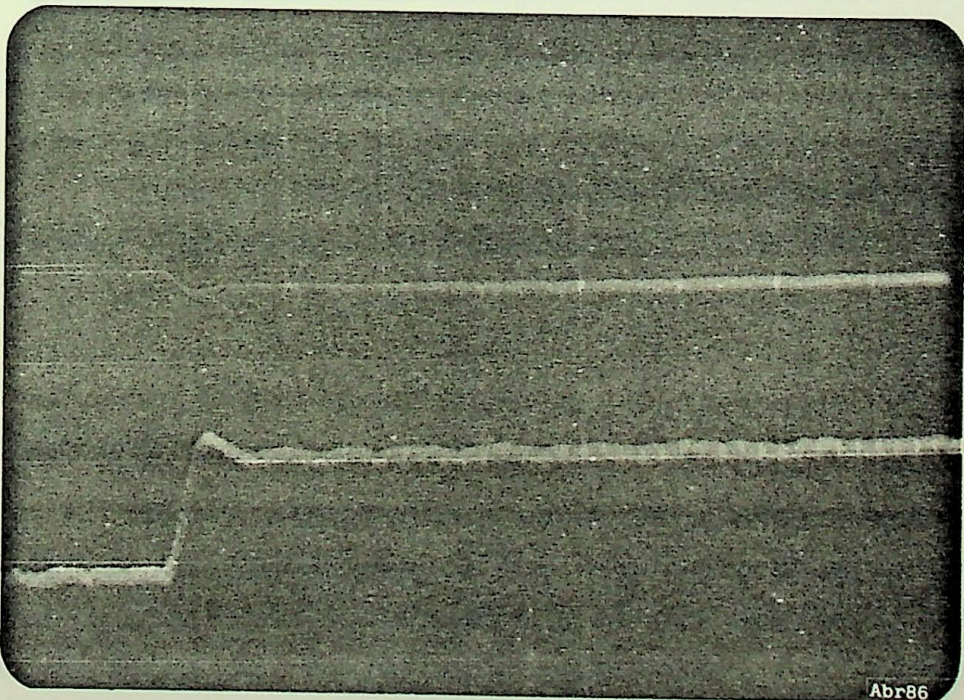


Figura 6.15 - Curva de velocidade (superior) e curva de corrente (inferior) para aumento brusco de carga.

Pode-se observar a partida do motor com corrente constante, comprovando a atuação eficiente de regulador de corrente.

As Figuras 6.15 e 6.16 ilustram o comportamento da velocidade e da corrente para variações bruscas de conjugado impostos ao motor.

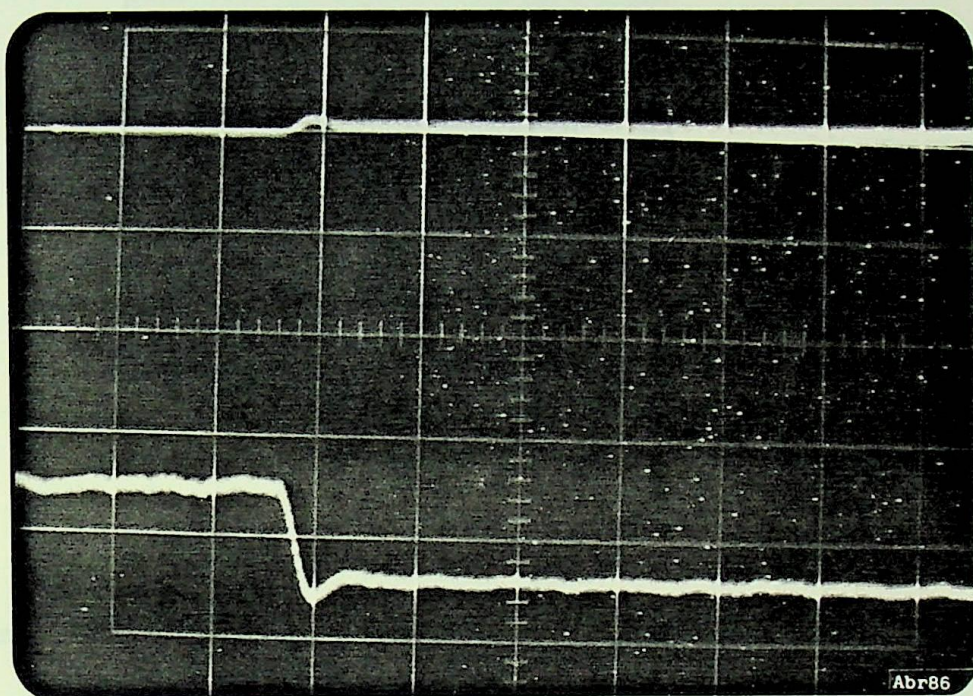


Figura 6.16 - Curva de velocidade (superior) e curva de corrente (inferior) para redução brusca de carga

Pode-se observar por intermédio das Figuras 6.15 e 6.16 a atuação eficiente do regulador de velocidade.

#### 6.4 - CONCLUSÕES

Por intermédio dos resultados experimentais pode-se comprovar a atuação eficiente dos reguladores de corrente e velocidade. A limitação de corrente é obtida devido à saturação da tensão de saída do regulador de velocidade, e o motor fica então adequadamente protegido.

A Figura 6.17 ilustra as formas de onda de velocidade e corrente na partida do motor de corrente contínua extraídas de [5], e comparando-se com as formas de onda apresentadas na Figura 6.14, pode-se observar uma semelhança nos resultados obtidos.

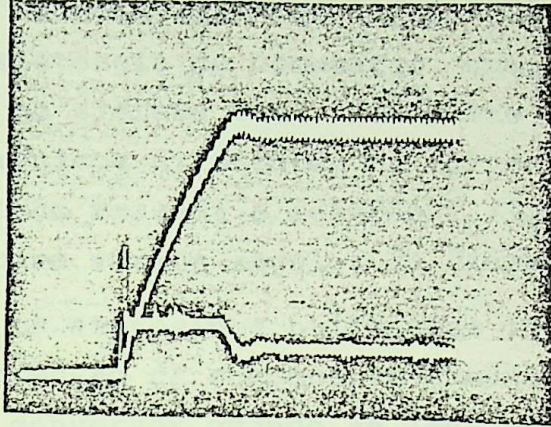


Figura 6.17 - Velocidade e corrente na partida do motor de corrente contínua [5]

## CAPÍTULO VII

## CONCLUSÕES GERAIS

A ponte conversora controlada de 6 pulsos foi estudada de maneira ampla no Capítulo 2. Foi desprezado inicialmente o efeito da comutação na ponte conversora de 6 pulsos obtendo-se o equacionamento e formas de onda respectivos. Posteriormente o efeito da comutação foi incorporado, incluindo-se também o efeito da resistência de comutação, que, via de regra, pode ser desprezado no sistema real. Foi feito também no capítulo um estudo dos harmônicos existentes na corrente de alimentação dos conversores, sendo traçada a relação  $I_n/I_{10}$  em função do ângulo de comutação, para vários ângulos de disparo.

As expressões utilizadas foram deduzidas no Apêndice II e a expressão da componente fundamental da corrente de alimentação do conversor quando se leva em consideração o efeito da comutação foi também determinada.

Após o estudo do conversor de 6 pulsos, ficou bastante facilitado o estudo do conversor de 12 pulsos, apresentado no Capítulo 3.

Os programas de simulação desenvolvidos para o traçado das formas de onda em regime permanente dos conversores se mostraram bastante úteis e eficientes, permitindo uma boa ilustração do comportamento destes. Em especial, no caso do conversor de 12 pulsos, espera-se que este trabalho possa ter dado uma contribuição para o estudo do mesmo.

No Capítulo 4 foram estudadas faltas nos sistemas conversores de 6 e 12 pulsos. Foi desenvolvido um programa digital para traçado das formas de onda da tensão e corrente durante a falta. Um método alternativo que utiliza o critério das áreas foi também desenvolvido, sendo que os resultados foram praticamente coincidentes.

A atuação do sistema de controle não foi considerada e sugere-se, então, como futura continuação deste trabalho, a inclusão do mesmo durante a falta.

No Capítulo 5 foi apresentado o sistema de contro

le de velocidade da máquina de corrente contínua e a modelagem utilizada, apesar de simplificada, se mostrou eficiente. Os resultados experimentais foram apresentados no Capítulo 6.

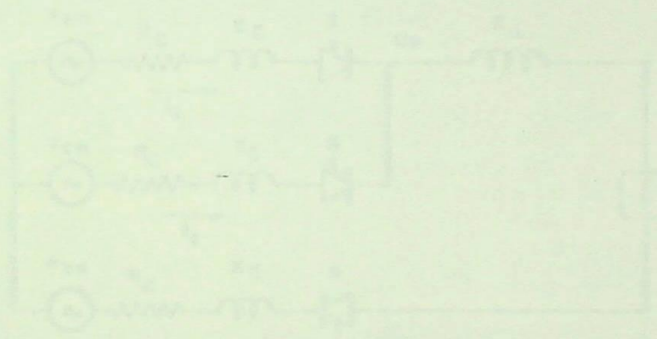


Figura 1.1 - Circuito de retificação de três fases com indutores e carga resistiva.

As tensões de condução são dadas por:

$$v_{d1} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \alpha) d\omega t \quad (1.1)$$

$$v_{d2} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \alpha + 120^\circ) d\omega t \quad (1.2)$$

$$v_{d3} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v_m \sin(\omega t) \sin(\omega t - \alpha + 240^\circ) d\omega t \quad (1.3)$$

onde  $v_m$  é a amplitude da tensão de fase e  $\alpha$  o ângulo de disparo.

$$v_{d1} = \frac{2}{\pi} v_m \cos(\alpha) \int_0^{\pi} \sin^2(\omega t - \alpha) d\omega t \quad (1.4)$$

$$v_{d1} = \frac{2}{\pi} v_m \cos(\alpha) \left[ \frac{\omega t}{2} - \frac{\sin(2\omega t - 2\alpha)}{4} \right]_0^{\pi} \quad (1.5)$$

## APÊNDICE I

EQUACIONAMENTO CONSIDERANDO-SE O EFEITO DA RESISTÊNCIA  
DE COMUTAÇÃO

Para efeito de equacionamento, o circuito equivalente de comutação das válvulas 1 e 5 será novamente apresentado na Figura AI.1. A equação da corrente de comutação, considerando-se o efeito da resistência, será deduzida a seguir.

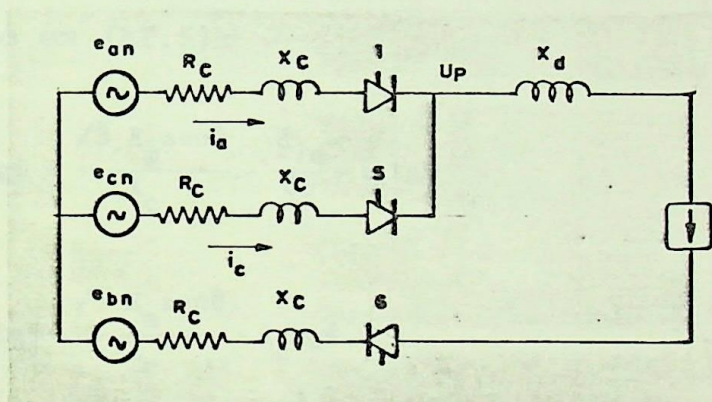


Figura AI.1 - Comutação das válvulas 1 e 5 considerando-se o efeito da resistência

As tensões de alimentação são dadas por:

$$e_{an} = E_m \text{sen}(\theta + \pi/6) \quad (\text{AI.1})$$

$$e_{bn} = E_m \text{sen}(\theta - \pi/2) \quad (\text{AI.2})$$

$$e_{cn} = E_m \text{sen}(\theta - 7\pi/6) \quad (\text{AI.3})$$

Equacionando o circuito da Figura AI.1, resulta:

$$e_{an} - R_c i_a - X_c \frac{d i_a}{d \theta} + X_c \frac{d i_c}{d \theta} + R_c i_c - e_{cn} = 0 \quad (\text{AI.4})$$

$$i_a + i_c = I_d \quad (\text{AI.5})$$

Dividindo (AI.4) por  $-X_c$ , vem:

$$\frac{e_{an}}{-X_c} + \frac{d_{ia}}{d\theta} + i_a \operatorname{tg}\psi - \frac{d_{ic}}{d\theta} - i_c \operatorname{tg}\psi + \frac{e_{cn}}{X_c} = 0$$

$$\frac{d_{ia}}{d\theta} + i_a \operatorname{tg}\psi = \frac{e_{an} - e_{cn}}{X_c} + \frac{d_{ic}}{d\theta} + i_c \operatorname{tg}\psi \quad (\text{AI.6})$$

$$e_{an} - e_{cn} = \sqrt{3} E_m \operatorname{sen}\theta \quad (\text{AI.7})$$

De (AI.5):

$$\frac{d_{ic}}{dt} = - \frac{d_{ia}}{dt}$$

Substituindo em (AI.5):

$$\frac{d_{ia}}{d\theta} + i_a \operatorname{tg}\psi = \frac{\sqrt{3} E_m \operatorname{sen}\theta}{X_c} - \frac{d_{ia}}{d\theta} + i_c \operatorname{tg}\psi$$

$$\frac{2d_{ia}}{d\theta} + i_a \operatorname{tg}\psi = \frac{\sqrt{3} E_m \operatorname{sen}\theta}{X_c} + i_c \operatorname{tg}\psi \quad (\text{AI.8})$$

Mas:

$$i_c = I_d - i_a$$

logo:

$$\frac{2d_{ia}}{d\theta} + i_a \operatorname{tg}\psi = \frac{\sqrt{3} E_m \operatorname{sen}\theta}{X_c} + \operatorname{tg}\psi (I_d - i_a)$$

$$\frac{2d_{ia}}{d\theta} + 2i_a \operatorname{tg}\psi = \frac{\sqrt{3} E_m}{X_c} \operatorname{sen}\theta + I_d \operatorname{tg}\psi$$

$$\frac{d_{ia}}{d\theta} + i_a \operatorname{tg}\psi = \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen}\theta \frac{E_m}{X_c} + \frac{I_d}{2} \operatorname{tg}\psi$$

$$\frac{d_{ia}}{d\theta} + i_a \operatorname{tg}\psi = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \operatorname{sen}\theta + \frac{1}{2} I_d \operatorname{tg}\psi \quad (\text{AI.9})$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação (AI.9), vem:

$$sI_a(s) + \operatorname{tg}\psi I_a(s) = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \frac{1}{s^2+1} + \frac{1}{2} \operatorname{tg}\psi I_d \frac{1}{s} \quad (\text{AI.10})$$

Sejam as seguintes propriedades:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{(s+\alpha)(s^2+\beta^2)} \right] = \frac{1}{\alpha^2+\beta^2} [e^{-\alpha t} + \frac{\alpha}{\beta} \operatorname{sen}\beta t - \cos\beta t]$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{s(s+\alpha)} \right] = \frac{1}{\alpha} [1 - e^{-\alpha t}]$$

Desenvolvendo a equação (AI.10) tem-se:

$$I_a(s)(s+\operatorname{tg}\psi) = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \frac{1}{s^2+1} + \frac{1}{2} \frac{I_d}{s} \operatorname{tg}\psi$$

$$I_a(s) = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \frac{1}{(s^2+1)(s+\operatorname{tg}\psi)} + \frac{1}{2} \frac{I_d \operatorname{tg}\psi}{s(s+\operatorname{tg}\psi)}$$

A anti-transformada, utilizando as propriedades acima, resulta finalmente:

$$i_a(\theta) = \frac{E_m}{X_c} \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2\psi} [e^{-\theta \operatorname{tg}\psi} + \operatorname{tg}\psi \operatorname{sen}\theta - \cos\theta] + \frac{1}{2} I_d [1 - e^{-\theta \operatorname{tg}\psi}] \quad (\text{AI.11})$$

## APÊNDICE II

DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DOS CONVERSORES  
EM SÉRIE TRIGONOMÉTRICA DE FOURIER

A Figura AII.1 ilustra a corrente de alimentação do conversor, fase a.

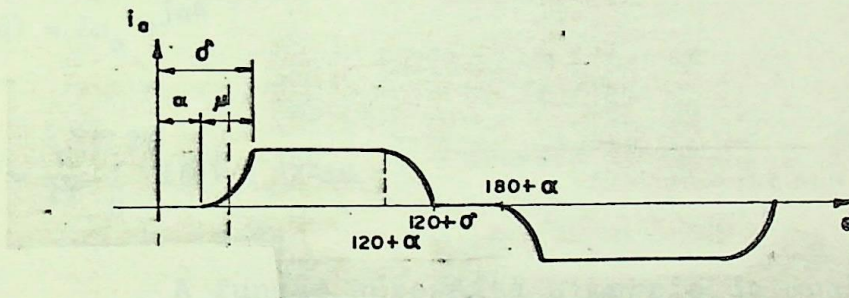


Figura AII.1 - Corrente de alimentação do conversor

Deslocando por conveniência o eixo das ordenadas de  $60^\circ$ , conforme mostra a linha tracejada da Figura AII.1, tem-se a corrente de alimentação mostrada na Figura AII.2.

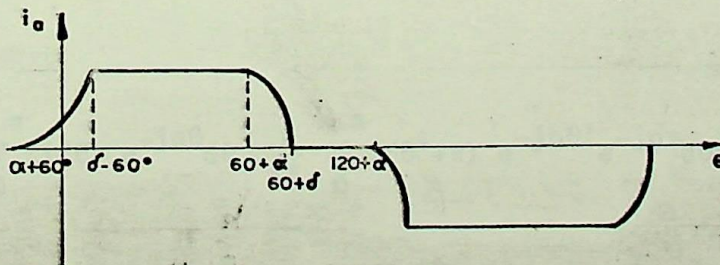


Figura AII.2 - Corrente de alimentação do conversor para o eixo das ordenadas deslocado de  $60^\circ$

As expressões da corrente de alimentação nos di versos intervalos considerados são ilustradas a seguir.

corrente	intervalo (graus)
$i_{\text{I}} = I_{s2} (\cos\alpha - \cos(\theta+60))$	$\alpha-60 < \theta < \delta-60$
$i_{\text{II}} = I_d = I_{s2} (\cos\alpha - \cos\delta)$	$\delta-60 < \theta < \alpha+60$
$i_{\text{III}} = I_{s2} [\cos(\theta-60) - \cos\delta]$	$\alpha+60 < \theta < \delta+60$
$i_{\text{IV}} = 0$	$\delta+60 < \theta < \alpha+120$

A corrente  $i_a(\theta)$  será simplesmente denotada por  $i(\theta)$ . Assim, decompondo em série trigonométrica de Fourier na forma complexa, resulta:

$$i(\theta) = \sum \alpha_n e^{jn\theta} \quad (\text{AII.1})$$

$$\alpha_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\theta) e^{-jn\theta} d\theta \quad (\text{AII.2})$$

A função apresenta simetria de quarto de onda, pois  $i(\theta+\pi) = -i(\theta)$ .

$$\alpha_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(\theta) e^{-jn\theta} d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} i(\theta) e^{-jn\theta} d\theta$$

Fazendo uma substituição de variáveis na segunda integral, tem-se:

$$\theta = \theta' + \pi \quad (\text{AII.3})$$

$$\alpha_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(\theta) e^{-jn\theta} d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(\theta'+\pi) e^{-jn\theta'} e^{-jn\pi} d\theta'$$

$$\alpha_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(\theta) e^{-jn\theta} d\theta - (-1)^n \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(\theta') e^{-jn\theta'} d\theta'$$

$$\alpha_n = [1 - (-1)^n] \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i(\theta) e^{-jn\theta} d\theta \quad (\text{AII.4})$$

Logo, pode-se concluir por intermédio da equação (AII.4):

$$\alpha_n = \begin{cases} 0 & \text{para } n \text{ par} \\ \frac{1}{\pi} \int_0^\pi i(\theta) e^{-jn\theta} d\theta & \text{para } n \text{ ímpar} \end{cases} \quad (\text{AII.5})$$

Também:

$$C_n = 2|\alpha_n| \quad (\text{AII.6})$$

$$\begin{aligned} \alpha_n = & \frac{1}{\pi} I_{s2} \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} [\cos\alpha - \cos(\theta+\pi/3)] e^{-jn\theta} d\theta + \\ & + \frac{1}{\pi} I_d \int_{\delta-\pi/3}^{\alpha+\pi/3} e^{-jn\theta} d\theta + \frac{1}{\pi} I_{s2} \int_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} [\cos(\theta-\pi/3) - \cos\delta] e^{-jn\theta} d\theta \quad (\text{AII.7}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\pi\alpha_n}{I_{s2}} = & \cos\alpha \left[ \frac{e^{-jn\theta}}{-jn} \right]_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} - \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} \cos(\theta+\pi/3) (\cos n\theta - j \operatorname{senn}\theta) d\theta + \\ & + (\cos\alpha - \cos\delta) \left[ \frac{e^{-jn\theta}}{-jn} \right]_{\delta-\pi/3}^{\alpha+\pi/3} + \int_{\delta-\pi/3}^{\alpha+\pi/3} \cos(\theta-\pi/3) (\cos n\theta - j \operatorname{senn}\theta) d\theta + \\ & + \cos\delta \left[ \frac{e^{-jn\theta}}{jn} \right]_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\pi\alpha_n}{I_{s2}} = & \frac{j\cos\alpha}{n} [\cos n(\delta-\pi/3) - j \operatorname{senn}(\delta-\pi/3) - \cos n(\alpha-\pi/3) + j \operatorname{senn}(\alpha-\pi/3)] + \\ & + j \frac{(\cos\alpha - \cos\delta)}{n} [\cos n(\alpha+\pi/3) - j \operatorname{senn}(\alpha+\pi/3) - \cos n(\delta-\pi/3) + j \operatorname{senn}(\delta-\pi/3)] - \\ & - j \frac{\cos\delta}{n} [\cos n(\delta+\pi/3) - j \operatorname{senn}(\delta+\pi/3) - \cos n(\alpha+\pi/3) + j \operatorname{senn}(\alpha+\pi/3)] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} \cos n\theta \cos(\theta+\pi/3) d\theta + j \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} \text{senn}\theta \cos(\theta+\pi/3) d\theta + \\
& + \int_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} \cos n\theta \cos(\theta-\pi/3) d\theta - j \int_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} \text{senn}\theta \cos(\theta-\pi/3) d\theta \quad (\text{AII.8})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\pi\alpha}{I_{s2}} = \frac{1}{n} & [\cos\alpha \text{senn}(\delta-\pi/3) - \text{senn}(\alpha-\pi/3) \cos\alpha + (\cos\alpha - \cos\delta) \text{senn}(\alpha+\pi/3) - \\
& - (\cos\alpha - \cos\delta) \text{senn}(\delta-\pi/3) - \cos\delta \text{senn}(\delta+\pi/3) + \cos\delta \text{senn}(\alpha+\pi/3)] + \\
& + \frac{j}{n} [\cos\alpha \cos n(\delta-\pi/3) - \cos\alpha \cos n(\alpha-\pi/3) + (\cos\alpha - \cos\delta) \cos n(\alpha+\pi/3) - \\
& - (\cos\alpha - \cos\delta) \cos n(\delta-\pi/3) - \cos\delta \cos n(\delta+\pi/3) + \cos\delta \cos n(\alpha+\pi/3)] - \\
& - \frac{1}{2} \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} \cos[(n+1)\theta-\pi/3] d\theta - \frac{1}{2} \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} \cos[(n-1)\theta-\pi/3] d\theta + \\
& + \frac{1}{2} \int_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} \cos[(n+1)\theta-\pi/3] d\theta + \frac{1}{2} \int_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} \cos[(n-1)\theta+\pi/3] d\theta + \\
& + \frac{j}{2} \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} \text{sen}[(n+1)\theta+\pi/3] d\theta + \frac{j}{2} \int_{\alpha-\pi/3}^{\delta-\pi/3} \text{sen}[(n-1)\theta-\pi/3] d\theta - \\
& - \frac{j}{2} \int_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} \text{sen}[(n+1)\theta-\pi/3] d\theta - \frac{j}{2} \int_{\alpha+\pi/3}^{\delta+\pi/3} \text{sen}[(n-1)\theta+\pi/3] d\theta \quad (\text{AII.9})
\end{aligned}$$

Seja:

$$\begin{aligned}
A = \frac{1}{n} & [\cos\alpha \text{senn}(\delta-\pi/3) - \cos\alpha \text{senn}(\alpha-\pi/3) + (\cos\alpha - \cos\delta) \text{senn}(\alpha+\pi/3) - \\
& - (\cos\alpha - \cos\delta) \text{senn}(\delta-\pi/3) - \cos\delta \text{senn}(\delta+\pi/3) + \cos\delta \text{senn}(\alpha+\pi/3)] + \\
& + \frac{j}{n} [\cos\alpha \cos n(\delta-\pi/3) - \cos\alpha \cos n(\alpha-\pi/3) + (\cos\alpha - \cos\delta) \cos n(\alpha+\pi/3) - \\
& - (\cos\alpha - \cos\delta) \cos n(\delta-\pi/3) - \cos\delta \cos n(\delta+\pi/3) + \cos\delta \cos n(\alpha+\pi/3)] \quad (\text{AII.10})
\end{aligned}$$

Logo:

$$\begin{aligned}
 \frac{\pi\alpha_n}{I_{s2}} = & A - \frac{1}{2} \frac{\text{sen}[(n+1)\theta - \pi/3]}{n+1} \Big|_{\alpha - \pi/3}^{\delta - \pi/3} - \frac{1}{2} \frac{\text{sen}[(n-1)\theta - \pi/3]}{n-1} \Big|_{\alpha - \pi/3}^{\delta - \pi/3} + \\
 & + \frac{1}{2} \frac{\text{sen}[(n+1)\theta - \pi/3]}{n+1} \Big|_{\alpha + \pi/3}^{\delta + \pi/3} + \frac{1}{2} \frac{\text{sen}[(n-1)\theta + \pi/3]}{n-1} \Big|_{\alpha + \pi/3}^{\delta + \pi/3} \\
 & - \frac{j}{2} \frac{\text{cos}[(n+1)\theta + \pi/3]}{n+1} \Big|_{\alpha - \pi/3}^{\delta - \pi/3} - \frac{j}{2} \frac{\text{cos}[(n-1)\theta - \pi/3]}{n-1} \Big|_{\alpha - \pi/3}^{\delta - \pi/3} + \\
 & + \frac{j}{2} \frac{\text{cos}[(n+1)\theta - \pi/3]}{n+1} \Big|_{\alpha + \pi/3}^{\delta + \pi/3} + \frac{j}{2} \frac{\text{cos}[(n-1)\theta + \pi/3]}{n-1} \Big|_{\alpha + \pi/3}^{\delta + \pi/3} \quad (\text{AII.11})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\pi\alpha_n}{I_{s2}} = & A + \frac{1}{2} \left\{ - \frac{\text{sen}[(n+1)\delta - n\pi/3]}{n+1} + \frac{\text{sen}[(n+1)\alpha - n\pi/3]}{n+1} = \frac{\text{sen}[(n-1)\delta - n\pi/3]}{n-1} + \right. \\
 & + \frac{\text{sen}[(n-1)\alpha - n\pi/3]}{n-1} + \frac{\text{sen}[(n+1)\delta + n\pi/3]}{n+1} - \frac{\text{sen}[(n+1)\alpha + n\pi/3]}{n+1} + \\
 & + \left. \frac{\text{sen}[(n-1)\delta + n\pi/3]}{n-1} - \frac{\text{sen}[(n-1)\alpha + n\pi/3]}{n-1} \right\} + \frac{j}{2} \left\{ \frac{-\text{cos}[(n+1)\delta - n\pi/3]}{n+1} + \right. \\
 & + \frac{\text{cos}[(n+1)\alpha - n\pi/3]}{n+1} - \frac{\text{cos}[(n-1)\delta - n\pi/3]}{n-1} + \frac{\text{cos}[(n-1)\alpha - n\pi/3]}{n-1} + \\
 & + \frac{\text{cos}[(n+1)\delta + n\pi/3]}{n+1} - \frac{\text{cos}[(n+1)\alpha + n\pi/3]}{n+1} + \frac{\text{cos}[(n-1)\delta + n\pi/3]}{n-1} - \\
 & \left. - \frac{\text{cos}[(n-1)\alpha + n\pi/3]}{n-1} \right\} \quad (\text{AII.12})
 \end{aligned}$$

Transformando em produtos a soma de senos e cossenos da equação (AII.12), resulta:

$$\begin{aligned}
 \frac{\pi\alpha_n}{I_{s2}} = & A + \frac{1}{2} \left[ \frac{2\text{sen}(n\pi/3)\text{cos}(n+1)\delta}{n+1} - \frac{2\text{sen}(n\pi/3)\text{cos}(n+1)\alpha}{n+1} + \right. \\
 & + \left. \frac{2\text{sen}(n\pi/3)\text{cos}(n-1)\delta}{n-1} - \frac{2\text{sen}(n\pi/3)\text{cos}(n-1)\alpha}{n-1} \right] + \\
 & + \frac{j}{2} \left[ \frac{-2\text{sen}(n\pi/3)\text{sen}(n+1)\delta}{n+1} + \frac{2\text{sen}(n\pi/3)\text{sen}(n+1)\alpha}{n+1} - \right. \\
 & \left. - \frac{2\text{sen}(n\pi/3)\text{sen}(n-1)\delta}{n-1} + \frac{2\text{sen}(n\pi/3)\text{sen}(n-1)\alpha}{n-1} \right] \quad (\text{AII.13})
 \end{aligned}$$

Da equação (AII.10) o valor de A pode ser obtido, logo:

$$\begin{aligned}
 A = \frac{1}{n} & [\cos\alpha \operatorname{senn}(\delta - \pi/3) - \operatorname{senn}(\alpha - \pi/3) \cos\alpha + \cos\alpha \operatorname{senn}(\alpha + \pi/3) - \cos\delta \operatorname{senn}(\alpha + \pi/3) - \\
 & - \cos\alpha \operatorname{senn}(\delta - \pi/3) + \cos\delta \operatorname{senn}(\delta - \pi/3) - \cos\delta \operatorname{senn}(\delta + \pi/3) + \cos\delta \operatorname{senn}(\alpha + \pi/3)] + \\
 & + \frac{j}{n} [\cos\alpha \operatorname{cosn}(\delta - \pi/3) - \cos\alpha \operatorname{cosn}(\alpha - \pi/3) + \cos\alpha \operatorname{cosn}(\alpha + \pi/3) - \cos\delta \operatorname{cosn}(\alpha + \pi/3) - \\
 & - \cos\alpha \operatorname{cosn}(\delta - \pi/3) + \cos\delta \operatorname{cosn}(\delta - \pi/3) - \cos\delta \operatorname{cosn}(\delta + \pi/3) + \cos\delta \operatorname{cosn}(\alpha + \pi/3)]
 \end{aligned}
 \tag{AII.14}$$

$$\begin{aligned}
 A = \frac{1}{n} & [\cos\alpha \operatorname{senn}(\alpha + \pi/3) - \cos\alpha \operatorname{senn}(\alpha - \pi/3) - \cos\delta \operatorname{senn}(\delta + \pi/3) + \cos\delta \operatorname{senn}(\delta - \pi/3)] + \\
 & + \frac{j}{n} [\cos\alpha \operatorname{cosn}(\alpha + \pi/3) - \cos\alpha \operatorname{cosn}(\alpha - \pi/3) + \cos\delta \operatorname{cosn}(\delta - \pi/3) - \cos\delta \operatorname{cosn}(\delta + \pi/3)]
 \end{aligned}
 \tag{AII.15}$$

$$\begin{aligned}
 nA = & \{ \cos\alpha [\operatorname{senn}(\alpha + \pi/3) - \operatorname{senn}(\alpha - \pi/3)] + \cos\delta [\operatorname{senn}(\delta - \pi/3) - \operatorname{senn}(\delta + \pi/3)] \} + \\
 & + \frac{j}{n} \{ \cos\alpha [\operatorname{cosn}(\alpha + \pi/3) - \operatorname{cosn}(\alpha - \pi/3)] + \cos\delta [\operatorname{cosn}(\delta - \pi/3) - \operatorname{cosn}(\delta + \pi/3)] \}
 \end{aligned}
 \tag{AII.16}$$

Transformando em produto as somas de senos e cos senos da equação (AII.16), resulta:

$$\begin{aligned}
 nA = & [2\cos\alpha \operatorname{sen}(n\pi/3) \cos n\alpha - 2\cos\delta \operatorname{sen}(n\pi/3) \cos n\delta] + \\
 & + j [-2\cos\alpha \operatorname{sen}(n\pi/3) \operatorname{senn}\alpha + 2\cos\delta \operatorname{sen}(n\pi/3) \operatorname{senn}\delta] \\
 A = & \frac{2\cos\alpha \operatorname{sen}(n\pi/3) \cos n\alpha}{n} - \frac{2\cos\delta \operatorname{sen}(n\pi/3) \cos n\delta}{n} + \\
 & + \frac{j}{n} [-2\cos\alpha \operatorname{sen}(n\pi/3) \operatorname{senn}\alpha + 2\cos\delta \operatorname{sen}(n\pi/3) \operatorname{senn}\delta]
 \end{aligned}
 \tag{AII.17}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\pi\alpha}{I_{s2}} = & \left[ \frac{2\cos\alpha \operatorname{sen}(n\pi/3) \cos n\alpha}{n} - \frac{2\cos\delta \operatorname{sen}(n\pi/3) \cos n\delta}{n} + \frac{\operatorname{sen}(n\pi/3) \cos(n+1)\delta}{n+1} - \right. \\
 & \left. - \frac{\operatorname{sen}(n\pi/3) \cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\operatorname{sen}(n\pi/3) \cos(n-1)\delta}{n-1} - \frac{\operatorname{sen}(n\pi/3) \cos(n-1)\alpha}{n-1} \right] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + j\text{sen}(n\pi/3)\left[\frac{-2\cos\alpha\text{sen}n\alpha}{n} + \frac{2\cos\delta\text{sen}n\delta}{n} - \frac{\text{sen}(n+1)\delta}{n+1} + \frac{\text{sen}(n+1)\alpha}{n+1} - \right. \\
& \left. - \frac{\text{sen}(n-1)\delta}{n-1} + \frac{\text{sen}(n-1)\alpha}{n-1}\right] \quad (\text{AII.18})
\end{aligned}$$

Utilizando as propriedades da trigonometria para transformação do produto em soma, tem-se:

$$2\cos\alpha\cos n\alpha = \frac{\cos(n+1)\alpha}{n} + \frac{\cos(n-1)\alpha}{n} \quad (\text{AII.19})$$

$$2\cos\delta\cos n\delta = \frac{\cos(n+1)\delta}{n} + \frac{\cos(n-1)\delta}{n} \quad (\text{AII.20})$$

$$2\cos\alpha\text{sen}n\alpha = \frac{\text{sen}(n+1)\alpha}{n} + \frac{\text{sen}(n-1)\alpha}{n} \quad (\text{AII.21})$$

$$2\cos\delta\text{sen}n\delta = \frac{\text{sen}(n+1)\delta}{n} + \frac{\text{sen}(n-1)\delta}{n} \quad (\text{AII.22})$$

Substituindo as equações (AII.19), (AII.20) (AII.21) e (AII.22) em (AII.18), resulta:

$$\begin{aligned}
\frac{\pi\alpha}{I_{s2}} = \text{sen}\left(\frac{n\pi}{3}\right) & \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n} + \frac{\cos(n-1)\alpha}{n} - \frac{\cos(n+1)\delta}{n} - \frac{\cos(n-1)\delta}{n} + \right. \\
& + \frac{\cos(n+1)\delta}{n+1} - \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(n-1)\delta}{n-1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1}] + \\
& + j\text{sen}(n\pi/3)\left[-\frac{\text{sen}(n+1)\alpha}{n} - \frac{\text{sen}(n-1)\alpha}{n} + \frac{\text{sen}(n+1)\delta}{n} + \frac{\text{sen}(n-1)\delta}{n} - \right. \\
& \left. - \frac{\text{sen}(n+1)\delta}{n+1} + \frac{\text{sen}(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\text{sen}(n-1)\delta}{n-1} + \frac{\text{sen}(n-1)\alpha}{n-1}\right] \quad (\text{AII.23})
\end{aligned}$$

Para valores pares de  $n$ , de acordo com a equação (AII.5)  $\alpha_n = 0$ .

Os possíveis valores ímpares de  $n$  para os quais  $\alpha_n$  pode ser não nulo, ou seja,  $\text{sen}(n\pi/3) \neq 0$ , são:  $n=1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$ . Estes valores obedecem à relação:

$$n = (6K \pm 1) \quad K=1, 2, 3, 4, \dots \quad (\text{AII.24})$$

Transformando em produto as somas de senos e cos senos da equação (AII.23) vem:

$$\begin{aligned}
\frac{\pm 2}{\sqrt{3}} \frac{\pi \alpha}{I_{s2}} = & \left\{ \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n+1)\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right] + \right. \\
& + \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right] - \\
& - \frac{2}{n+1} \operatorname{sen}\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n+1)\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right] - \\
& - \frac{2}{n-1} \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right] + \\
& + j \left[ \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n+1)\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right] \cos\left[(n+1)\left(\frac{\delta+\alpha}{2}\right)\right] + \right. \\
& + \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right] \cos\left[(n-1)\left(\frac{\delta+\alpha}{2}\right)\right] - \\
& - \frac{2}{n+1} \operatorname{sen}\left[\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)(n+1)\right] \cos\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] - \\
& \left. - \frac{2}{n-1} \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right)\right] \cos\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \right\} \quad (\text{AII.25})
\end{aligned}$$

mas  $\delta - \alpha = \mu$ , logo:

$$\begin{aligned}
\frac{\pm 2}{\sqrt{3}} \frac{\pi \alpha}{I_{s2}} = & \left\{ \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n+1)\frac{\mu}{2}\right] + \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n-1)\frac{\mu}{2}\right] - \right. \\
& - \frac{2}{n+1} \operatorname{sen}\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n+1)\frac{\mu}{2}\right] - \frac{2}{n-1} \operatorname{sen}\left[(n-1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \operatorname{sen}\left[(n-1)\frac{\mu}{2}\right] + \\
& + j \left\{ \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n+1)\frac{\mu}{2}\right] \cos\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] + \frac{2}{n} \operatorname{sen}\left[(n-1)\frac{\mu}{2}\right] \cos\left[(n-1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] - \right. \\
& \left. - \frac{2}{n+1} \operatorname{sen}\left[\frac{\mu}{2}(n+1)\right] \cos\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] - \frac{2}{n-1} \operatorname{sen}\left[(n-1)\frac{\mu}{2}\right] \cos\left[(n+1)\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)\right] \right\} \quad (\text{AII.26})
\end{aligned}$$

Sejam as expressões:

$$B = \frac{(n+1)(\alpha+\delta)}{2} \quad (\text{AII.27})$$

$$C = (n+1) \frac{\mu}{2} \quad (\text{AII.28})$$

$$D = \frac{(n-1)(\alpha+\delta)}{2} \quad (\text{AII.29})$$

$$E = (n-1) \frac{\mu}{2} \quad (\text{AII.30})$$

Substituindo na equação (AII.26), vem:

$$\frac{\pm 1}{\sqrt{3}} \frac{\pi \alpha_n}{I_{s2}} = \frac{1}{n} \text{senBsenC} + \frac{1}{n} \text{senDsenE} - \frac{1}{n+1} \text{senBsenC} - \frac{1}{(n-1)} \text{senDsenE} +$$

$$+ j \left[ \frac{1}{n} \text{senCcosB} + \frac{1}{n} \text{senEcosD} - \frac{1}{n+1} \text{senCcosB} - \frac{1}{n-1} \text{senEcosD} \right] \quad (\text{AII.31})$$

$$\frac{\pm 1}{\sqrt{3}} \frac{\pi \alpha_n}{I_{s2}} = \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) (\text{senBsenC}) + \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n-1} \right) \text{senDsenE} + j \left[ \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) \text{senCcosB} + \right.$$

$$\left. + \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n-1} \right) \text{senEcosD} \right] \quad (\text{AII.32})$$

$$\frac{\pm 1}{\sqrt{3}} \frac{\pi \alpha_n}{I_{s2}} = \left[ \frac{\text{senBsenC}}{n(n+1)} - \frac{\text{senDsenE}}{n(n-1)} \right] + j \left[ \frac{\text{senCcosB}}{n(n+1)} - \frac{\text{senEcosD}}{n(n-1)} \right] \quad (\text{AII.33})$$

O módulo de  $\alpha_n$  pode ser obtido de AII.33.

$$\frac{\pi^2 |\alpha_n|^2}{3 I_{s2}^2} = \frac{\text{sen}^2 \text{Bsen}^2 \text{C}}{n^2 (n+1)^2} + \frac{\text{sen}^2 \text{Dsen}^2 \text{E}}{n^2 (n-1)^2} - \frac{2 \text{senBsenCsenDsenE}}{n^2 (n-1)(n+1)} +$$

$$+ \frac{\text{sen}^2 \text{Ccos}^2 \text{B}}{n^2 (n+1)^2} + \frac{\text{sen}^2 \text{Ecos}^2 \text{D}}{n^2 (n-1)^2} - \frac{2 \text{senCcosBsenEcosD}}{n^2 (n+1)(n-1)} \quad (\text{AII.34})$$

$$\frac{\pi^2 |\alpha_n|^2}{3 I_{s2}^2} = \frac{\text{sen}^2 \text{C}}{n^2 (n+1)^2} + \frac{\text{sen}^2 \text{E}}{n^2 (n-1)^2} - \frac{2 \text{senCsenEcos(B-D)}}{n^2 (n-1)(n+1)} \quad (\text{AII.35})$$

$$\text{B-D} = \alpha + \delta = 2\alpha + \mu \quad (\text{AII.36})$$

Logo:

$$\frac{\pi^2}{3} \frac{|\alpha_n|^2}{I_{s2}^2} n^2 = \frac{\text{sen}^2 \text{C}}{(n+1)^2} + \frac{\text{sen}^2 \text{E}}{(n-1)^2} - \frac{2 \text{senCsenEcos(B-D)}}{(n-1)(n+1)} \quad (\text{AII.37})$$

Substituindo (AII.27), (AII.28), (AII.29), (AII.30) e (AII.36) em (AII.37), resulta:

$$\frac{\pi^2}{3} \frac{|\alpha_n|^2}{I_{s2}^2} n^2 = \left[ \frac{\text{sen}(n+1) \frac{\mu}{2}}{n+1} \right]^2 + \left[ \frac{\text{sen}(n-1) \frac{\mu}{2}}{n-1} \right]^2 -$$

$$- 2 \frac{\text{sen}\left[\frac{(n+1)\mu}{2}\right]}{n+1} \cdot \frac{\text{sen}\left[\frac{(n-1)\mu}{2}\right]}{n-1} \cos(2\alpha+\mu) \quad (\text{AII.38})$$

Seja:

$$H = \frac{\text{sen}(n+1)\frac{\mu}{2}}{n+1} \quad (\text{AII.39})$$

$$K = \frac{\text{sen}(n-1)\frac{\mu}{2}}{n-1} \quad (\text{AII.40})$$

Substituindo em (AII.38), tem-se:

$$\frac{\pi^2}{3} \frac{|\alpha_n|^2}{I_{s2}^2} n^2 = H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)$$

$$|\alpha_n| = \frac{\sqrt{3} I_{s2} \sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{n\pi} \quad (\text{AII.41})$$

mas:

$$I_{s2} = \frac{I_d}{\cos\alpha - \cos\delta}$$

logo:

$$|\alpha_n| = \frac{\sqrt{3} I_d \sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{n\pi(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (\text{AII.42})$$

O módulo da componente fundamental da corrente  $|I_n|$  é dado segundo a equação (AII.6) por:

$$|I_n| = 2|\alpha_n|$$

O valor eficaz é dado por:

$$I_n = \frac{2|\alpha_n|}{\sqrt{2}} \quad (\text{AII.43})$$

Logo:

$$I_n = \frac{2\sqrt{3} I_d \sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{n\pi \cdot \sqrt{2} (\cos\alpha - \cos\delta)}$$

$$I_n = \frac{\sqrt{6} I_d}{n\pi} \frac{\sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (\text{AII.44})$$

Tem-se:

$$I_{10} = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi}$$

$$\frac{I_n}{I_{10}} = \frac{\sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{n(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (\text{AII.45})$$

$$\frac{I_n}{I_{n0}} = \frac{\sqrt{H^2 + K^2 - 2HK \cos(2\alpha + \mu)}}{(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (\text{AII.46})$$

Para a componente fundamental não se pode aplicar a equação (AII.46) pois o termo K possui o denominador igual a zero.

De acordo com a equação (AII.9), fazendo-se  $n=1$ , vem:

$$\begin{aligned} \frac{\pi\alpha_1}{I_{s2}} &= [\cos\alpha \sin(\alpha + \pi/3) - \cos\alpha \sin(\alpha - \pi/3) - \cos\delta \sin(\delta + \pi/3) + \cos\delta \sin(\delta - \pi/3)] \\ &+ j[\cos\alpha \cos(\alpha + \pi/3) - \cos\alpha \cos(\alpha - \pi/3) + \cos\delta \cos(\delta - \pi/3) - \cos\delta \cos(\delta + \pi/3)] \\ &+ \frac{1}{2} \left[ \frac{-\sin(2\delta - \pi/3)}{2} + \frac{\sin(2\alpha - \pi/3)}{2} + \frac{\sin(2\delta + \pi/3)}{2} - \frac{\sin(2\alpha + \pi/3)}{2} \right] + \\ &+ \frac{j}{2} \left[ \frac{-\cos(2\delta - \pi/3)}{2} + \frac{\cos(2\alpha - \pi/3)}{2} + \frac{\cos(2\delta + \pi/3)}{2} - \frac{\cos(2\alpha + \pi/3)}{2} - \sqrt{3} \mu \right] \end{aligned} \quad (\text{AII.47})$$

Seja:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \left[ -\frac{\sin(2\delta - \pi/3)}{2} + \frac{\sin(2\alpha - \pi/3)}{2} + \frac{\sin(2\delta + \pi/3)}{2} - \frac{\sin(2\alpha + \pi/3)}{2} \right] + \\ &+ \frac{j}{2} \left[ \frac{-\cos(2\delta - \pi/3)}{2} + \frac{\cos(2\alpha - \pi/3)}{2} + \frac{\cos(2\delta + \pi/3)}{2} - \frac{\cos(2\alpha + \pi/3)}{2} - \sqrt{3} \mu \right] \end{aligned} \quad (\text{AII.48})$$

$$\begin{aligned} \frac{\pi\alpha_1}{I_{s2}} &= \{ \cos\alpha [\sin(\alpha + \pi/3) - \sin(\alpha - \pi/3)] + \cos\delta [\sin(\delta - \pi/3) - \sin(\delta + \pi/3)] \} + \\ &+ j \{ \cos\alpha [\cos(\alpha + \pi/3) - \cos(\alpha - \pi/3)] + \cos\delta [\cos(\delta - \pi/3) - \cos(\delta + \pi/3)] \} + F \end{aligned} \quad (\text{AII.49})$$

Transformando em produto as somas de senos e cos senos da equação (AII.49), vem:

$$\frac{\pi\alpha_1}{I_{s2}} = (2\cos^2\alpha\sin\frac{\pi}{3} - 2\cos^2\delta\sin\frac{\pi}{3}) + j(-2\cos\alpha\sin\alpha\sin\frac{\pi}{3} + 2\sin\delta\cos\delta\sin\frac{\pi}{3}) + F \quad (\text{AII.50})$$

$$\frac{\pi\alpha_1}{I_{s2}} = \sqrt{3}(\cos^2\alpha - \cos^2\delta) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(\sin 2\delta - \sin 2\alpha) + F \quad (\text{AII.51})$$

De (AII.48), transformando em produto a soma de senos e cossenos, vem:

$$F = \frac{1}{4}[-2\sin\frac{\pi}{3}\cos 2\alpha + 2\sin\frac{\pi}{3}\cos 2\delta] + \frac{j}{4}[2\sin 2\alpha\sin\frac{\pi}{3} - 2\sin 2\delta\sin\frac{\pi}{3} - 2\sqrt{3}\mu] \quad (\text{AII.52})$$

$$F = \frac{\sqrt{3}}{4}(\cos 2\delta - \cos 2\alpha) + j\frac{\sqrt{3}}{4}(\sin 2\alpha - \sin 2\delta - 2\mu) \quad (\text{AII.53})$$

Substituindo na equação (AII.51) e utilizando a inda as relações:

$$\cos^2\alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \quad (\text{AII.54})$$

$$\cos^2\delta = \frac{1 + \cos 2\delta}{2} \quad (\text{AII.55})$$

tem-se:

$$\frac{\pi\alpha_1}{I_{s2}} = \frac{\sqrt{3}}{4}(2\cos 2\alpha - 2\cos 2\delta - \cos 2\alpha + \cos 2\delta) + \frac{j\sqrt{3}}{4}(\sin 2\delta - \sin 2\alpha - 2\mu)$$

$$\frac{\pi\alpha_1}{I_{s2}} = \frac{\sqrt{3}}{4}(\cos 2\alpha - \cos 2\delta) + \frac{j\sqrt{3}}{4}(\sin 2\delta - \sin 2\alpha - 2\mu) \quad (\text{AII.56})$$

$$\alpha_1 = \frac{I_{s2}}{\pi} \left[ \frac{\sqrt{3}}{4}(\cos 2\alpha - \cos 2\delta) + \frac{j\sqrt{3}}{4}(\sin 2\delta - \sin 2\alpha - 2\mu) \right] \quad (\text{AII.57})$$

$$I_{s2} = \frac{I_d}{\cos\alpha - \cos\delta}$$

logo:

$$\alpha_1 = \frac{I_d}{\pi(\cos\alpha - \cos\delta)} \left[ \frac{\sqrt{3}}{4}(\cos 2\alpha - \cos 2\delta) + \frac{j\sqrt{3}}{4}(\sin 2\delta - \sin 2\alpha - 2\mu) \right] \quad (\text{AII.58})$$

Seja:

$$H_1 = (\cos 2\alpha - \cos 2\delta) \quad (\text{AII.59})$$

$$K_1 = (\sin 2\delta - \sin 2\alpha - 2\mu) \quad (\text{AII.60})$$

$$|\alpha_1| = \frac{\sqrt{3} I_d}{4\pi(\cos\alpha - \cos\delta)} \sqrt{H_1^2 + K_1^2} \quad (\text{AII.61})$$

O valor eficaz da componente fundamental da corrente é dado por:

$$I_1 = \frac{2|\alpha_1|}{\sqrt{2}}$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{6} I_d}{\pi 4(\cos\alpha - \cos\delta)} \sqrt{H_1^2 + K_1^2} \quad (\text{AII.62})$$

Tem-se:

$$\frac{I_1}{I_{10}} = \frac{\sqrt{H_1^2 + K_1^2}}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (\text{AII.63})$$

As expressões (AII.45), (AII.46) e (AII.63) foram utilizadas em um programa de computação para cálculo e simulação dos fatores de redução dos harmônicos, quando o efeito da comutação é considerado. O referido programa é apresentado no Capítulo II.

## APÊNDICE III

TENSÃO DE SAÍDA DO CONVERSOR DE 12 PULSOS PARA ÂNGULO  
DE COMUTAÇÃO MAIOR QUE  $30^\circ$

Em condições de curto circuito o ângulo de comutação pode atingir valores superiores a  $30^\circ$ .

Caso o ângulo de comutação seja maior que  $30^\circ$  haverá instantes em que as duas pontes possuirão válvulas comutando. A Figura AIII.1 ilustra a tensão de saída no conversor de 12 pulsos para  $\alpha=30^\circ$  e  $\mu=45^\circ$ .

As tensões de saída nos intervalos considerados resultam:

- intervalo 1:  $0^\circ < \omega t < 15^\circ$

$$UPN_1 = -\frac{3}{2} e_{bn_1}$$

$$UPN_2 = -\frac{3}{2} e_{bn_2}$$

$$UPN = -\frac{3}{2} E_m [\text{sen}(\omega t - \pi/2) + \text{sen}(\omega t - 2\pi/3)]$$

$$UPN = -\frac{3}{2} E_m [2\text{sen}(\omega t - 7\pi/12) \cos \pi/12]$$

$$UPN = 3E_m \text{sen}(\omega t - 19\pi/12)$$

como:

$$E_m = 180$$

$$UPN = 521,64 \text{sen}(\omega t - 19\pi/12)$$

- intervalo 2:  $15^\circ < \omega t < 30^\circ$

$$UPN_1 = e_{cb_1}$$

$$UPN_2 = -\frac{3}{2} e_{bn_2}$$

$$UPN = 581,769 \text{sen}(\omega t - 20\pi/12)$$

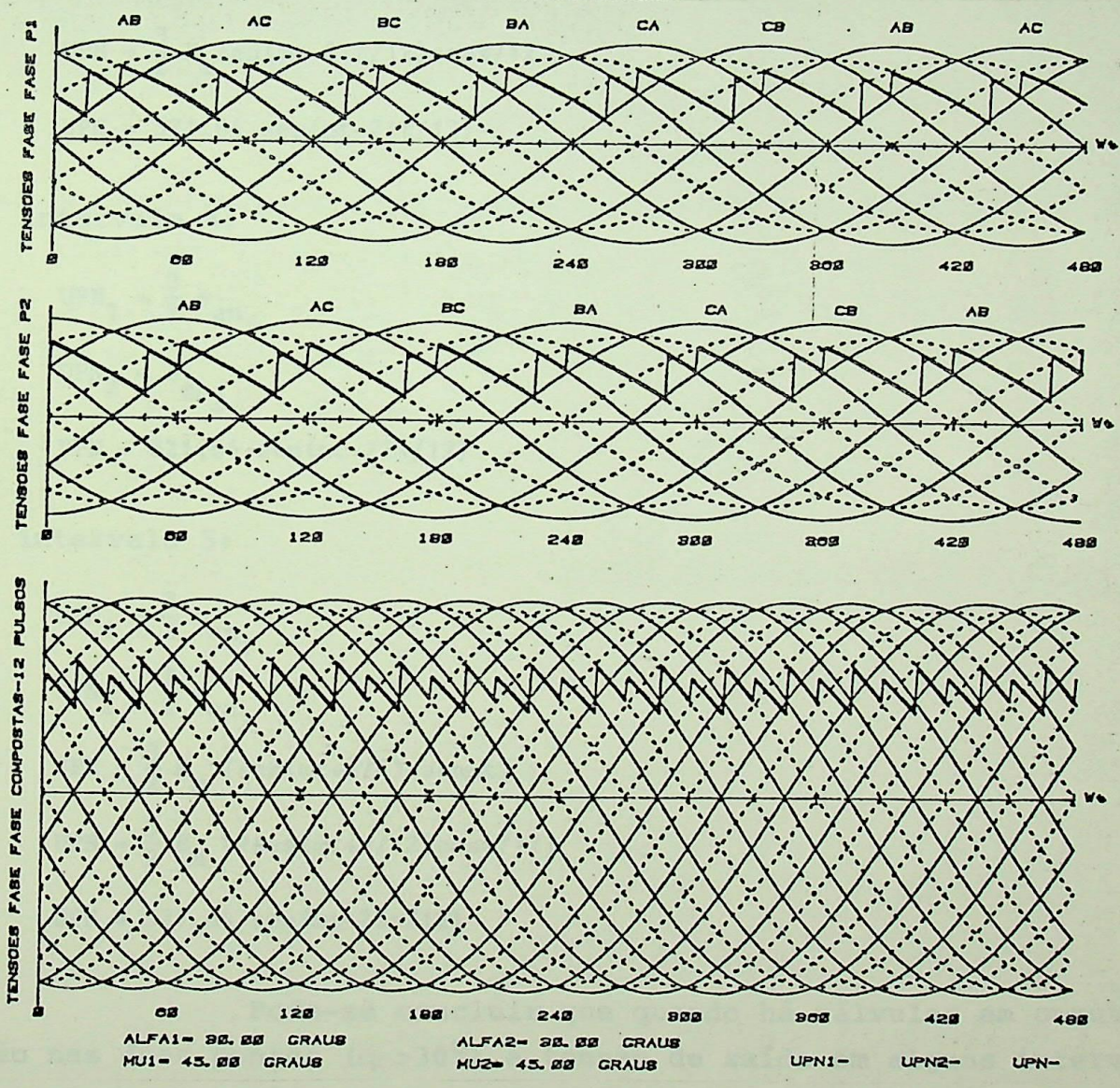


Figura AIII.1 - Tensão de saída no conversor de 12 pulsos  $\alpha=30^{\circ}$   $\mu=45^{\circ}$

- intervalo 3:

$$UPN_1 = \frac{3}{2} e_{an_1}$$

$$UPN_2 = -\frac{3}{2} e_{bn_2}$$

$$UPN = \frac{3}{2} [E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6) - E_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3)]$$

$$UPN = \frac{3}{2} E_m [2\text{sen}7\pi/12 \cos(\omega t - \pi/12)]$$

$$UPN = \frac{3}{2} [E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6) + E_m \text{sen}(\omega t - 5\pi/3)]$$

$$UPN = \frac{3}{2} [2E_m \text{sen}(\omega t - 9\pi/12) \cos 11\pi/12]$$

$$UPN = \frac{3}{2} E_m \text{sen}(\omega t - 21\pi/12) \cos \pi/12$$

$$UPN = 521,64 \text{ sen}(\omega t - 21\pi/12)$$

- intervalo 4:

$$UPN_1 = \frac{3}{2} e_{an_1}$$

$$UPN_2 = e_{ab_2}$$

$$UPN = 521,64 \text{ sen}(\omega t - 22\pi/12)$$

- intervalo 5:

$$UPN_1 = \frac{3}{2} e_{an_1}$$

$$UPN_2 = \frac{3}{2} e_{an_2}$$

$$UPN = \frac{3}{2} E_m [\text{sen}(\omega t + \pi/6) + \text{sen} \omega t]$$

$$UPN = \frac{3}{2} E_m [2\text{sen}(\omega t + \pi/12) \cos \pi/12]$$

$$UPN = 521,64 \text{ sen}(\omega t - 23\pi/12)$$

Pode-se concluir que quando há válvulas em comutação nas duas pontes ( $i_{\mu} > 30^\circ$ ) a tensão de saída em alguns intervalos de tempo está em fase com as curvas de tensões fase fase compostas ( $Y_1$  a  $Y_{12}$ ). A amplitude é, entretanto, menor.

Logo, tem-se:

- Curvas de comutação 2:

$$\begin{aligned}
 Y_{25} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 17\pi/12) \\
 Y_{26} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 19\pi/12) \\
 Y_{27} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 21\pi/12) \\
 Y_{28} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 23\pi/12) \\
 Y_{29} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 25\pi/12) \\
 Y_{30} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 27\pi/12) \\
 Y_{31} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 29\pi/12) \\
 Y_{32} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 31\pi/12) \\
 Y_{33} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 33\pi/12) \\
 Y_{34} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 35\pi/12) \\
 Y_{35} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 37\pi/12) \\
 Y_{36} &= 521,64 \operatorname{sen}(\theta - 39\pi/12)
 \end{aligned}$$

As seguintes conclusões são aplicáveis:

- 1ª)  $\mu \leq 30 \rightarrow$  As curvas utilizadas para o traçado das tensões de saída são  $Y_1$  a  $Y_{12}$  e  $Y_{13}$  a  $Y_{24}$ .
- 2ª)  $30 < \mu < 60 \rightarrow$  As curvas utilizadas para o traçado das tensões de saída são:  $Y_{13}$  a  $Y_{24}$  e  $Y_{25}$  a  $Y_{36}$ .

## APÊNDICE IV

## MANUAIS DE UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS

Os manuais de utilização dos programas são apresentados a seguir.

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE1 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR AS CORRENTES EM SISTEMA CONVERSOR  
DE SEIS PULSOS. O PROGRAMA TRACA AINDA AS  
TENSÕES  $UP_n$  e  $UN_n$

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====

A equacao de arquivo para execucao do programa deve ser

:FPSCE1

Após a compilacao e preparacao do programa aparecera a mensagem

Aguarde mensagem do operador para liberacao do ploter  
Digite S após a liberacao?

O comando intrinseco do programa emite uma mensagem para liberacao do ploter, nao sendo necessario comunicacao com o operador para tal. Caso se queira emitir uma nova mensagem inserir qualquer caracter diferente de S pressionando a tecla LFCR e aguardando resposta do operador

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

1) De os valores dos angulos alfa e delta

2) De os valores das correntes  $I_d$  e  $I_{S2}$

3) De o numero de curvas 1 e 2

Curvas1=3 para angulo de comutacao zero graus

Curvas1=6 para angulo de comutacao diferente de zero graus

Curvas2=10

4) De as penas para legenda, correntes, tensao  $UN_n$ , tensao  $UP_n$

Os numeros das penas sao: 1, 2, 3, 4

=====> OBSERVACOES <=====

1) Todos os dados devem ser separados por vinga

2) A resolucao do programa e de 1 grau

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE2 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR AS TENSOES EM SISTEMA CONVERSOR  
DE SEIS PULSOS. O PROGRAMA TRACA AS TENSOES  
UPn , UNn e UPN

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====

A equacao de arquivo para execucao do programa deve ser  
;FPSCE2

Após a compilacao e preparacao do programa aparecera a mensagem  
Aguarde mensagem do operador para liberacao do ploter  
Digite S após a liberacao?

O comando intrinseco do programa emite uma mensagem para  
liberacao do ploter, nao sendo necessario comunicacao  
com o operador para tal. Caso se queira emitir uma nova  
mensagem inserir qualquer caracter diferente de S  
pressionando a tecla LFCR e aguardando resposta do operador

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

1) De os valores do numero de curvas 1 e 2  
Angulo de comutacao zero graus

Curvas 1=3  
Curvas 2=6

Angulo de comutacao diferente de zero graus  
Curvas 1=6  
Curvas 2=12

2) De os valores dos angulos alfa, delta.

3) De os valores das correntes Id e IS2

4) De as penas para eixos, UNn, UPn, UPN, rodape

5) De as penas para tracado das tensoes nas valvulas  
Fornecer as penas para tracado das tensoes nas valvulas  
1 A 6

6) De as valvulas em que se deseja tracar as tensoes  
Inserir para as valvulas 1 a 6 os caracteres 0 ou 1

0-NAO TRACA A TENSAO NA VALVULA  
1-TRACA A TENSAO NA VALVULA

Os numeros das penas sao 1, 2, 3, 4

=====> OBSERVACOES <=====

1) Todos os dados devem ser separados por virgula

2) Caso nao se deseje tracar a tensao em nenhuma das valvulas  
inserir todos os caracteres iguais a 0 nos dados  
referentes ao item 6.

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE3 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR AS CORRENTES NAS VALVULAS EM SISTEMA  
CONVERSOR DE 12 PULSOS. O PROGRAMA TRACA AINDA  
AS SENOIDES DE REFERENCIA PARA OS CONVERSORES  
1 E 2.

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====

A equacao de arquivo para execucao do programa deve ser

;FPSCE3

Apos a compilacao e preparacao do programa aparecera a mensagem

Aguarde mensagem do operador para liberacao do ploter  
Digite S apos a liberacao?

O comando intrinseco do programa emite uma mensagem para  
liberacao do ploter, nao sendo necessario comunicacao  
com o operador para tal. Caso se queira emitir uma nova  
mensagem inserir qualquer caracter diferente de S  
pressionando a tecla LFCR e aguardando resposta do operador

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

- 1) De os valores dos angulos  $\alpha_1$ ,  $\delta_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\delta_2$
- 2) De as penas para correntes, senoides P1, senoides P2, rodape
- 3) De os valores das correntes ID1, IS21, ID2, IS22

Os numeros das penas sao: 1, 2, 3, 4

=====> OBSERVACOES <=====

- 1) Todos os dados devem ser separados por virgula
- 2) A resolucao do programa e de 1 grau
- 3) Os angulos devem ser fornecidos em graus

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE4 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR AS CORRENTES NAS FASES EM SISTEMA  
CONVERSOR DE 12 PULSOS. O PROGRAMA TRACA  
AINDA AS SENOIDES DE REFERENCIA PARA OS  
CONVERSORES 1 E 2.

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====  
A equacao de arquivo para execucao do programa deve ser  
;FPSCE4

Apos a compilacao e preparacao do programa aparecera a mensagem

Aguarde mensagem do operador para liberacao do ploter  
Digite S apos a liberacao?

O comando intrinseco do programa emite uma mensagem para  
liberacao do ploter, nao sendo necessario comunicacao  
com o operador para tal. Caso se queira emitir uma nova  
mensagem inserir qualquer caracter diferente de S  
pressionando a tecla LFCR e aguardando resposta do operador

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

- 1) De os valores dos angulos  $\alpha_1$ ,  $\delta_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\delta_2$
- 2) De as penas para correntes, senoides P1, senoides P2, rodape
- 3) De os valores das correntes ID1, IS21, ID2, IS22

Os numeros das penas sao: 1, 2, 3, 4

=====> OBSERVACOES <=====

- 1) Todos os dados devem ser separados por virgula
- 2) A resolucao do programa e de 1 grau
- 3) Os angulos devem ser fornecidos em graus

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE5 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR AS TENSOES EM SISTEMA CONVERSOR  
DE DOZE PULSOS.

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====

A equacao de arquivo para execucao do programa deve ser

:FPSCE5

Apos a compilacao e preparacao do programa aparecera a mensagem

Aguarde mensagem do operador para liberacao do ploter  
Digite S apos a liberacao?

O comando intrinseco do programa emite uma mensagem para liberacao do ploter, nao sendo necessario comunicacao com o operador para tal. Caso se queira emitir uma nova mensagem inserir qualquer caracter diferente de S pressionando a tecla LFCR e aguardando resposta do operador

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

1) De os valores dos angulos  $\alpha_1, \delta_1, \alpha_2, \delta_2$

2) De o numero de curvas 1, 2, 3

Angulo de comutacao zero graus

Curvas1=6

Curvas2=6

Curvas3=12

Angulo de comutacao diferente de zero graus

Curvas1=12

Curvas2=12

Curvas3=24

3) De as penas para gabarito das curvas, tensoes no conversor1, tensoes no conversor2, tensoes no conversor de 12 pulsos, legenda, eixos

4) De os valores das correntes  $ID_1, IS_{21}, ID_2, IS_{22}$

Os numeros das penas sao: 1, 2, 3, 4

=====> OBSERVACOES <=====

1) Todos os dados devem ser separados por virgula

2) A resolucao do programa e de 1 grau

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE6 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR OS VALORES DE PICO DAS CORRENTES  
DE CURTO CIRCUITO EM SISTEMA CONVERSOR DE  
6 PULSOS

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====  
As equacoes de arquivo para execucao do programa devem ser

```
;FILE FTN09=RALFA,OLD
;FILE FTN10=NN,OLD
;FILE FTN11=XC,OLD
;F PSCE6
```

Apos a compilacao e preparacao do programa aparecera a mensagem

Aguarde mensagem do operador para liberacao do ploter  
Digite S apos a liberacao?

O comando intrinseco do programa emite uma mensagem para liberacao do ploter, nao sendo necessario comunicacao com o operador para tal. Caso se queira emitir uma nova mensagem inserir qualquer caracter diferente de S pressionando a tecla LF $\overline{C}$ R e aguardando resposta do operador

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

- 1) De o valor de XD
- 2) De o valor da tolerancia para metodo iterativo

=====> DADOS EM ARQUIVO DE DISCO <=====

Deverao ser criados arquivos em disco com os dados de:

- 1) Angulos alfa-->Arquivo RALFA  
Numero de angulos do arquivo=13, sendo que cada linha do arquivo deve conter apenas um angulo em formato real
- 2) Intervalos de duracao de curto circuito--->Arquivo NN  
Numero de dados do arquivo=3, sendo que as cada linha do arquivo deve conter respectivamente os numeros inteiros 0, 1 e 2
- 3) Valores das reatancias de comutacao--->Arquivo XC  
Deverao ser fornecidos quatro valores de reatancias de comutacao sendo que cada linha do arquivo deve conter um valor real

=====> OBSERVACOES <=====

- 1) Os resultados sao apresentados em graficos

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE7 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR OS VALORES DE PICO DAS CORRENTES  
DE CURTO CIRCUITO EM SISTEMA CONVERSOR DE  
12 PULSOS

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====

As equacoes de arquivo para execucao do programa devem ser

```

:FILE FTN09=RALFA,OLD
:FILE FTN10=NN,OLD
:FILE FTN11=XC,OLD
:F PSCE7

```

Apos a compilacao e preparacao do programa aparecera a mensagem

Aguarde mensagem do operador para liberacao do ploter  
Digite S apos a liberacao?

O comando intrinseco do programa emite uma mensagem para liberacao do ploter, nao sendo necessario comunicacao com o operador para tal. Caso se queira emitir uma nova mensagem inserir qualquer caracter diferente de S pressionando a tecla LFCR e aguardando resposta do operador

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

1) De o valor de XD

2) De o valor da tolerancia para metodo iterativo

=====> DADOS EM ARQUIVO DE DISCO <=====

Deverao ser criados arquivos em disco com os dados de:

1) Angulos alfa-->Arquivo RALFA

Numero de angulos do arquivo=13, sendo que cada linha do arquivo deve conter apenas um angulo em formato real

2) Intervalos de duracao de curto circuito--->Arquivo NN

Numero de dados do arquivo=3, sendo que as cada linha do arquivo deve conter respectivamente os numeros inteiros 0, 1 e 2

3) Valores das reatancias de comutacao--->Arquivo XC

Deverao ser fornecidos quatro valores de reatancias de comutacao sendo que cada linha do arquivo deve conter um valor real

=====> OBSERVACOES <=====

1) Os resultados sao apresentados em graficos

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE8 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: DETERMINAR O FATOR DE REDUÇAO DOS HARMONICOS  
DAS CORRENTES DE ALIMENTAÇÃO DE CONVERSORES  
DE 6 PULSOS QUANDO SE LEVA EM CONSIDERAÇÃO O  
O EFEITO DA COMUTAÇÃO

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZAÇÃO \*\*\*\*\*

===== > EQUAÇÕES DE ARQUIVO <=====

As equações de arquivo para execução do programa devem ser

```
:FILE FTN07=HALFA,OLD
:FILE FTN08=N,OLD
:FILE FTN04;DEV=LP;CCTL
:FORTGO PSCE8,*FTN04
```

===== > DADOS EM ARQUIVO DE DISCO <=====

Deverão ser criados arquivos em disco com os dados de:

- 1) Ângulos alfa --> Arquivo HALFA  
Número de ângulos do arquivo=3, sendo que cada linha do  
arquivo deve conter apenas um ângulo em formato real
- 2) Ordem dos harmônicos ----- > Arquivo N  
Número de dados do arquivo=7, sendo que cada linha do  
arquivo deve conter respectivamente os números reais  
das ordens dos harmônicos considerados

===== > OBSERVAÇÕES <=====

- 1) Os resultados são apresentados em tabelas

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE9 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: TRACAR A RELACAO DOS VALORES EFICAZES DAS  
CORRENTES HARMONICAS DE CONVERSORES DE 6 PULSOS  
EM RELACAO AO VALOR EFICAZ DA COMPONENTE FUNDAMENTAL  
EM FUNCAO DO ANGULO DE COMUTACAO MU.

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====>EQUACOES DE ARQUIVO <=====

As equacoes de arquivo para execucao do programa devem ser

```
:FILE FTN07;DEV=24;CCTL
:FILE FTN08;DEV=24;CCTL
:FILE FTN09=HALFA,OLD
:FILE FTN10=N,OLD
:FORTRAN PSCE9,,$NULL
:PREP $OLDPASS,$NEWPASS;RL=RLPLOT21.PUB.SYS
:RUN $OLDPASS
```

=====>DADOS POR TERMINAL <=====

1) De as penas para eixos 1,2,3,4 e rodape

=====> DADOS EM ARQUIVO DE DISCO <=====

Deverao ser criados arquivos em disco com os dados de:

- 1) Angulos alfa-->Arquivo HALFA  
Numero de angulos do arquivo=5, sendo que cada linha do  
arquivo deve conter apenas um angulo em formato real
- 2) Ordem dos harmonicos----->Arquivo N  
Numero de dados do arquivo=4, sendo que cada linha do  
arquivo deve conter respectivamente os numeros reais  
das ordens dos harmonicos considerados

=====> OBSERVACOES <=====

- 1) Os resultados sao apresentados em graficos
- 2) O angulo alfa e tomado como parametro em cada curva
- 3) O programa traca 4 graficos simultaneamente

\*\*\*\*\* PROGRAMA PSCE10 \*\*\*\*\*

FINALIDADE: CALCULAR OS ANGULOS DE COMUTACAO QUANDO  
O EFEITO DA RESISTENCIA E CONSIDERADO

\*\*\*\*\* MANUAL DE UTILIZACAO \*\*\*\*\*

=====> EQUACOES DE ARQUIVO <=====

As equacoes de arquivo para execucao do programa devem ser

```
:FILE FTN07=RC,OLD
:FILE FTN08=XC,OLD
:FILE FTN09=Y,OLD
:FILE FTN10=TANFI,OLD
:FILE FTN11=ALFA,OLD
:FILE FTN04;DEV=LP;CCTL
:FORTGO PSCE10,*FTN04
```

=====> DADOS POR TERMINAL <=====

1) De os valores de corrente  $I_d$ , tensao  $E_m$ , tolerancia  
numero de angulos, numero de iteracoes por bissecao

2) De o limite inferior e o limite superior para calculo de MU

=====> DADOS EM ARQUIVO DE DISCO <=====

Deverao ser criados arquivos em disco com os dados de:

1) Resistencias de comutacao-->Arquivo RC

Numero de dados do arquivo=4, sendo que cada linha do  
arquivo deve conter apenas um valor em formato real

2) Reatancias de comutacao----->Arquivo XC

Numero de dados do arquivo=4, sendo que as cada linha do  
arquivo deve conter respectivamente os numeros reais  
das reatancias consideradas

3) Valores XC/RC----->Arquivo Y

Deverao ser fornecidos os valores das relacoes XC/RC  
sendo que cada linha do arquivo deve conter um valor real  
Numero de dados do arquivo:4

4) Valores RC/XC----->Arquivo TANFI

Deverao ser fornecidos os valores das relacoes RC/XC  
sendo que cada linha do arquivo deve conter um valor real  
Numero de dados do arquivo:4

5) Angulos de disparo----->Arquivo ALFA

Numero de dados do arquivo=4, sendo que cada linha do  
arquivo deve conter respectivamente os angulos de disparo  
considerados

=====> OBSERVACOES <=====

1) Os resultados sao apresentados em tabelas

2) Os dados por terminal devem ser fornecidos separados  
por virgula

3) O programa calcula o angulo de comutacao iterativamente  
sendo que as primeiras iteracoes sao feitas pelo metodo  
DA bissecao. O numero maximo de iteracoes e 100, e caso nao  
haja convergencia e emitida uma mensagem de erro.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] KIMBARK, E.W. - Direct Current Transmission, Vol. I, Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [2] MÖLTGEN, G. - Line Commutated Thyristor Converters, Siemens Aktiengesellschaft Pitman Publishing, London, 1972.
- [3] PETERSON, H.A.; PHADKE, A.G. and REITAN, D.K. - Transients in EHVDC Power Systems, Part I - Rectifier. Fault Current, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88 n<sup>o</sup> 7, July 1969.
- [4] KRISHNAN, T. and ROMASWAMI, B. - A Fast-Response DC Motor Speed Control System, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-10, N<sup>o</sup> 5, September/October 1974.
- [5] SEN, P.C. and MACDONALD, M. - Thyristorized DC Drives with Regenerative Braking and Speed Reversal, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-25, N<sup>o</sup> 4, November 1978.
- [6] OLIVEIRA, J.C.; COGO, J.R. - Transmissão em Corrente Contínua, Apostilas do Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos (CESE), Vol. I, Itajubá, 1982.
- [7] REEVE, J.; KAPOOR S.C. - Analysis of Transient Short-Circuit Currents in HVDC Power Systems, IEEE Paper 70 TP 533, July 1970.
- [8] UHLMANN, E. - Power Transmission by Direct Current, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1975.
- [9] PELLY, B.R. - Thyristor Phase Controlled Converters and Cycloconverters, Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [10] REEVE, J.; BARON, J.A. and KRISHNAYYA, P.C.S. - A General Approach to Harmonic Current Generation by HVDC Converters, IEEE Paper 69 TP 55 PWR.

- [11] REEVE, J.; KRISHNAYYA, P.C.S. - Unusual Current Harmonics Arising from High-Voltage DC Transmission - IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-87, nº3, pp. 883-893, march - 1968.
- [12] COGO, J.R.; OLIVEIRA, J.C.; REZEK, A.J.J.; ABREU, J.P.G.; - Influência do Ângulo de Defasagem de Transformadores na Eliminação de Componentes Harmônicos em Pontes Conversoras II? Seminário Interno de Pesquisa - EFEI - 1982 - Anais do II SIPq - pg. 84.
- [13] SÁ, J.S.; - Acionamentos Elétricos - Apostila - Escola Federal de Engenharia de Itajubá - 1981
- [14] SILVA, L.E.B.; SILVA, V.F. - Reguladores na Malha de Controle de Velocidade de Motores de Corrente Contínua. - Revista EFEI Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico - Vol. 10 - Nº1 1984.

