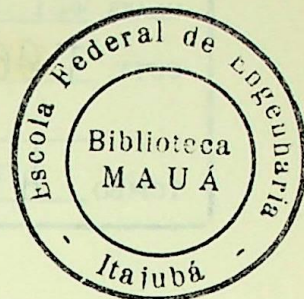


TESE

471

GERMANO LAMBERT TORRES



ANÁLISE DE PROBLEMAS TÍPICOS NA EXTRAÇÃO DE
PEQUENAS POTÊNCIAS POR EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS
NAS PROXIMIDADES DAS LINHAS ELÉTRICAS DE
ALTA TENSÃO

ORIENTADOR: PROF. RENATO DE AQUINO FARIA NUNES

CO-ORIENTADOR: PROF. ANTONIO EDUARDO HERMETO

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO APRESENTADO À
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA ESCOLA FEDERAL DE
ENGENHARIA DE ITAJUBÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELETRICA

ITAJUBÁ, MAIO DE 1986

"Quando te invoquei, atendeste-me e
multiplicaste a força em minh'alma.
Sim, Javē é excelso, mas olha o sím
ples e de longe conhece o soberbo."

(Sl. 138-4,6)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Renato de Azevedo Faria Nunes, orientador acadêmico,
do e atento, sempre firme nos momentos difíceis.

Ao Professor Dr. Antônio Eduardo Barbosa, co-orientador,
pessoas com seu apoio, confiança e forte incentivo.

Aos colegas do Instituto de Engenharia Elétrica pela ajuda e paciência
na elaboração deste trabalho.

Ao professor José Bandeira, amigo de toda a vida.

A minha esposa e filho pelo tempo que ficaram privados de meu corpo
vivo.

Aos meus pais, Germano e Dulce,
pela confiança e apoio prestado durante todo o curso, pela
realização dos sonhos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização
deste trabalho.

A minha esposa e filho,

Rosário e Bruno

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Dr. Renato de Aquino Faria Nunes, orientador dedicado e atento, sempre firme nos momentos difíceis.
- Ao Professor Dr. Antonio Eduardo Hermeto, co-orientador sempre presente com seu apoio, confiança e forte incentivo.
- Aos colegas do Instituto de Engenharia Elétrica pela ajuda e estímulo na elaboração deste trabalho.
- Ao Professor Jamil Haddad, amigo de todas as horas.
- À minha esposa e filho pelo tempo que ficaram privados de meu convívio.
- Ao Sr. Ronaldo Ivo Firmo, pela parte datilográfica, sempre desenvolvida com muita presteza e ao Sr. Argemiro dos Santos, pela execução dos desenhos.
- À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.
- À Deus, detentor de tudo e todos.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais	02
1.2 - Resumo Histórico	03
1.3 - Estrutura da Dissertação	04

CAPÍTULO 2 - EXTRAÇÃO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE UM CONDUTOR ISOLADO: ANÁLISE DE SENSIBILIDADES,

2.1. - Introdução	07
2.2. - Configurações Utilizadas	07
2.2.1 - Sistema de Transmissão A	10
2.2.2 - Sistema de Transmissão B	11
2.2.3 - Sistema de Transmissão C	12
2.2.4 - Condutor Isolado	13
2.2.5 - Cálculo da Matriz de Admitâncias Transversais ..	13
2.2.6 - Cálculo da Matriz de Impedâncias Longitudinais .	18
2.3. - Formulação Matemática da Tensão Induzida em um Condutor Isolado em Vazio	33
2.4. - Influência dos Campos Elétrico e Magnético	36
2.5. - Colocação de Carga no Condutor Isolado	38
2.6. - Proposta de um Circuito Ressonante	43

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DA TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR ISOLADO

3.1. - Introdução	62
3.2. - Propagação num Sistema de N Condutores: Teoria Modal de Propagação	63

3.3. - Estudo do Sistema Linha de Transmissão-Conductor Isolado Através da Teoria dos Quadripolos	66
3.4. - Análise de Sensibilidades	82

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DE UM CIRCUITO ELETRÔNICO DE CONTROLE DE TENSÃO

4.1. - Introdução	95
4.2. - Análise do Controle de Tensão Utilizando Tiristores em Anti-Paralelo Com Carga Fictícia	97
4.3. - Análise do Controle de Tensão Utilizando Tiristores em Anti-Paralelo no Terciário de um Transformador	102
4.4. - Resultados de Alguns Ensaios em Laboratório	106
4.5. - Análise Computacional	114

CAPÍTULO 5 - ESTUDO SOBRE FERRORESSONÂNCIA

5.1. - Introdução	160
5.2. - Ressonância Série	161
5.3. - O Fenômeno da Ferrorressonância	164
5.4. - Estudo da Possibilidade da Ocorrência de Ferrorressonân- cia no Sistema Conductor Isolado-Transformador Abaixador	175

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES GERAIS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185
----------------------------------	-----

ANEXO I - DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS UTILIZADOS

I.1. - Programa GLT3	188
I.2. - Programa GLT4	196
I.3. - Programa GJRC4	208

ANEXO II - APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE DISPARO DE TIRISTORES EM ANTI-PARALELO

II.1. - Introdução	213
II.2. - Regulador Eletrônico	213
II.3. - Sistema de Controle	219
II.4. - Módulos de Controle	221

RESUMO

A presente dissertação tem por objetivo analisar problemas típicos na extração de pequenas potências de uma linha de transmissão através do acoplamento eletrostático com um condutor isolado.

Esta análise começa por estudar a configuração do Sistema de Transmissão, calculando suas matrizes de admitâncias transversais e de impedâncias longitudinais. Em seguida, calcula-se a tensão induzida no condutor isolado. Coloca-se, então, uma carga em seus terminais, e verifica-se a existência de uma má regulação no circuito. Faz-se uma análise de sensibilidades relacionada com a capacidade de extração de potência do sistema quando a regulação de tensão é efetuada por um circuito ressonante LC. Surge, porém, um fator limitante que é a sobretensão em determinados equipamentos do circuito. Devido a isto, tenta-se resolver o problema da regulação, com um regulador eletrônico, que se mostra mais eficiente na solução deste problema.

Como a configuração é típica para o aparecimento do fenômeno de ferroressonância, é desenvolvida uma metodologia para o cálculo da carga mínima que deve ser ligada ao secundário do transformador para que este fenômeno não ocorra.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O progressivo esgotamento da capacidade hídrica para a geração de energia elétrica na região Sul-Sudeste, faz com que esta captação de energia primária aconteça cada vez mais distante dos grandes centros consumidores. Devido a isto, muito vem sendo investido na transmissão de grandes blocos de energia a grandes distâncias. Técnicas e modelagens refinadas sugerem a transmissão em extra-alta tensão (EAT) tanto em corrente alternada como, mais recentemente, em corrente contínua.

As rotas das linhas de transmissão, algumas vezes, atravessam pequenas comunidades, que requerem apenas alguns quilowatts de energia elétrica para seu abastecimento. É proibitivo, porém, uma transformação convencional pelo seu alto custo. A viabilização do fornecimento de energia a estas comunidades poderia ser feita com micro-centrais ou geração térmica diesel. Existe, entretanto, uma solução alternativa, muito menos dispendiosa, que seria a de captar esta energia através do campo elétrico criado pela linha de transmissão. Isto seria conseguido, estendendo-se um condutor paralelo a linha de transmissão e isolando-o. Ele ficaria sujeito, a um determinado potencial de forma que, ligando em um de seus extremos um transformador, este poderia alimentar a carga.

O objetivo da presente dissertação é o de formular e analisar certos problemas típicos inerentes a este tipo de solução, propondo algumas maneiras de melhorar o fornecimento de energia elétrica a estas pequenas comunidades, supridas através de tal sistema.

1.2 - RESUMO HISTÓRICO

A extração de potência através do acoplamento capacitivo tem sido aplicada e comercializada principalmente por canadenses e russos, sendo o primeiro protótipo posto a funcionar no ocidente, em 1962. O que levou à adoção desta técnica foi, principalmente, a necessidade do suprimento de energia em vilas próximas a linhas de transmissão em regiões remotas.

Uma grande contribuição para o desenvolvimento deste campo foi dada por V.D. Yurenkov [2], em 1965.

Em 1977, R. Blais e R. Berthiaume [3] propuseram uma técnica para regular a tensão na carga e, assim, conseguir extrair uma quantidade mais significativa de potência. Em 1980, apresentaram uma análise mais detalhada do trabalho anterior [4,5].

Em 1981, a Eletroperu S.A., em consórcio com a B.G. Checo International (Canadá), colocou em funcionamento sua primeira estação supridora da cidade de Nahuimpuquio, nos Andes [6]. Os resultados experimentais obtidos na instalação foram publicados pelos engenheiros da Companhia, F.L. Sifuentes e R.S. Rojas, em [7].

Esta é a segunda dissertação de mestrado produzida na Escola Federal de Engenharia de Itajubá, versando sobre este assunto. A primeira, de J.F. Rodrigues [1], versou sobre a formulação básica do problema com o duplo intuito de desenvolver uma formulação matemática corrente e, com base nesta, justificar a viabilidade técnica da solução.

No entanto, nenhum dos referidos trabalhos menciona certos aspectos importantes, tais como, por exemplo, a variação da tensão induzida no condutor isolado em função da carga da linha principal, que em certas configurações pode até inviabilizar o projeto, ou a possível ocorrência do fenômeno de ferroressonância. Estes serão alguns dos problemas analisados no decorrer desta tese.

1.3 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho encontra-se desenvolvido em capítulos que apresentam a estrutura a seguir.

O capítulo II descreve os cálculos dos parâmetros elétricos da linha e apresenta as matrizes que representam os Sistemas Elétricos que serão utilizados durante todo o trabalho. Apresenta, também, uma análise de sensibilidades sobre a tensão induzida no condutor isolado, bem como, faz um estudo sobre a proposta de se controlar a tensão nos terminais da carga através de um circuito ressonante LC.

O Capítulo III descreve uma técnica mais exata para

o equacionamento do problema da extração de potência, utilizando a Teoria Modal de Propagação e estuda a viabilidade da extração de potência para diversos tipos de comprimentos de linhas.

O capítulo IV apresenta a análise de um regulador eletrônico com o objetivo de controlar a tensão nos terminais da carga. São descritas duas configurações com este dispositivo. Fazem-se, então, simulações experimentais e computacionais com este circuito, para várias condições de funcionamento.

O capítulo V apresenta um estudo sobre ferroressonância série, que pode vir a acontecer caso o transformador que está ligado ao condutor isolado venha a operar em vazio ou em baixa carga. É apresentada uma metodologia para o cálculo da impedância mínima que deve ser ligada ao secundário do transformador para que este opere sem a possibilidade de ocorrência deste fenômeno.

Finalmente, no capítulo VI, apresentam-se as principais conclusões derivadas do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2

EXTRAÇÃO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE UM CONDUCTOR ISOLADO: ANÁLISE DE SENSIBILIDADES

CAPITULO 2

EXTRAÇÃO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE UM CONDUTOR ISOLADO: ANÁLISE DE SENSIBILIDADES

2.1 - INTRODUÇÃO

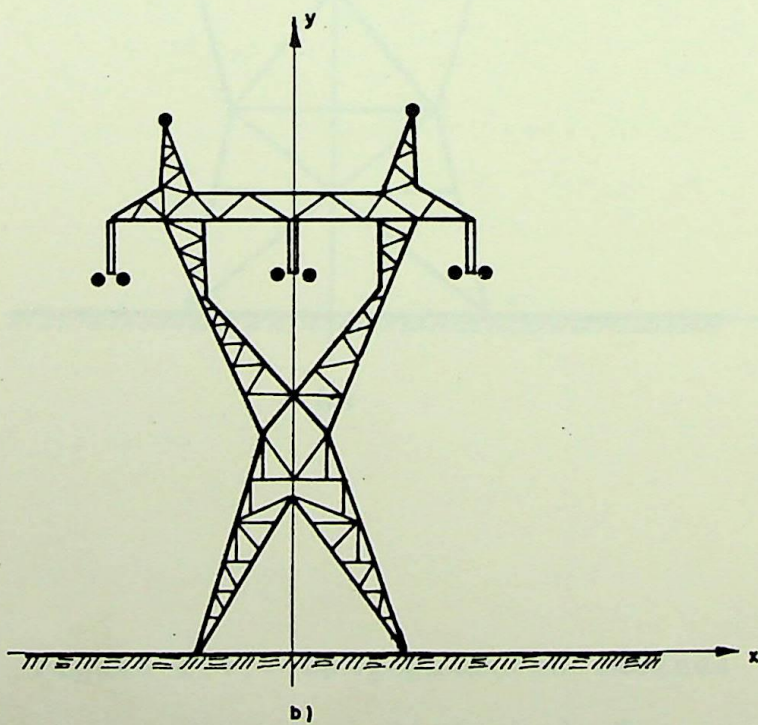
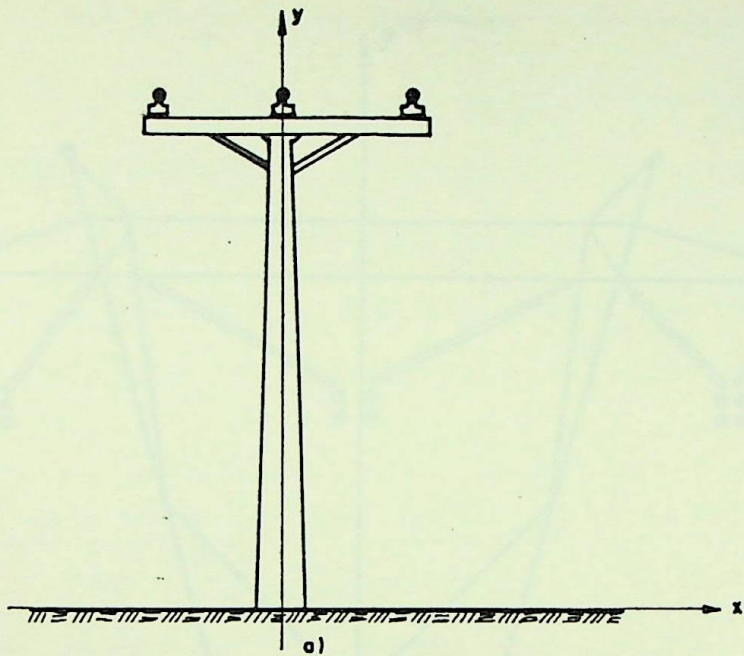
Devido a ser, este estudo, relativamente novo, pouco se conhece do comportamento do condutor isolado face a algumas variações na linha principal. Por este motivo, faz-se necessário um estudo mais apurado para que se possa adquirir maior sensibilidade do fenômeno.

Inicialmente, mostrar-se-ã, a influência de cada um dos campos, elétrico e magnético, no condutor isolado. Em seguida, serão feitas algumas análises com diversas impedâncias terminais no condutor isolado, propostas algumas soluções para melhor qualidade no fornecimento de energia ao consumidor do condutor isolado e verificadas as potências extraídas.

Neste capítulo, também, serão feitas algumas propostas de regulação da tensão através de um circuito ressonante, LC.

2.2 - CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS

Para maior facilidade de análise e comparação dos resultados serão utilizadas três configurações básicas. As duas primeiras, bastante comuns no Sistema Elétrico Brasileiro e a terceira uma configuração utilizada no Sistema Elétrico Canadense.



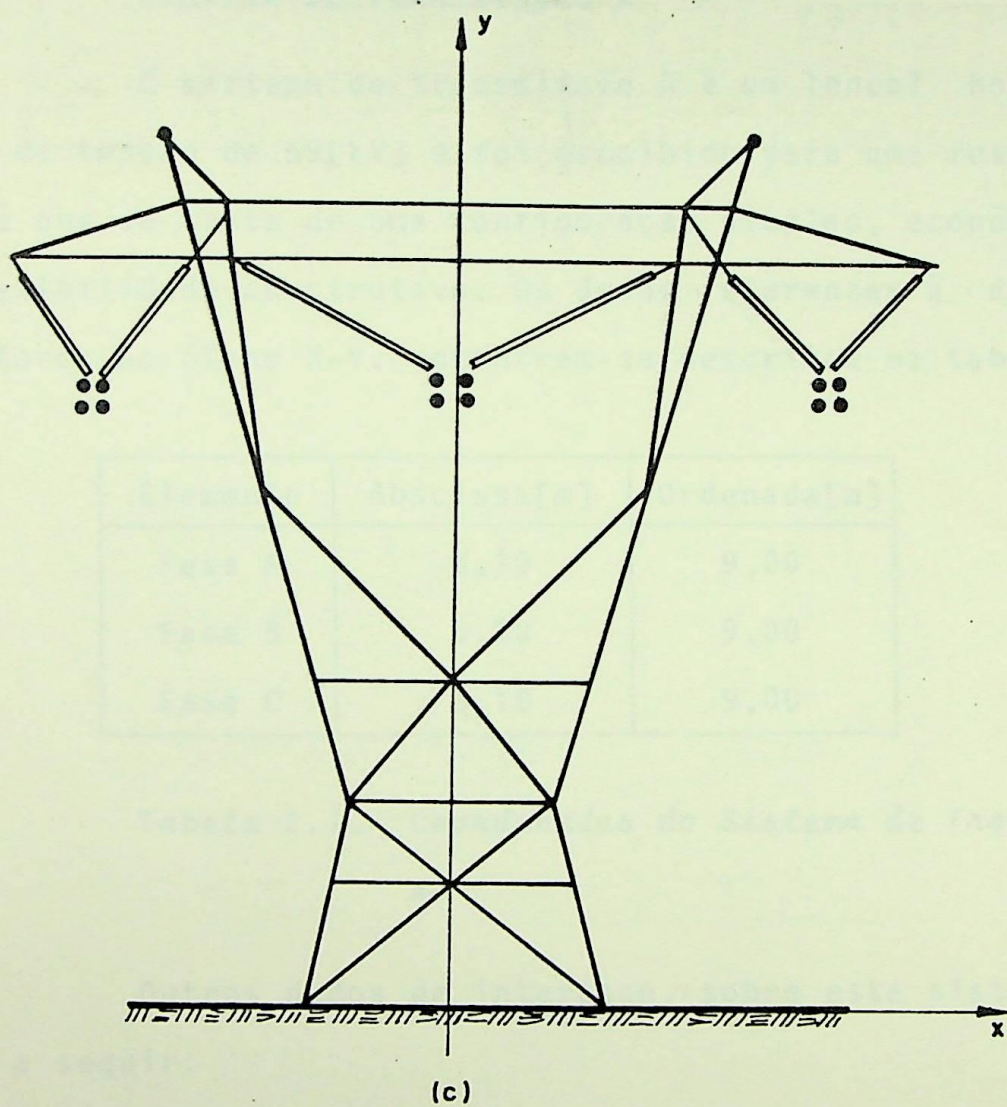


Figura 2.1.- Configurações Básicas

(a) Sistema de Transmissão A

(b) Sistema de Transmissão B

(c) Sistema de Transmissão C

2.2.1 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO A

O sistema de transmissão A é um lençol horizontal, na classe de tensão de 69[kV] e foi escolhido para uma futura construção, já que se trata de uma configuração simples, econômica e de grande flexibilidade construtiva. Os dados referentes à disposição dos condutores no plano X-Y, encontram-se descritos na tabela 2.1.

Elemento	Abcissa[m]	Ordenada[m]
Fase A	-3,10	9,00
Fase B	0,00	9,00
Fase C	3,10	9,00

Tabela 2.1.- Coordenadas do Sistema de Transmissão A.

Outros dados de interesse, sobre este sistema estão listados, a seguir:

Condutor de fase: 0xlip

Bundle: 1

Flecha dos condutores de fase: 1,5[m]

Resistividade do solo: 100[Ω .m]

Corrente nos condutores de fase: 200[A]

Ângulo de fase da corrente: 30^o

2.2.2 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO B

O sistema de transmissão B é da classe de 345[kV] e foi escolhido para uma visão dos fenômenos em uma classe de tensão superior e por sua maior complexidade. É um sistema de circuito simples com dois cabos de guarda multiterrados. Os dados referentes à disposição dos condutores no plano X-Y, encontram-se descritos na tabela 2.2.

Elemento	Abcissa[m]	Ordenada[m]
Fase A	-10,00	19,40
Fase B	0,00	19,40
Fase C	10,00	19,40
PR-1	- 4,80	29,40
PR-2	4,80	29,40

Tabela 2.2.- Coordenadas do Sistema de Transmissão B

Outros dados de interesse, sobre este sistema estão listados a seguir:

Condutor de fase: Grosbeak

Bundle: 2

Espaçamento: 0,40[m]

Flecha dos condutores de fase: 9,70[m]

Cabo de guarda: HS

Flecha dos cabos de guarda: 9,00[m]

Resistividade do solo: 100[Ω .m]

2.2.3 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO C

O Sistema de Transmissão C é da classe de 750[kV] e foi escolhido para uma visão dos fenômenos que ocorrem quando do transporte de grandes blocos de potência a grandes distâncias. É um sistema de circuito simples com dois cabos de guarda multiaterra dos. Os dados referentes à disposição dos condutores no plano X-Y, encontram-se descritos na tabela 2.3.

Elemento	Abcissa[m]	Ordenada[m]
Fase A	-15,24	32,00
Fase B	0,00	32,00
Fase C	15,24	32,00
PR-1	-10,50	41,50
PR-2	10,50	41,50

Tabela 2.3.- Coordenadas do Sistema de Transmissão C

Outros dados de interesse, sobre este sistema estão

listados a seguir:

Condutor da fase: Grosbeak

Bundle: 4

Espaçamento: 0,40[m]

Flecha dos condutores de fase: 15,70[m]

Cabo de guarda: Penguim

Flecha dos cabos de guarda: 15,00[m]

Resistividade do solo: 100[Ω .m]

2.2.4 - CONDUTOR ISOLADO

O condutor isolado no Sistema de Transmissão A será do mesmo tipo do condutor de fase, estará localizado segundo as coordenadas (3,10[m]; 8,50[m]), tendo um comprimento de 1[km].

O condutor isolado no Sistema de Transmissão B será também, do mesmo tipo do condutor de fase deste sistema, estará localizado segundo as coordenadas (10,00[m]; 15,00[m]), tendo um comprimento de 10[km].

O condutor isolado no Sistema de Transmissão C será também, do mesmo tipo do condutor de fase deste sistema, estará localizado segundo as coordenadas (18,00[m]; 15,00[m]), tendo um comprimento de 10[km].

2.2.5 - CÁLCULO DA MATRIZ DE ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS

A matriz de admitâncias transversais $\underline{\dot{Y}}$ depende da geometria dos condutores na linha de transmissão. Trata-se de uma matriz com elementos de parte imaginária, somente, pois a parte real é desprezível devido aos valores da condutância no ar.

Esta matriz, em última análise, representa o aspecto capacitivo de uma linha de transmissão, podendo ser definida segundo a equação (2.1).

$$\underline{\dot{Y}} = j \omega \underline{C} \quad (2.1)$$

onde a matriz \underline{C} é a inversa da matriz dos coeficientes de potencial, também denominada matriz dos coeficientes de campo elétrico ou de Maxwell.

A matriz $\dot{\underline{Y}}$ pode ser representada pela equação (2.2) em forma particionada.

$$\dot{\underline{Y}} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{Y}}_{CC} & \dot{\underline{Y}}_{CG} & \dot{\underline{Y}}_{CI} \\ \dot{\underline{Y}}_{GC} & \dot{\underline{Y}}_{GG} & \dot{\underline{Y}}_{GI} \\ \dot{\underline{Y}}_{IC} & \dot{\underline{Y}}_{IG} & \dot{\underline{Y}}_{II} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde os índices C, I e G representam, respectivamente, os condutores de fase, os condutores isolados e os cabos de guarda. As sub-matrizes da diagonal, $\dot{\underline{Y}}_{CC}$, $\dot{\underline{Y}}_{II}$ e $\dot{\underline{Y}}_{GG}$, são do tipo própria, pois somente estão relacionadas com si mesmas, enquanto as outras sub-matrizes são do tipo mútua, pois, estas, se relacionam com os outros grupos.

O Sistema de Transmissão A apresentará uma matriz de admitâncias transversais do tipo 4x4, expressa na tabela 2.4, em [siemens/km].

!	Y(1,1)=	.425988E-05	!
!	Y(1,2)=	-.112328E-05	!
!	Y(1,3)=	-.288056E-06	!
!	Y(1,4)=	-.255968E-06	!
!	Y(2,1)=	-.112328E-05	!
!	Y(2,2)=	.458821E-05	!
!	Y(2,3)=	-.746672E-06	!
!	Y(2,4)=	-.687897E-06	!
!	Y(3,1)=	-.288056E-06	!
!	Y(3,2)=	-.746672E-06	!
!	Y(3,3)=	.650355E-05	!
!	Y(3,4)=	-.384225E-05	!
!	Y(4,1)=	-.255968E-06	!
!	Y(4,2)=	-.687897E-06	!
!	Y(4,3)=	-.384225E-05	!
!	Y(4,4)=	.655062E-05	!

Tabela 2.4.- Matriz das Admitâncias Transversais do Sistema de Transmissão A.

O Sistema de Transmissão B apresentará uma matriz de admitâncias transversais do tipo 6x6, expressa na tabela 2.5, em [siemens/km].

!	Y(1,1)=	.375798E-05	!
!	Y(1,2)=	-.505137E-06	!
!	Y(1,3)=	-.122675E-06	!
!	Y(1,4)=	-.371709E-06	!
!	Y(1,5)=	-.170645E-06	!
!	Y(1,6)=	-.580372E-07	!
!	Y(2,1)=	-.505137E-06	!
!	Y(2,2)=	.388429E-05	!
!	Y(2,3)=	-.454206E-06	!
!	Y(2,4)=	-.328315E-06	!
!	Y(2,5)=	-.324617E-06	!
!	Y(2,6)=	-.228177E-06	!
!	Y(3,1)=	-.122675E-06	!
!	Y(3,2)=	-.454206E-06	!
!	Y(3,3)=	.393952E-05	!
!	Y(3,4)=	-.158962E-06	!
!	Y(3,5)=	-.346843E-06	!
!	Y(3,6)=	-.755285E-06	!
!	Y(4,1)=	-.371709E-06	!
!	Y(4,2)=	-.328315E-06	!
!	Y(4,3)=	-.158962E-06	!
!	Y(4,4)=	.256067E-05	!
!	Y(4,5)=	-.365170E-06	!
!	Y(4,6)=	-.565596E-07	!
!	Y(5,1)=	-.170645E-06	!
!	Y(5,2)=	-.324617E-06	!
!	Y(5,3)=	-.346843E-06	!
!	Y(5,4)=	-.365170E-06	!
!	Y(5,5)=	.256332E-05	!
!	Y(5,6)=	-.107191E-06	!
!	Y(6,1)=	-.580372E-07	!
!	Y(6,2)=	-.228177E-06	!
!	Y(6,3)=	-.755285E-06	!
!	Y(6,4)=	-.565596E-07	!
!	Y(6,5)=	-.107191E-06	!
!	Y(6,6)=	.312374E-05	!

Tabela 2.5.- Matriz das Admitâncias Transversais do Sistema de Transmissão B.

O Sistema de Transmissão C apresentará uma matriz de admitâncias transversais do tipo 6×6 , expressa na tabela 2.6, em [siemens/km].

!	Y(1,1)=	.413944E-05	!
!	Y(1,2)=	-.646549E-06	!
!	Y(1,3)=	-.171110E-06	!
!	Y(1,4)=	-.478667E-06	!
!	Y(1,5)=	-.161683E-06	!
!	Y(1,6)=	-.217517E-07	!
!	Y(2,1)=	-.646549E-06	!
!	Y(2,2)=	.426529E-05	!
!	Y(2,3)=	-.642358E-06	!
!	Y(2,4)=	-.351067E-06	!
!	Y(2,5)=	-.350589E-06	!
!	Y(2,6)=	-.767430E-07	!
!	Y(3,1)=	-.171110E-06	!
!	Y(3,2)=	-.642358E-06	!
!	Y(3,3)=	.415153E-05	!
!	Y(3,4)=	-.161009E-06	!
!	Y(3,5)=	-.476615E-06	!
!	Y(3,6)=	-.199736E-06	!
!	Y(4,1)=	-.478667E-06	!
!	Y(4,2)=	-.351067E-06	!
!	Y(4,3)=	-.161009E-06	!
!	Y(4,4)=	.243559E-05	!
!	Y(4,5)=	-.224537E-06	!
!	Y(4,6)=	-.148250E-07	!
!	Y(5,1)=	-.161683E-06	!
!	Y(5,2)=	-.350589E-06	!
!	Y(5,3)=	-.476615E-06	!
!	Y(5,4)=	-.224537E-06	!
!	Y(5,5)=	.243590E-05	!
!	Y(5,6)=	-.351012E-07	!
!	Y(6,1)=	-.217517E-07	!
!	Y(6,2)=	-.767430E-07	!
!	Y(6,3)=	-.199736E-06	!
!	Y(6,4)=	-.148250E-07	!
!	Y(6,5)=	-.351012E-07	!
!	Y(6,6)=	.325924E-05	!

Tabela 2.6.- Matriz das Admitâncias Transversais do Sistema de Transmissão C.

Nos Sistemas de Transmissão B e C, os cabos de guarda são multiterrados. Esta condição permite a eliminação das linhas e colunas de índice 4 e 5, que são referentes aos mesmos. Logo, resultam as matrizes de admitâncias reduzidas para estes sistemas, mostradas nas tabelas 2.7 e 2.8, em [siemens/km].

!	Y(1,1)=	.375798E-05	!
!	Y(1,2)=	-.505137E-06	!
!	Y(1,3)=	-.122675E-06	!
!	Y(1,4)=	-.580372E-07	!
!	Y(2,1)=	-.505137E-06	!
!	Y(2,2)=	.388429E-05	!
!	Y(2,3)=	-.454206E-06	!
!	Y(2,4)=	-.228177E-06	!
!	Y(3,1)=	-.122675E-06	!
!	Y(3,2)=	-.454206E-06	!
!	Y(3,3)=	.393952E-05	!
!	Y(3,4)=	-.755285E-06	!
!	Y(4,1)=	-.580372E-07	!
!	Y(4,2)=	-.228177E-06	!
!	Y(4,3)=	-.755285E-06	!
!	Y(4,4)=	.312374E-05	!

Tabela 2.7.- Matriz das Admitâncias Transversais Reduzida do Sistema de Transmissão B.

```

-----
!   Y(1,1)=  .413944E-05   !
!   Y(1,2)= -.646549E-06   !
!   Y(1,3)= -.171110E-06   !
!   Y(1,4)= -.217517E-07   !
!   Y(2,1)= -.646549E-06   !
!   Y(2,2)=  .426529E-05   !
!   Y(2,3)= -.642358E-06   !
!   Y(2,4)= -.767430E-07   !
!   Y(3,1)= -.171110E-06   !
!   Y(3,2)= -.642358E-06   !
!   Y(3,3)=  .415153E-05   !
!   Y(3,4)= -.199736E-06   !
!   Y(4,1)= -.217517E-07   !
!   Y(4,2)= -.767430E-07   !
!   Y(4,3)= -.199736E-06   !
!   Y(4,4)=  .325924E-05   !
-----

```

Tabela 2.8.- Matriz das Admitâncias Transversais Reduzida do Sistema de Transmissão C.

2.2.6 - CÁLCULO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS

A matriz de impedâncias longitudinais $\underline{\dot{Z}}$ pode ser dividida em três partes independentes; uma, devido aos próprios condutores, $\underline{\dot{Z}}_c$; outra, devido à geometria dos condutores da linha, $\underline{\dot{Z}}_g$; e a última, a correção de Carson, que representa a influência do retorno pelo solo, $\underline{\dot{Z}}_t$. Portanto, pode-se expressar a matriz de impedâncias longitudinais através da equação (2.3).

$$\underline{\dot{Z}} = \underline{\dot{Z}}_c + \underline{\dot{Z}}_g + \underline{\dot{Z}}_t \quad (2.3)$$

A matriz de impedâncias que contém os efeitos dos

próprios condutores, $\dot{\underline{Z}}_c$, tem seu cálculo representado na equação (2.4), que é constituída por uma parte real, a resistência ôhmica a 60[Hz], e por uma parte imaginária, a indutância interna, obtida a travês do raio médio geométrico.

$$\dot{\underline{Z}}_c = \underline{R}_c + j\underline{X}_c \quad (2.4)$$

A matriz de impedância devido a geometria da linha, $\dot{\underline{Z}}_g$, é calculada através da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell, a qual está expressa na equação (2.5), possuindo apenas parte imaginária, \underline{X}_g .

$$\dot{\underline{Z}}_g = j\underline{X}_g \quad (2.5)$$

A matriz de impedâncias que contém os efeitos de retorno pelo solo, $\dot{\underline{Z}}_t$, é calculada com o uso da série infinita de Carson, truncando-a, para problemas em sistemas de energia elétrica, em geral, para $r < 5$. A equação (2.6) mostra a parte real, \underline{P} , e a parte imaginária, \underline{Q} , as quais compõem a matriz.

$$\dot{\underline{Z}}_t = \underline{P} + j\underline{Q} \quad (2.6)$$

Para o Sistema de Transmissão A obtêm-se as matrizes $\dot{\underline{Z}}_c$, $\dot{\underline{Z}}_g$ e $\dot{\underline{Z}}_t$, representadas nas tabelas 2.9, 2.10 e 2.11, respectivamente, em [Ω/km].

!	R(1,1)=	.2977000	I(1,1)=	.1977640	!
!	R(1,2)=	.0000000	I(1,2)=	.0000000	!
!	R(1,3)=	.0000000	I(1,3)=	.0000000	!
!	R(1,4)=	.0000000	I(1,4)=	.0000000	!
!	R(2,1)=	.0000000	I(2,1)=	.0000000	!
!	R(2,2)=	.2977000	I(2,2)=	.1977640	!
!	R(2,3)=	.0000000	I(2,3)=	.0000000	!
!	R(2,4)=	.0000000	I(2,4)=	.0000000	!
!	R(3,1)=	.0000000	I(3,1)=	.0000000	!
!	R(3,2)=	.0000000	I(3,2)=	.0000000	!
!	R(3,3)=	.2977000	I(3,3)=	.1977640	!
!	R(3,4)=	.0000000	I(3,4)=	.0000000	!
!	R(4,1)=	.0000000	I(4,1)=	.0000000	!
!	R(4,2)=	.0000000	I(4,2)=	.0000000	!
!	R(4,3)=	.0000000	I(4,3)=	.0000000	!
!	R(4,4)=	.2977000	I(4,4)=	.1977640	!

Tabela 2.9.- Matriz de Impedâncias Longitudinais, Contribuição Própria dos Condutores, do Sistema de Transmissão A.

!	I(1,1)=	.4131849	!
!	I(1,2)=	.1246763	!
!	I(1,3)=	.0763438	!
!	I(1,4)=	.0740173	!
!	I(2,1)=	.1246763	!
!	I(2,2)=	.4131849	!
!	I(2,3)=	.1246763	!
!	I(2,4)=	.1213900	!
!	I(3,1)=	.0763438	!
!	I(3,2)=	.1246763	!
!	I(3,3)=	.4131849	!
!	I(3,4)=	.2584286	!
!	I(4,1)=	.0740173	!
!	I(4,2)=	.1213900	!
!	I(4,3)=	.2584286	!
!	I(4,4)=	.4082872	!

Tabela 2.10.- Matriz de Impedâncias Longitudinais, Contribuição da Geometria, do Sistema de Transmissão A.

!	R(1,1)=	.0580438	I(1,1)=	.3013009	!
!	R(1,2)=	.0580424	I(1,2)=	.2998933	!
!	R(1,3)=	.0580383	I(1,3)=	.2959635	!
!	R(1,4)=	.0580740	I(1,4)=	.2980070	!
!	R(2,1)=	.0580424	I(2,1)=	.2998933	!
!	R(2,2)=	.0580438	I(2,2)=	.3013009	!
!	R(2,3)=	.0580424	I(2,3)=	.2998933	!
!	R(2,4)=	.0580781	I(2,4)=	.3021728	!
!	R(3,1)=	.0580383	I(3,1)=	.2959635	!
!	R(3,2)=	.0580424	I(3,2)=	.2998933	!
!	R(3,3)=	.0580438	I(3,3)=	.3013009	!
!	R(3,4)=	.0580795	I(3,4)=	.3036703	!
!	R(4,1)=	.0580740	I(4,1)=	.2980070	!
!	R(4,2)=	.0580781	I(4,2)=	.3021728	!
!	R(4,3)=	.0580795	I(4,3)=	.3036703	!
!	R(4,4)=	.0581153	I(4,4)=	.3061214	!

Tabela 2.11.- Matriz de Impedâncias Longitudinais, Contribuição da Influência de Solo, do Sistema de Transmissão A.

Para o Sistema de Transmissão B obtêm-se as matrizes $\dot{\underline{Z}}_c$, $\dot{\underline{Z}}_g$ e $\dot{\underline{Z}}_t$, representadas nas tabelas 2.12, 2.13 e 2.14, respectivamente, em [Ω/km].

!	R(1,1)=	.0502500	I(1,1)=	.0078484	!
!	R(1,2)=	.0000000	I(1,2)=	.0000000	!
!	R(1,3)=	.0000000	I(1,3)=	.0000000	!
!	R(1,4)=	.0000000	I(1,4)=	.0000000	!
!	R(1,5)=	.0000000	I(1,5)=	.0000000	!
!	R(1,6)=	.0000000	I(1,6)=	.0000000	!
!	R(2,1)=	.0000000	I(2,1)=	.0000000	!
!	R(2,2)=	.0502500	I(2,2)=	.0078484	!
!	R(2,3)=	.0000000	I(2,3)=	.0000000	!
!	R(2,4)=	.0000000	I(2,4)=	.0000000	!
!	R(2,5)=	.0000000	I(2,5)=	.0000000	!
!	R(2,6)=	.0000000	I(2,6)=	.0000000	!
!	R(3,1)=	.0000000	I(3,1)=	.0000000	!
!	R(3,2)=	.0000000	I(3,2)=	.0000000	!
!	R(3,3)=	.0502500	I(3,3)=	.0078484	!
!	R(3,4)=	.0000000	I(3,4)=	.0000000	!
!	R(3,5)=	.0000000	I(3,5)=	.0000000	!
!	R(3,6)=	.0000000	I(3,6)=	.0000000	!
!	R(4,1)=	.0000000	I(4,1)=	.0000000	!
!	R(4,2)=	.0000000	I(4,2)=	.0000000	!
!	R(4,3)=	.0000000	I(4,3)=	.0000000	!
!	R(4,4)=	.3679000	I(4,4)=	.0798357	!
!	R(4,5)=	.0000000	I(4,5)=	.0000000	!
!	R(4,6)=	.0000000	I(4,6)=	.0000000	!
!	R(5,1)=	.0000000	I(5,1)=	.0000000	!
!	R(5,2)=	.0000000	I(5,2)=	.0000000	!
!	R(5,3)=	.0000000	I(5,3)=	.0000000	!
!	R(5,4)=	.0000000	I(5,4)=	.0000000	!
!	R(5,5)=	.3679000	I(5,5)=	.0798357	!
!	R(5,6)=	.0000000	I(5,6)=	.0000000	!
!	R(6,1)=	.0000000	I(6,1)=	.0000000	!
!	R(6,2)=	.0000000	I(6,2)=	.0000000	!
!	R(6,3)=	.0000000	I(6,3)=	.0000000	!
!	R(6,4)=	.0000000	I(6,4)=	.0000000	!
!	R(6,5)=	.0000000	I(6,5)=	.0000000	!
!	R(6,6)=	.1005000	I(6,6)=	.0156967	!

Tabela 2.12.- Matriz de Impedâncias Longitudinais,
Contribuição Própria dos Condutores,
do Sistema de Transmissão B.

!	I(1,1)=	.4428805	!
!	I(1,2)=	.0752522	!
!	I(1,3)=	.0358785	!
!	I(1,4)=	.0848712	!
!	I(1,5)=	.0570416	!
!	I(1,6)=	.0258944	!
!	I(2,1)=	.0752522	!
!	I(2,2)=	.4428805	!
!	I(2,3)=	.0752522	!
!	I(2,4)=	.0858717	!
!	I(2,5)=	.0858717	!
!	I(2,6)=	.0564455	!
!	I(3,1)=	.0358785	!
!	I(3,2)=	.0752522	!
!	I(3,3)=	.4428805	!
!	I(3,4)=	.0570416	!
!	I(3,5)=	.0848712	!
!	I(3,6)=	.1171922	!
!	I(4,1)=	.0848712	!
!	I(4,2)=	.0858717	!
!	I(4,3)=	.0570416	!
!	I(4,4)=	.6615156	!
!	I(4,5)=	.1200606	!
!	I(4,6)=	.0377390	!
!	I(5,1)=	.0570416	!
!	I(5,2)=	.0858717	!
!	I(5,3)=	.0848712	!
!	I(5,4)=	.1200606	!
!	I(5,5)=	.6615156	!
!	I(5,6)=	.0527270	!
!	I(6,1)=	.0258944	!
!	I(6,2)=	.0564455	!
!	I(6,3)=	.1171922	!
!	I(6,4)=	.0377390	!
!	I(6,5)=	.0527270	!
!	I(6,6)=	.5409598	!

Tabela 2.13.- Matriz de Impedâncias Longitudinais,
Contribuição da Geometria, do Sistema
de Transmissão B.

!	R(1,1)=	.0573906	I(1,1)=	.2672376	!
!	R(1,2)=	.0573783	I(1,2)=	.2617313	!
!	R(1,3)=	.0573420	I(1,3)=	.2488424	!
!	R(1,4)=	.0566781	I(1,4)=	.2410327	!
!	R(1,5)=	.0566575	I(1,5)=	.2358477	!
!	R(1,6)=	.0576444	I(1,6)=	.2567046	!
!	R(2,1)=	.0573783	I(2,1)=	.2617313	!
!	R(2,2)=	.0573906	I(2,2)=	.2672376	!
!	R(2,3)=	.0573783	I(2,3)=	.2617313	!
!	R(2,4)=	.0566785	I(2,4)=	.2411487	!
!	R(2,5)=	.0566785	I(2,5)=	.2411487	!
!	R(2,6)=	.0576830	I(2,6)=	.2735265	!
!	R(3,1)=	.0573420	I(3,1)=	.2488424	!
!	R(3,2)=	.0573783	I(3,2)=	.2617313	!
!	R(3,3)=	.0573906	I(3,3)=	.2672376	!
!	R(3,4)=	.0566575	I(3,4)=	.2358477	!
!	R(3,5)=	.0566781	I(3,5)=	.2410327	!
!	R(3,6)=	.0576961	I(3,6)=	.2813524	!
!	R(4,1)=	.0566781	I(4,1)=	.2410327	!
!	R(4,2)=	.0566785	I(4,2)=	.2411487	!
!	R(4,3)=	.0566575	I(4,3)=	.2358477	!
!	R(4,4)=	.0559953	I(4,4)=	.2232167	!
!	R(4,5)=	.0559864	I(4,5)=	.2216220	!
!	R(4,6)=	.0569508	I(4,6)=	.2437952	!
!	R(5,1)=	.0566575	I(5,1)=	.2358477	!
!	R(5,2)=	.0566785	I(5,2)=	.2411487	!
!	R(5,3)=	.0566781	I(5,3)=	.2410327	!
!	R(5,4)=	.0559864	I(5,4)=	.2216220	!
!	R(5,5)=	.0559953	I(5,5)=	.2232167	!
!	R(5,6)=	.0569725	I(5,6)=	.2503724	!
!	R(6,1)=	.0576444	I(6,1)=	.2567046	!
!	R(6,2)=	.0576830	I(6,2)=	.2735265	!
!	R(6,3)=	.0576961	I(6,3)=	.2813524	!
!	R(6,4)=	.0569508	I(6,4)=	.2437952	!
!	R(6,5)=	.0569725	I(6,5)=	.2503724	!
!	R(6,6)=	.0580068	I(6,6)=	.2989146	!

Tabela 2.14.- Matriz de Impedâncias Longitudinais, Contribuição da Influência de Solo, do Sistema de Transmissão B.

Para o Sistema de Transmissão C obtêm-se as matrizes $\dot{\underline{Z}}_c$, $\dot{\underline{Z}}_g$ e $\dot{\underline{Z}}_t$, representadas nas tabelas 2.15, 2.16 e 2.17, respectivamente, em [Ω/km].

!	R(1,1)=	.0251250	I(1,1)=	.0039242	!
!	R(1,2)=	.0000000	I(1,2)=	.0000000	!
!	R(1,3)=	.0000000	I(1,3)=	.0000000	!
!	R(1,4)=	.0000000	I(1,4)=	.0000000	!
!	R(1,5)=	.0000000	I(1,5)=	.0000000	!
!	R(1,6)=	.0000000	I(1,6)=	.0000000	!
!	R(2,1)=	.0000000	I(2,1)=	.0000000	!
!	R(2,2)=	.0251250	I(2,2)=	.0039242	!
!	R(2,3)=	.0000000	I(2,3)=	.0000000	!
!	R(2,4)=	.0000000	I(2,4)=	.0000000	!
!	R(2,5)=	.0000000	I(2,5)=	.0000000	!
!	R(2,6)=	.0000000	I(2,6)=	.0000000	!
!	R(3,1)=	.0000000	I(3,1)=	.0000000	!
!	R(3,2)=	.0000000	I(3,2)=	.0000000	!
!	R(3,3)=	.0251250	I(3,3)=	.0039242	!
!	R(3,4)=	.0000000	I(3,4)=	.0000000	!
!	R(3,5)=	.0000000	I(3,5)=	.0000000	!
!	R(3,6)=	.0000000	I(3,6)=	.0000000	!
!	R(4,1)=	.0000000	I(4,1)=	.0000000	!
!	R(4,2)=	.0000000	I(4,2)=	.0000000	!
!	R(4,3)=	.0000000	I(4,3)=	.0000000	!
!	R(4,4)=	.3679000	I(4,4)=	.0798357	!
!	R(4,5)=	.0000000	I(4,5)=	.0000000	!
!	R(4,6)=	.0000000	I(4,6)=	.0000000	!
!	R(5,1)=	.0000000	I(5,1)=	.0000000	!
!	R(5,2)=	.0000000	I(5,2)=	.0000000	!
!	R(5,3)=	.0000000	I(5,3)=	.0000000	!
!	R(5,4)=	.0000000	I(5,4)=	.0000000	!
!	R(5,5)=	.3679000	I(5,5)=	.0798357	!
!	R(5,6)=	.0000000	I(5,6)=	.0000000	!
!	R(6,1)=	.0000000	I(6,1)=	.0000000	!
!	R(6,2)=	.0000000	I(6,2)=	.0000000	!
!	R(6,3)=	.0000000	I(6,3)=	.0000000	!
!	R(6,4)=	.0000000	I(6,4)=	.0000000	!
!	R(6,5)=	.0000000	I(6,5)=	.0000000	!
!	R(6,6)=	.1005000	I(6,6)=	.0156967	!

Tabela 2.15.- Matriz de Impedâncias Longitudinais, Contribuição Própria dos Condutores, do Sistema de Transmissão C.

!	I(1,1)=	.4096213	!
!	I(1,2)=	.0811294	!
!	I(1,3)=	.0401459	!
!	I(1,4)=	.1000692	!
!	I(1,5)=	.0560622	!
!	I(1,6)=	.0081633	!
!	I(2,1)=	.0811294	!
!	I(2,2)=	.4096213	!
!	I(2,3)=	.0811294	!
!	I(2,4)=	.0886212	!
!	I(2,5)=	.0886212	!
!	I(2,6)=	.0165159	!
!	I(3,1)=	.0401459	!
!	I(3,2)=	.0811294	!
!	I(3,3)=	.4096213	!
!	I(3,4)=	.0560622	!
!	I(3,5)=	.1000692	!
!	I(3,6)=	.0286137	!
!	I(4,1)=	.1000692	!
!	I(4,2)=	.0886212	!
!	I(4,3)=	.0560622	!
!	I(4,4)=	.6932743	!
!	I(4,5)=	.0944206	!
!	I(4,6)=	.0103605	!
!	I(5,1)=	.0560622	!
!	I(5,2)=	.0886212	!
!	I(5,3)=	.1000692	!
!	I(5,4)=	.0944206	!
!	I(5,5)=	.6932743	!
!	I(5,6)=	.0164892	!
!	I(6,1)=	.0081633	!
!	I(6,2)=	.0165159	!
!	I(6,3)=	.0286137	!
!	I(6,4)=	.0103605	!
!	I(6,5)=	.0164892	!
!	I(6,6)=	.4869323	!

Tabela 2.16.- Matriz de Impedâncias Longitudinais,
Contribuição da Geometria, do Sistema
de Transmissão C.

! R(1,1)= .0562659	I(1,1)= .2300440	!
! R(1,2)= .0562425	I(1,2)= .2253839	!
! R(1,3)= .0561738	I(1,3)= .2141047	!
! R(1,4)= .0553589	I(1,4)= .2089356	!
! R(1,5)= .0553031	I(1,5)= .2020256	!
! R(1,6)= .0572730	I(1,6)= .2294778	!
! R(2,1)= .0562425	I(2,1)= .2253839	!
! R(2,2)= .0562659	I(2,2)= .2300440	!
! R(2,3)= .0562425	I(2,3)= .2253839	!
! R(2,4)= .0553512	I(2,4)= .2079096	!
! R(2,5)= .0553512	I(2,5)= .2079096	!
! R(2,6)= .0573648	I(2,6)= .2520959	!
! R(3,1)= .0561738	I(3,1)= .2141047	!
! R(3,2)= .0562425	I(3,2)= .2253839	!
! R(3,3)= .0562659	I(3,3)= .2300440	!
! R(3,4)= .0553031	I(3,4)= .2020256	!
! R(3,5)= .0553589	I(3,5)= .2089356	!
! R(3,6)= .0574034	I(3,6)= .2673654	!
! R(4,1)= .0553589	I(4,1)= .2089356	!
! R(4,2)= .0553512	I(4,2)= .2079096	!
! R(4,3)= .0553031	I(4,3)= .2020256	!
! R(4,4)= .0544913	I(4,4)= .1933287	!
! R(4,5)= .0544571	I(4,5)= .1901140	!
! R(4,6)= .0563668	I(4,6)= .2190529	!
! R(5,1)= .0553031	I(5,1)= .2020256	!
! R(5,2)= .0553512	I(5,2)= .2079096	!
! R(5,3)= .0553589	I(5,3)= .2089356	!
! R(5,4)= .0544571	I(5,4)= .1901140	!
! R(5,5)= .0544913	I(5,5)= .1933287	!
! R(5,6)= .0564439	I(5,6)= .2336897	!
! R(6,1)= .0572730	I(6,1)= .2294778	!
! R(6,2)= .0573648	I(6,2)= .2520959	!
! R(6,3)= .0574034	I(6,3)= .2673654	!
! R(6,4)= .0563668	I(6,4)= .2190529	!
! R(6,5)= .0564439	I(6,5)= .2336897	!
! R(6,6)= .0586157	I(6,6)= .3522949	!

Tabela 2.17.- Matriz de Impedâncias Longitudinais, Contribuição da Influência de Solo, do Sistema de Transmissão C.

A matriz de impedâncias longitudinais $\underline{\dot{Z}}$ pode ser representada pela equação (2.7), em forma particionada.

$$\underline{\dot{Z}} = \begin{bmatrix} \underline{\dot{Z}}'_{CC} & | & \underline{\dot{Z}}'_{CG} & | & \underline{\dot{Z}}'_{CI} \\ \hline \underline{\dot{Z}}'_{GC} & & \underline{\dot{Z}}'_{GG} & & \underline{\dot{Z}}'_{GI} \\ \hline \underline{\dot{Z}}'_{IC} & & \underline{\dot{Z}}'_{IG} & & \underline{\dot{Z}}'_{II} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A matriz de impedâncias longitudinais $\underline{\dot{Z}}$ é obtida pela equação (2.3), sendo representada nas tabelas 2.18, 2.19 e 2.20 para os Sistemas de Transmissão A, B, e C, respectivamente.

!	R(1,1)=	.3557438	I(1,1)=	.9122499	!
!	R(1,2)=	.0580424	I(1,2)=	.4245696	!
!	R(1,3)=	.0580383	I(1,3)=	.3723073	!
!	R(1,4)=	.0580740	I(1,4)=	.3720243	!
!	R(2,1)=	.0580424	I(2,1)=	.4245696	!
!	R(2,2)=	.3557438	I(2,2)=	.9122499	!
!	R(2,3)=	.0580424	I(2,3)=	.4245696	!
!	R(2,4)=	.0580781	I(2,4)=	.4235628	!
!	R(3,1)=	.0580383	I(3,1)=	.3723073	!
!	R(3,2)=	.0580424	I(3,2)=	.4245696	!
!	R(3,3)=	.3557438	I(3,3)=	.9122499	!
!	R(3,4)=	.0580795	I(3,4)=	.5620989	!
!	R(4,1)=	.0580740	I(4,1)=	.3720243	!
!	R(4,2)=	.0580781	I(4,2)=	.4235628	!
!	R(4,3)=	.0580795	I(4,3)=	.5620989	!
!	R(4,4)=	.3558154	I(4,4)=	.9121727	!

Tabela 2.18.- Matriz de Impedâncias Longitudinais do Sistema de Transmissão A.

!	R(1,1)=	.1076406	I(1,1)=	.7179664	!
!	R(1,2)=	.0573783	I(1,2)=	.3369835	!
!	R(1,3)=	.0573420	I(1,3)=	.2847208	!
!	R(1,4)=	.0566781	I(1,4)=	.3259040	!
!	R(1,5)=	.0566575	I(1,5)=	.2928892	!
!	R(1,6)=	.0576444	I(1,6)=	.2825990	!
!	R(2,1)=	.0573783	I(2,1)=	.3369835	!
!	R(2,2)=	.1076406	I(2,2)=	.7179664	!
!	R(2,3)=	.0573783	I(2,3)=	.3369835	!
!	R(2,4)=	.0566785	I(2,4)=	.3270205	!
!	R(2,5)=	.0566785	I(2,5)=	.3270205	!
!	R(2,6)=	.0576830	I(2,6)=	.3299720	!
!	R(3,1)=	.0573420	I(3,1)=	.2847208	!
!	R(3,2)=	.0573783	I(3,2)=	.3369835	!
!	R(3,3)=	.1076406	I(3,3)=	.7179664	!
!	R(3,4)=	.0566575	I(3,4)=	.2928892	!
!	R(3,5)=	.0566781	I(3,5)=	.3259040	!
!	R(3,6)=	.0576961	I(3,6)=	.3985445	!
!	R(4,1)=	.0566781	I(4,1)=	.3259040	!
!	R(4,2)=	.0566785	I(4,2)=	.3270205	!
!	R(4,3)=	.0566575	I(4,3)=	.2928892	!
!	R(4,4)=	.4238954	I(4,4)=	.9645680	!
!	R(4,5)=	.0559864	I(4,5)=	.3416826	!
!	R(4,6)=	.0569508	I(4,6)=	.2815342	!
!	R(5,1)=	.0566575	I(5,1)=	.2928892	!
!	R(5,2)=	.0566785	I(5,2)=	.3270205	!
!	R(5,3)=	.0566781	I(5,3)=	.3259040	!
!	R(5,4)=	.0559864	I(5,4)=	.3416826	!
!	R(5,5)=	.4238954	I(5,5)=	.9645680	!
!	R(5,6)=	.0569725	I(5,6)=	.3030993	!
!	R(6,1)=	.0576444	I(6,1)=	.2825990	!
!	R(6,2)=	.0576830	I(6,2)=	.3299720	!
!	R(6,3)=	.0576961	I(6,3)=	.3985445	!
!	R(6,4)=	.0569508	I(6,4)=	.2815342	!
!	R(6,5)=	.0569725	I(6,5)=	.3030993	!
!	R(6,6)=	.1585068	I(6,6)=	.8555712	!

Tabela 2.19.- Matriz de Impedâncias Longitudinais
do Sistema de Transmissão B.

!	R(1,1)=	.0813909	I(1,1)=	.6435895	!
!	R(1,2)=	.0562425	I(1,2)=	.3065134	!
!	R(1,3)=	.0561738	I(1,3)=	.2542506	!
!	R(1,4)=	.0553589	I(1,4)=	.3090048	!
!	R(1,5)=	.0553031	I(1,5)=	.2580878	!
!	R(1,6)=	.0572730	I(1,6)=	.2376411	!
!	R(2,1)=	.0562425	I(2,1)=	.3065134	!
!	R(2,2)=	.0813909	I(2,2)=	.6435895	!
!	R(2,3)=	.0562425	I(2,3)=	.3065134	!
!	R(2,4)=	.0553512	I(2,4)=	.2965308	!
!	R(2,5)=	.0553512	I(2,5)=	.2965308	!
!	R(2,6)=	.0573648	I(2,6)=	.2686118	!
!	R(3,1)=	.0561738	I(3,1)=	.2542506	!
!	R(3,2)=	.0562425	I(3,2)=	.3065134	!
!	R(3,3)=	.0813909	I(3,3)=	.6435895	!
!	R(3,4)=	.0553031	I(3,4)=	.2580878	!
!	R(3,5)=	.0553589	I(3,5)=	.3090048	!
!	R(3,6)=	.0574034	I(3,6)=	.2959791	!
!	R(4,1)=	.0553589	I(4,1)=	.3090048	!
!	R(4,2)=	.0553512	I(4,2)=	.2965308	!
!	R(4,3)=	.0553031	I(4,3)=	.2580878	!
!	R(4,4)=	.4223914	I(4,4)=	.9664388	!
!	R(4,5)=	.0544571	I(4,5)=	.2845346	!
!	R(4,6)=	.0563668	I(4,6)=	.2294134	!
!	R(5,1)=	.0553031	I(5,1)=	.2580878	!
!	R(5,2)=	.0553512	I(5,2)=	.2965308	!
!	R(5,3)=	.0553589	I(5,3)=	.3090048	!
!	R(5,4)=	.0544571	I(5,4)=	.2845346	!
!	R(5,5)=	.4223914	I(5,5)=	.9664388	!
!	R(5,6)=	.0564439	I(5,6)=	.2501789	!
!	R(6,1)=	.0572730	I(6,1)=	.2376411	!
!	R(6,2)=	.0573648	I(6,2)=	.2686118	!
!	R(6,3)=	.0574034	I(6,3)=	.2959791	!
!	R(6,4)=	.0563668	I(6,4)=	.2294134	!
!	R(6,5)=	.0564439	I(6,5)=	.2501789	!
!	R(6,6)=	.1591157	I(6,6)=	.8549240	!

Tabela 2.20.- Matriz de Impedâncias Longitudinais
do Sistema de Transmissão C.

Nos Sistemas de Transmissão B e C, os cabos de guarda são multiterrados; com isto pode-se fazer a redução de Kron, nas linhas e colunas de índice 4 e 5. Com isto chega-se às matrizes de impedâncias longitudinais reduzidas dos sistemas mostrados nas tabelas 2.21 e 2.22.

!	R(1,1)=	.1065686	I(1,1)=	.5751333	!
!	R(1,2)=	.0572742	I(1,2)=	.1869477	!
!	R(1,3)=	.0555053	I(1,3)=	.1431859	!
!	R(1,4)=	.0544963	I(1,4)=	.1484250	!
!	R(2,1)=	.0572742	I(2,1)=	.1869477	!
!	R(2,2)=	.1090403	I(2,2)=	.5596597	!
!	R(2,3)=	.0572742	I(2,3)=	.1869477	!
!	R(2,4)=	.0559788	I(2,4)=	.1879258	!
!	R(3,1)=	.0555053	I(3,1)=	.1431859	!
!	R(3,2)=	.0572742	I(3,2)=	.1869477	!
!	R(3,3)=	.1065686	I(3,3)=	.5751333	!
!	R(3,4)=	.0550471	I(3,4)=	.2635224	!
!	R(4,1)=	.0544963	I(4,1)=	.1484250	!
!	R(4,2)=	.0559788	I(4,2)=	.1879258	!
!	R(4,3)=	.0550471	I(4,3)=	.2635224	!
!	R(4,4)=	.1544851	I(4,4)=	.7278936	!

Tabela 2.21.- Matriz de Impedâncias Longitudinais Reduzida do Sistema de Transmissão B.

!	R(1,1)=	.0795321	I(1,1)=	.5174624	!
!	R(1,2)=	.0545402	I(1,2)=	.1763372	!
!	R(1,3)=	.0527327	I(1,3)=	.1310717	!
!	R(1,4)=	.0506235	I(1,4)=	.1321158	!
!	R(2,1)=	.0545402	I(2,1)=	.1763372	!
!	R(2,2)=	.0807251	I(2,2)=	.5076545	!
!	R(2,3)=	.0545402	I(2,3)=	.1763372	!
!	R(2,4)=	.0516634	I(2,4)=	.1577475	!
!	R(3,1)=	.0527327	I(3,1)=	.1310717	!
!	R(3,2)=	.0545402	I(3,2)=	.1763372	!
!	R(3,3)=	.0795321	I(3,3)=	.5174625	!
!	R(3,4)=	.0513961	I(3,4)=	.1892498	!
!	R(4,1)=	.0506235	I(4,1)=	.1321158	!
!	R(4,2)=	.0516634	I(4,2)=	.1577475	!
!	R(4,3)=	.0513961	I(4,3)=	.1892498	!
!	R(4,4)=	.1503881	I(4,4)=	.7644563	!

*Tabela 2.22.- Matriz de Impedâncias Longitudinais
Reduzida do Sistema de Transmissão C.*

2.3 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA TENSÃO INDUZIDA EM UM CON- DUTOR ISOLADO EM VAZIO.

O comportamento das tensões e correntes, em regime permanente, em um sistema de transmissão em presença da terra, está representado nas equações (2.8) e (2.9).

$$\frac{d\dot{V}}{dx} = - \dot{Z} \dot{I} \quad (2.8)$$

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = - \dot{Y} \dot{V} \quad (2.9)$$

O problema na solução destas equações reside no fato de que não existe apenas uma variável em cada uma delas. Uma das possíveis soluções é o desenvolvimento em série de Mac-Laurin, como mostrado nas equações (2.10) e (2.11).

$$\frac{d\dot{V}}{dx} = \left. \frac{d\dot{V}}{dx} \right|_{x=0} + x \left. \frac{d^2\dot{V}}{dx^2} \right|_{x=0} + \frac{x^2}{2!} \left. \frac{d^3\dot{V}}{dx^3} \right|_{x=0} + \dots \quad (2.10)$$

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = \left. \frac{d\dot{I}}{dx} \right|_{x=0} + x \left. \frac{d^2\dot{I}}{dx^2} \right|_{x=0} + \frac{x^2}{2!} \left. \frac{d^3\dot{I}}{dx^3} \right|_{x=0} + \dots \quad (2.11)$$

Truncando a série no 3º termo, o que não introduz erro expressivo, resolve-se o problema, derivando-se as equações

$$\frac{d^2\dot{V}}{dx^2} = \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{V}}} \quad \frac{d^3\dot{V}}{dx^3} = \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{I}}} \quad (2.12)$$

$$\frac{d^2\dot{I}}{dx^2} = \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{I}}} \quad \frac{d^3\dot{I}}{dx^3} = \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{V}}} \quad (2.13)$$

Substituindo as equações (2.12) e (2.13) em (2.10) e (2.11), resulta nas equações (2.14) e (2.15), já manipuladas.

$$\underline{\underline{\dot{V}}} = \underline{\underline{\dot{V}}}_0 - x \cdot \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{I}}}_0 + \frac{x^2}{2!} \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{V}}}_0 \quad (2.14)$$

$$\underline{\underline{\dot{I}}} = \underline{\underline{\dot{I}}}_0 - x \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{V}}}_0 + \frac{x^2}{2!} \underline{\underline{\dot{Y}}} \underline{\underline{\dot{Z}}} \underline{\underline{\dot{I}}}_0 \quad (2.15)$$

onde os vetores $\underline{\dot{V}}_0$ e $\underline{\dot{I}}_0$ representam as tensões e correntes nos elementos do sistema para $x=0$.

Pode-se expressar as equações (2.14) e (2.15), na forma de matrizes particionadas, como nas equações (2.16) e (2.17). Deve-se lembrar que os cabos de guarda são multi-aterrados.

$$\begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}_C \\ \underline{\dot{V}}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}_{C0} \\ \underline{\dot{V}}_{I0} \end{bmatrix} - x \begin{bmatrix} \underline{\dot{Z}}_{CC} & \underline{\dot{Z}}_{CI} \\ \underline{\dot{Z}}_{IC} & \underline{\dot{Z}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{I}}_{C0} \\ \underline{\dot{I}}_{I0} \end{bmatrix} + \frac{x^2}{2!} \begin{bmatrix} \underline{\dot{Z}}_{CC} & \underline{\dot{Z}}_{CI} \\ \underline{\dot{Z}}_{IC} & \underline{\dot{Z}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{Y}}_{CC} & \underline{\dot{Y}}_{CI} \\ \underline{\dot{Y}}_{IC} & \underline{\dot{Y}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}_{C0} \\ \underline{\dot{V}}_{I0} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\dot{I}}_C \\ \underline{\dot{I}}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\dot{I}}_{C0} \\ \underline{\dot{I}}_{I0} \end{bmatrix} - x \begin{bmatrix} \underline{\dot{Y}}_{CC} & \underline{\dot{Y}}_{CI} \\ \underline{\dot{Y}}_{IC} & \underline{\dot{Y}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}_{C0} \\ \underline{\dot{V}}_{I0} \end{bmatrix} + \frac{x^2}{2!} \begin{bmatrix} \underline{\dot{Y}}_{CC} & \underline{\dot{Y}}_{CI} \\ \underline{\dot{Y}}_{IC} & \underline{\dot{Y}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{Z}}_{CC} & \underline{\dot{Z}}_{CI} \\ \underline{\dot{Z}}_{IC} & \underline{\dot{Z}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{I}}_{C0} \\ \underline{\dot{I}}_{I0} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Fazendo $x = \ell$, na equação (2.17), resulta em (2.18)

$$\begin{aligned} \underline{\dot{I}}_{I\ell} = \underline{\dot{I}}_{I0} - \ell (\underline{\dot{Y}}_{IC} \cdot \underline{\dot{V}}_{C0} + \underline{\dot{Y}}_{II} \cdot \underline{\dot{V}}_{I0}) + \frac{\ell^2}{2} (\underline{\dot{Y}}_{IC} \cdot \underline{\dot{Z}}_{CC} + \\ + \underline{\dot{Y}}_{II} \cdot \underline{\dot{Z}}_{IC}) \underline{\dot{I}}_{C0} + \frac{\ell^2}{2} (\underline{\dot{Y}}_{IC} \cdot \underline{\dot{Z}}_{CI} + \underline{\dot{Y}}_{II} \cdot \underline{\dot{Z}}_{II}) \underline{\dot{I}}_{I0} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Porém, o condutor \bar{e} isolado, logo $\underline{\dot{I}}_{I\ell} = \underline{\dot{I}}_{I0} = 0$, pois não há injeção de corrente em seus terminais. Isto resulta na equação (2.19), que fornece a tensão na origem do condutor isolado.

$$\underline{\dot{V}}_{I0} = -\underline{\dot{Y}}_{II}^{-1} \cdot \underline{\dot{Y}}_{IC} \cdot \underline{\dot{V}}_{C0} + \frac{\ell}{2} \cdot \underline{\dot{Y}}_{II}^{-1} (\underline{\dot{Y}}_{IC} \cdot \underline{\dot{Z}}_{CC} + \underline{\dot{Y}}_{II} \cdot \underline{\dot{Z}}_{IC}) \cdot \underline{\dot{I}}_{C0} \quad (2.19)$$

Fazendo $x = \ell$, na equação (2.16), é possível obter a equação (2.20), que fornece a tensão no terminal do condutor isolado.

SUBSTITUINDO

$$\begin{aligned} \dot{V}_{I\ell} = \dot{V}_{IO} - \ell(\dot{Z}_{IC} \cdot \dot{I}_{CO} + \dot{Z}_{II} \cdot \dot{I}_{IO}) + \frac{\ell^2}{2}(\dot{Z}_{IC} \cdot \dot{Y}_{CC} + \dot{Z}_{II} \cdot \dot{Y}_{IC}) \dot{V}_{CO} \\ + \frac{\ell^2}{2}(\dot{Z}_{IC} \cdot \dot{Y}_{CI} + \dot{Z}_{II} \cdot \dot{Y}_{II}) \dot{V}_{IO} \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.4 - INFLUÊNCIA DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO

Com a finalidade de observar a influência dos campos elétrico e magnético na indução eletromagnética do condutor isolado, utiliza-se o Sistema de Transmissão B. Para tal, varia-se a tensão dos condutores de fase do sistema e calcula-se a tensão que surge no condutor isolado, devido aos efeitos eletrostáticos. Isto está representado na tabela 2.23. Cabe ressaltar o fato que algumas das tensões nominais não se aplicariam a este tipo de configuração.

Tensão Nominal [kV]	Tensão Induzida [kV]
69,00	8,182
138,00	16,364
240,00	28,459
345,00	40,909
500,00	59,289
750,00	88,933

Tabela 2.23.- Tensão Induzida Eletrostaticamente no Condutor Isolado.

Agora, varia-se a corrente nos condutores de fase e calcula-se a tensão que surge no condutor isolado, devido aos efeitos magnéticos. Isto está representado na tabela 2.24.

Corrente Nominal [A]	Tensão Induzida [kV]
50,0	0,0515
100,0	0,1030
150,0	0,1545
200,0	0,2060
250,0	0,2574
300,0	0,3089

Tabela 2.24.- Tensão Induzida Magneticamente no Condutor Isolado.

Confrontando-se os valores obtidos nas tabelas 2.23 e 2.24, verifica-se que a tensão induzida eletrostaticamente é muito maior do que a induzida magneticamente, de tal forma que a tensão induzida total é praticamente capacitiva.

Isto é válido afirmar, pois o comprimento do condutor isolado é pequeno. Para grandes extensões, na ordem de centenas de quilometros, não se poderia desprezar esta influência.

Para tal verificação, veja o Sistema de Transmissão A, onde varia-se o comprimento do condutor isolado e calcula-se a tensão eletromagnética induzida por ele no mesmo, formando-se a tabela 2.25 para dois valores de correntes nominais.

Comprimento do Conductor Isolado [km]	Corrente Nominal do Circuito Principal = 100[A]	Corrente Nominal do Circuito Principal = 200[A]
	Tensão Induzida no Conductor Isolado [kV]	Tensão Induzida no Conductor Isolado [kV]
10	0,17	0,34
50	0,85	1,70
100	1,70	3,40
150	2,55	5,10
200	3,40	6,80

Tabela 2.25.- Variação do Comprimento do Conductor Isolado e da Corrente na Linha Principal pela Tensão Eletromagnética Induzida.

2.5 - COLOCAÇÃO DE CARGA NO CONDUTOR ISOLADO

Como a finalidade do condutor isolado é abastecer pequenas cargas, analisar-se-á a influência desta sobre os parâmetros elétricos de interesse.

Seja o Sistema de Transmissão A, com o condutor isolado conectado a um transformador abaixador que alimenta uma carga \dot{Z}'_x , como mostrado na figura 2.2.

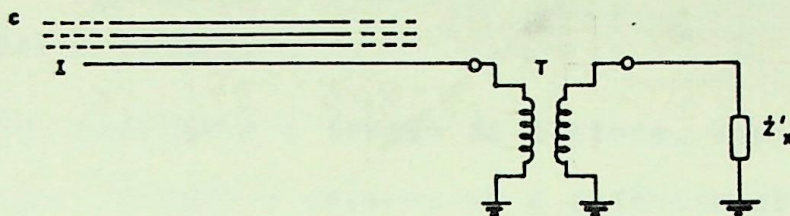


Figura 2.2.- Esquema de Ligação do Circuito do Conductor Isolado.

Para maior facilidade, pode-se referir a carga \dot{Z}'_x ao primário do transformador, passando a ser denotada por \dot{Z}_x . O circuito, então, pode ser representado por uma tensão e por uma impedância de Thevenin, \dot{V}_{Th} e C_{Th} , respectivamente. Isto está mostrado na figura 2.3.

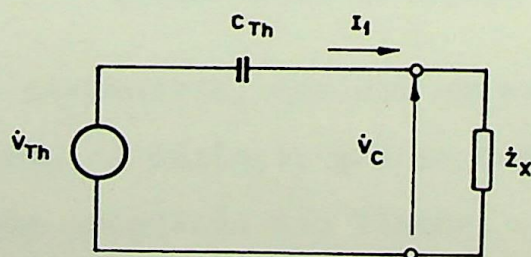


Figura 2.3.- Circuito Equivalente do Conductor Isolado e Carga.

Far-se-á, a partir deste ponto, variações de dois parâmetros, com os demais constantes, com a finalidade de adquirir sensibilidade sobre o estudo.

1. Mantendo constante a tensão do sistema, varia-se o comprimento do condutor isolado e observa-se a potência absorvida pela impedância de carga, mantida constante. Os valores obtidos estão na tabela 2.26.

Comprimento [km]	Potência Extraída [kW]
1,0	1,3982
10,0	2,8578
20,0	2,9258
30,0	2,9764
40,0	3,0248
50,0	3,0729

Tabela 2.26.- Variação do Comprimento do Condutor Isolado pela Potência Extraída.

Nota-se, claramente, que com um aumento do comprimento isolado aumenta, também, a potência que se pode extrair do circuito principal, porém, numa proporção não linear.

2. Mantendo-se constante o comprimento do condutor isolado, varia-se a impedância da carga \dot{Z}_x e calcula-se a tensão \dot{V}_c em seus terminais. Os valores obtidos estão na tabela 2.27.

Impedância Z_c [Ω]	Tensão [kV]
45 000	15,000
61 250	17,500
35 285	20,650
103 058	22,700
114 816	23,960

Tabela 2.27.- Variação do Módulo da Carga pela Tensão em seus Terminais.

Com a variação do módulo da carga, varia muito a tensão em seus terminais, esta é uma condição inaceitável para uma boa qualidade de energia.

3. Mantendo-se constante o fator de potência da carga, varia se o seu módulo e observa-se a tensão em seus terminais e a potência absorvida. As curvas obtidas estão na figura 2.4.

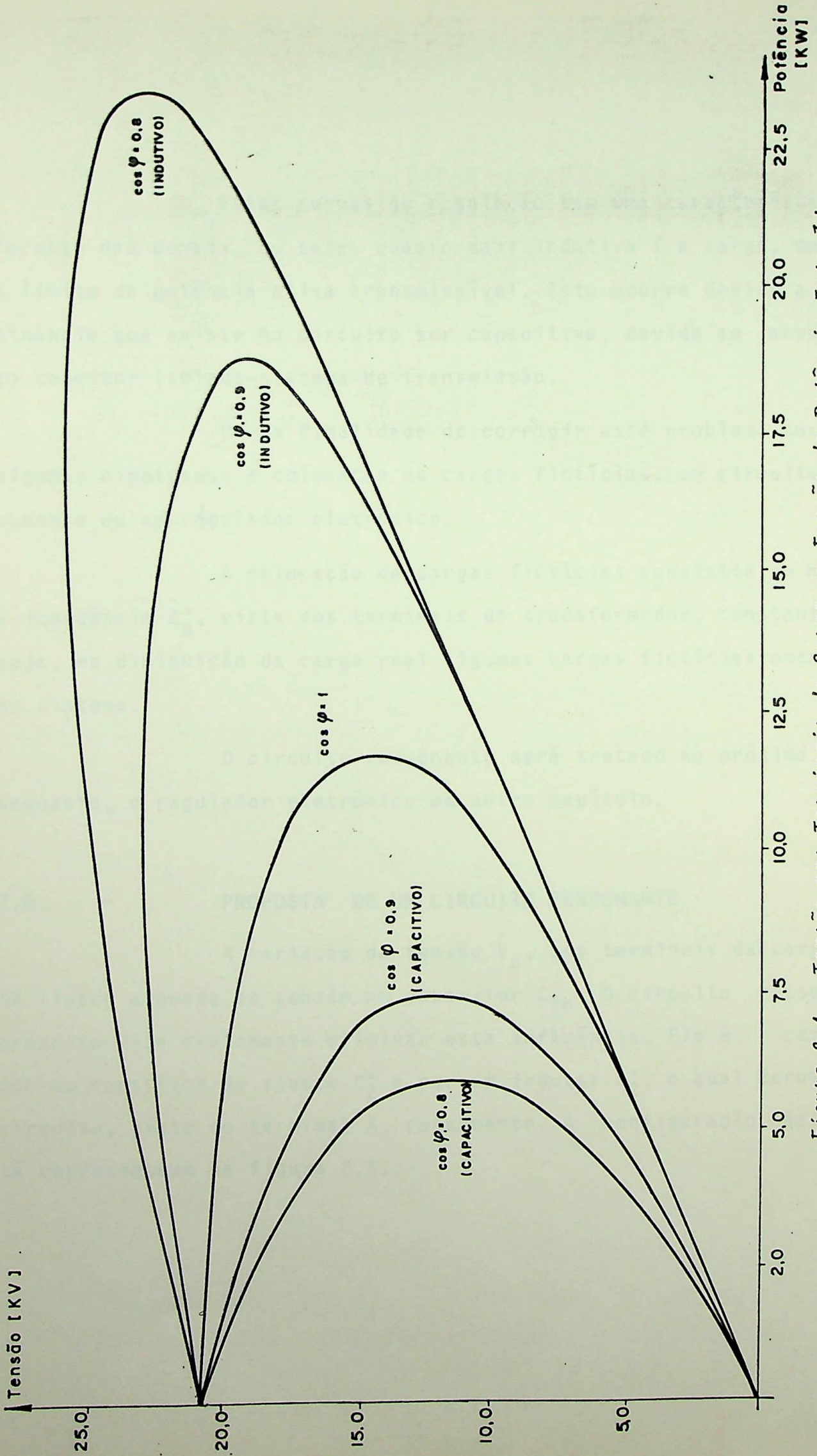


Figura 2.4.- Tensão nos Terminais da Carga em Função da Potência Extraída.

Estas curvas de regulação tem uma característica diferente das demais, ou seja, quanto mais indutiva é a carga, maior é o limite de potência ativa transmissível. Isto ocorre devido a predominância que existe no circuito ser capacitiva, devido ao acoplamento condutor isolado-sistema de transmissão.

Com a finalidade de corrigir este problema surgiram algumas hipóteses: a colocação de cargas fictícias, um circuito ressonante ou um regulador eletrônico.

A colocação de cargas fictícias consistia em manter a impedância \dot{Z}'_x , vista dos terminais do transformador, constante, ou seja, na diminuição da carga real algumas cargas fictícias entrariam no sistema.

O circuito ressonante será tratado no próximo item, enquanto, o regulador eletrônico em outro capítulo.

2.6 - PROPOSTA DE UM CIRCUITO RESSONANTE

A variação da tensão \dot{V}_c , nos terminais da carga, está ligada a queda de tensão no capacitor C_{Th} . O circuito ressonante proposto visa exatamente eliminar esta influência. Ele é composto por um capacitor de ajuste C'_2 e por um indutor L'_2 , o qual torna o circuito, visto do terminal A, ressonante. A configuração básica está representada na figura 2.5.

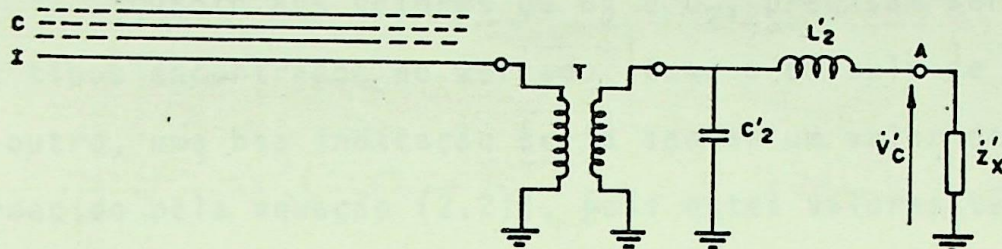


Figura 2.5.- Esquema de Ligação com o Circuito Resonante.

Para facilidade de análise é conveniente referir todas as grandezas ao primário do transformador, resultando assim no circuito equivalente da figura 2.6.

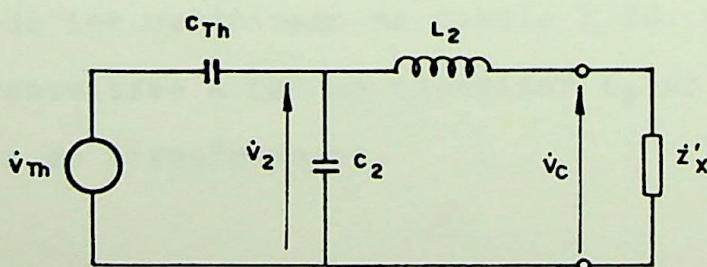


Figura 2.6.- Circuito Equivalente com Circuito Resonante.

Devido à ressonância entre as capacitâncias C_{Th} e C_2 e a indutância L_2 , a tensão \dot{V}_{Th} surgirá nos terminais da carga, para qualquer corrente, resolvendo o problema da variação desta ten

são.

Quanto aos valores de C_2' e L_2' , precisam ser compatíveis com os tipos encontrados no mercado. Como o cálculo de um deles depende do outro, uma boa indicação seria adotar um valor de C_2 próximo do fornecido pela equação (2.21), pois estes valores têm proporcionado, para a maioria dos casos, valores compatíveis de indutâncias encontradas no mercado.

$$C_2 = \frac{Y(4,4)}{10 \cdot \omega} \quad (2.21)$$

onde $Y(4,4)$ é o elemento da matriz de admitâncias transversais e ω é dado pelo produto $2 \pi f$.

O problema introduzido com o circuito ressonante é a tensão \dot{V}_2 que surge nos terminais do capacitor C_2 - ou nos terminais do transformador -, que aumenta com o aumento da potência extraída. Isto pode ser verificado na tabela 2.28, onde foi utilizado o Sistema de Transmissão A com um capacitor C_2 de 0,00105 [μ F], referido ao primário do transformador.

Potência Extraída [kW]	Tensão V_2 [kV]
2,803	24,722
3,018	25,419
3,270	26,271
3,567	27,327
3,924	28,656
4,360	30,360

Tabela 2.28. - Potência Extraída pela Tensão nos Terminais do Capacitor C_2 .

A tensão nos terminais da carga, \dot{V}_C , referida ao primário permaneceu constante, em 19,809[kV]. Porém, pela tabela 2.28, nota-se que a tensão nos terminais do transformador pode atingir valores muito elevados. Diante deste problema, poder-se-ia optar por dois caminhos: conviver com possíveis elevadas tensões ou tentar diminuí-las.

A convivência é possível se o transformador for isolado convenientemente para as tensões que poderão aparecer. Este procedimento não é satisfatório pois levaria, invariavelmente, a um transformador de preço elevado.

Uma das maneiras possíveis de se minimizar estas tensões é a colocação de um indutor L'_2 , que não torne o circuito ressonante a 60[Hz], ou seja, não tenha uma relação de ressonância de X_L/X_C igual a 100%.

Ao se estabelecer uma relação de ressonância dife

rente de 100%, surgirá uma solução de compromisso entre existir uma pequena variação de tensão nos terminais da carga para obter-se valores menores de tensão nos terminais do transformador.

A vantagem deste método reside no fato de que a maioria das cargas variam o fator de potência na faixa de 0,98 capacitivo a 0,85 indutivo. Ao deixar-se a relação de ressonância pouco abaixo de 100%, este circuito torna-se, levemente, capacitivo podendo a indutância da carga, compensar esta diferença. Isto pode ser verificado nos gráficos das figuras 2.7 a 2.9, onde se utilizou o Sistema de Transmissão A, calculando-se a potência extraída, a tensão nos terminais da carga e a tensão nos terminais do transformador em função do fator de potência da carga, para diversos valores da relação de ressonância.

A variação do fator de potência é conseguida, nestes gráficos, adotando-se uma impedância de carga, com parte resistiva constante e variando-se a parte reativa.

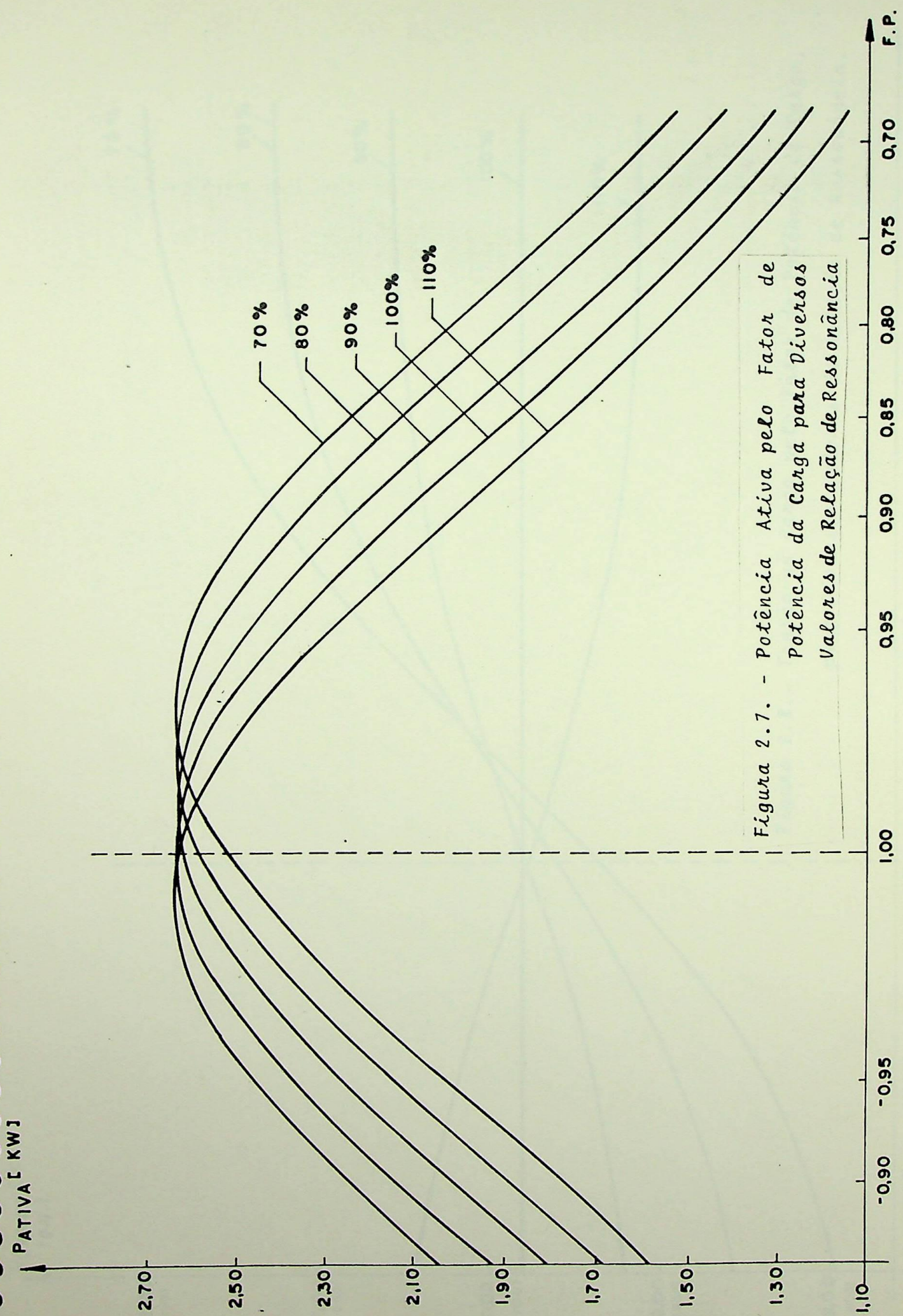


Figura 2.7. - Potência Ativa pelo Fator de Potência da Carga para Diversos Valores de Relação de Ressonância

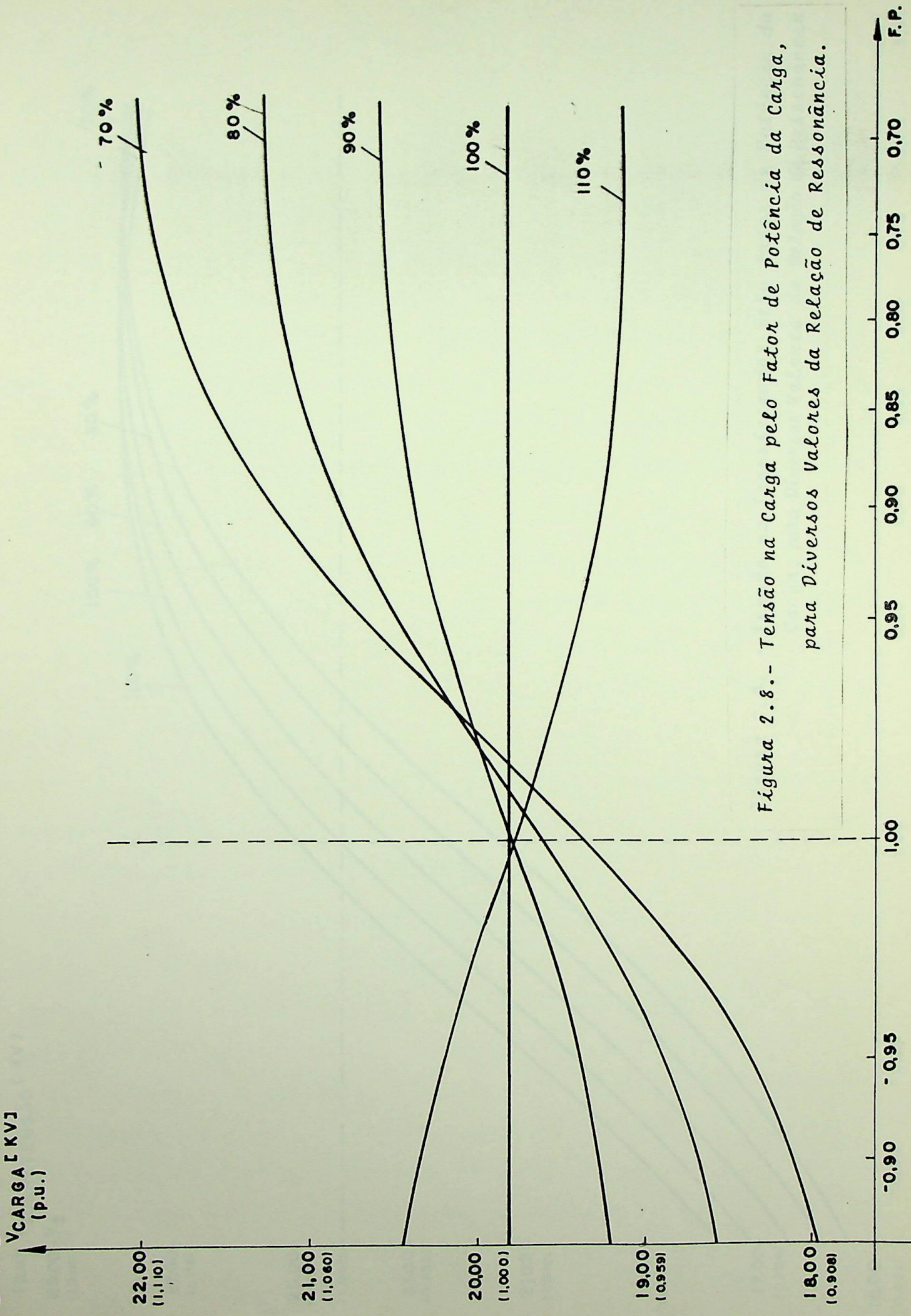


Figura 2.8.- Tensão na Carga pelo Fator de Potência da Carga, para Diversos Valores da Relação de Ressonância.

(p.u.) $V_{SOBRETENSÃO}$ [KV]

29,00
(1,200)

27,00
(1,118)

25,00
(1,035)

23,00
(0,952)

21,00
(0,870)

19,00
(0,787)

17,00
(0,704)

15,00
(0,621)

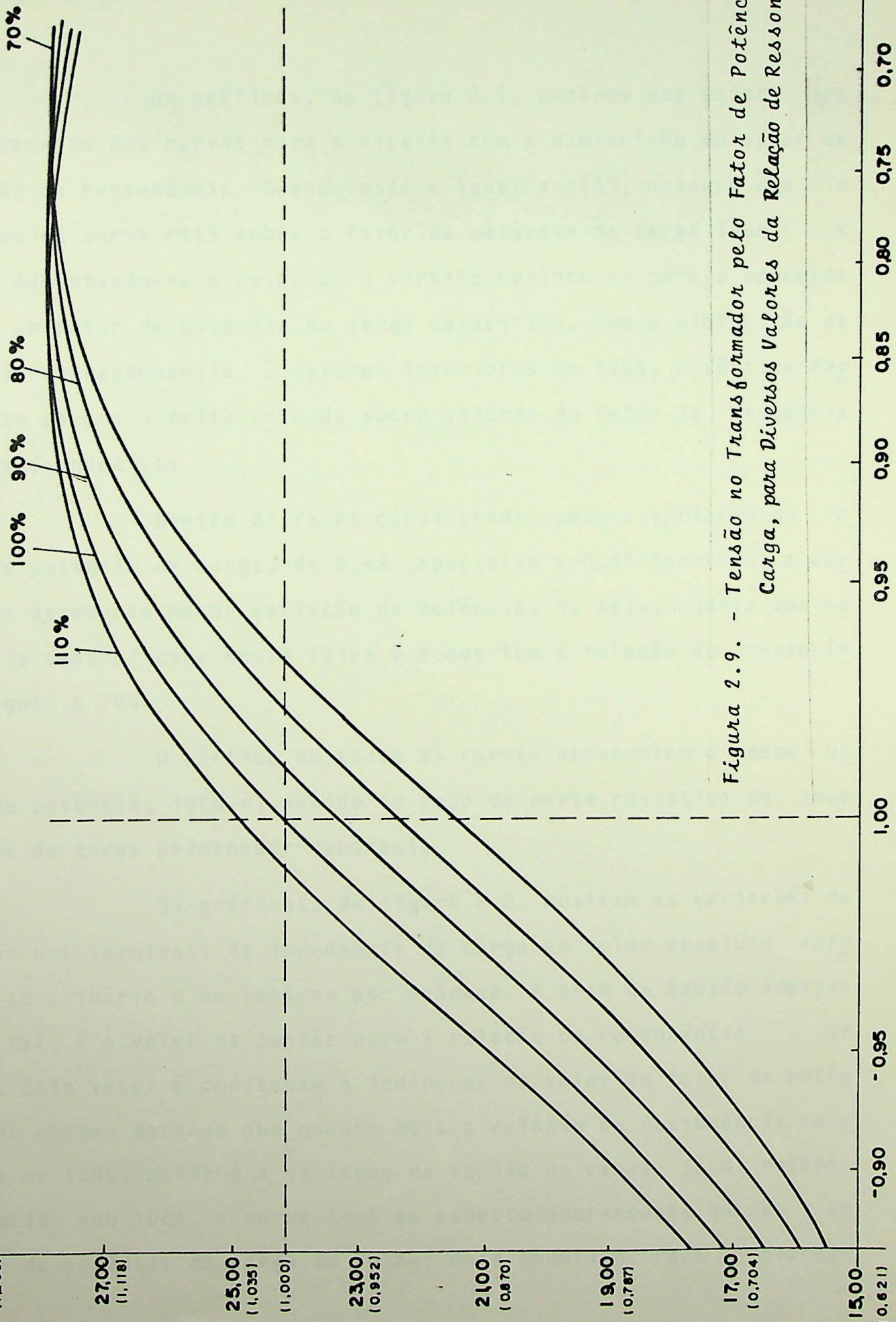


Figura 2.9. - Tensão no Transformador pelo Fator de Potência da Carga, para Diversos Valores da Relação de Ressonância

F.P. 0,90 0,95 1,00 1,05 1,10 0,70 0,75 0,80 0,85

Os gráficos, da figura 2.7, mostram que existe um deslocamento das curvas para a direita com a diminuição do valor da relação de ressonância. Quando esta é igual a 100%, nota-se que o vértice da curva está sobre o fator de potência da carga igual a 1,00. Aumentando-se a relação, o vértice desloca-se para a esquerda sobre um fator de potência da carga capacitivo. Com a diminuição da relação de ressonância, a valores inferiores de 100%, o vértice desloca-se para a direita estando sobre valores do fator de potência da carga indutivos.

Dentro da faixa considerada, para a variação do fator de potência da carga, de 0,98 capacitivo a 0,85 indutivo, a curva que apresenta menor variação da potência, ou seja, aquela que está mais centralizada nesta faixa é a que tem a relação de ressonância igual a 70%.

O vértice de todas as curvas apresentam o mesmo valor de potência, isto é, devido ao fato da parte resistiva da impedância de carga permanecer constante.

Os gráficos, da figura 2.8, mostram as variações da tensão nos terminais da impedância de carga em valor absoluto referido ao primário e em valores por unidade. A base de tensão adotada para tal, é o valor da tensão para a relação de ressonância de 100%. Este valor é constante e independe do valor do fator de potência da carga. Nota-se que quanto mais a relação de ressonância se afasta de 100%, maior é a variação da tensão na carga. Se a relação for maior que 100%, a curva terá um aspecto decrescente quando o fator de potência da carga se tornar mais indutivo. Para relações

menores que 100%, este aspecto é crescente. Dentro da faixa considerada para a variação do fator de potência da carga, a relação de ressonância de 70%, apresenta valores de variação desta tensão com uma variação máxima, menor do que 0,1 pu, o que ainda torna a energia de boa qualidade.

Os gráficos, da figura 2.9, mostram a variação da tensão nos terminais do transformador do seu lado de alta e em valores por unidade. A base de tensão adotada foi a mesma do gráfico passado para facilidade de análise. Nota-se que para uma impedância de carga com parte resistiva constante, a tensão nos terminais do transformador diminui para uma relação de ressonância menor. Neste caso, para uma relação de 70%, a tensão chega a um valor máximo de 1,15 pu, o que não é drástico em termos de sobretensão.

Com os gráficos das figuras 2.7 a 2.9, chega-se a conclusão que a opção por um circuito com relação de ressonância menor do que 100% é melhor. Dentre estes valores, e considerando a faixa de variação do fator de potência da carga, o que melhor se comporta é a relação de 70%. Para valores menores que este, existiria o conveniente de diminuir a tensão nos terminais do transformador, porém, os inconvenientes de ter uma variação da tensão nos terminais da carga muito grande e uma curva de potência que não estaria centralizada na faixa considerada. Para valores maiores que 70%, o inconveniente da não centralização da curva de potência continua e a variação das tensões sobre o transformador e sobre a impedância de carga tornam-se inconveniente e conveniente, respectivamente, ao inverso do analisado para a relação menor do que 70%.

Devido a esta conclusão sobre a relação de ressonância de 70%, far-se-á, agora, os gráficos das figuras 2.10 e 2.11, mostrando algumas grandezas importantes. Estes são feitos mantendo o fator de potência da carga constante. Para tal, varia-se a parte resistiva da mesma, calculando-se a parte reativa. A configuração utilizada, continua sendo, o Sistema de Transmissão A.

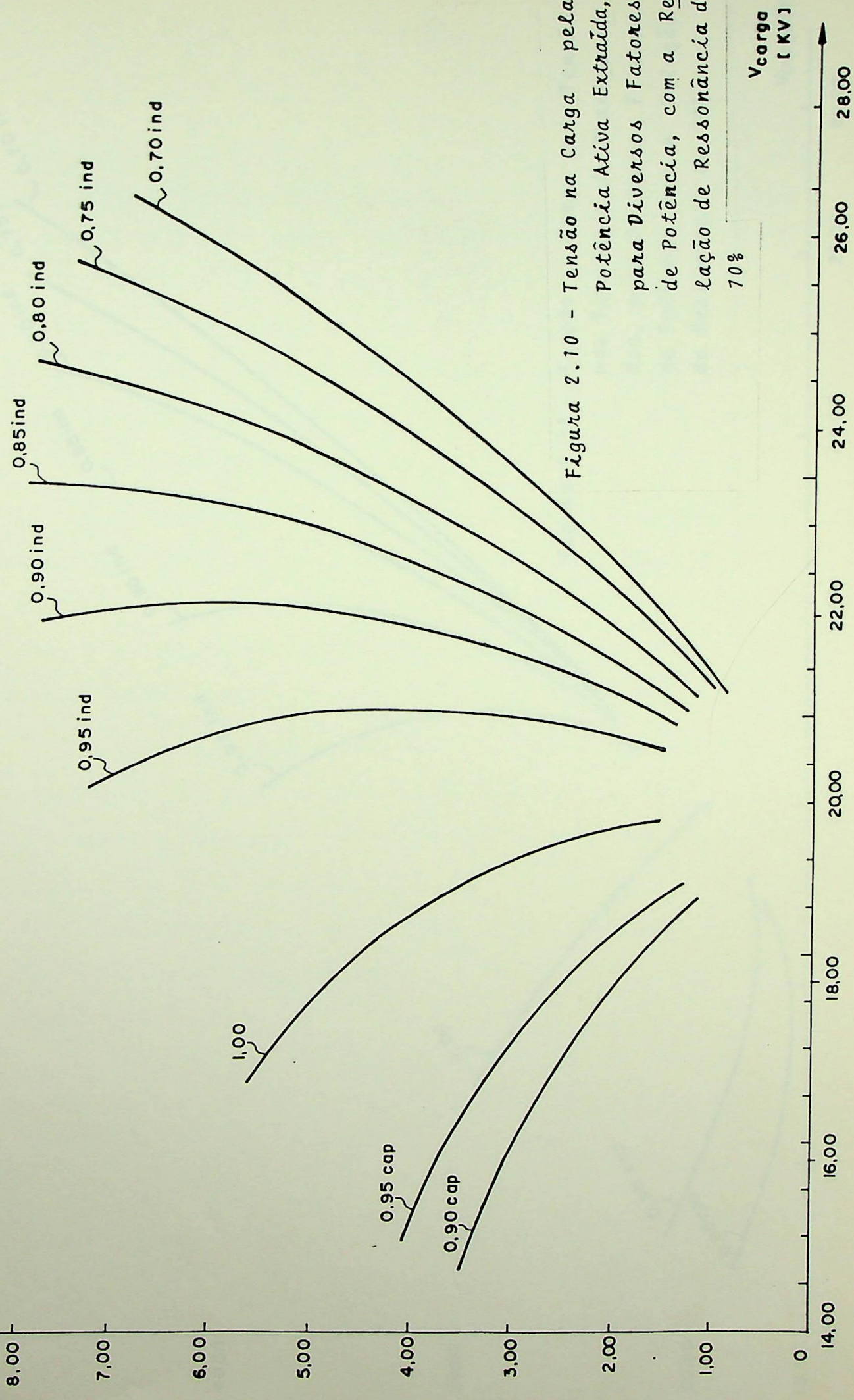


Figura 2.10 - Tensão na Carga pela Potência Ativa Extraída, para Diversos Fatores de Potência, com a Resonância de 70%

Vcarga [KV]

28.00

26.00

24.00

22.00

20.00

18.00

16.00

14.00

8.00

7.00

6.00

5.00

4.00

3.00

2.00

1.00

0

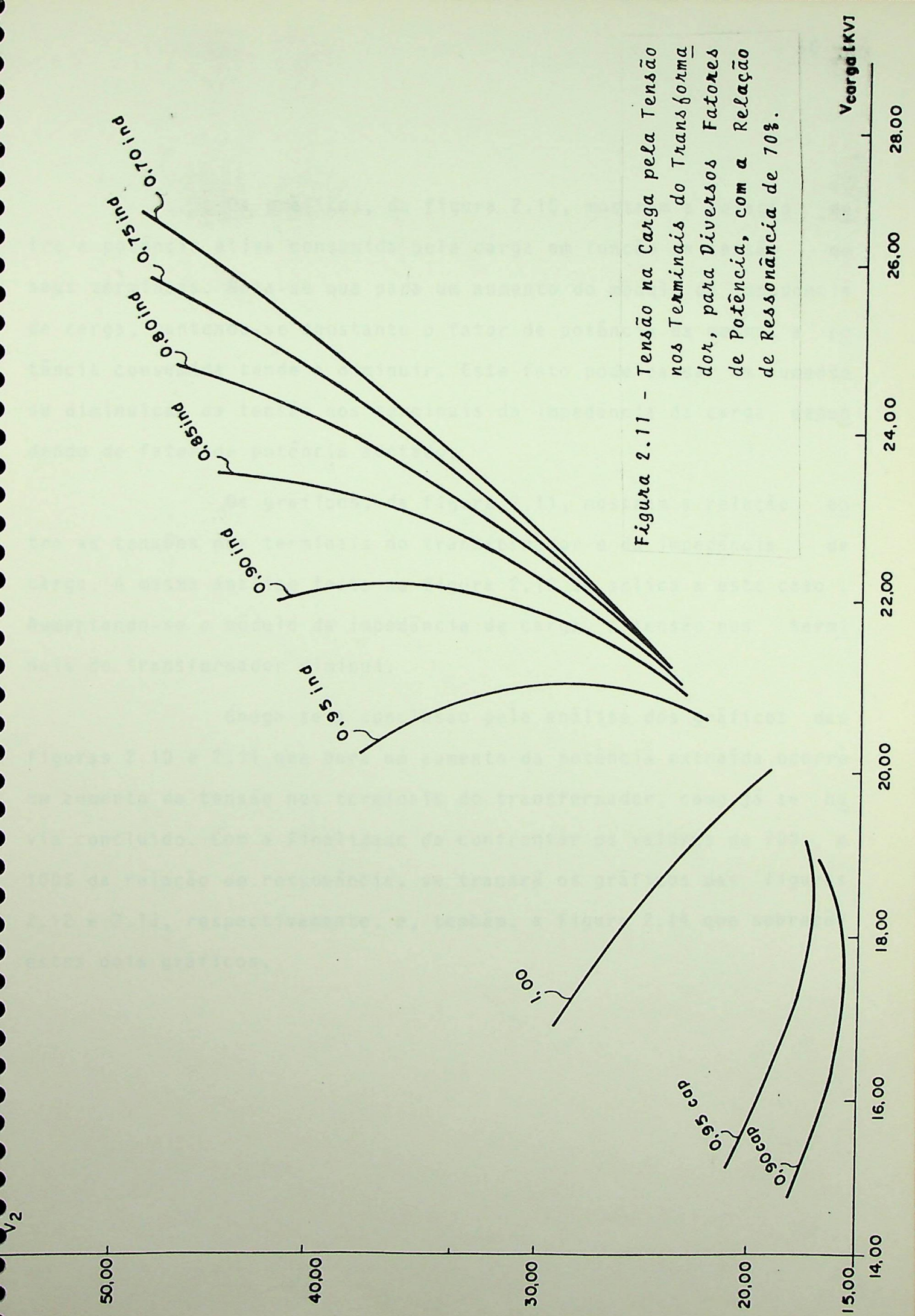


Figura 2.11 - Tensão na Carga pela Tensão nos Terminais do Transformador, para Diversos Fatores de Potência, com a Relação de Ressonância de 70%.

Os gráficos, da figura 2.10, mostram a relação entre a potência ativa consumida pela carga em função da tensão em seus terminais. Nota-se que para um aumento do módulo da impedância de carga, mantendo-se constante o fator de potência da mesma, a potência consumida tende a diminuir. Este fato pode causar um aumento ou diminuição da tensão nos terminais da impedância da carga dependendo do fator de potência adotado.

Os gráficos, da figura 2.11, mostram a relação entre as tensões nos terminais do transformador e da impedância de carga. A mesma análise feita na figura 2.10 se aplica a este caso . Aumentando-se o módulo da impedância de carga, a tensão nos terminais do transformador diminui.

Chega-se a conclusão pela análise dos gráficos das figuras 2.10 e 2.11 que para um aumento da potência extraída ocorre um aumento da tensão nos terminais do transformador, como já se havia concluído. Com a finalidade de confrontar os valores de 70% e 100% da relação de ressonância, se traçarã os gráficos das figuras 2.12 e 2.13, respectivamente, e, também, a figura 2.14 que sobrepõe estes dois gráficos.

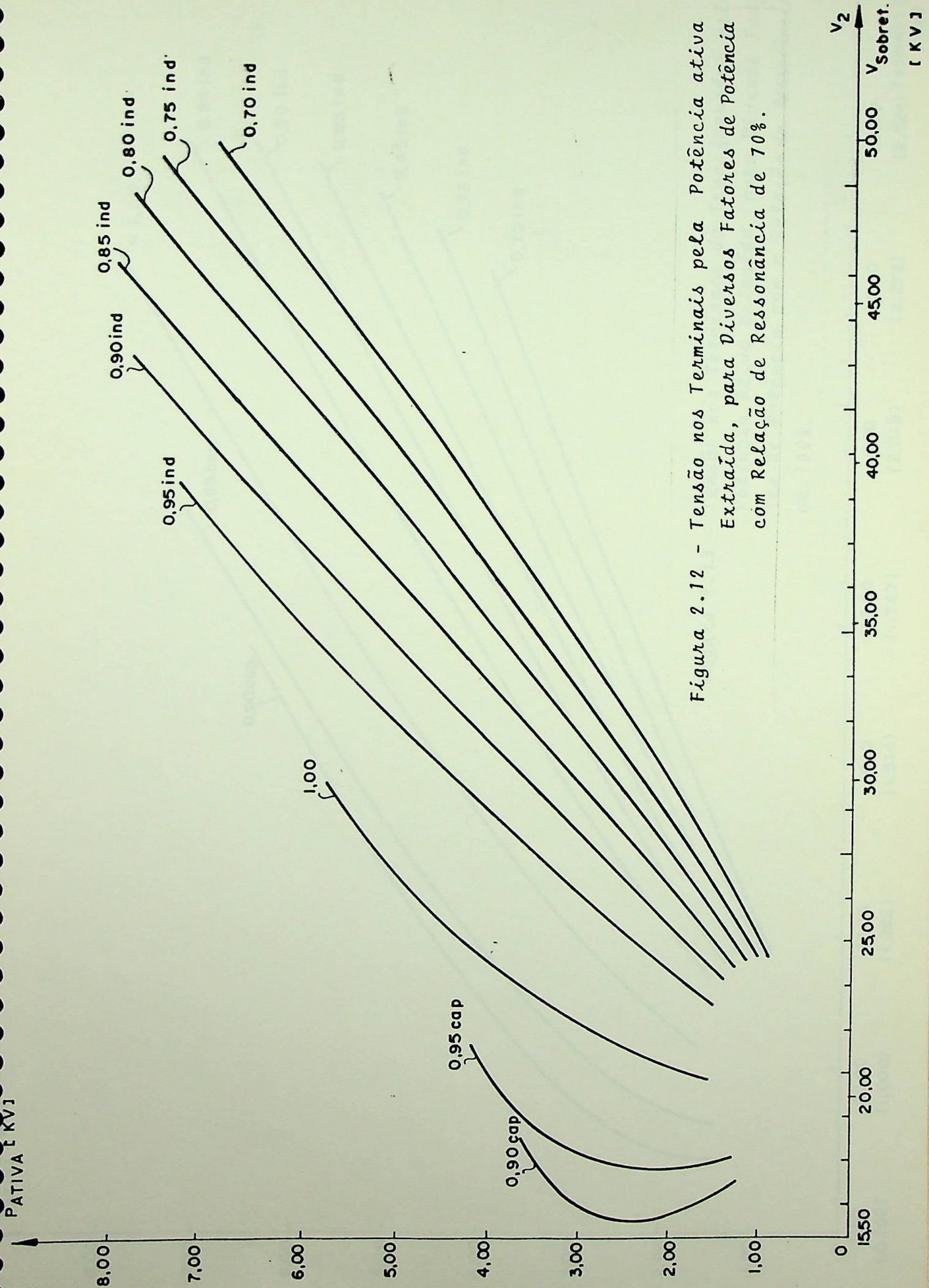


Figura 2.12 - Tensão nos Terminais pela Potência ativa Extraída, para Diversos Fatores de Potência com Relação de Ressonância de 70%.

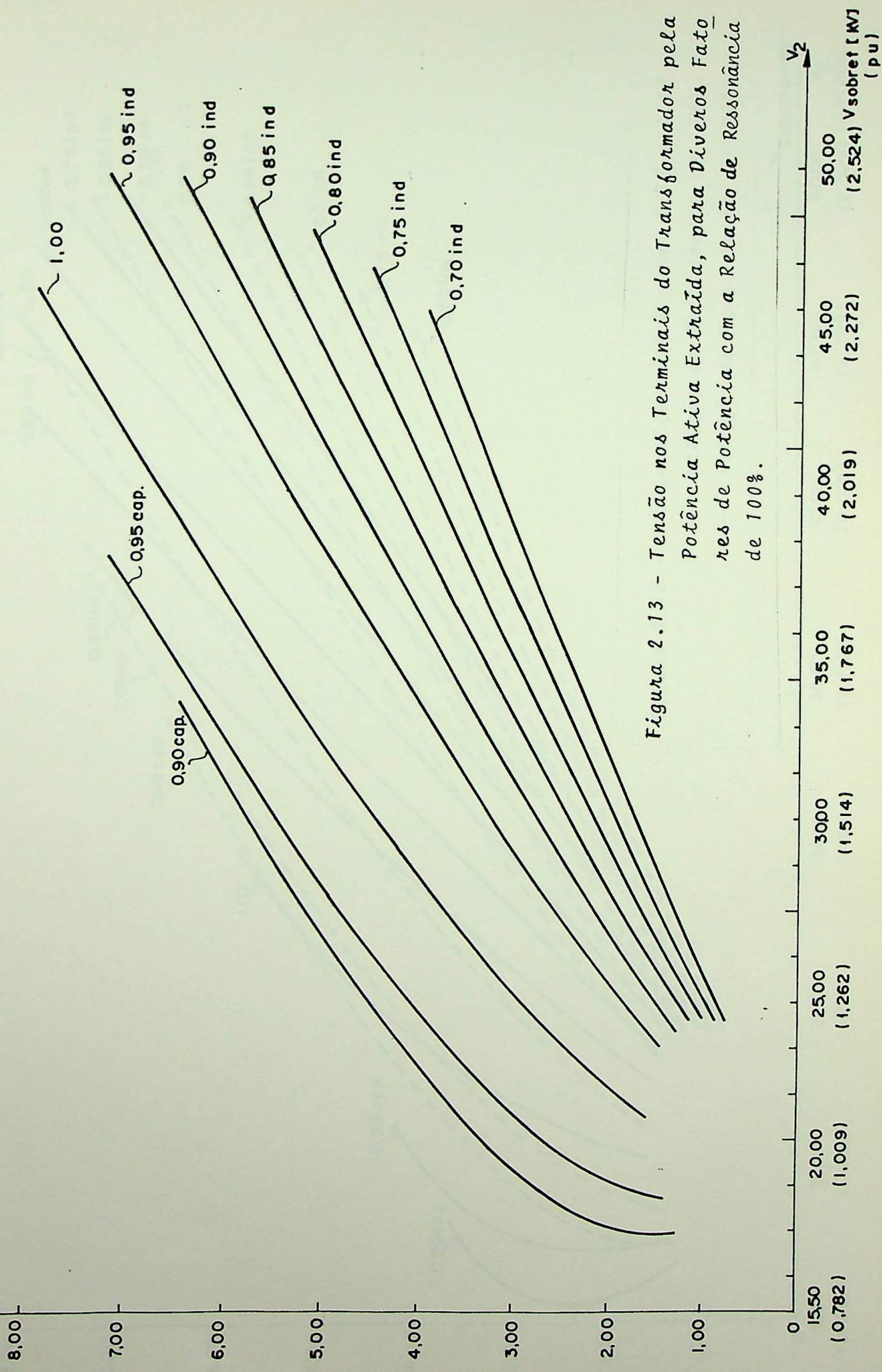


Figura 2.13 - Tensão nos Terminais do Transformador pela Potência Ativa Extraída, para Diveros Fatores de Potência com a Relação de Ressonância de 100%.

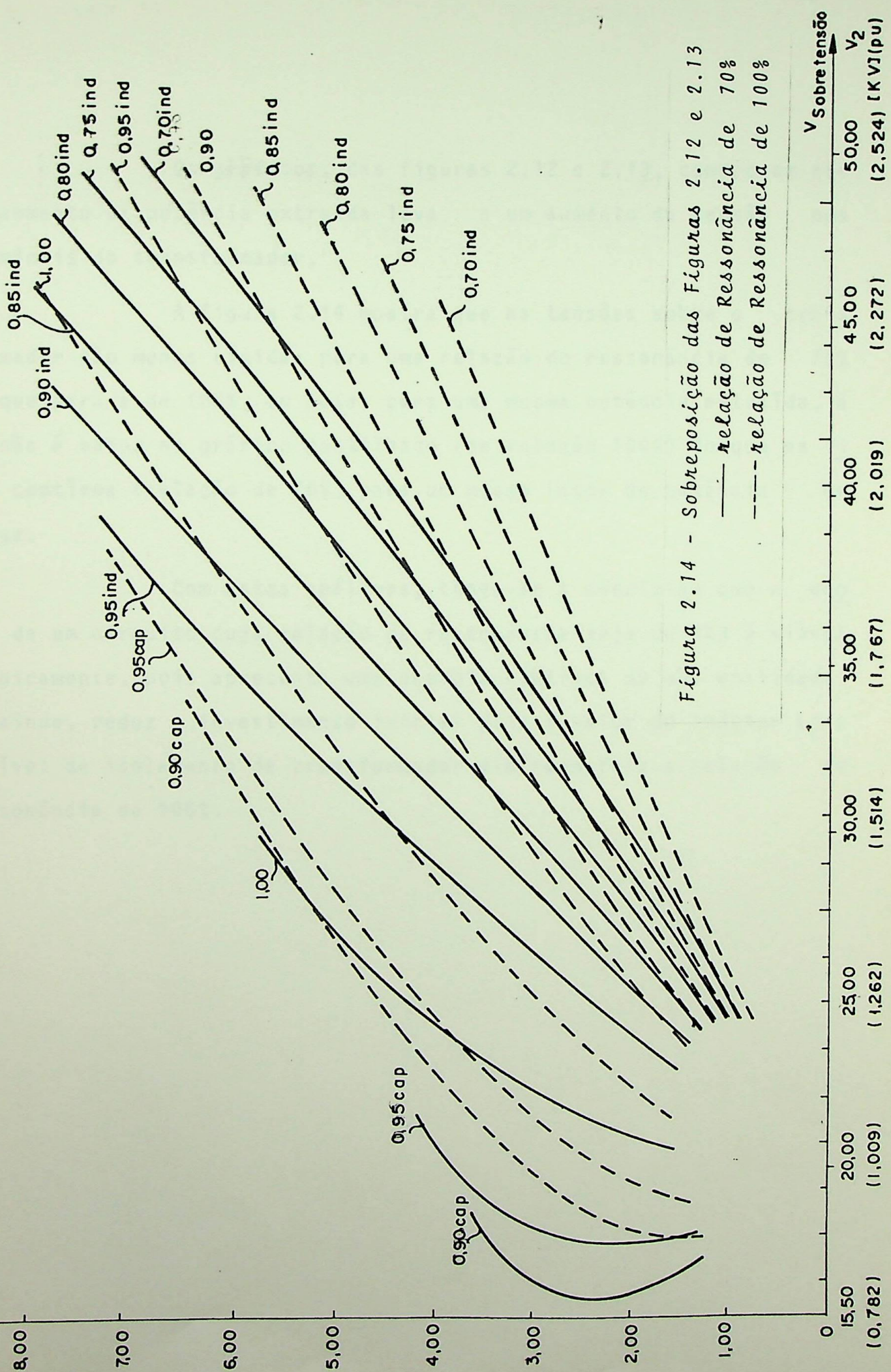


Figura 2.14 - Sobreposição das Figuras 2.12 e 2.13
 — relação de Ressonância de 70%
 - - - relação de Ressonância de 100%

Os gráficos, das figuras 2.12 e 2.13, comprovam que um aumento da potência extraída leva a um aumento da tensão nos terminais do transformador.

A figura 2.14 mostra que as tensões sobre o transformador são menos rígidas para uma relação de ressonância de 70% do que para a de 100%, ou seja, para uma mesma potência extraída, a tensão é maior no gráfico pontilhado (de relação 100%) do que na linha contínua (relação de 70%) para um mesmo fator de potência da carga.

Com estas análises, chega-se a conclusão que a adoção de um circuito cuja relação de ressonância seja de 70% é viável tecnicamente, pois apresenta uma energia elétrica de boa qualidade, e, ainda, reduz o investimento inicial pois o valor do indutor L'_2 e o nível de isolamento de transformador diminuem face a relação de ressonância de 100%.

CAPÍTULO 3

ESTUDO DA TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR ISOLADO

3.1 - INTRODUÇÃO

O capítulo 2 tem como objetivo a análise de tensão induzida no

caso de um condutor isolado, sendo que a tensão induzida no condutor

CAPÍTULO 3

ESTUDO DA TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR ISOLADO

Este capítulo tem como objetivo a análise de tensão induzida no condutor

nesta seção, será estudada a influência da tensão induzida no condutor
de uma linha de transmissão sobre a tensão nos terminais da linha
de carga adjacentes ao condutor isolado. Serão estudadas as condições
de tensão induzida no condutor isolado em função da tensão induzida no
condutor de transmissão, com a ajuda de técnicas de aproximação e
de tensão induzida no condutor de transmissão.

CAPÍTULO 3

ESTUDO DA TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR ISOLADO

3.1 - INTRODUÇÃO

O capítulo 2 permitiu a análise de sensibilidade sobre os problemas de controle e ajuste da tensão nos terminais da carga alimentada pelo condutor isolado, quando esta variava, sendo mantida constante a tensão na linha de transmissão indutora.

Porém, é sabido que a tensão em uma linha de transmissão não é a mesma em todos os pontos, variando seu perfil de acordo com o seu carregamento e comprimento.

Neste capítulo, será estudada a influência da variação da tensão da linha de transmissão sobre a tensão nos terminais da carga alimentada pelo condutor isolado, bem como a influência do posicionamento do mesmo em vários comprimentos de linhas sob várias condições de carregamento, com a ajuda de técnicas de quadripolos e da teoria modal de propagação em multi-condutores.

3.2 - PROPAGAÇÃO NUM SISTEMA DE N CONDUTORES: TEORIA MODAL DE PROPAGAÇÃO

Este tratamento será utilizado para que se possa obter uma solução exata para os valores de tensão e de corrente ao longo do sistema linha de transmissão-condutor isolado.

A teoria baseia-se na definição da chamada transformação modal que, quando convenientemente aplicada às equações de propagação num sistema com N condutores, permite calcular as tensões e as correntes em qualquer ponto da linha como uma combinação linear de N modos independentes de tensão e de corrente, cuja estrutura não se altera com a distância de propagação mas tem a sua amplitude atenuada de acordo com constantes de propagação, que variam de modo para modo [8,9].

Considere-se um sistema de transmissão a N condutores. As equações (2.12) e (2.13) podem ser escritas na forma:

$$\frac{d^2 \underline{\dot{V}}^f}{dx^2} = \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{V}}^f = \underline{\dot{\Psi}}^2 \cdot \underline{\dot{V}}^f \quad (3.1)$$

$$\frac{d^2 \underline{\dot{I}}^f}{dx^2} = \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{I}}^f = \underline{\dot{\Psi}}_t^2 \cdot \underline{\dot{I}}^f \quad (3.2)$$

onde $\underline{\dot{\Psi}}$ é a matriz dos coeficientes de propagação definida pela multiplicação da matriz de impedâncias longitudinais $\underline{\dot{Z}}$ e da matriz de admitâncias transversais $\underline{\dot{Y}}$, e $\underline{\dot{\Psi}}_t$ é a matriz transposta de $\underline{\dot{\Psi}}$.

Resolvendo-se a equação diferencial (3.1), obtêm-se

$$\underline{\dot{v}}^f(x) = e^{-\underline{\dot{\psi}}x} \cdot \underline{\dot{v}}_r^f + e^{+\underline{\dot{\psi}}x} \cdot \underline{\dot{v}}_i^f \quad (3.3)$$

onde os vetores $\underline{\dot{v}}_r^f$ e $\underline{\dot{v}}_i^f$ são constantes de integração que dependem das condições de contorno do problema.

O cálculo de $\underline{\dot{v}}^f(x)$ a partir da equação anterior não é imediato uma vez que os termos $e^{-\underline{\dot{\psi}}x}$ e $e^{+\underline{\dot{\psi}}x}$, são funções da matriz $\underline{\dot{\psi}}$, que não é diagonal. Alguns métodos poderiam ser utilizados para a solução deste problema. Neste trabalho optou-se pela aplicação da transformação modal, que diagonaliza a matriz $\underline{\dot{\psi}}$.

Considere-se então a matriz $\underline{\dot{\psi}}$ escrita na forma:

$$\underline{\dot{\psi}} = \underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{\gamma}} \cdot \underline{\dot{Q}}^{-1} \quad (3.4)$$

onde $\underline{\dot{Q}}$ é a matriz cujas colunas são vetores próprios de $\underline{\dot{\psi}}$, matriz modal, e $\underline{\dot{\gamma}}$ é a matriz diagonal cujos elementos não nulos são os valores próprios da matriz $\underline{\dot{\psi}}$. Define-se, então, a seguinte transformação:

$$\underline{\dot{v}}^f = \underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{v}}^c \quad (3.5)$$

onde $\underline{\dot{v}}^f$ é o vetor das tensões de fase e $\underline{\dot{v}}^c$ é o vetor de tensões com componentes resultante da transformação.

Substituindo-se $\underline{\dot{v}}^f$ da equação (3.5) na equação (3.1), vem:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} (\underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{v}}^c) &= \underline{\dot{\psi}}^2 \cdot \underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{v}}^c \\ \frac{d^2 \underline{\dot{v}}^c}{dx^2} &= \underline{\dot{Q}}^{-1} \cdot \underline{\dot{\psi}}^2 \cdot \underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{v}}^c = \underline{\dot{\gamma}}^2 \cdot \underline{\dot{v}}^c \end{aligned} \quad (3.6)$$

Resolvendo-se a equação (3.6):

$$\dot{\underline{v}}^c(x) = e^{-\underline{\gamma}x} \cdot \dot{\underline{v}}_r^c + e^{+\underline{\gamma}x} \cdot \dot{\underline{v}}_i^c \quad (3.7)$$

de solução, agora, muito mais simples, pois, de acordo com a teoria de funções de matrizes, tem-se:

$$e^{\begin{bmatrix} \gamma_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \gamma_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \gamma_{NN} \end{bmatrix} \cdot x} = \begin{bmatrix} e^{\gamma_{11} \cdot x} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\gamma_{22} \cdot x} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & e^{\gamma_{NN} \cdot x} \end{bmatrix}$$

Solução análoga, para a equação (3.2), obtêm-se a a través da utilização da matriz de transformação modal $\dot{\underline{S}}$, definida por:

$$\dot{\underline{\Psi}}_t = \dot{\underline{S}} \cdot \dot{\underline{\gamma}} \cdot \dot{\underline{S}}^{-1} \quad (3.8)$$

donde,

$$\dot{\underline{i}}^c(x) = e^{-\dot{\underline{\Psi}} \cdot x} \cdot \dot{\underline{i}}_r^c + e^{+\dot{\underline{\Psi}} \cdot x} \cdot \dot{\underline{i}}_i^c \quad (3.9)$$

Maiores detalhes sobre o cálculo das matrizes de transformação modal $\dot{\underline{Q}}$ e $\dot{\underline{S}}$, podem ser encontrados em [8,9].

3.3 - ESTUDO DO SISTEMA LINHA DE TRANSMISSÃO-CONDUTOR ISO LADO ATRAVÉS DA TEORIA DOS QUADRIPOLOS

Como o problema a ser estudado exige o conhecimento da tensão em um determinado ponto da linha, é apropriado o estudo a través da técnica dos quadripolos, pois somente serão calculadas as condições terminais dos mesmos.

Para aplicação desta técnica, algumas condições de vem ser cumpridas:

- (a) o quadripolo deve ter apenas uma entrada e uma saída;
- (b) o circuito representado pelo quadripolo deve conter apenas elementos passivos;
- (c) o quadripolo deve ser linear e bilateral.

Considere-se a figura 3.1, a qual mostra um quadripolo típico.

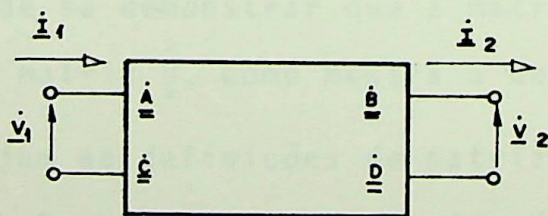


Figura 3.1.- Quadripolo Típico

Na análise que se segue, considerar-se-ã que \underline{v}_2 e \underline{i}_2 são variáveis independentes e \underline{v}_1 e \underline{i}_1 são dependentes. Com isto pode-se escrever a equação (3.10).

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}_1 \\ \dot{\underline{I}}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{A}} & \dot{\underline{B}} \\ \dot{\underline{C}} & \dot{\underline{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}_2 \\ \dot{\underline{I}}_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Como desenvolvido em [01], pode-se chegar às constantes generalizadas do quadripolo definidas neste caso pelas equações matriciais (3.11) a (3.14).

$$\dot{\underline{A}} = \cosh(\dot{\underline{\Psi}} \cdot \ell) = \dot{\underline{Q}} \cdot \cosh(\dot{\underline{\Upsilon}} \cdot \ell) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \quad (3.11)$$

$$\dot{\underline{B}} = \sinh(\dot{\underline{\Psi}} \cdot \ell) = \dot{\underline{Q}} \cdot \sinh(\dot{\underline{\Upsilon}} \cdot \ell) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \quad (3.12)$$

$$\dot{\underline{C}} = \dot{\underline{Y}}_0 \cdot \sinh(\dot{\underline{\Psi}} \cdot \ell) = \dot{\underline{Y}}_0 \cdot \dot{\underline{Q}} \cdot \sinh(\dot{\underline{\Upsilon}} \cdot \ell) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \quad (3.13)$$

$$\dot{\underline{D}} = \dot{\underline{Y}}_0 \cdot \cosh(\dot{\underline{\Psi}} \cdot \ell) \cdot \dot{\underline{Z}}_0 = \dot{\underline{Y}}_0 \cdot \dot{\underline{Q}} \cdot \cosh(\dot{\underline{\Upsilon}} \cdot \ell) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Z}}_0 \quad (3.14)$$

sendo ℓ o comprimento da linha.

Pode-se demonstrar que a matriz transposta de $\dot{\underline{A}}$, ou seja, $\dot{\underline{A}}_t$ é igual a matriz $\dot{\underline{D}}$, como mostra a dedução a seguir.

Sejam as definições de matriz de admitância característica componente, $\dot{\underline{Y}}_{0c}$, e de matriz de impedância característica componente, $\dot{\underline{Z}}_{0c}$, dadas pelas equações (3.15) e (3.16).

$$\dot{\underline{Y}}_{0c} = \dot{\underline{S}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Y}}_0 \cdot \dot{\underline{Q}} \quad (3.15)$$

$$\dot{\underline{Z}}_{0c} = \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Z}}_0 \cdot \dot{\underline{S}} \quad (3.16)$$

Donde pode-se escrever:

$$\dot{\underline{Y}}_0 = \dot{\underline{S}} \cdot \dot{\underline{Y}}_{0c} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \quad (3.17)$$

$$\dot{\underline{Z}}_0 = \dot{\underline{Q}} \cdot \dot{\underline{Z}}_{0c} \cdot \dot{\underline{S}}^{-1} \quad (3.18)$$

Substituindo-se estas equações em (3.14), vem:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{D}} &= \dot{\underline{Y}}_0 \cdot \cosh \dot{\underline{\Psi}} \ell \cdot \dot{\underline{Z}}_0 = \dot{\underline{S}} \cdot \dot{\underline{Y}}_{0c} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Q}} \cdot \cosh \dot{\underline{\Psi}} \ell \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Q}} \cdot \dot{\underline{Z}}_{0c} \cdot \dot{\underline{S}}^{-1} = \\ &= \dot{\underline{S}} \cdot \dot{\underline{Y}}_{0c} \cdot \dot{\underline{U}} \cdot \cosh \dot{\underline{\Psi}} \ell \cdot \dot{\underline{U}} \cdot \dot{\underline{Z}}_{0c} \cdot \dot{\underline{S}}^{-1} = \\ &= \dot{\underline{S}} \cosh \dot{\underline{\Psi}} \ell \dot{\underline{S}}^{-1} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Porém a transposta da matriz $\dot{\underline{A}}$ pode ser escrita da equação (3.11):

$$\begin{aligned} \dot{\underline{A}}_t &= (\dot{\underline{Q}} \cdot \cosh \dot{\underline{\Psi}} \ell \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1})_t = \\ &= (\dot{\underline{Q}}^{-1})_t \cdot \cosh \dot{\underline{\Psi}} \ell \cdot \dot{\underline{Q}}_t \end{aligned} \quad (3.20)$$

entretanto, por definição:

$$\dot{\underline{S}} = (\dot{\underline{Q}}^{-1})_t$$

$$\dot{\underline{Q}}_t = \dot{\underline{S}}^{-1}$$

donde

$$\dot{\underline{A}}_t = \dot{\underline{S}} \cdot \cosh \dot{\underline{\Psi}} \ell \cdot \dot{\underline{S}}^{-1} = \dot{\underline{D}} \quad (3.21)$$

Considere-se a configuração apresentada na figura 3.2, onde se representam a linha de transmissão principal, o condutor isolado e as cargas respectivas.

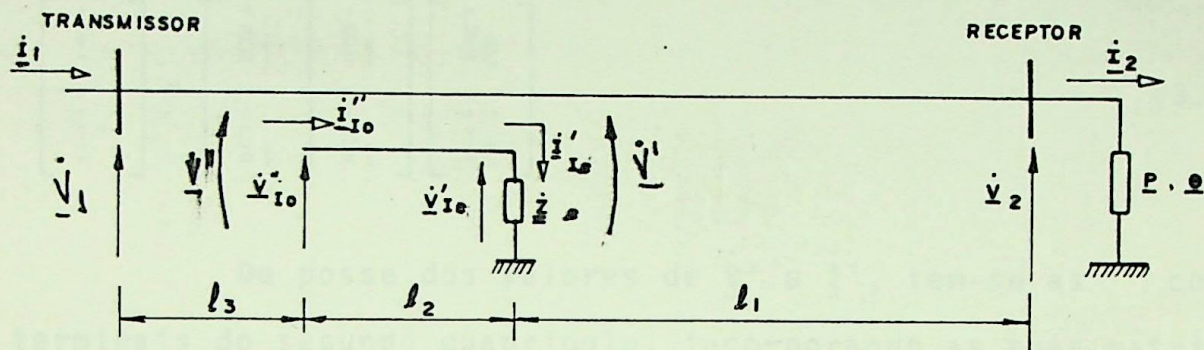


Figura 3.2.- Configuração real do sistema.

Pode-se, agora, particionar a figura 3.2 em quadripolos equivalentes, como mostra a figura 3.3.

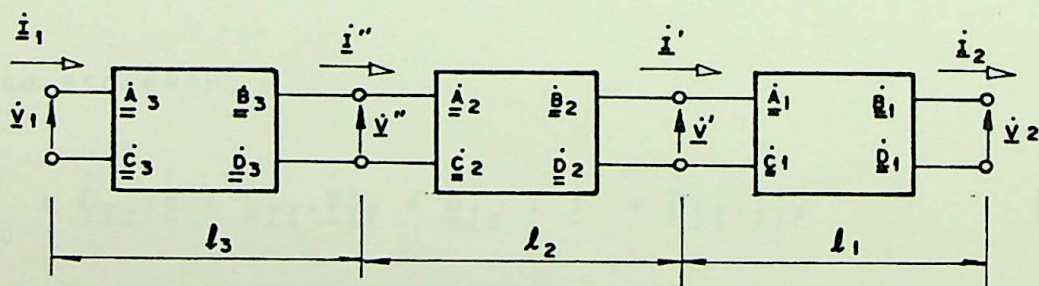


Figura 3.3.- Representação do sistema anterior através de uma associação de quadripolos em cascata.

Para o primeiro quadripolo, definem-se \dot{V}_2 e \dot{i}_2 . Para este trecho pode-se, então, escrever:

$$\begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}' \\ \underline{\dot{I}}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\dot{A}}_1 & \underline{\dot{B}}_1 \\ \underline{\dot{C}}_1 & \underline{\dot{D}}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}_2 \\ \underline{\dot{I}}_2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

De posse dos valores de $\underline{\dot{V}}'$ e $\underline{\dot{I}}'$, tem-se as condições terminais do segundo quadripolo, incorporando as suas matrizes as condições do condutor isolado.

$$\begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}'' \\ \underline{\dot{V}}''_{I_0} \\ \underline{\dot{I}}'' \\ \underline{\dot{I}}''_{I_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\dot{A}}_{cc} & \underline{\dot{A}}_{cI} & \underline{\dot{B}}_{cc} & \underline{\dot{B}}_{cI} \\ \underline{\dot{A}}_{Ic} & \underline{\dot{A}}_{II} & \underline{\dot{B}}_{Ic} & \underline{\dot{B}}_{II} \\ \underline{\dot{C}}_{cc} & \underline{\dot{C}}_{cI} & \underline{\dot{D}}_{cc} & \underline{\dot{D}}_{cI} \\ \underline{\dot{C}}_{Ic} & \underline{\dot{C}}_{II} & \underline{\dot{D}}_{Ic} & \underline{\dot{D}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{V}}' \\ \underline{\dot{V}}'_{I\ell} \\ \underline{\dot{I}}' \\ \underline{\dot{I}}'_{I\ell} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Logo pode-se escrever:

$$\underline{\dot{I}}''_{I_0} = \underline{\dot{C}}_{Ic} \cdot \underline{\dot{V}}' + \underline{\dot{C}}_{II} \cdot \underline{\dot{V}}'_{I\ell} + \underline{\dot{D}}_{Ic} \cdot \underline{\dot{I}}' + \underline{\dot{D}}_{II} \cdot \underline{\dot{I}}'_{I\ell} \quad (3.17)$$

como a extremidade inicial do condutor isolado se encontra em va zio, pode-se afirmar que $\underline{\dot{I}}''_{I_0}$ é um nulo. Logo,

$$\underline{0} = \underline{\dot{C}}_{Ic} \cdot \underline{\dot{V}}' + \underline{\dot{C}}_{II} \cdot \underline{\dot{V}}'_{I\ell} + \underline{\dot{D}}_{Ic} \cdot \underline{\dot{I}}' + \underline{\dot{D}}_{II} \cdot \underline{\dot{I}}'_{I\ell} \quad (3.18)$$

Porém $\underline{\dot{V}}'_{I\ell}$ e $\underline{\dot{I}}'_{I\ell}$ estão relacionados através da carga ligada ao con dutor isolado, $\underline{\dot{Z}}_{\ell}$, como mostra a equação (3.19).

$$\underline{\dot{V}}'_{I\ell} = \underline{\dot{Z}}_{\ell} \cdot \underline{\dot{I}}'_{I\ell} \quad (3.19)$$

Substituindo-se a equação (3.19) em (3.18), vem:

$$\dot{\underline{I}}'_{I\ell} = (\dot{\underline{C}}_{II} \cdot \dot{\underline{Z}}_{\ell} + \dot{\underline{D}}_{II})^{-1} \cdot (-\dot{\underline{C}}_{IC} \cdot \dot{\underline{V}}' - \dot{\underline{D}}_{IC} \cdot \dot{\underline{I}}') \quad (3.20)$$

$$\dot{\underline{V}}'_{I\ell} = \dot{\underline{Z}}_{\ell} [(\dot{\underline{C}}_{II} \cdot \dot{\underline{Z}}_{\ell} + \dot{\underline{D}}_{II})^{-1} \cdot (-\dot{\underline{C}}_{IC} \cdot \dot{\underline{V}}' - \dot{\underline{D}}_{IC} \cdot \dot{\underline{I}}')] \quad (3.21)$$

Com as equações (3.20) e (3.21), calculam-se, $\dot{\underline{I}}'_{I\ell}$ e $\dot{\underline{V}}'_{I\ell}$, possibilitando, assim, o cálculo das tensões e correntes na entrada do segundo quadripolo.

Para o terceiro quadripolo, de posse dos valores de tensão e corrente, $\dot{\underline{V}}''$ e $\dot{\underline{I}}''$, calculam-se $\dot{\underline{V}}'_1$ e $\dot{\underline{I}}'_1$, pela equação (3.22).

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}'_1 \\ \dot{\underline{I}}'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{A}}_3 & \dot{\underline{B}}_3 \\ \dot{\underline{C}}_3 & \dot{\underline{D}}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}'' \\ \dot{\underline{I}}'' \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Considere-se o Sistema de Transmissão B, alimentado por uma carga equilibrada de 330[MW], com fator de potência unitário. O condutor isolado possui um comprimento de 10[km], enquanto os quadripolos 1 e 3 representam linhas com comprimentos de 100[km] e 150[km], respectivamente.

As tabelas 3.1 a 3.3 mostram as constantes dos quadripolos calculados e as tabelas 3.4 a 3.6, os valores dos vetores das tensões e das correntes na entrada de cada quadripolo.

A ₁	R(1,1)=	.9941057	I(1,1)=	.0010463
	R(1,2)=	-.0010281	I(1,2)=	.0003995
	R(1,3)=	-.0010478	I(1,3)=	.0004738
	R(2,1)=	-.0011275	I(2,1)=	.0004364
	R(2,2)=	.9943120	I(2,2)=	.0010457
	R(2,3)=	-.0011277	I(2,3)=	.0004364
	R(3,1)=	-.0010479	I(3,1)=	.0004738
	R(3,2)=	-.0010282	I(3,2)=	.0003995
	R(3,3)=	.9941053	I(3,3)=	.0010463

B ₁	R(1,1)=	8.0614567	I(1,1)=	43.6196442
	R(1,2)=	4.3270464	I(1,2)=	14.1638756
	R(1,3)=	4.1931858	I(1,3)=	10.8439255
	R(2,1)=	4.3270483	I(2,1)=	14.1638546
	R(2,2)=	8.2490959	I(2,2)=	42.4469147
	R(2,3)=	4.3270473	I(2,3)=	14.1638508
	R(3,1)=	4.1931772	I(3,1)=	10.8439140
	R(3,2)=	4.3270397	I(3,2)=	14.1638565
	R(3,3)=	8.0614491	I(3,3)=	43.6196213

C ₁	R(1,1)=	-.0000001	I(1,1)=	.0002850
	R(1,2)=	-.0000000	I(1,2)=	-.0000387
	R(1,3)=	-.0000000	I(1,3)=	-.0000105
	R(2,1)=	-.0000000	I(2,1)=	-.0000387
	R(2,2)=	-.0000001	I(2,2)=	.0002934
	R(2,3)=	-.0000000	I(2,3)=	-.0000387
	R(3,1)=	-.0000000	I(3,1)=	-.0000105
	R(3,2)=	-.0000000	I(3,2)=	-.0000387
	R(3,3)=	-.0000001	I(3,3)=	.0002850

D ₁	R(1,1)=	.9954616	I(1,1)=	.0010477
	R(1,2)=	-.0011285	I(1,2)=	.0004370
	R(1,3)=	-.0010491	I(1,3)=	.0004744
	R(2,1)=	-.0010299	I(2,1)=	.0003997
	R(2,2)=	.9956670	I(2,2)=	.0010468
	R(2,3)=	-.0010300	I(2,3)=	.0003998
	R(3,1)=	-.0010499	I(3,1)=	.0004747
	R(3,2)=	-.0011293	I(3,2)=	.0004371
	R(3,3)=	.9954603	I(3,3)=	.0010478

Tabela 3.1.- Quadripolo 1

$\underline{A}_2 =$

!	R(1,1)=	.9998982	I(1,1)=	.0000180	!
!	R(1,2)=	-.0000169	I(1,2)=	.0000065	!
!	R(1,3)=	-.0000149	I(1,3)=	.0000069	!
!	R(1,4)=	-.0000139	I(1,4)=	.0000054	!
!	R(2,1)=	-.0000191	I(2,1)=	.0000075	!
!	R(2,2)=	.9999028	I(2,2)=	.0000178	!
!	R(2,3)=	-.0000159	I(2,3)=	.0000063	!
!	R(2,4)=	-.0000152	I(2,4)=	.0000052	!
!	R(3,1)=	-.0000176	I(3,1)=	.0000062	!
!	R(3,2)=	-.0000167	I(3,2)=	.0000067	!
!	R(3,3)=	.9999022	I(3,3)=	.0000172	!
!	R(3,4)=	-.0000171	I(3,4)=	.0000038	!
!	R(4,1)=	-.0000194	I(4,1)=	.0000079	!
!	R(4,2)=	-.0000184	I(4,2)=	.0000065	!
!	R(4,3)=	-.0000195	I(4,3)=	.0000035	!
!	R(4,4)=	.9998990	I(4,4)=	.0000214	!

 $\underline{B}_2 =$

!	R(1,1)=	1.0655973	I(1,1)=	5.7511244	!
!	R(1,2)=	.5726808	I(1,2)=	1.8693728	!
!	R(1,3)=	.5549932	I(1,3)=	1.4317667	!
!	R(1,4)=	.5449003	I(1,4)=	1.4641495	!
!	R(2,1)=	.5726807	I(2,1)=	1.8693755	!
!	R(2,2)=	1.0903134	I(2,2)=	5.5963964	!
!	R(2,3)=	.5726807	I(2,3)=	1.8693738	!
!	R(2,4)=	.5597235	I(2,4)=	1.8791478	!
!	R(3,1)=	.5549918	I(3,1)=	1.4317675	!
!	R(3,2)=	.5726800	I(3,2)=	1.8693705	!
!	R(3,3)=	1.0655973	I(3,3)=	5.7511225	!
!	R(3,4)=	.5504053	I(3,4)=	2.6350822	!
!	R(4,1)=	.5448992	I(4,1)=	1.4641467	!
!	R(4,2)=	.5597222	I(4,2)=	1.8791435	!
!	R(4,3)=	.5504051	I(4,3)=	2.6350875	!
!	R(4,4)=	1.5447247	I(4,4)=	7.2786684	!

\cdot
 $\underline{C}_2 =$

!	R(1,1)=	-.00000000	I(1,1)=	.00000376	!
!	R(1,2)=	-.00000000	I(1,2)=	-.00000051	!
!	R(1,3)=	-.00000000	I(1,3)=	-.00000012	!
!	R(1,4)=	-.00000000	I(1,4)=	-.00000006	!
!	R(2,1)=	-.00000000	I(2,1)=	-.00000051	!
!	R(2,2)=	-.00000000	I(2,2)=	.00000388	!
!	R(2,3)=	-.00000000	I(2,3)=	-.00000045	!
!	R(2,4)=	-.00000000	I(2,4)=	-.00000023	!
!	R(3,1)=	-.00000000	I(3,1)=	-.00000012	!
!	R(3,2)=	-.00000000	I(3,2)=	-.00000045	!
!	R(3,3)=	-.00000000	I(3,3)=	.00000394	!
!	R(3,4)=	-.00000000	I(3,4)=	-.00000076	!
!	R(4,1)=	-.00000000	I(4,1)=	-.00000006	!
!	R(4,2)=	-.00000000	I(4,2)=	-.00000023	!
!	R(4,3)=	.00000000	I(4,3)=	-.00000076	!
!	R(4,4)=	-.00000000	I(4,4)=	.00000312	!

 \cdot
 $\underline{D}_2 =$

!	R(1,1)=	1.0012605	I(1,1)=	.00000179	!
!	R(1,2)=	-.00000197	I(1,2)=	.00000073	!
!	R(1,3)=	-.00000181	I(1,3)=	.00000081	!
!	R(1,4)=	-.00000197	I(1,4)=	.00000077	!
!	R(2,1)=	-.00000161	I(2,1)=	.00000065	!
!	R(2,2)=	1.0012660	I(2,2)=	.00000178	!
!	R(2,3)=	-.00000162	I(2,3)=	.00000066	!
!	R(2,4)=	-.00000170	I(2,4)=	.00000065	!
!	R(3,1)=	-.00000142	I(3,1)=	.00000072	!
!	R(3,2)=	-.00000162	I(3,2)=	.00000064	!
!	R(3,3)=	1.0012653	I(3,3)=	.00000171	!
!	R(3,4)=	-.00000200	I(3,4)=	.00000033	!
!	R(4,1)=	-.00000145	I(4,1)=	.00000053	!
!	R(4,2)=	-.00000156	I(4,2)=	.00000053	!
!	R(4,3)=	-.00000170	I(4,3)=	.00000041	!
!	R(4,4)=	1.0012619	I(4,4)=	.00000216	!

Tabela 3.2.- Quadripolo 2

$\dot{A}_3 =$

R(1,1)=	.9667542	I(1,1)=	.0023475
R(1,2)=	-.0023074	I(1,2)=	.0008952
R(1,3)=	-.0023521	I(1,3)=	.0010620
R(2,1)=	-.0025307	I(2,1)=	.0009779
R(2,2)=	.9672178	I(2,2)=	.0023464
R(2,3)=	-.0025308	I(2,3)=	.0009779
R(3,1)=	-.0023522	I(3,1)=	.0010620
R(3,2)=	-.0023074	I(3,2)=	.0008953
R(3,3)=	.9667538	I(3,3)=	.0023475

 $\dot{B}_3 =$

R(1,1)=	12.0215530	I(1,1)=	65.2599640
R(1,2)=	6.4423342	I(1,2)=	21.1631355
R(1,3)=	6.2426214	I(1,3)=	16.1943665
R(2,1)=	6.4423389	I(2,1)=	21.1631126
R(2,2)=	12.3026237	I(2,2)=	63.5071030
R(2,3)=	6.4423361	I(2,3)=	21.1631050
R(3,1)=	6.2426119	I(3,1)=	16.1943512
R(3,2)=	6.4423265	I(3,2)=	21.1631126
R(3,3)=	12.0215454	I(3,3)=	65.2599182

 $\dot{C}_3 =$

R(1,1)=	-.0000003	I(1,1)=	.0004265
R(1,2)=	-.0000001	I(1,2)=	-.0000581
R(1,3)=	-.0000001	I(1,3)=	-.0000158
R(2,1)=	-.0000001	I(2,1)=	-.0000581
R(2,2)=	-.0000003	I(2,2)=	.0004391
R(2,3)=	-.0000001	I(2,3)=	-.0000581
R(3,1)=	-.0000001	I(3,1)=	-.0000158
R(3,2)=	-.0000001	I(3,2)=	-.0000581
R(3,3)=	-.0000003	I(3,3)=	.0004265

 $\dot{D}_3 =$

R(1,1)=	.9680999	I(1,1)=	.0023566
R(1,2)=	-.0025336	I(1,2)=	.0009793
R(1,3)=	-.0023551	I(1,3)=	.0010634
R(2,1)=	-.0023110	I(2,1)=	.0008962
R(2,2)=	.9680968	I(2,2)=	.0023493
R(2,3)=	-.0023111	I(2,3)=	.0008962
R(3,1)=	-.0023560	I(3,1)=	.0010636
R(3,2)=	-.0025344	I(3,2)=	.0009794
R(3,3)=	.9680989	I(3,3)=	.0023507

Tabela 3.3.- Quadripolo 3

VTOT(1)=	.1982026E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.2288380E+02	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1995193E+03	KV	(MODULO)
	6.59	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(2)=	-.1181887E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.1632311E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.2015266E+03	KV	(MODULO)
	125.91	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(3)=	-.8150331E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J	-.1865760E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.2036010E+03	KV	(MODULO)
	-113.60	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(1)=	.5548176E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.8154414E+02	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5607781E+03	A	(MODULO)
	8.36	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(2)=	-.3500942E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.4312408E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5554589E+03	A	(MODULO)
	129.07	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(3)=	-.2002419E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	-.5101606E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5480518E+03	A	(MODULO)
	-111.43	GRAUS	(ARGUMENTO)

Tabela 3.4.- Tensões e correntes na entrada do quadripolo 1.

VTOT(1)= .1979210E+03 KV (COMPONENTE REAL)
 J .2518433E+02 KV (COMPONENTE IMAGINARIA)

.1995168E+03 KV (MODULO)
 7.25 GRAUS (ARGUMENTO)

VTOT(2)= -.1199717E+03 KV (COMPONENTE REAL)
 J .1621452E+03 KV (COMPONENTE IMAGINARIA)

.2017034E+03 KV (MODULO)
 126.50 GRAUS (ARGUMENTO)

VTOT(3)= -.7958902E+02 KV (COMPONENTE REAL)
 J -.1878242E+03 KV (COMPONENTE IMAGINARIA)

.2039911E+03 KV (MODULO)
 -112.96 GRAUS (ARGUMENTO)

VTOT(4)= -.2053979E+02 KV (COMPONENTE REAL)
 J -.3535074E+02 KV (COMPONENTE IMAGINARIA)

.4088468E+02 KV (MODULO)
 -120.16 GRAUS (ARGUMENTO)

ITOT(1)=	.5552423E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.8981079E+02	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5624589E+03	A	(MODULO)
	9.19	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(2)=	-.3576998E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.4266158E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5567318E+03	A	(MODULO)
	129.98	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(3)=	-.1926370E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	-.5135747E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5485144E+03	A	(MODULO)
	-110.56	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(4)=	.1937151E-06	A	(COMPONENTE REAL)
J	.0000000E+00	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1937151E-06	A	(MODULO)
	.00	GRAUS	(ARGUMENTO)

Tabela 3.5.- Tensões e correntes na entrada do quadripolo 2.

VTOT(1)=	.1897037E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.5953362E+02	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1988259E+03	KV	(MODULO)
	17.42	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(2)=	-.1447119E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.1425397E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.2031234E+03	KV	(MODULO)
	135.43	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(3)=	-.4891042E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J	-.2027986E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.2086133E+03	KV	(MODULO)
	-103.56	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(1)=	.5397600E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.2109640E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5795228E+03	A	(MODULO)
	21.35	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(2)=	-.4585898E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.3403005E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5710597E+03	A	(MODULO)
	143.42	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(3)=	-.6994792E+02	A	(COMPONENTE REAL)
J	-.5444918E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.5489663E+03	A	(MODULO)
	-97.32	GRAUS	(ARGUMENTO)

Tabela 3.6.- Tensões e correntes na entrada do qua
dripolo 3.

Cómo foi demonstrado anteriormente, a matriz transposta de $\underline{\dot{A}}$ deveria ser igual a matriz $\underline{\dot{D}}$ para cada quadripolo, ou seja, as linhas da matriz $\underline{\dot{A}}$ deveriam ser iguais às colunas da matriz $\underline{\dot{D}}$ e vice-versa. Esta identidade ocorre para os primeiros algarismos significativos de cada número e não se estende para os demais, isto devido ao computador utilizado não operar com variáveis com dupla precisão para operações de números complexos.

Outro problema devido ao motivo acima mencionado, pode ser encontrado nas tabelas 3.4 a 3.6, onde por se tratar de uma configuração simétrica, as tensões e correntes nas fases externas deveriam ser iguais, a menos de um pequeno desbalanço causado pela extração de potência do condutor isolado, o que não ocorre.

Porém, este problema não invalida os resultados obtidos, pois as diferenças encontradas são mínimas. Para verificar tal fato, considere-se a figura 3.4 que mostra o perfil das tensões em cada fase para o Sistema de Transmissão C, com um carregamento de 2400[MW].

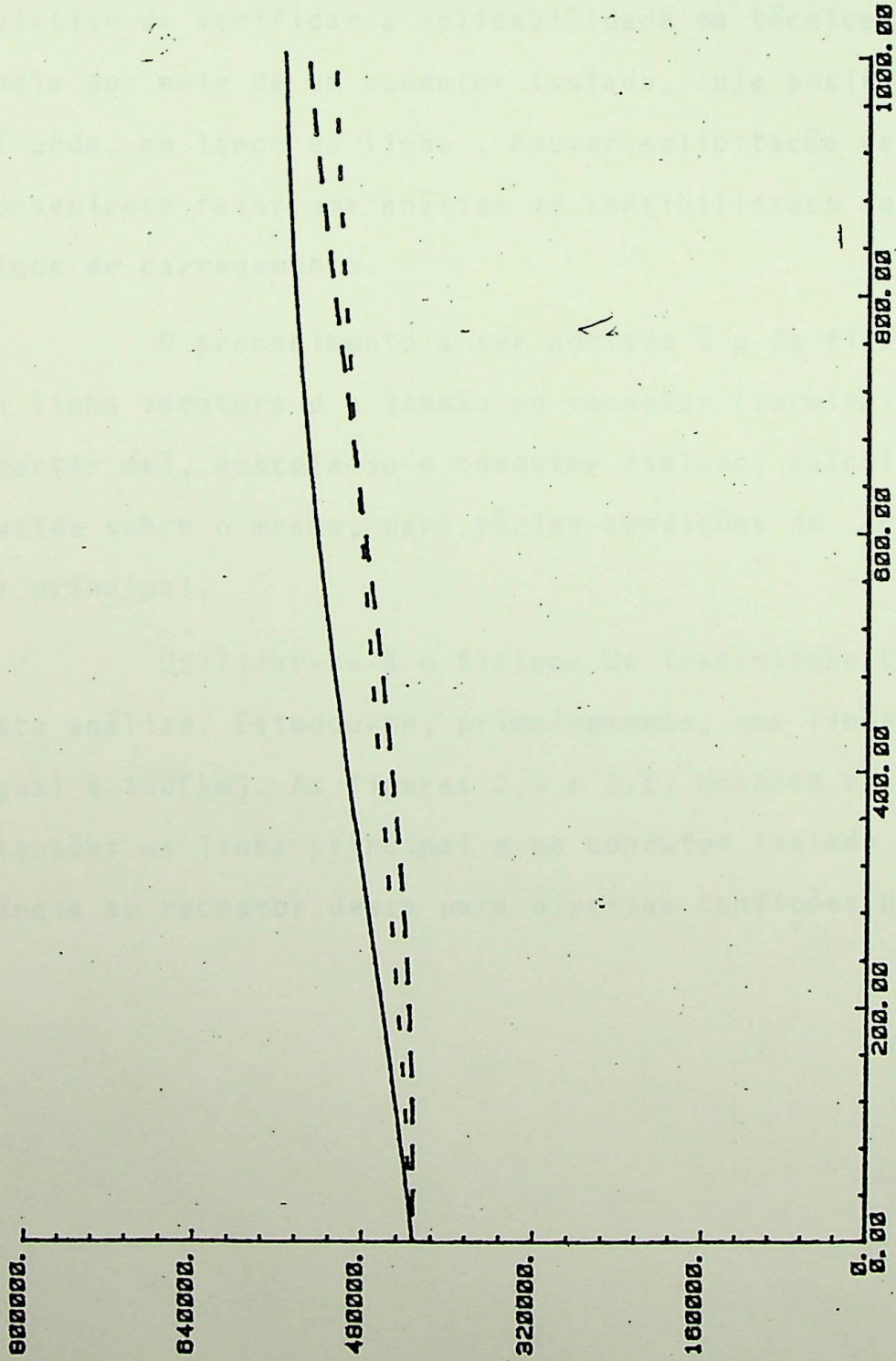


FIGURA 3.4.- Perfil das Tensões em Cada Fase.

LINHA		NOME DO GRAFICO	
—	—	FASE A	
- -	- -	FASE B	
—	—	FASE C	
ESC:	1:1	DATA:	MAR/88
OBS:		NUM:	3.4

TISE

3.4 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADES

Em estudos realizados sobre o perfil das tensões , nota-se que este depende das condições de carregamento da linha . Com o objetivo de verificar a aplicabilidade da técnica de extração de potência por meio de um condutor isolado, cuja posição depende do local onde, ao longo da linha , houver solicitação de carga, torna-se conveniente fazer uma análise de sensibilidades em alguns casos típicos de carregamento.

O procedimento a ser adotado é o de fixar o comprimento da linha indutora e a tensão no receptor (terminais da carga). A partir daí, descola-se o condutor isolado, calculando a tensão induzida sobre o mesmo, para várias condições de carregamento da linha principal.

Utilizar-se-á o Sistema de Transmissão C, como exemplo, nesta análise. Estudou-se, primeiramente, uma linha de comprimento igual a 150[km]. As figuras 3.5 e 3.6, mostram o comportamento das tensões na linha principal e no condutor isolado em função da distância ao receptor desta para diversas condições de carregamento.

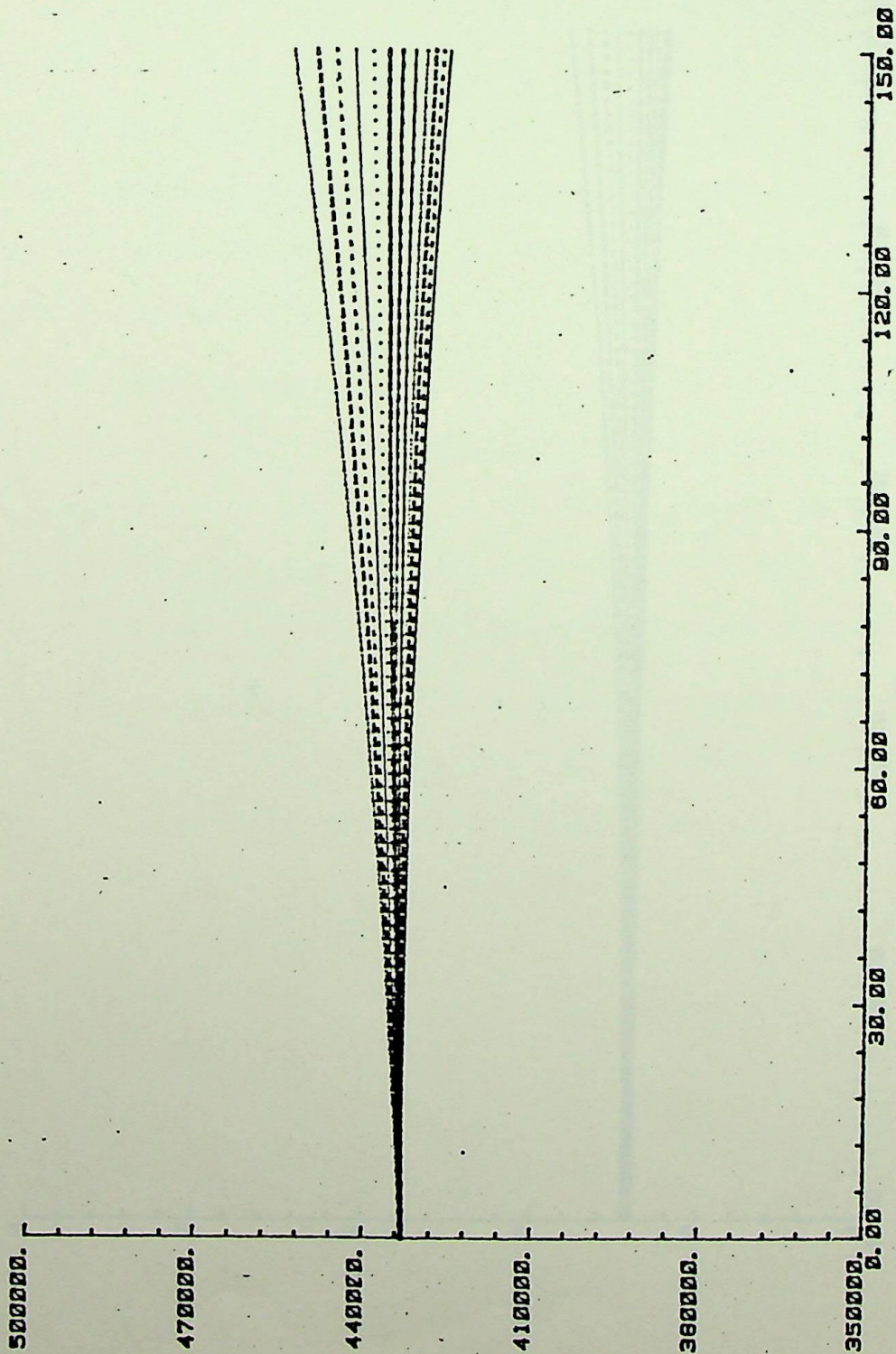
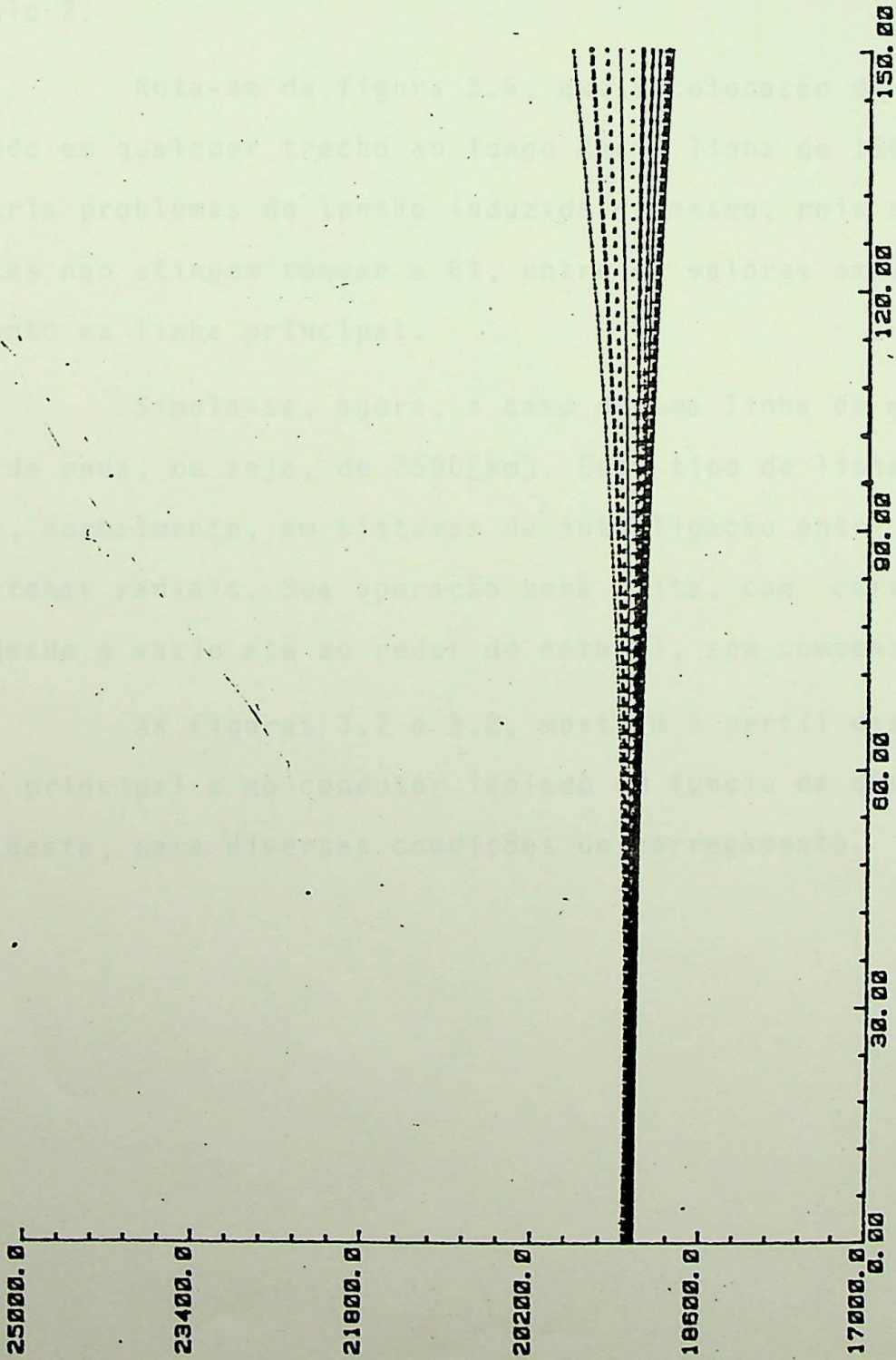


Figura 3.5 - Tensão na Linha Principal em Função da Distância ao Receptor, para Várias Condições de Carregamento.

LINHA	NOME DO GRAFICO
—	7 MV
---	3200 MV
—	6000 MV
—	9500 MV
—	12000 MV
—	16000 MV
—	18000 MV
.....	21200 MV
—	24000 MV
---	27000 MV
—	30000 MV
—	32000 MV
ESC: 1:1	DATA: MAR/80
OBS:	
NUM:	

TESE



LINHA	NOME DO GRAFICO
---	PLT - 0 MV
---	PLT - 3000 MV
---	PLT - 0300 MV
---	PLT - 9000 MV
---	PLT - 12000 MV
---	PLT - 15000 MV
---	PLT - 18000 MV
.....	PLT - 21000 MV
---	PLT - 24000 MV
---	PLT - 27000 MV
---	PLT - 30000 MV
ESC: 1:1	DATA: MAR/86
OBS:	

Figura 3.6 - Tensão Induzida no Condutor Isolado em Função da Distância ao Receptor, para Várias Condições de Carregamento da Linha Principal.

Verifica-se destas figuras, que o comportamento entre as curvas, para um mesmo carregamento, é bastante semelhante. Este fato vem a comprovar que, a tensão induzida no condutor isolado depende, basicamente, da tensão na linha principal, como visto no capítulo 2.

Nota-se da figura 3.6, que a colocação de um condutor isolado em qualquer trecho ao longo desta linha de 150[km], não apresentaria problemas de tensão induzida no mesmo, pois as variações destas não atingem sequer a 6%, entre os valores extremos de carregamento na linha principal.

Simula-se, agora, o caso de uma linha de meio comprimento de onda, ou seja, de 2500[km]. Este tipo de linha pode vir a existir, normalmente, em sistemas de interligação entre regiões ou em sistemas radiais. Sua operação será feita, com carregamentos que vão desde o vazio até ao redor do natural, sem compensação.

As figuras 3.7 e 3.8, mostram o perfil das tensões na linha principal e no condutor isolado em função da distância ao receptor desta, para diversas condições de carregamento.

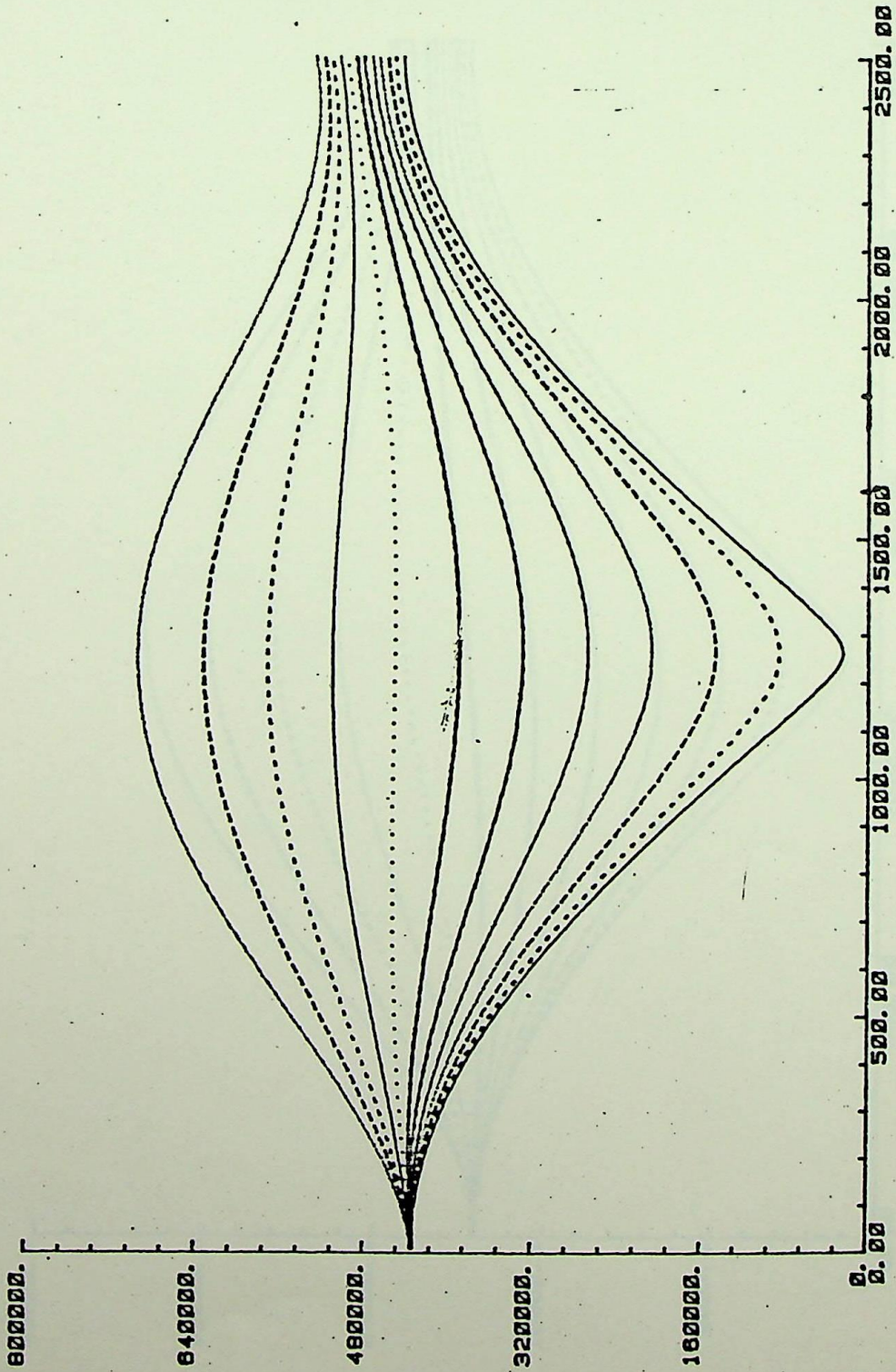
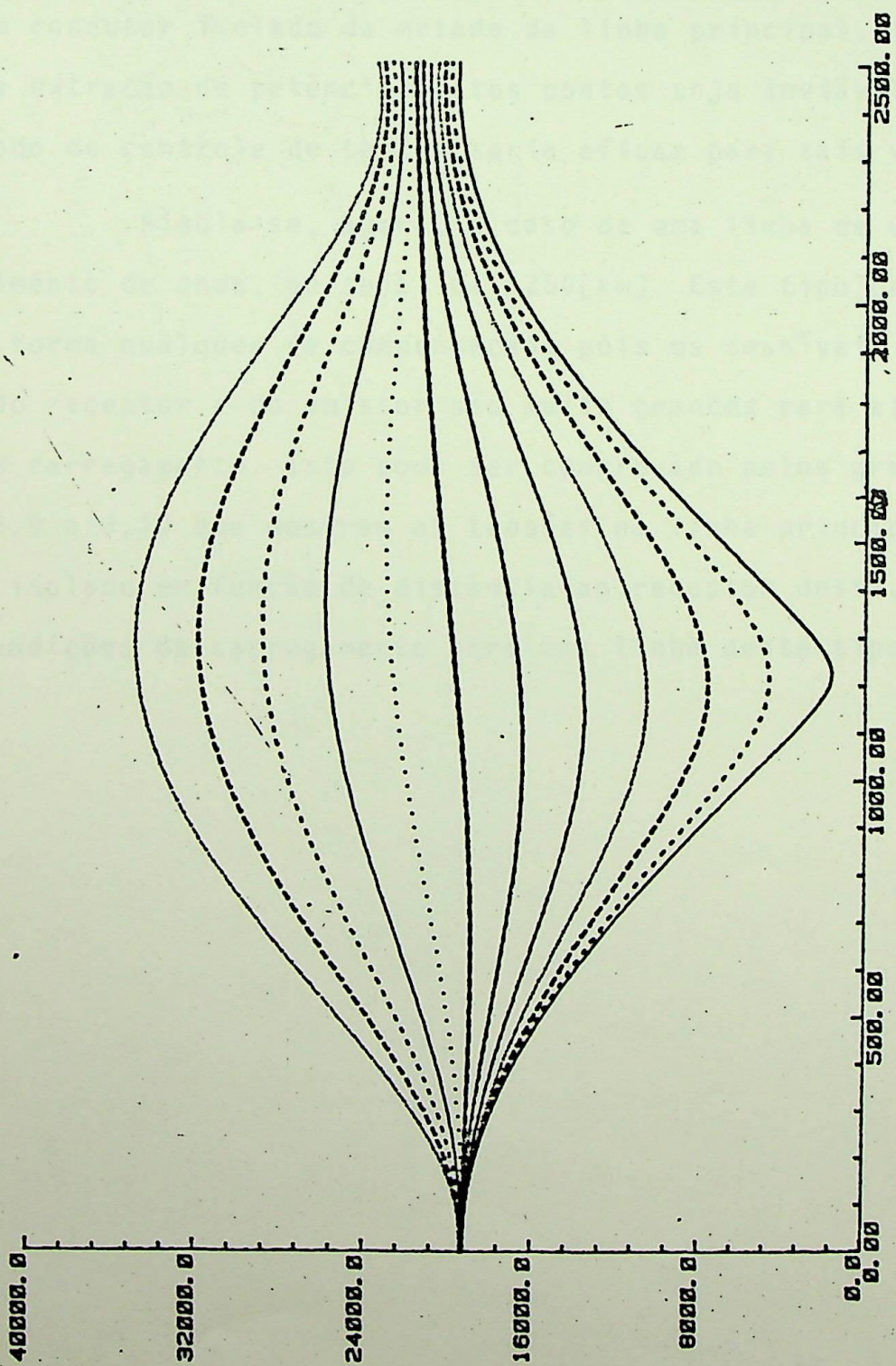


Figura 3.7 - Tensão na Linha Principal em Função da Distância ao Receptor, para Várias Condições de Carregamento.

LINHA	NOME DO GRAFICO
—	8 MV
- - -	368 MV
- - -	688 MV
- - -	908 MV
- - -	1208 MV
- - -	1608 MV
- - -	1828 MV
.....	2128 MV
- - -	2408 MV
- - -	2708 MV
- - -	3008 MV
- - -	3278 MV

ESC:	DATA:	NUM:
1: 1	MAR/80	

OBS:

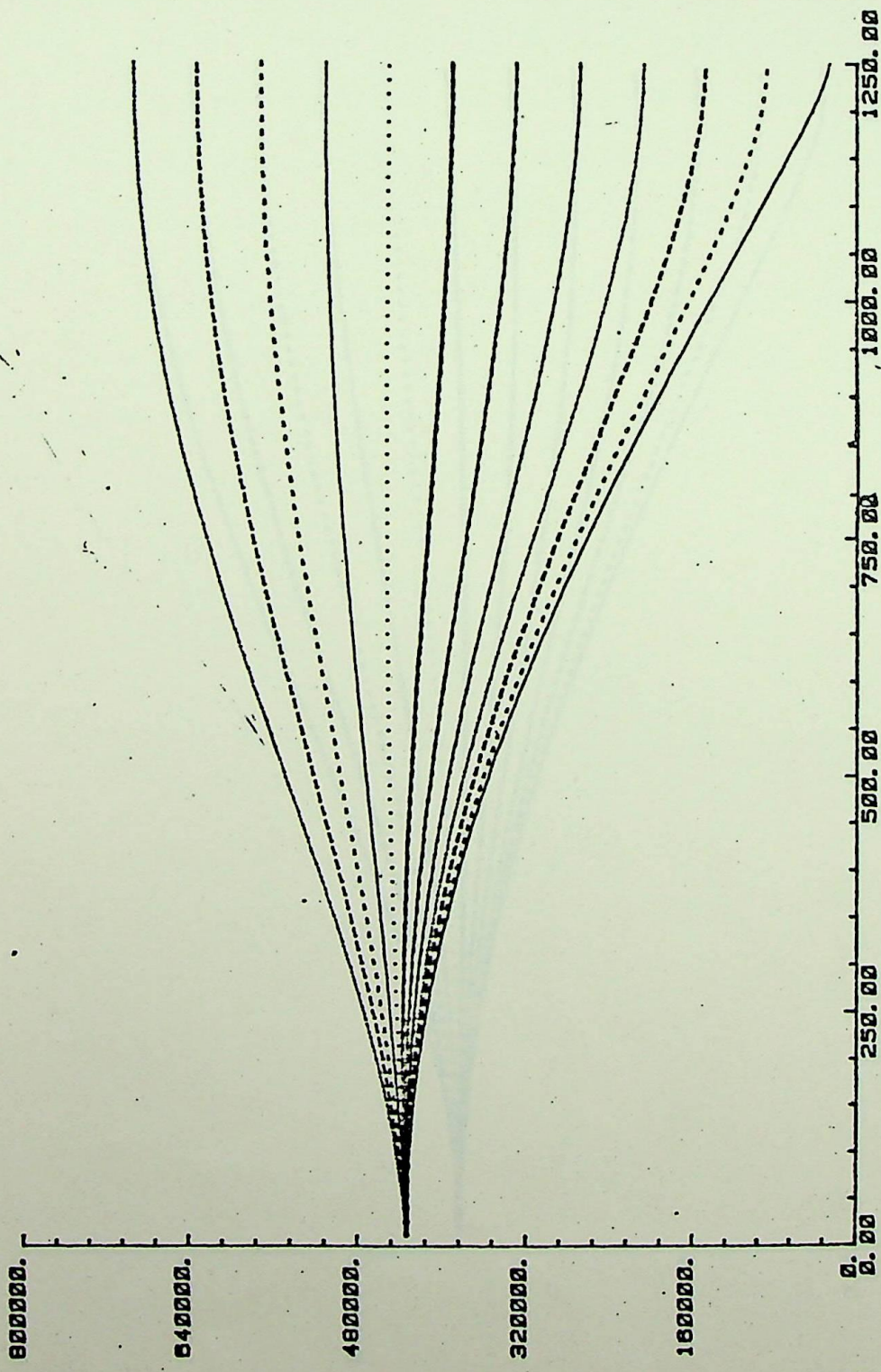


LINHA	NOME DO GRAFICO
---	PLT - 0 MV
---	PLT - 300 MV
---	PLT - 600 MV
---	PLT - 900 MV
---	PLT - 1200 MV
---	PLT - 1500 MV
---	PLT - 1800 MV
.....	PLT - 2100 MV
---	PLT - 2400 MV
---	PLT - 2700 MV
---	PLT - 3000 MV
---	PLT - 3300 MV
ESC: 1:1	DATA: MAR/86
OBS:	
	NUM:

Figura 3.8 - Tensão Induzida no Condutor Isolado em Função da Distância ao Receptor, para Várias Condições de Carregamento da Linha Principal

Verifica-se das figuras que o perfil das tensões ao longo da linha principal varia muito com o seu carregamento. Isto faz com que as tensões induzidas no condutor isolado, também, variem bastante. Este fato é tanto mais acentuado quanto mais próximo estiver o condutor isolado da metade da linha principal. Isto faz com que a extração de potência nestes pontos seja inviável, pois nenhum método de controle de tensão seria eficaz para tais variações.

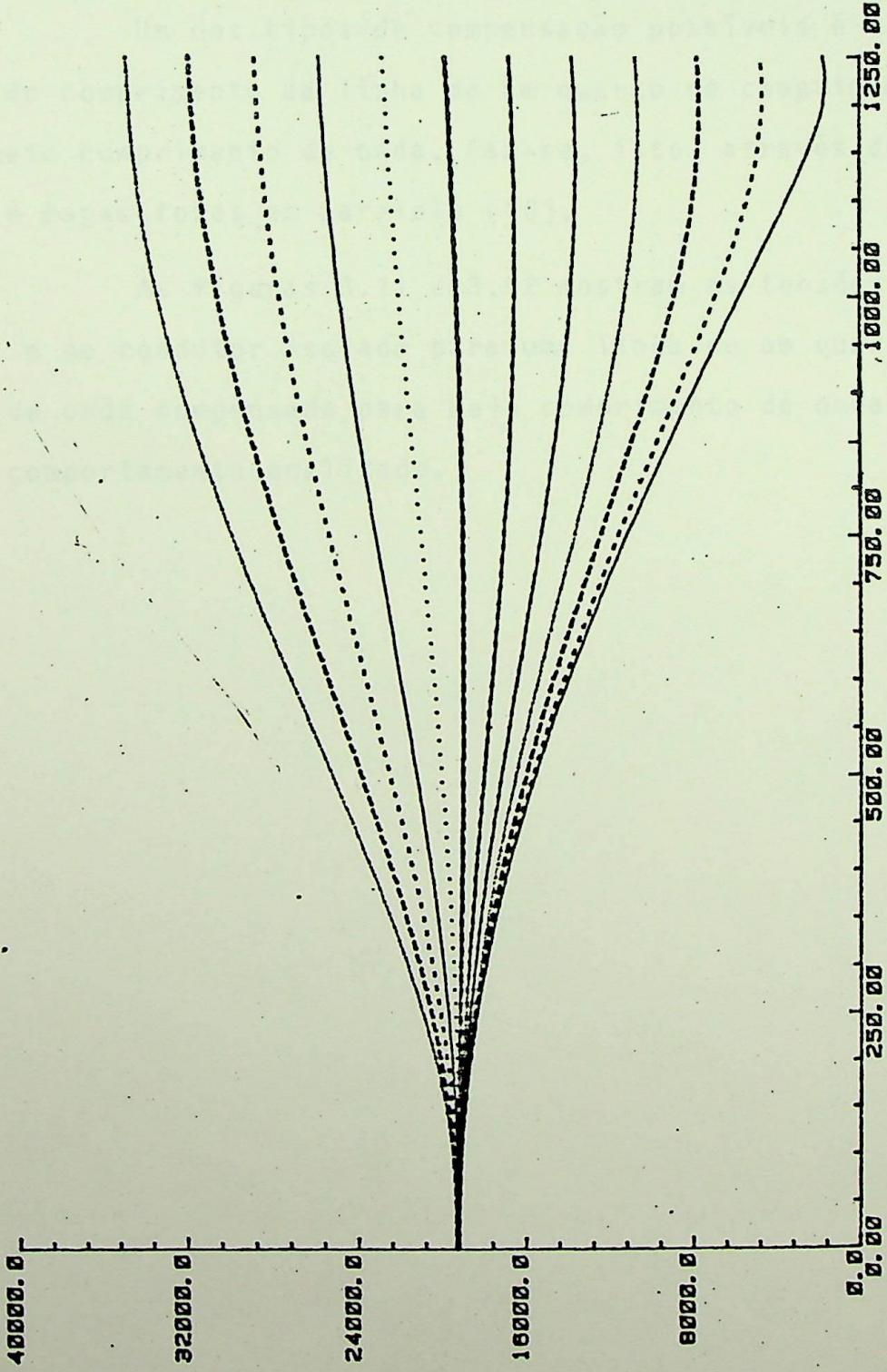
Simula-se, agora, o caso de uma linha de um quarto de comprimento de onda, ou seja, de 1250[km]. Este tipo de linha exige uma forma qualquer de compensação, pois os desníveis entre as tensões do receptor e do emissor são muito grandes para algumas condições de carregamento. Isto pode ser comprovado pelos gráficos das figuras 3.9 e 3.10 que mostram as tensões na linha principal e no condutor isolado em função da distância ao receptor desta, para diversas condições de carregamento para uma linha deste tipo sem compensação.



LINHA	NOME DO GRAFICO
—	0 MV
- - -	300 MV
- - -	600 MV
- - -	900 MV
- - -	1200 MV
- - -	1500 MV
- - -	1800 MV
.....	2100 MV
- - -	2400 MV
- - -	2700 MV
- - -	3000 MV
- - -	3300 MV

EBC:	DATA:	NUM:
1: 1	MAR/80	
OBS:		

Figura 3.9 - Tensão na Linha Principal em Função da Distância ao Receptor, para Várias Condições de Carregamento



LINHA	NOME DO GRAFICO
—	PLT - 8 MV
- - -	PLT - 368 MV
—	PLT - 688 MV
—	PLT - 908 MV
—	PLT - 1288 MV
—	PLT - 1888 MV
—	PLT - 1888 MV
.....	PLT - 2182 MV
—	PLT - 2488 MV
- - -	PLT - 2788 MV
—	PLT - 3088 MV
—	PLT - 3288 MV

ESCA:
1 : 1

DATA:
MAR/88

NUM:

OBS:

Figura 3.10 - Tensão Induzida no Condutor Isolado em Função da Distância ao Receptor, para Várias Condições de Carregamento da Linha Principal

Verifica-se que realmente, o funcionamento desta linha sem compensação é impossível devido aos desníveis de tensões entre os seus extremos, o que inviabiliza a extração de potência por meio do condutor isolado.

Um dos tipos de compensação possíveis é a expansão elétrica do comprimento da linha de um quarto de comprimento de onda para meio comprimento de onda. Faz-se, isto, através de indutor em série e capacitores em paralelo [10].

As figuras 3.11 e 3.12 mostram as tensões na linha principal e no condutor isolado para uma linha de um quarto de comprimento de onda compensada para meio comprimento de onda, que já teve seu comportamento analisado.

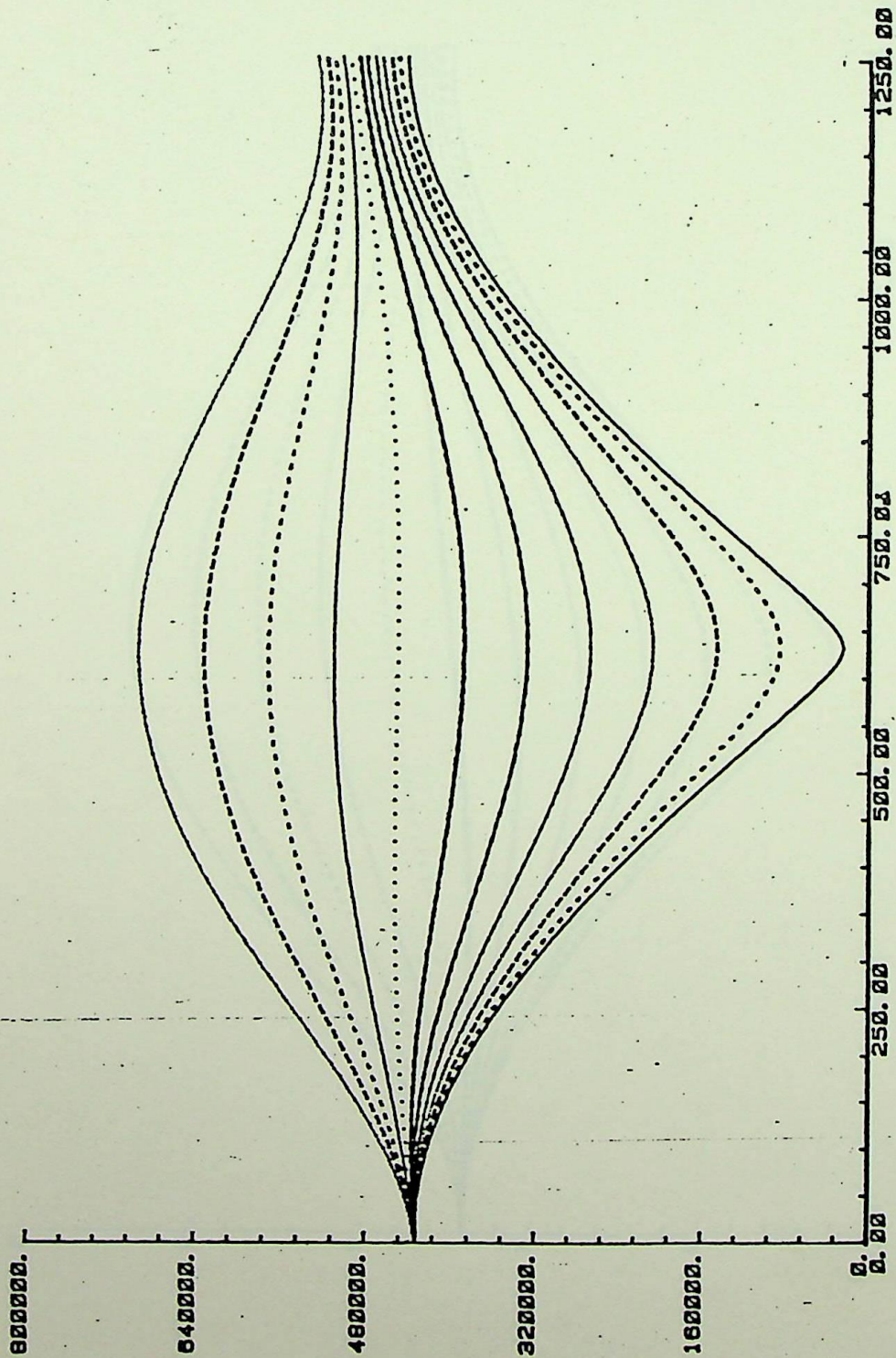


FIGURA 3.11.- Tensão na Linha Principal em Função da Distância ao Receptor para uma Linha Compensada..

LINHA	NOME DO GRAFICO
—	0 MV
—	300 MV
—	600 MV
—	900 MV
—	1200 MV
—	1500 MV
—	1800 MV
—	2100 MV
—	2400 MV
—	2700 MV
—	3000 MV
—	3300 MV

ESC:	DATA:	NUM:
1:1	MAR/88	02
OBS:		

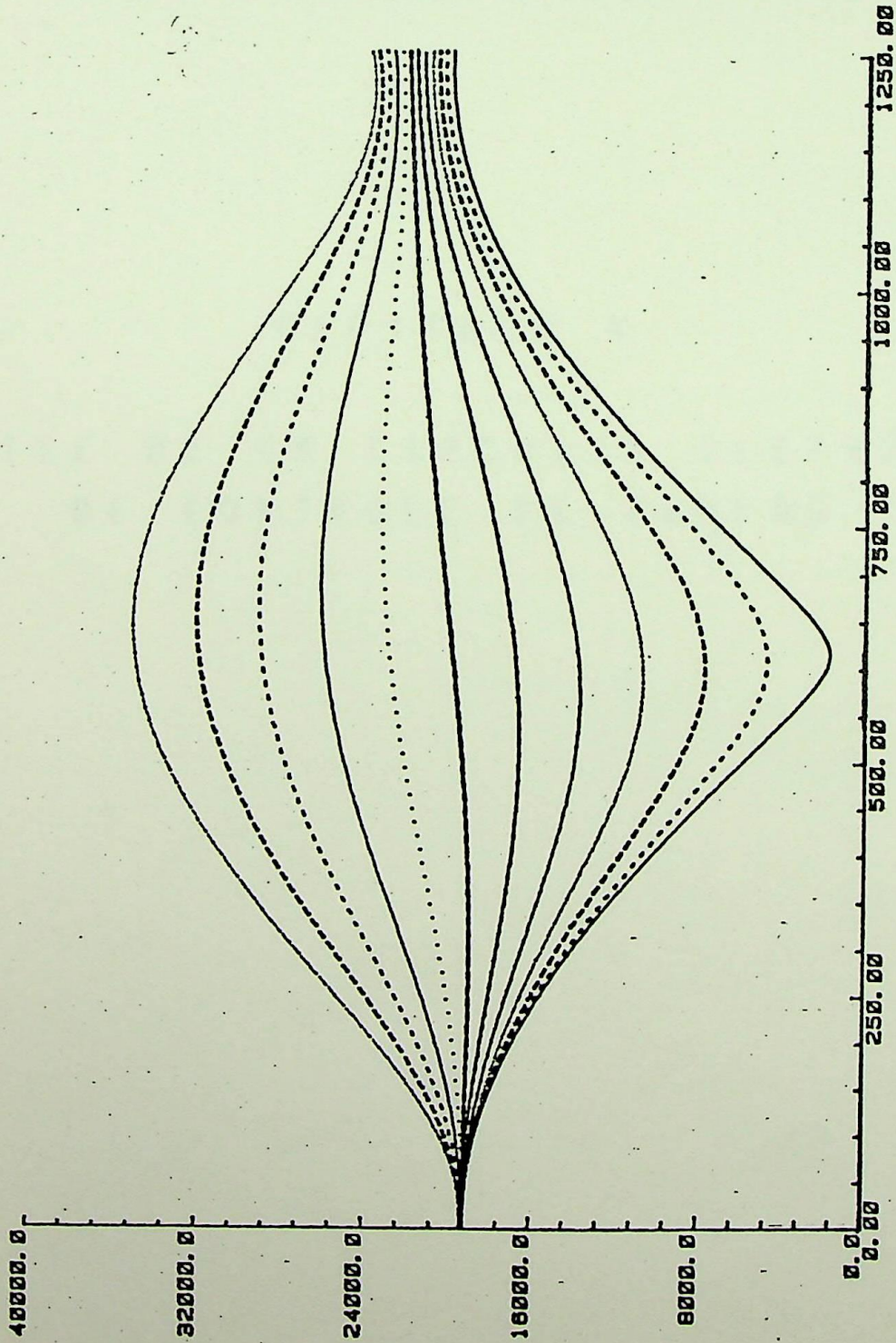


FIGURA 3.12.- Tensão Induzida no Condutor Isolado em Função da Distância ao Receptor, para uma Linha Compensada.

LINHA	NOME DO GRAFICO
---	PLT - 8 KV
---	PLT - 300 KV
---	PLT - 600 KV
---	PLT - 900 KV
---	PLT - 1200 KV
---	PLT - 1500 KV
---	PLT - 1800 KV
---	PLT - 2100 KV
---	PLT - 2400 KV
---	PLT - 2700 KV
---	PLT - 3000 KV
---	PLT - 3300 KV

ESC:	DATA:	NUM:
1: 1	MAR/86	02

OBS:

TESE

ANÁLISE DE UM CIRCUITO ELETRÔNICO DE CONTROLE DE TENSÃO

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE UM CIRCUITO ELETRÔNICO DE CONTROLE DE TENSÃO

CAPITULO 4

ANÁLISE DE UM CIRCUITO ELETRÔNICO DE CONTROLE DE TENSÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

No capítulo 2, optou-se por descrever uma solução para controlar a tensão nos terminais da carga que utilizava um circuito LC. Devido a constatação de alguns problemas, comentados no decorrer do mesmo capítulo, surgiu então a proposta da introdução de um circuito eletrônico que viesse eliminar os problemas mencionados e dar uma maior flexibilidade de controle e de operação ao sistema de distribuição alimentado pelo condutor isolado.

O circuito eletrônico de controle a ser utilizado deve possuir, entre outras, as seguintes características básicas:

- ser de baixo custo;
- permitir manutenção simples e rápida; e
- permitir, dentro de certos limites, um controle efetivo da tensão do sistema de distribuição.

As duas primeiras exigências são facilmente justificadas pelo enfoque do sistema proposto ser utilizado na alimentação de pequenas vilas ou empreendimentos agro-pecuários. Em tais casos, custos elevados inviabilizariam o projeto e a inexistência ou escassez de técnicos especializados impõe a condição de que a manu

tenção, quando aconselhável, seja muito simples e rápida, do tipo troca de placas de circuitos eletrônicos ou similar, atividades que seriam da responsabilidade de um ou mais membros da própria comunidade, instruídos para tal por técnicos da concessionária responsável pelo sistema.

A idéia deste controle de tensão através de chaves eletrônicas seria o de poder fixar o valor rms da tensão nos terminais da impedância de carga, independente da variação da mesma. Para tal foi escolhido o sistema de tiristores em anti-paralelo, que se adapta perfeitamente ao estudo a ser realizado. Existem dois tipos de controle para este tipo de configuração: on-off e o de fase, ambos abordados por S.B. Dewan e A. Straughen em [11].

A filosofia do controle on-off é utilizar as chaves atuando por alguns ciclos conectadas e por um período de ciclos idênticos desconectadas, como fosse um contator de alta-velocidade. O controle de fase utiliza a conexão e a desconexão do circuito a intervalos de um mesmo ciclo. O controle utilizado será o de fase, por ser mais maleável às situações encontradas nos sistemas elétricos, como é notado pelo seu grande uso junto a indústrias eletroquímicas, no controle de velocidade de motores de indução, na eletrotermia, entre outras. O controle on-off não deve ser aplicado.

A introdução do circuito de tiristores na configuração condutor isolado-carga pode se dar de algumas formas. Foram escolhidas duas: uma que utiliza carga fictícia e a outra que exige um transformador de três enrolamentos. Esta escolha prende-se ao fa

to de que a primeira é amplamente utilizada em sistemas industriais e a segunda foi proposta em [7] e [4], estando em operação na Eletroperu.

O controle da tensão nos terminais da carga através da proposta que utiliza a carga fictícia é feito pelo ajuste de corrente no secundário do transformador, enquanto que na proposta com o transformador de três enrolamentos é feito pelo ajuste da tensão em um enrolamento auxiliar (terceiro enrolamento), como será verificado nos ítems a seguir.

4.2 - ANÁLISE DO CONTROLE DE TENSÃO UTILIZANDO TIRISTORES EM ANTI-PARALELO COM CARGA FICTÍCIA.

Este modelo possui a configuração apresentada na figura 4.1, onde encontram-se representados a linha principal, o condutor isolado, o transformador abaixador e no seu secundário, ligados em paralelo, a impedância de carga a ser alimentada e o dispositivo eletrônico de controle de tensão. Ao dispositivo eletrônico utilizado dá-se o nome de regulador eletrônico.

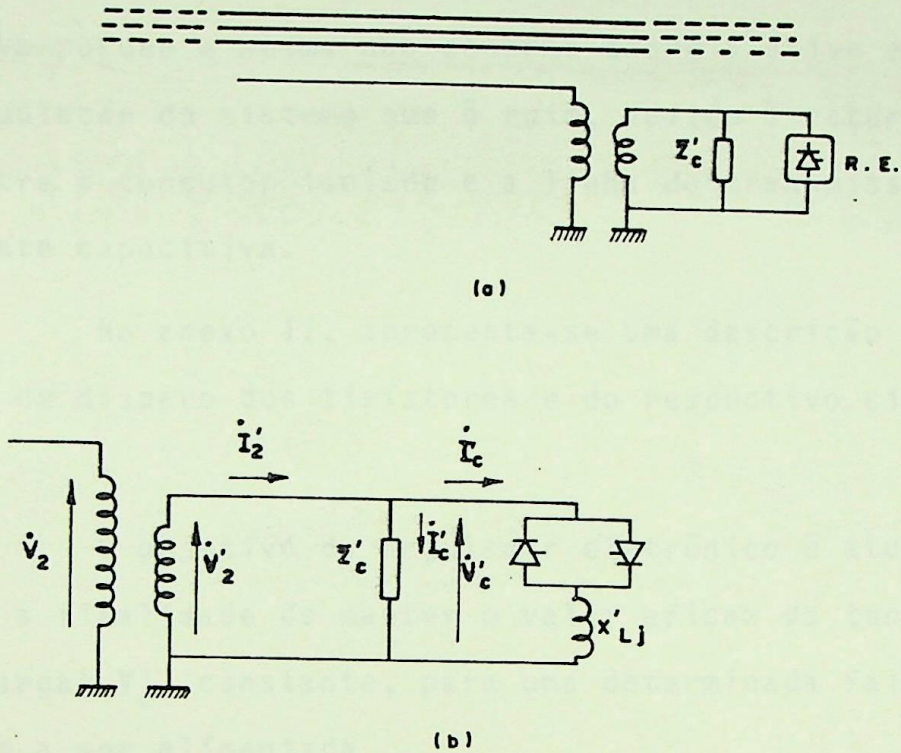


Figura 4.1.- Proposta de controle da tensão na carga, através de tiristores em anti-paralelo com carga fictícia:

(a) circuito geral;

(b) circuito do condutor isolado (detalhe).

O regulador eletrônico é dotado, como pode ser verificado na figura 4.1(b), de tiristores em anti-paralelo em série com uma impedância. Esta poderia ser de qualquer natureza, ou seja, capacitiva, indutiva ou resistiva. Optou-se pela impedância de natu

reza indutiva porque a mesma não consome energia ativa e ajuda a melhorar a regulação do sistema que é ruim, devido à natureza do acoplamento entre o condutor isolado e a linha de transmissão ser predominantemente capacitiva.

No anexo II, apresenta-se uma descrição detalhada do circuito de disparo dos tiristores e do respectivo circuito de controle.

O objetivo do regulador eletrônico é atuar sobre o sistema com a finalidade de manter o valor eficaz da tensão nos terminais da carga; V'_c , constante, para uma determinada faixa de valores da carga a ser alimentada.

Considere-se o circuito equivalente mostrado na figura 4.2,

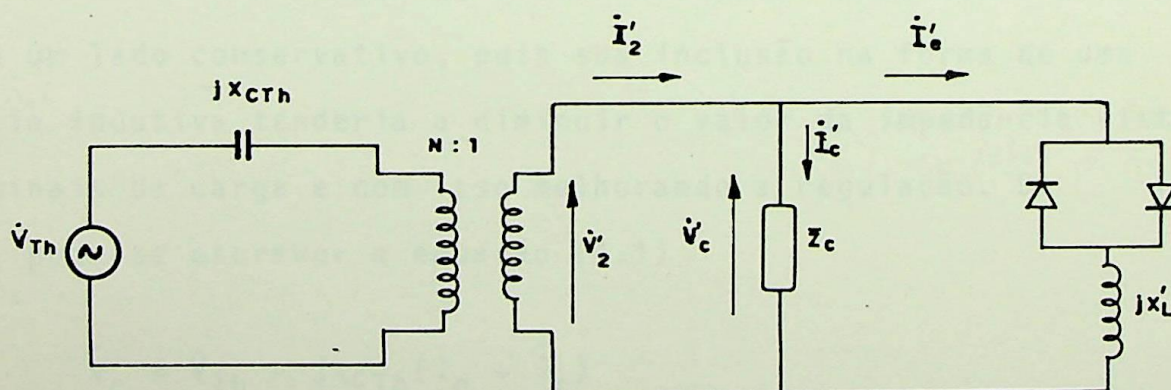


Figura 4.2.- Circuito equivalente, com transformador.

onde \dot{V}_{Th} e x_{cTh} , representam a tensão induzida no condutor isolado e a impedância de Thevenin vista pelo mesmo. Adotando-se um trans

formador ideal, referem-se os elementos do secundário para o primário, dando origem à figura 4.3.

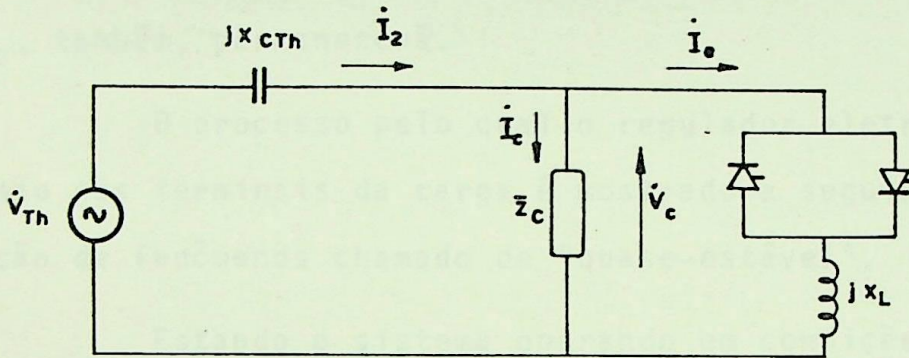


Figura 4.3.- Circuito equivalente, sem transformador.

A adoção de um transformador ideal leva o estudo para um lado conservativo, pois sua inclusão na forma de uma impedância indutiva tenderia a diminuir o valor da impedância vista dos terminais da carga e com isso melhorando a regulação. Da figura 4.3, pode-se escrever a equação (4.1)

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{Th} - jX_{CTh}(\dot{i}_e + \dot{i}_c) \quad (4.1)$$

Os valores de \dot{V}_{Th} e X_{CTh} não dependem da carga e podem ser assumidos como variáveis independentes. O valor da tensão v_{Th} é imposto pela linha principal e será adotado como perfeitamente senoidal, com período e amplitude constantes. A impedância X_{CTh} é calculada de acordo com a configuração do sistema linha de transmissão-condutor isolado e será adotada constante.

Com isto, concluiu-se que, o valor eficaz da tensão nos terminais da carga, V_C , só depende da soma das correntes i_e e i_c , e, se o valor eficaz de sua soma, I_2 , permanecer invariável, a tensão V_C , também, permanecerá.

O processo pelo qual o regulador eletrônico controla a tensão nos terminais da carga é mostrado a seguir, utilizando a descrição de fenômenos chamado de "quase-estável".

Estando o sistema operando em condições nominais, diminui-se a impedância de carga \bar{Z}_C . Com o valor da tensão V_C , ainda constante, o valor da corrente I_C é aumentado e, por conseguinte, a queda de tensão em X_{CTH} , também, o que produz uma diminuição do valor da tensão V_C . O controle percebe este fato e varia o ângulo de disparo dos tiristores, para que o valor da corrente I_e diminua, de tal forma que o valor da corrente I_2 volte ao inicial, fazendo com que a queda de tensão em X_{CTH} e o valor da tensão V_C voltem aos seus valores iniciais.

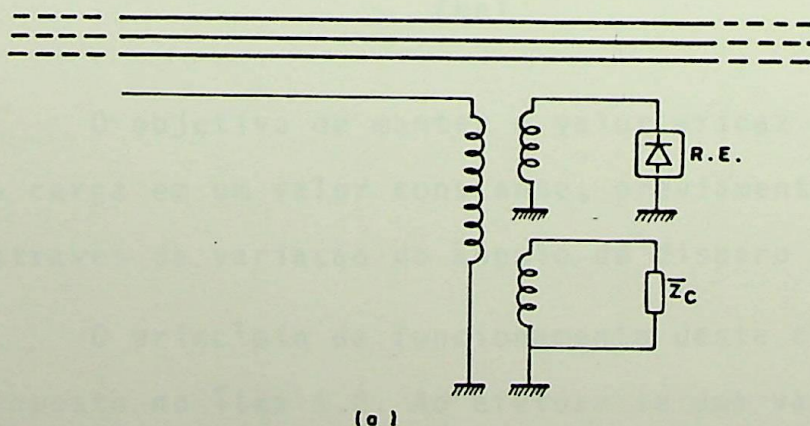
O processo de controle da tensão para um aumento da impedância de carga é análogo ao descrito, porém o ângulo de disparo dos tiristores deve variar no sentido oposto.

4.3 - ANÁLISE DO CONTROLE DE TENSÃO UTILIZANDO TIRISTORES EM ANTI-PARALELO NO TERCIÁRIO DE UM TRANSFORMADOR

A proposição de se controlar a tensão sobre os terminais da carga, através de um regulador eletrônico colocado em um terciário do transformador abaixador, foi posta em prática na cidade de Nahuimpuquio, uma pequena localidade peruana nos Andes.

O projeto foi realizado através de um consórcio entre a Eletroperu S.A. e a Companhia Hydro Quebec, tendo sido construído pela firma canadense BG Checo International Limited. A instalação, posta a funcionar em agosto de 1981, apresenta bom desempenho como mostrado no relatório técnico [6].

Este sistema possui a configuração apresentada na figura 4.4, onde se representa a linha principal, o condutor isolado, um transformador abaixador de três enrolamentos, a carga a ser alimentada e o regulador eletrônico.



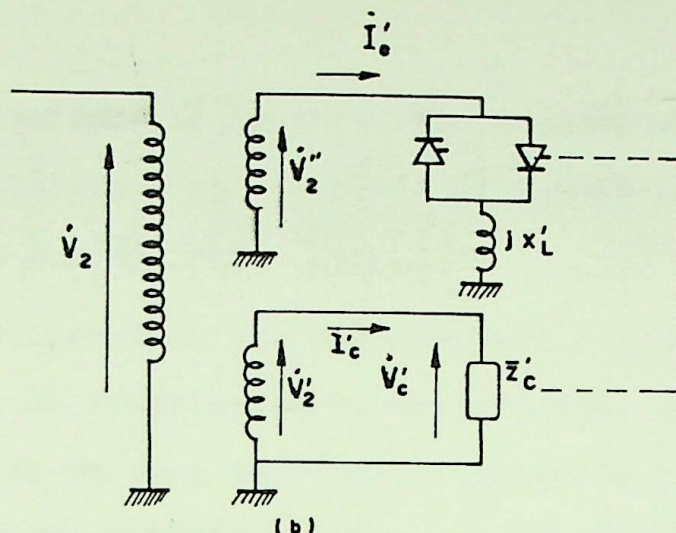


Figura 4.4.- Proposta de controle da tensão na carga, através de tiristores em anti-paralelo com um transformador de três enrolamentos:

(a) circuito geral;

(b) circuito do condutor isolado (detalhe)

O objetivo de manter o valor eficaz da tensão nos terminais da carga em um valor constante, previamente estipulado, é conseguido através da variação do ângulo de disparo dos tiristores.

O princípio de funcionamento deste controle é semelhante ao proposto no item 4.2. Ao efetuar-se uma variação na carga Z'_C , muda-se o valor eficaz da corrente e da tensão nos terminais da carga. Esta variação é detectada pelo regulador eletrônico que atua no ângulo de disparo dos tiristores no sentido de variar convenientemente.

temente a força contra-eletromotriz, V_2'' , e assim variar a tensão v_2' . Isto ocorre até que o valor eficaz da tensão nos terminais da carga volte a ser o pré-fixado.

Dispensa-se uma análise mais rígida ou uma modelagem mais completa do transformador, neste ponto, pois o interesse é somente pela tensão em seus terminais secundário e terciário. O que poderia vir a ser mais crítico, seria um transformador com uma má regulação, mas mesmo assim este fato só iria gerar uma faixa de variação maior da tensão de saída que poderia ser monitorada pelo controle.

Considere-se, o circuito equivalente mostrado na figura 4.5,

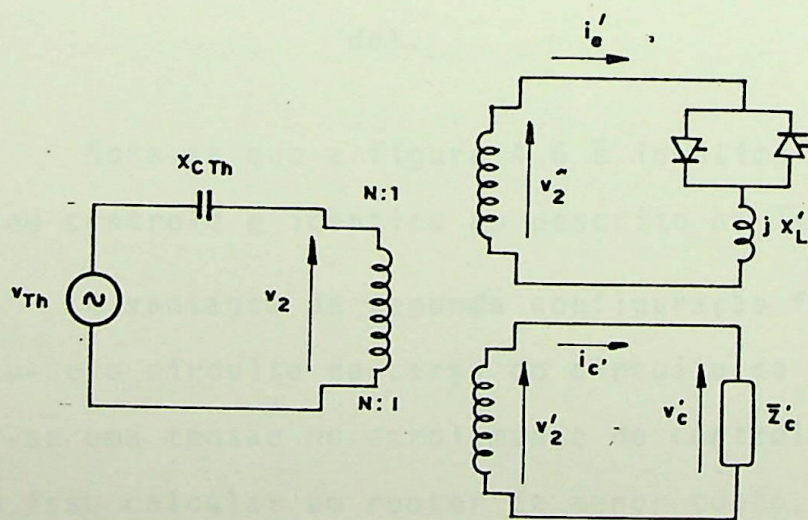


Figura 4.5.- Circuito equivalente, com transformador.

onde as grandezas v_{Th} e X_{CTh} são as mesmas apresentadas na figura

4.2. Referindo-se os elementos do secundário e do terciário para o primário, dá-se origem a figura 4.6

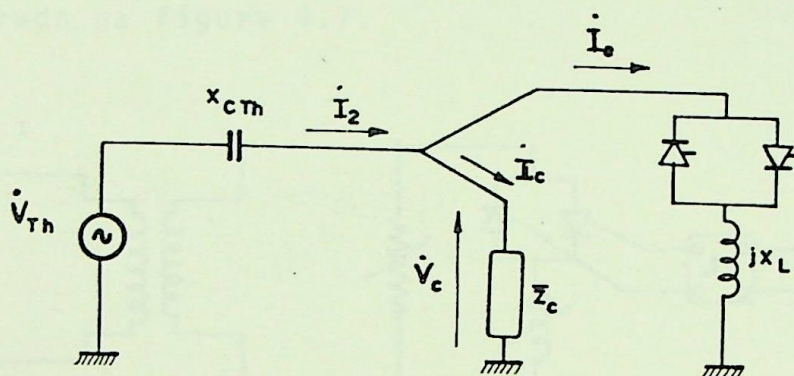


Figura 4.6.- Circuito equivalente, sem transformador.

Nota-se que a figura 4.6 é idêntica à figura 4.3 . Portanto o seu controle é idêntico ao descrito no ítem 4.2.

A vantagem da segunda configuração face a primeira é que separou-se o circuito de carga do circuito de controle. Isto conduz a ter-se uma tensão no enrolamento de controle própria, podendo-se com isso calcular um reator de menor custo.

4.4 - RESULTADOS DE ALGUNS ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Com a finalidade de verificar o comportamento do circuito eletrônico de controle, montou-se, em laboratório, o circuito mostrado na figura 4.7.

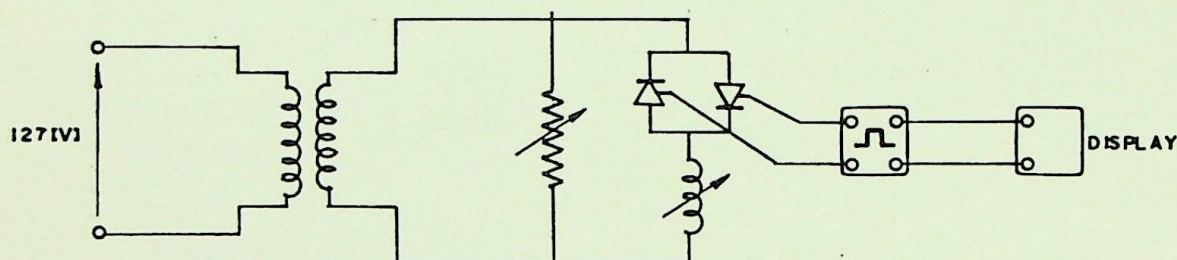


Figura 4.7.- Circuito I montado no laboratório.

O arranjo foi composto por um transformador monofásico, que permite diversos tipos de ligação, tanto em seu primário quanto em seu secundário, uma resistência variável, que fez o papel de carga e o regulador eletrônico com diversos valores de indutância.

Aplicou-se uma tensão fase-neutro de 127[V] com o transformador ligado de maneira que tivesse relação 1:1.

O controle do ângulo de disparo, que quando da operação normal é realizado automaticamente, foi colocado em operação manual, com a finalidade de verificar a variação da forma de onda e do valor eficaz da tensão nos terminais da carga para diversos ângulos de disparo.

Ajustou-se a resistência de carga, para um valor i igual a $75[\Omega]$. Variando-se o ângulo de disparo mediu-se o valor eficaz da tensão nos terminais da carga e oscilografou-se sua forma , como mostrado na figura 4.8.



Figura 4.8 - Forma de onda nos terminais da carga para ângulo de disparo de 10° e 30° .
Escala: 10V/div , $10\mu\text{s/div}$

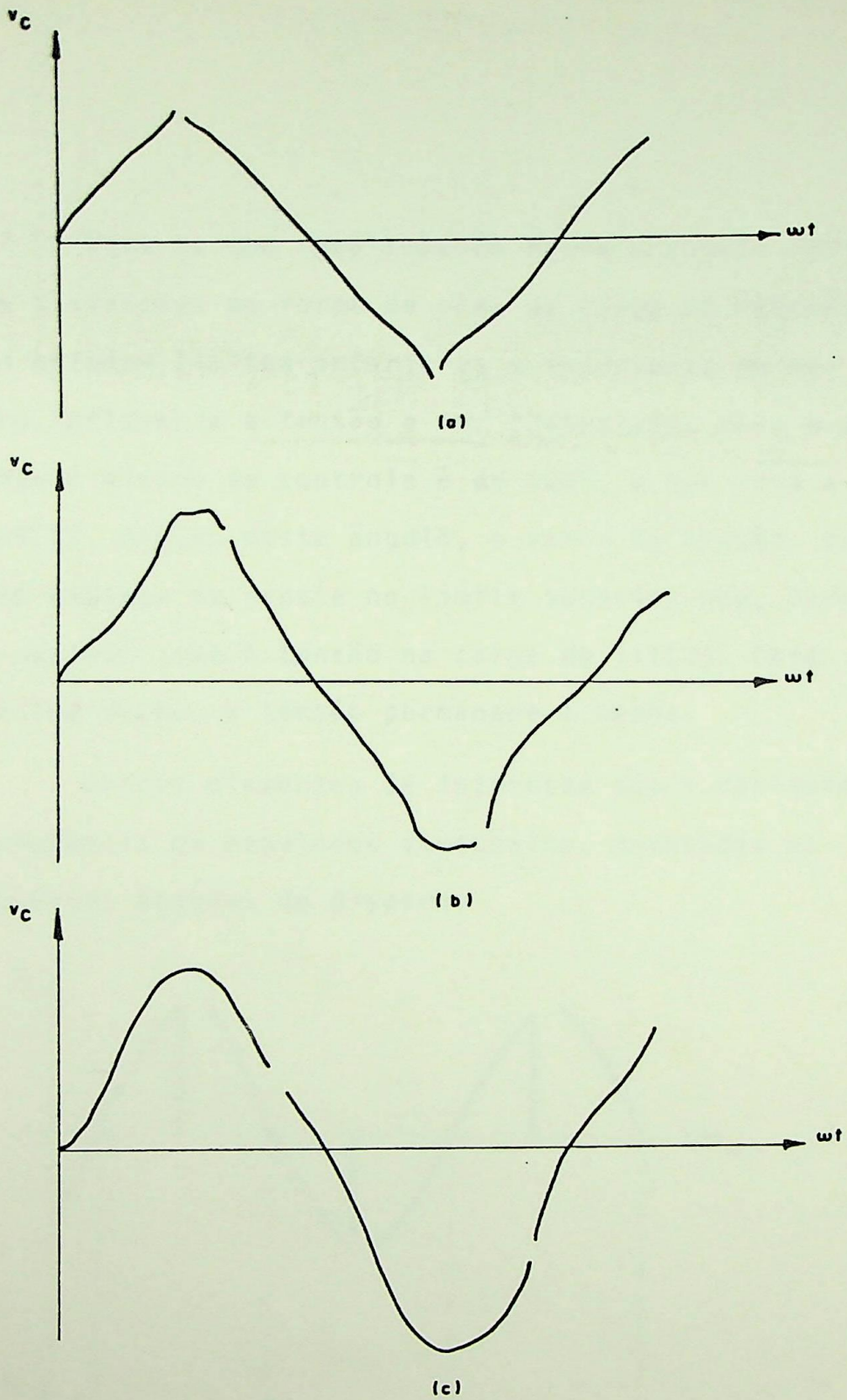


Figura 4.8.- Forma de onda nos terminais da carga para ângulos de disparo de:

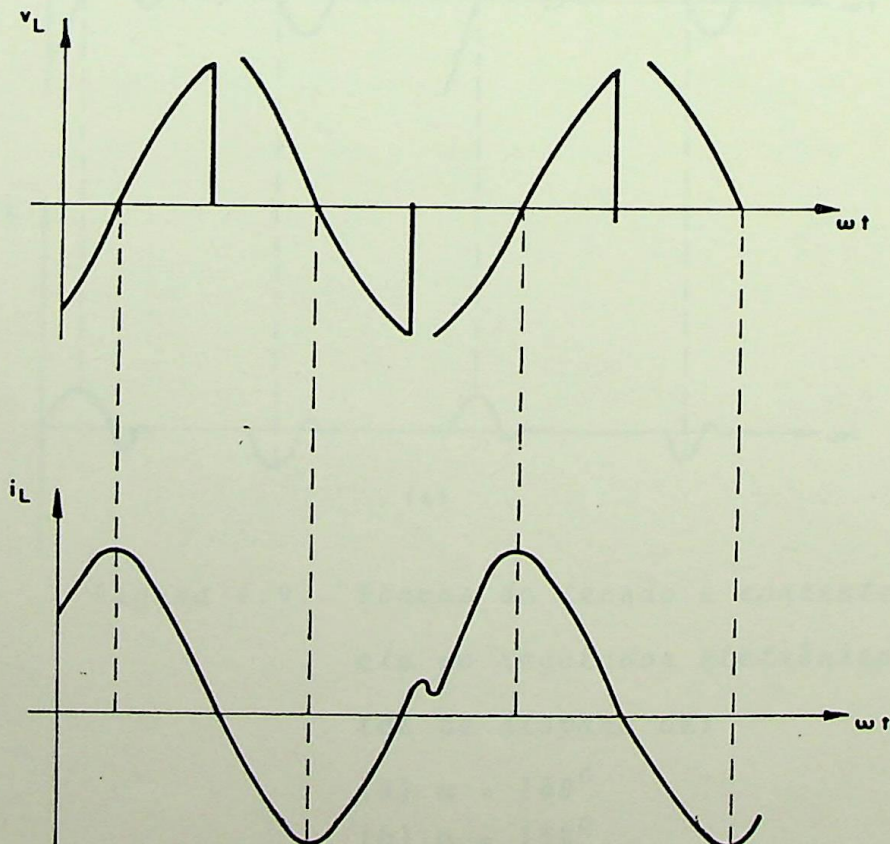
(a) $\alpha = 100^\circ$

(b) $\alpha = 132^\circ$

(c) $\alpha = 165^\circ$

Nota-se que uma relação entre o ângulo de disparo e as distorções na forma de onda da carga em relação a senoide. Porém existem limites inferiores e superiores em que o ângulo de disparo influencia a tensão a ser controlada. Para o caso simulado, o ângulo mínimo de controle é de 100° , o que leva a tensão na carga a 69[V]. Abaixo deste ângulo, o valor da tensão permanece o mesmo. Fato análogo se repete no limite superior que, para esta simulação é de 165° , com a tensão na carga de 111[V]. Para ângulos de disparo acima deste, a tensão permanece a mesma.

Outros elementos de interesse são a corrente e a tensão na indutância do regulador eletrônico, mostradas na figura 4.9, para diversos ângulos de disparo.



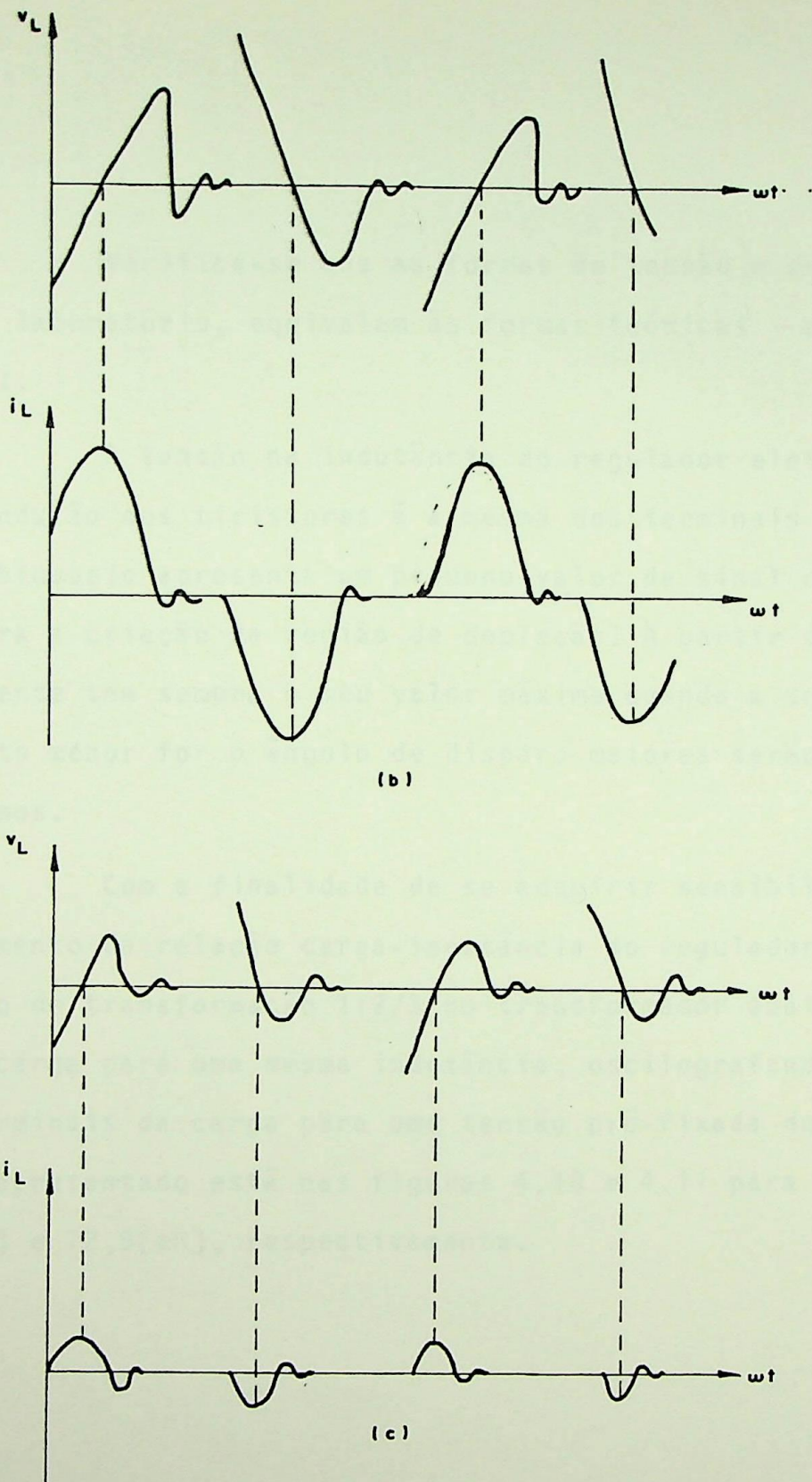


Figura 4.9.- Formas de tensão e corrente na indutância do regulador eletrônico para ângulos de disparo de:

(a) $\alpha = 100^\circ$

(b) $\alpha = 132^\circ$

(c) $\alpha = 165^\circ$

Verifica-se que as formas de tensão e de corrente obtidas no laboratório, equivalem às formas teóricas apresentadas no anexo II.

A tensão na indutância do regulador eletrônico durante a condução dos tiristores é a mesma dos terminais da carga e durante o bloqueio apresenta um pequeno valor de sinal contrário ao inicial para a criação da região de depleção. A partir daí anula-se. A corrente tem sempre o seu valor máximo quando a tensão se anula, e quanto menor for o ângulo de disparo maiores serão os seus valores máximos.

Com a finalidade de se adquirir sensibilidade sobre o comportamento da relação carga-indutância do regulador, fixou-se uma relação de transformação 1:2/3 no transformador abaixador e variou-se a carga para uma mesma indutância, oscilografando-se a tensão nos terminais da carga para uma tensão pré-fixada de 65[V]. O resultado apresentado está nas figuras 4.10 e 4.11 para indutância de 27,6[mH] e 72,9[mH], respectivamente.

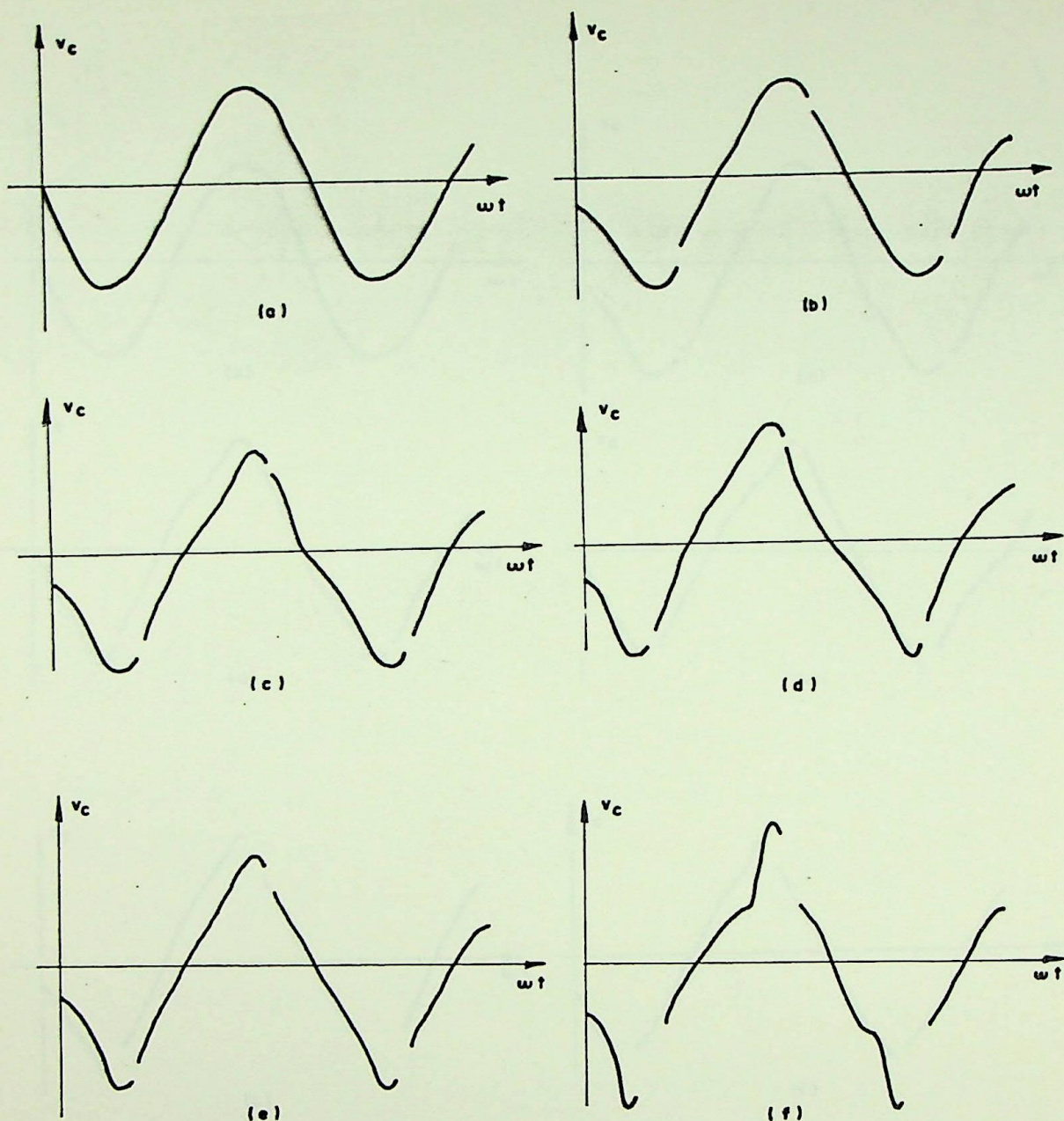


Figura 4.10.- Tensão nos terminais da carga para \underline{u} ma indutância no regulador eletrônico igual a 27,6[mH], nos casos:
 (a) 50[Ω], (b) 60[Ω], (c) 80[Ω],
 (d) 100[Ω], (e) 120[Ω], (f) ∞

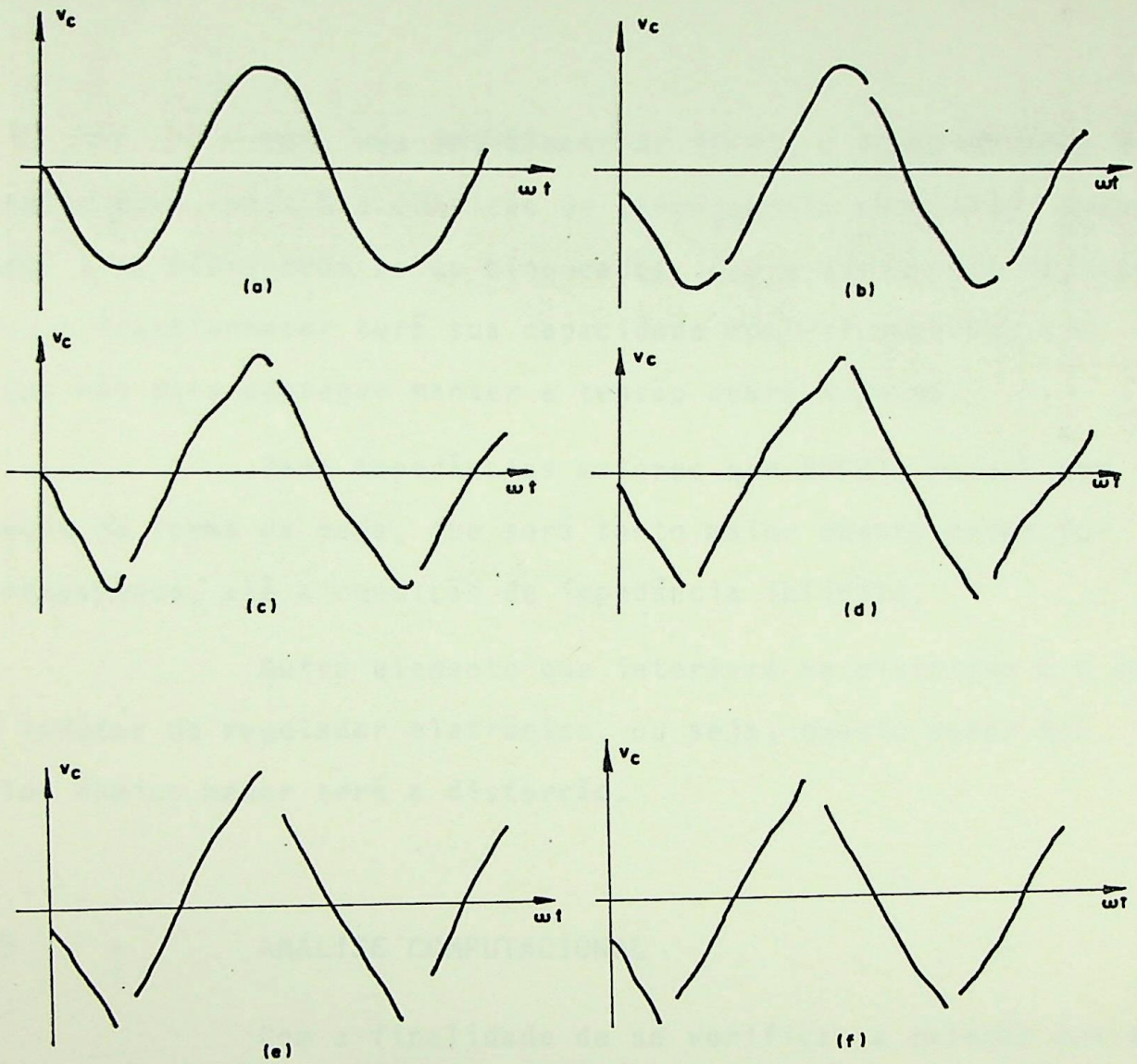


Figura 4.11.- Tensão nos terminais da carga para \underline{u} ma indutância no regulador eletrônico igual a $72,9[\text{mH}]$, nos casos:
 (a) $50[\Omega]$, (b) $60[\Omega]$, (c) $80[\Omega]$
 (d) $100[\Omega]$, (e) $120[\Omega]$, (f) ∞

Para uma impedância de $50[\Omega]$, a forma de onda é uma senoide pura, pois é a condição de carregamento máximo do transformador e os tiristores estão bloqueados. Com a diminuição da impedância, o transformador terá sua capacidade nominal superada e o regulador não mais consegue manter a tensão sobre a carga.

Para impedâncias maiores que $50[\Omega]$, haverá uma distorção na forma de onda, que será tanto maior quanto menor for o carregamento, até a condição de impedância infinita.

Outro elemento que interfere na distorção é o valor do indutor do regulador eletrônico, ou seja, quanto maior for seu valor ôhmico menor será a distorção.

4.5 - ANÁLISE COMPUTACIONAL

Com a finalidade de se verificar a relação entre o ângulo de disparo dos tiristores e a tensão nos terminais da carga ligada ao condutor isolado. Sob diversas condições, simula-se o circuito equivalente da figura 4.3. Para tal, variar-se-á um parâmetro a cada vez, confrontando-se o resultado como um pré-existente.

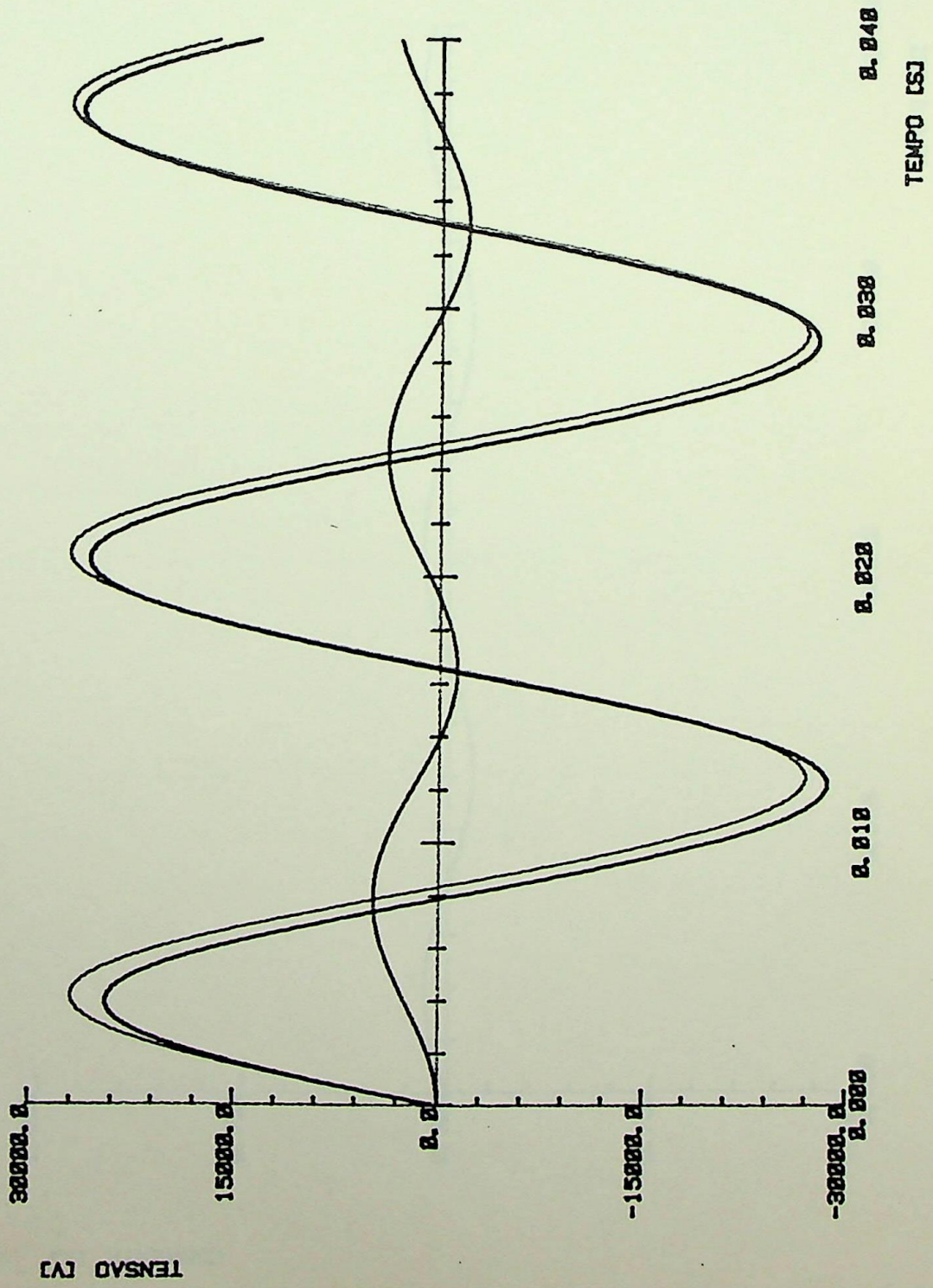
Nesta forma de análise, é conveniente adotar-se a notação por unidade, p.u., para uma rápida comparação com os resultados passados. Os valores base adotados serão os obtidos das simulações feitas no Sistema de Transmissão C, no capítulo 3, ou seja:

- (a) para a tensão, o valor eficaz da tensão induzida, 19
[kV];

(b) para a impedância, o valor da reatância capacitiva de Thevenin, $30[k\Omega]$.

O método utilizado nas simulações que se seguem, está descrito no anexo I e foi desenvolvido por J.R. Cogo [12].

O primeiro caso a ser simulado tem como carga, uma resistência pura de $9,8[p.u.]$, e os tiristores não são disparados no período estudado. Isto dá origem aos gráficos 4.12 e 4.13, que mostram alguns valores das tensões e correntes relevantes ao estudo.

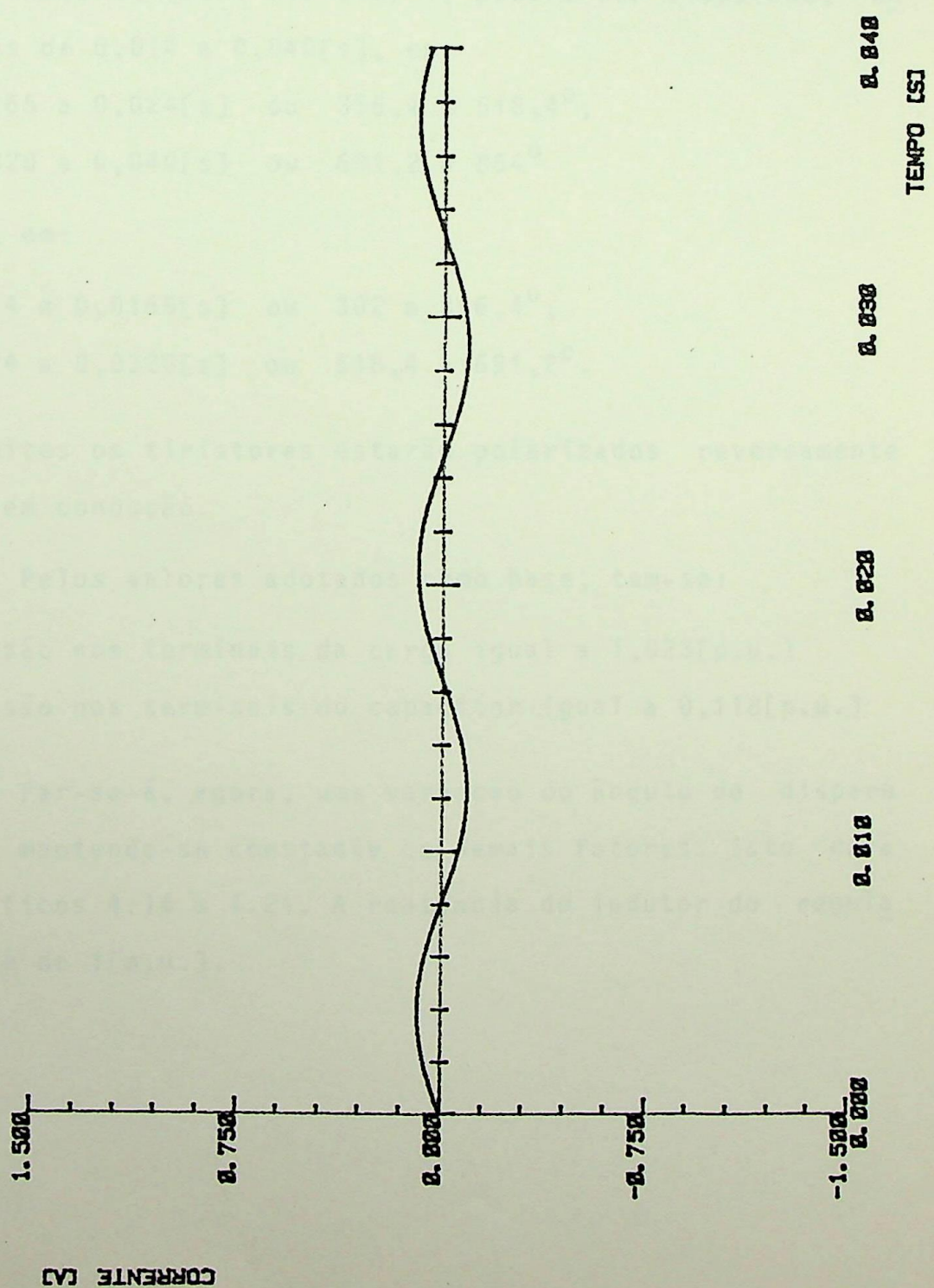


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1.00	—	TENSÃO - FONTE
1: 1.00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1: 1.00	—	TENSÃO - CARGA

FIG. No 4.12

DATA ABR/86	CAPITULO 4
----------------	------------

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 TIRISTORES BLOQUEADOS
 CARGA RESISTIVA



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE - CARGA

FIG. No 4.13

DATA ABR/88	CAPITULO 4
OBSERVAÇÕES: FORMA DE ONDA DA CORRENTE TIRISTORES BLOQUEADOS CARGA RESISTIVA	

Do gráfico 4.12, verifica-se que a queda de tensão nos terminais da carga possui um valor cerca de 9 vezes da queda no capacitor. Para efeito de disparo dos tiristores, considerar-se-á ultrapassada a fase transitória inicial depois de decorrido um tempo de 0,014[s] (302°).

Nota-se que o tiristor T_1 poderá ser disparado, entre os instantes de 0,014 a 0,040[s], em:

a) 0,0165 a 0,024[s] ou $356,4$ a $518,4^\circ$;

b) 0,0320 a 0,040[s] ou $691,2$ a 864°

e o tiristor T_2 em:

a) 0,014 a 0,0165[s] ou 302 a $356,4^\circ$;

b) 0,024 a 0,0320[s] ou $518,4$ a $691,2^\circ$.

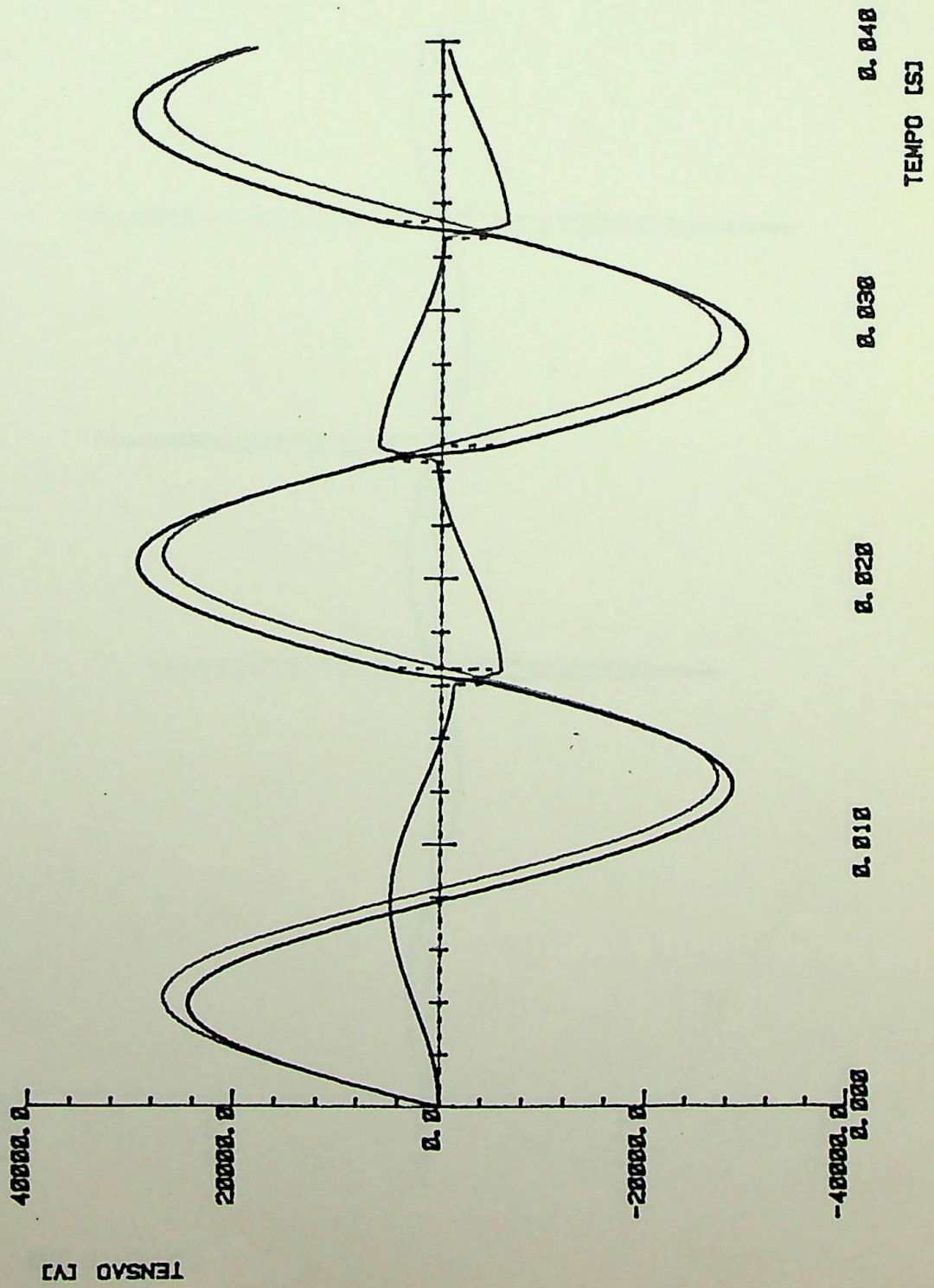
Fora destes limites os tiristores estarão polarizados reversamente e não entrarão em condução.

Pelos valores adotados como base, tem-se:

- a tensão nos terminais da carga igual a 1,023[p.u.]

- a tensão nos terminais do capacitor igual a 0,118[p.u.]

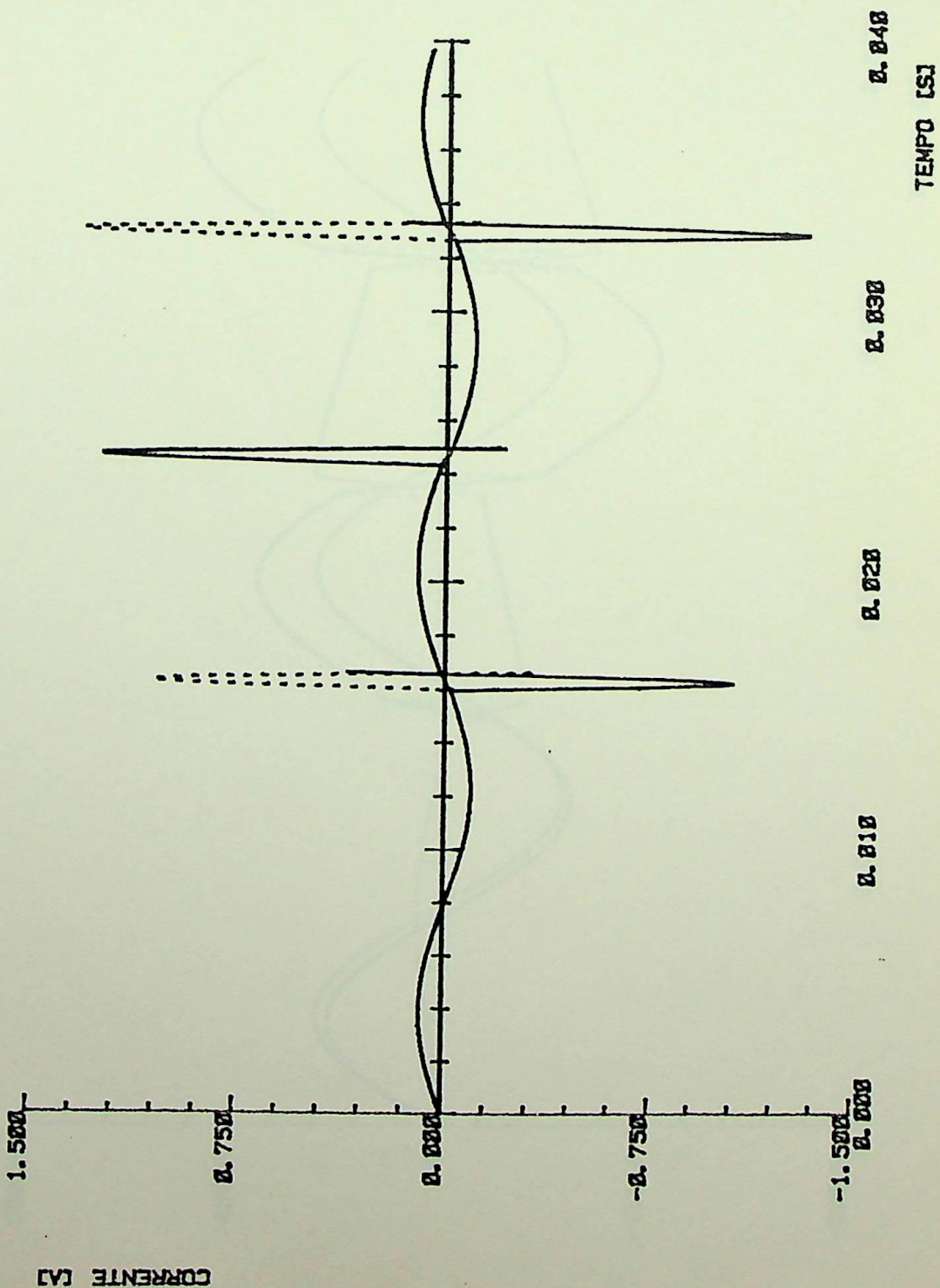
Far-se-á, agora, uma variação do ângulo de disparo dos tiristores, mantendo-se constante os demais fatores. Isto dará origem aos gráficos 4.14 a 4.21. A reatância do indutor do regulador eletrônico é de 1[p.u.].



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	TENSÃO - FONTE
1:1.00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSÃO - CARGA
1:1.00	- - - - -	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No 4.14

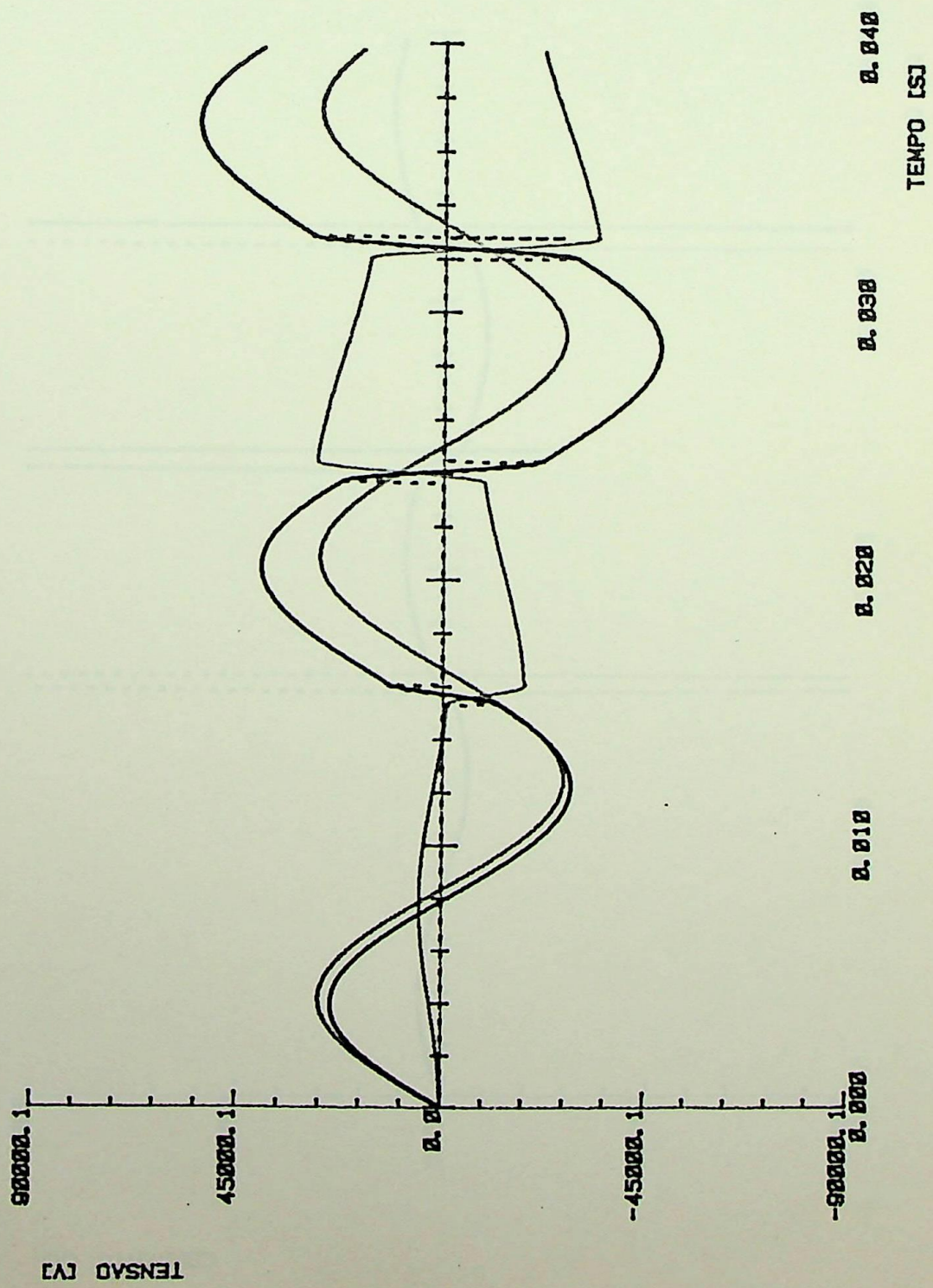
DATA ABR/88	CAPITULO 4
OBSERVAÇÕES: FORMAS DE ONDA DA TENSÃO ANGULO DE DESFASE = 16.5 CARGA RESISTIVA	



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1.00	—	CORRENTE - CARGA
1: 1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1.00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1: 1.00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4.15

DATA ABR/86	CAPITULO 4
OBSERVACOES: FORMAS DE ONDA DA CORRENTE ANGULO DE DISPARO = 165 CARGA RESISTIVA	

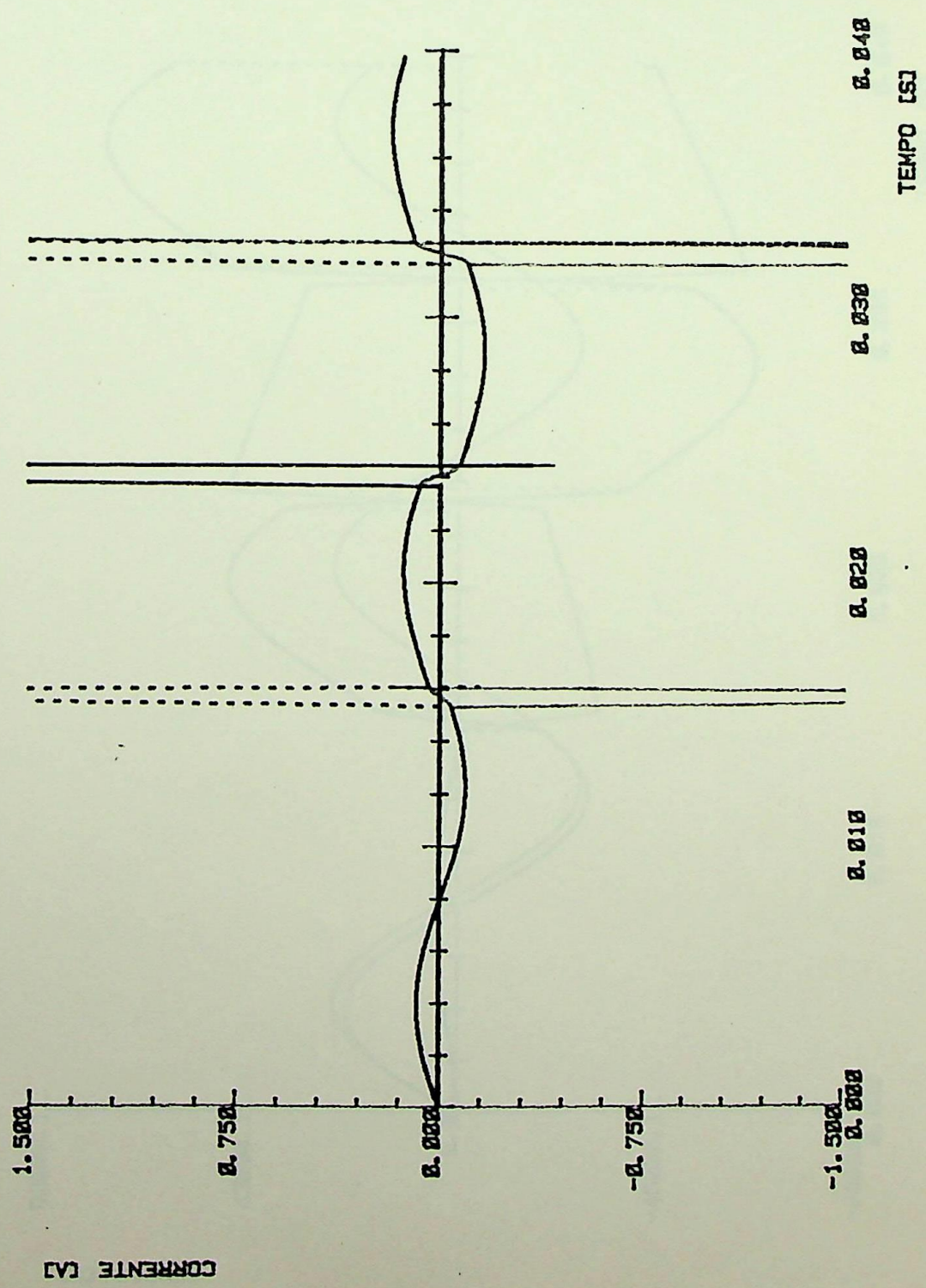


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1. 00	—	TENSAO - FONTE
1: 1. 00	—	TENSAO - CAPACITOR
1: 1. 00	—	TENSAO - CARGA
1: 1. 00	- - - - -	TENSAO - INDUTOR

FIG. No 4.16

DATA ABR/86	CAPITULO 4
----------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSAO
 ANGULO DE DESFASE = 150
 CARGA RESISTIVA



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1. 00	—	CORRENTE - CARGA
1: 1. 00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1. 00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1: 1. 00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No4.17

DATA ABR/88	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA CORRENTE
 ANGULO DE DISPARO = 150
 CARGA RESISTIVA

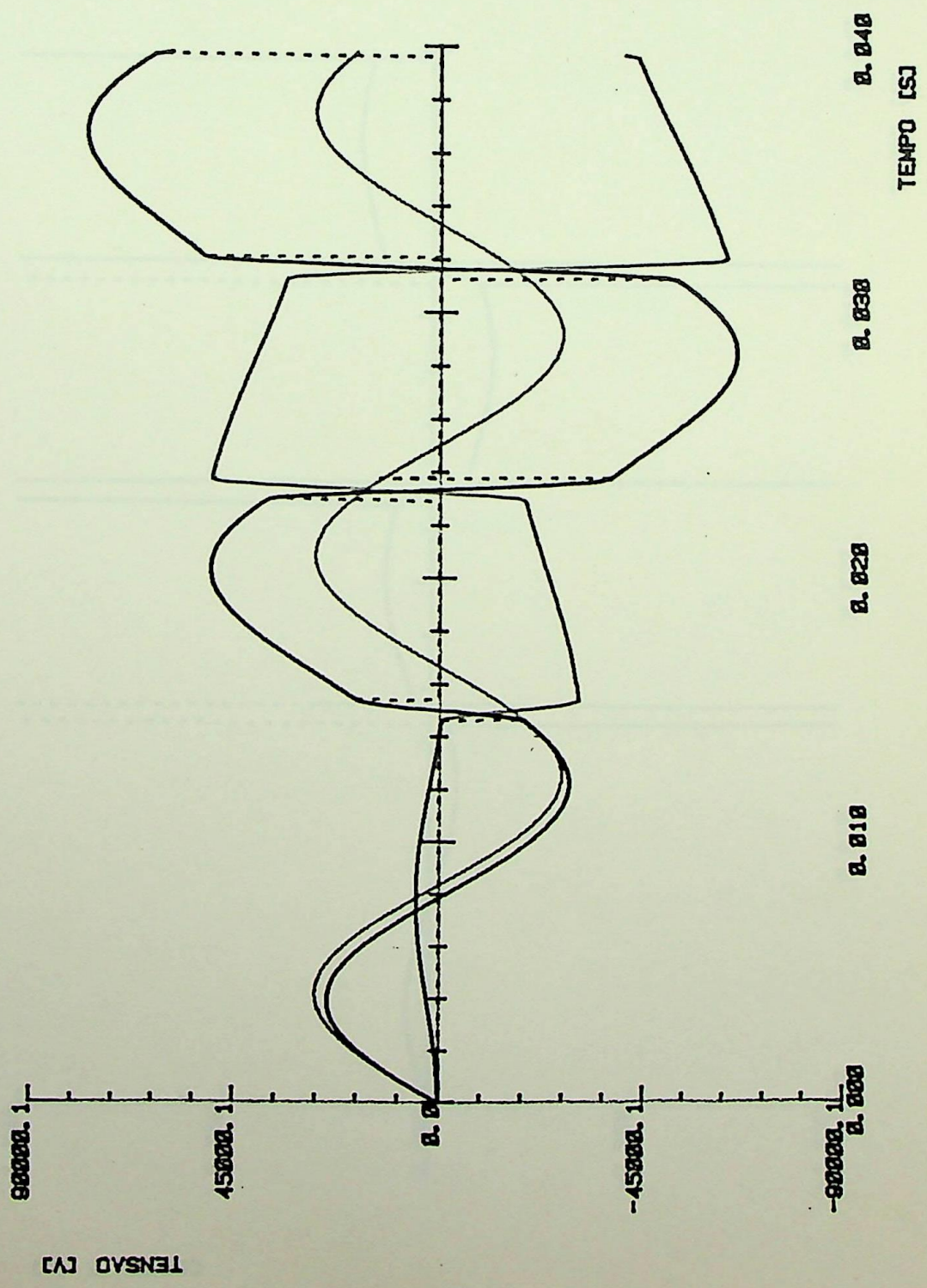
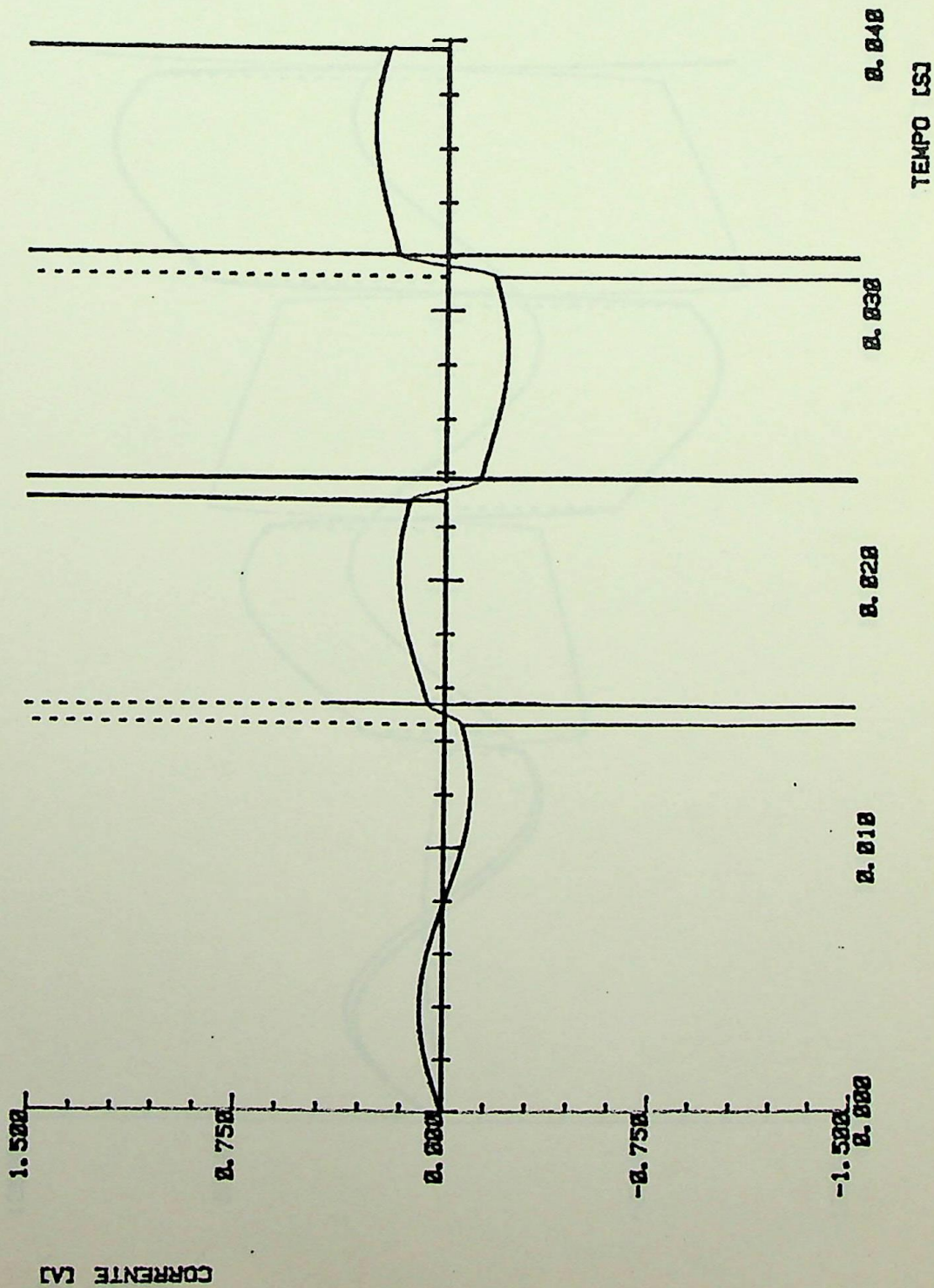


FIG. No 4,18

ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	TENSAO - FONTE
1:1.00	—	TENSAO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSAO - CARGA
1:1.00	- - - - -	TENSAO - INDUTOR

DATA ABR/86	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DE TENSAO
 ANGULO DE DISPARO = 135
 CARGA RESISTIVA

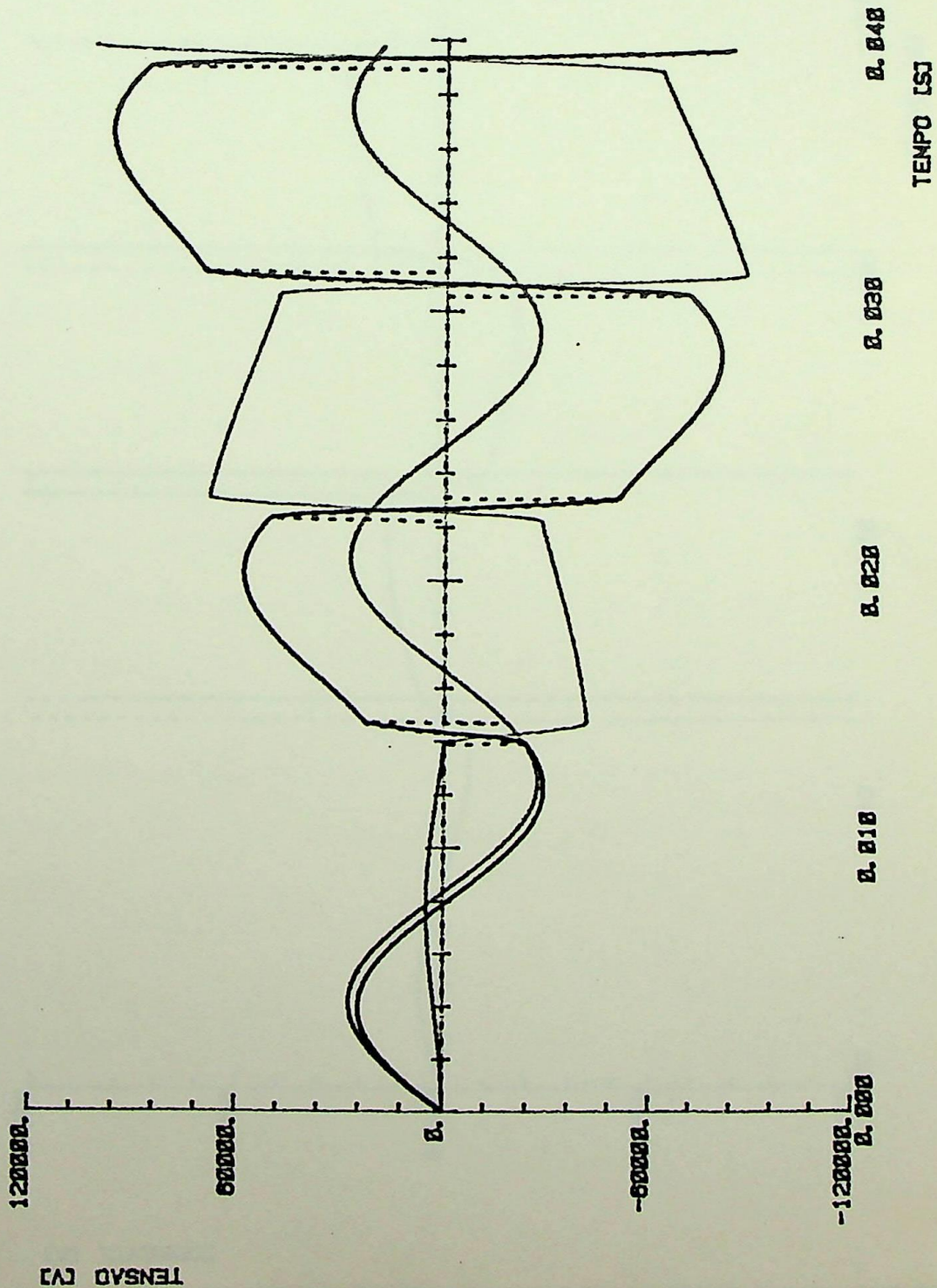


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE - CARGA
1:1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1:1.00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1:1.00	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4.19

DATA ABR/86	CAPITULO 4
-------------	------------

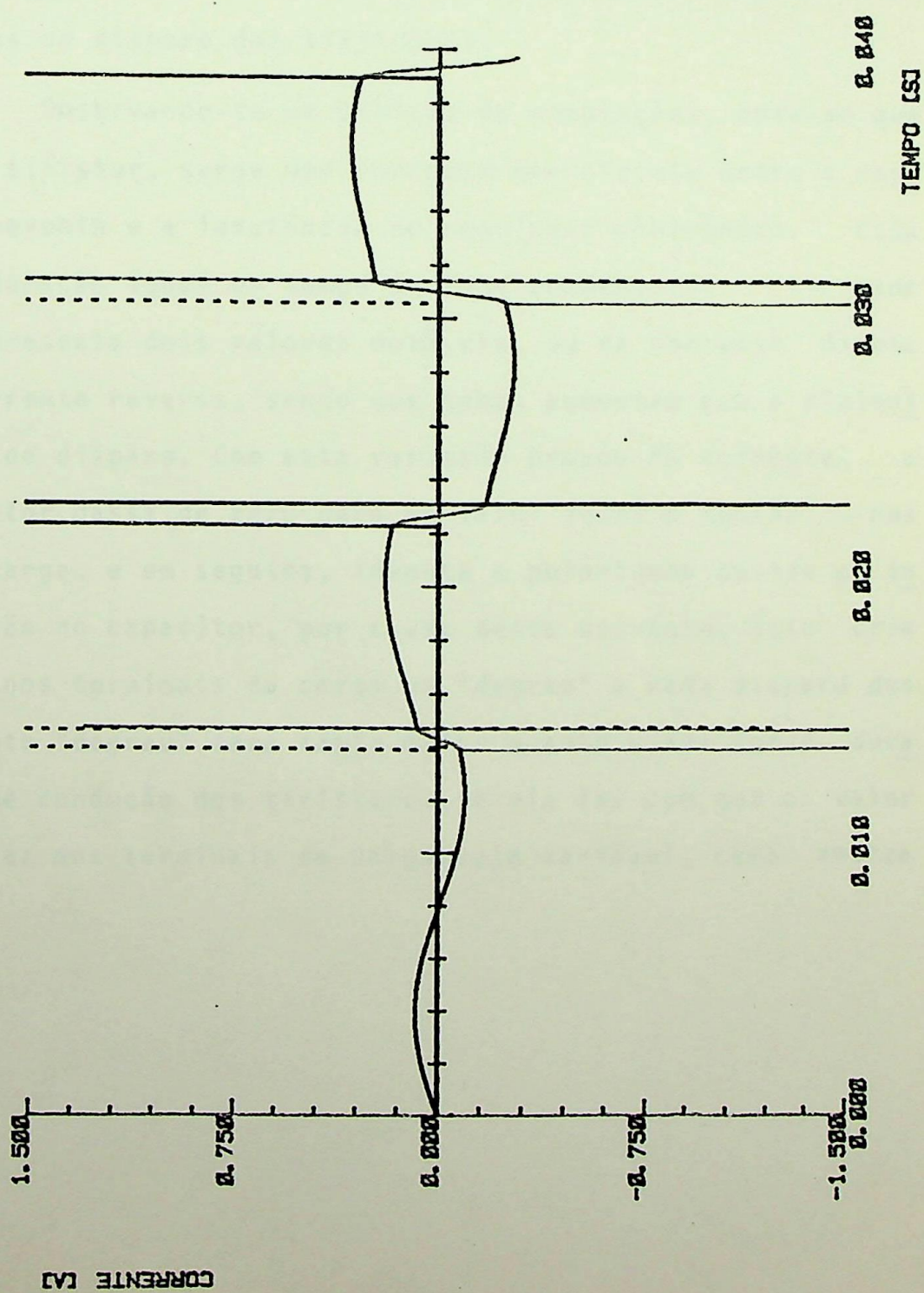
OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA CORRENTE
 ANGULO DE DISPARO = 135
 CARGA RESISTIVA



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	TENSAO - FONTE
1:1.00	—	TENSAO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSAO - CARGA
1:1.00	- - - - -	TENSAO - INDUTOR

FIG. No 4.20

DATA ABR/86	CAPITULO 4
OBSERVAÇÕES: FORMAS DE ONDA DA TENSAO ANGULO DE DISPARO = 120 CARGA RESISTIVA	



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1. 00	—	CORRENTE - CARGA
1: 1. 00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1. 00	—	CORRENTE - TIRISTORI
1: 1. 00	- - - - -	CORRENTE - TIRISTORC

FIG. No 4.21

DATA ABR/88 CAPITULO 4

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA CORRENTE
 ANGULO DE DISPARO = 120
 CARGA RESISTIVA

As figuras 4.14, 4.16 e 4.20 mostram tensões no circuito e as figuras 4.15, 4.17 e 4.21, correntes, para ângulos de disparos, referidos ao primeiro ciclo, de 165° , 150° , 135° e 120° , respectivamente.

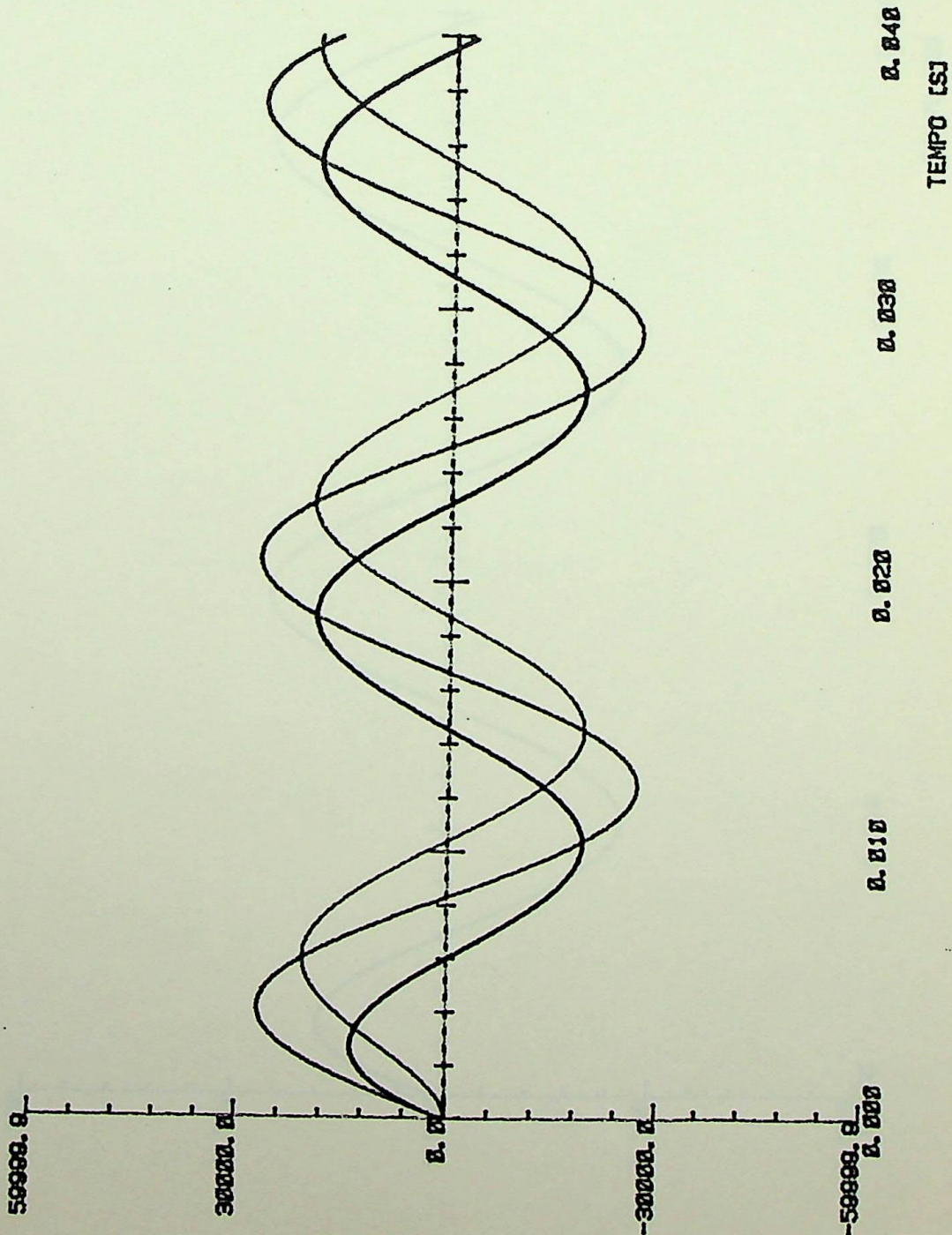
As figuras que mostram o comportamento das tensões, indicam as mesmas ainda alternadas, porém não mais senoidais. Isto acontece graças ao disparo dos tiristores.

Observando-se um período de comutações, nota-se que ao disparar o tiristor, surge uma corrente que circula entre a capacitância de Thevenin e a indutância do regulador eletrônico. Esta corrente tem duração igual ao tempo de funcionamento do tiristor disparado e apresenta dois valores notáveis, um de corrente direta e outro de corrente reversa, sendo que ambos aumentam com a diminuição do ângulo de disparo. Com esta variação brusca da corrente, a tensão no indutor passa de zero para um valor igual a tensão nos terminais da carga, e em seguida, inverte a polaridade devido a inversão da tensão no capacitor, por causa desta corrente. Isto cria para a tensão nos terminais da carga um "degrau" a cada disparo dos tiristores. Este "degrau" será tanto maior quanto maior for a duração do tempo de condução dos tiristores, e ele faz com que o valor da tensão eficaz nos terminais da carga seja variável, como mostra a tabela 4.1.

α	Tensão no capacitor[pu]	Tensão na carga[pu]
bloqueado	0,118	1,023
165 ^o	0,185	1,134
150 ^o	1,015	1,845
135 ^o	1,936	2,632
120 ^o	2,734	3,260

Tabela 4.1.- Variação da tensão nos terminais da carga e da capacitância em função do ângulo de disparo.

Faz-se, agora, um estudo análogo com carga resistiva pura de 1[pu]. As tensões e correntes relevantes estão indicadas nas figuras 4.22 a 4.29, para diversos ângulos de disparo.

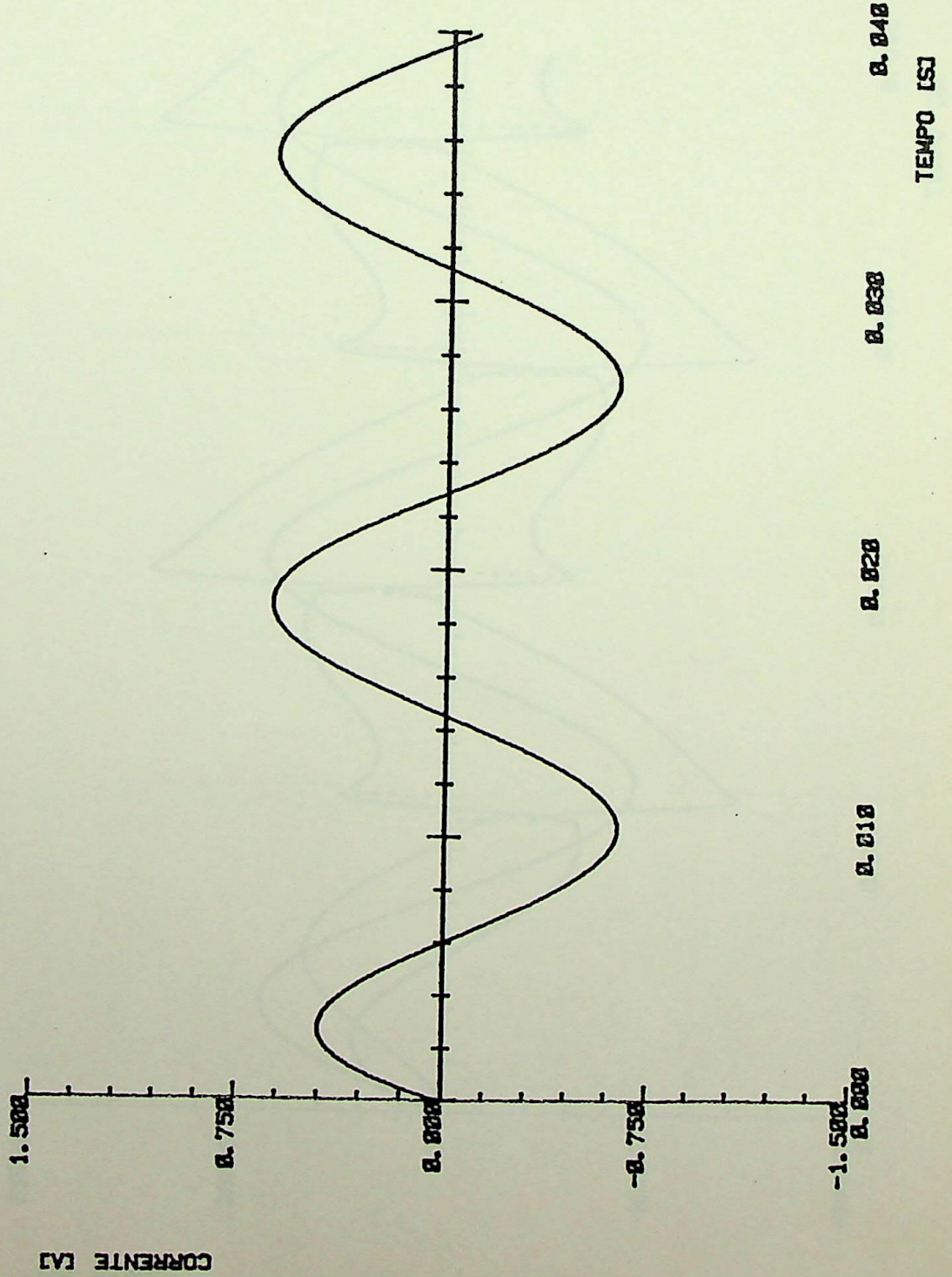


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	TENSÃO - FONTE
1:1.00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSÃO - CARGA
1:1.00	-----	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No 4,22

DATA ABR/88	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 TIRISTORES BLOQUEADOS
 CARGA RESISTIVA 1.0 Ω

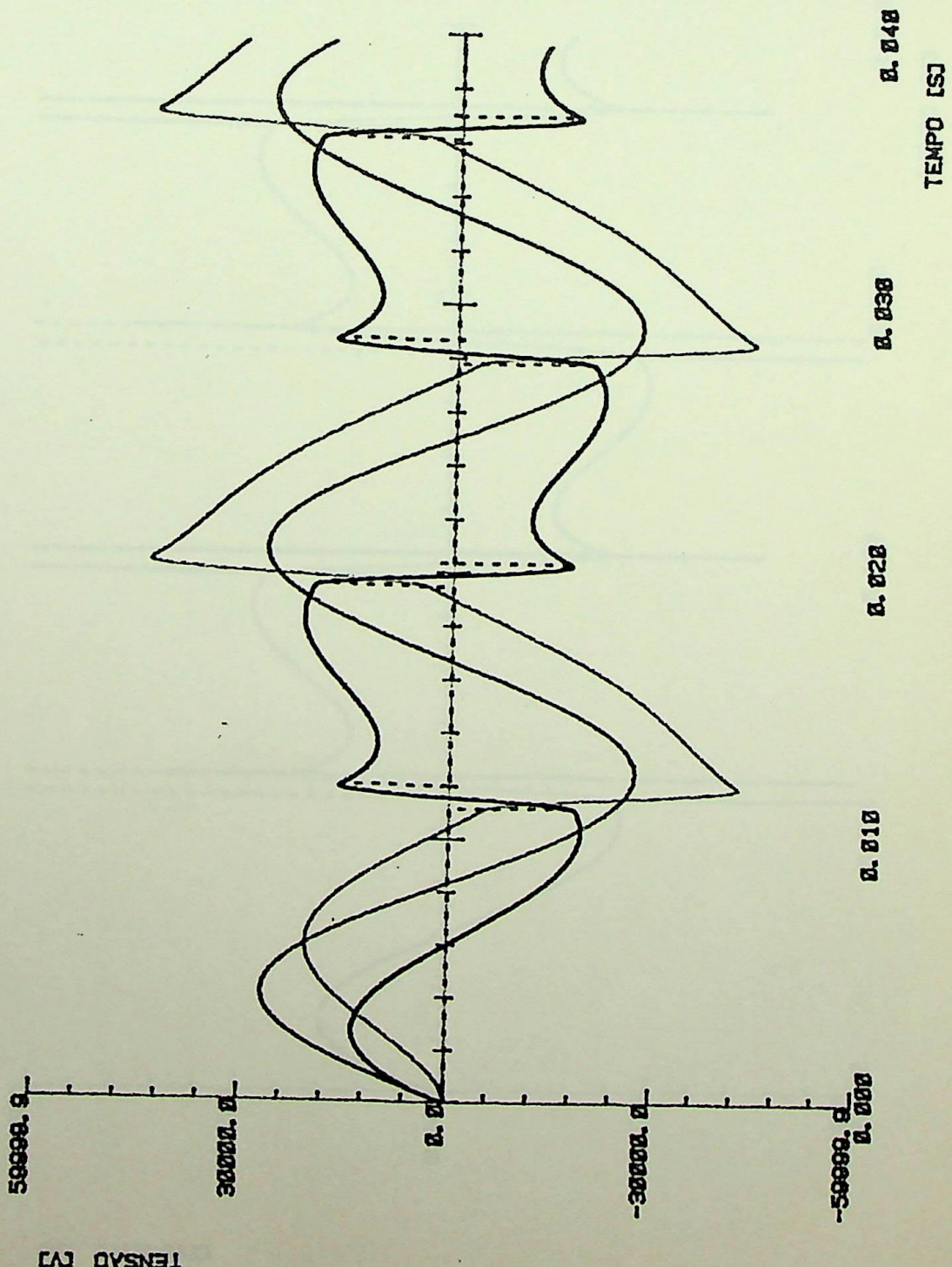


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1. 00	—	CORRENTE - CARGA
1: 1. 00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1. 00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1: 1. 00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4,23

DATA ABR/86	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 TIRISTORES BLOQUEADOS
 CARGA RESISTIVA 1.8 Ω

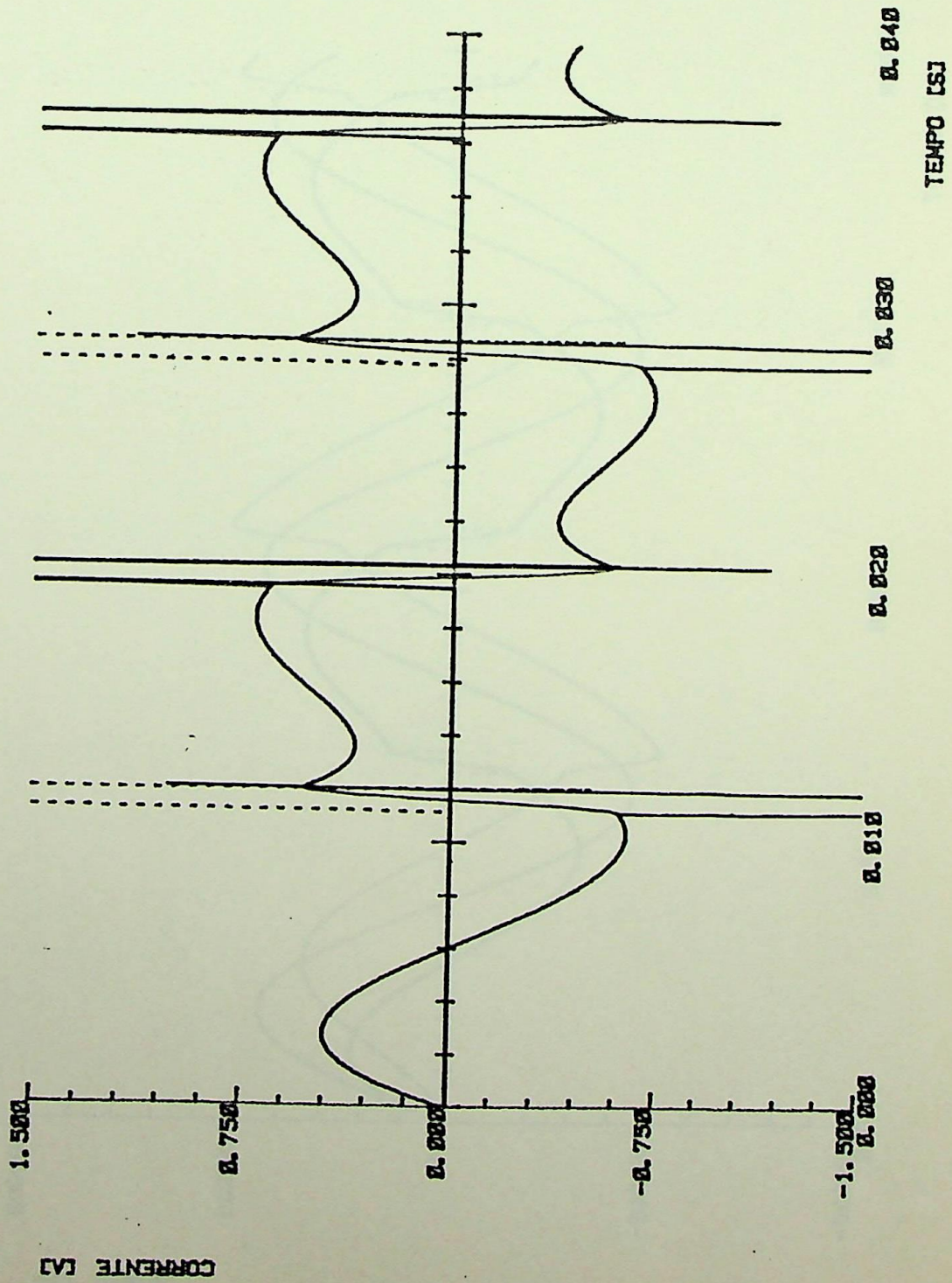


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	TENSAO - FONTE
1:1.00	—	TENSAO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSAO - CARGA
1:1.00	TENSAO - INDUTOR

FIG. No 4,24

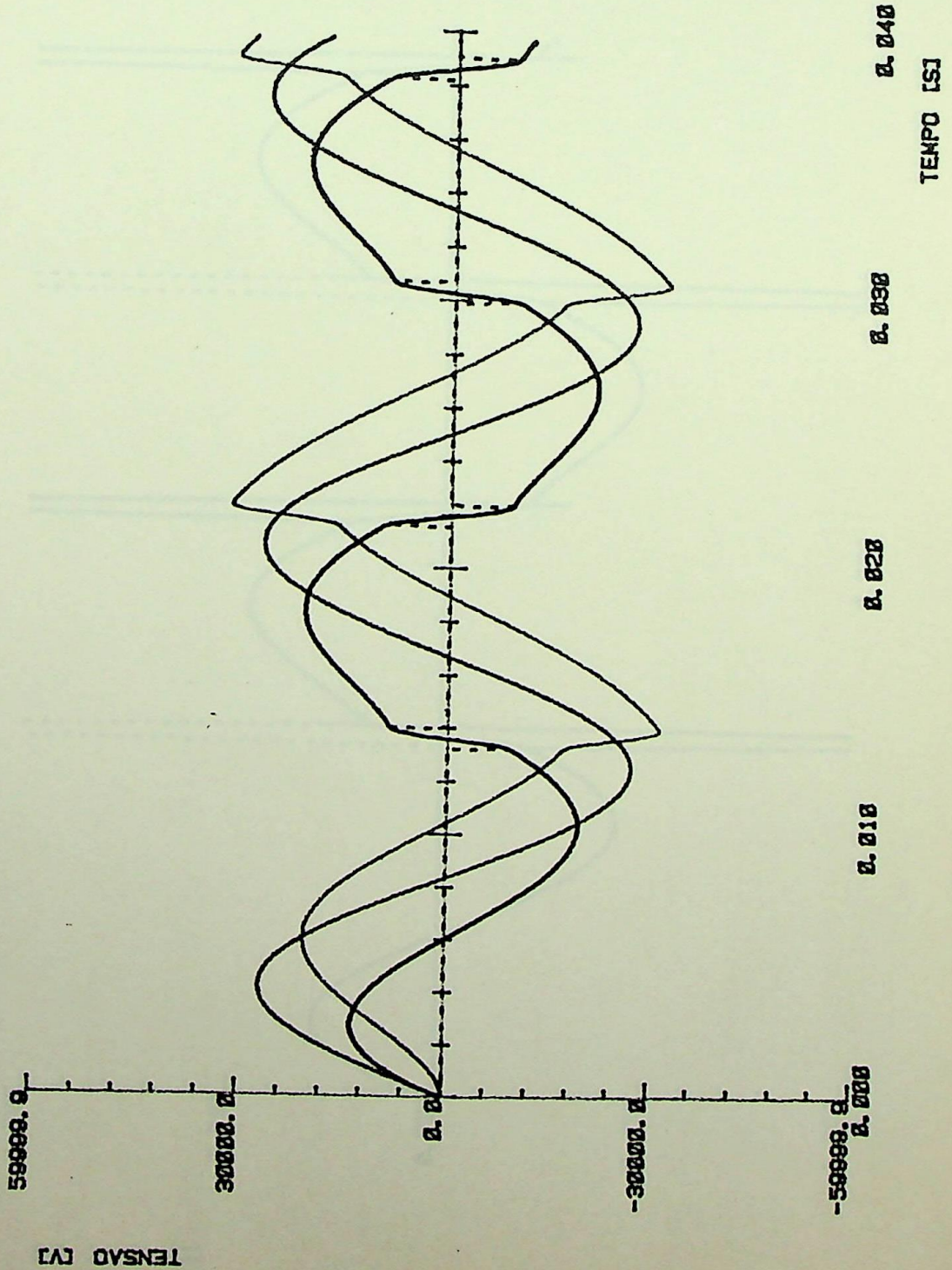
DATA	CAPITULO
ABR/88	4

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSAO
 ANGULO DE DISPARO = 165
 CARGA RESISTIVA 1.0 [Ω]



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE - CARGA
1:1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1:1.00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1:1.00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4,25	
DATA ABR/88	CAPITULO 4
OBSERVACOES: FORMAS DE ONDA DA TENSAO ANGULO DE DISPARO = 16,5 CARGA RESISTIVA 1.8 (P)Ω	

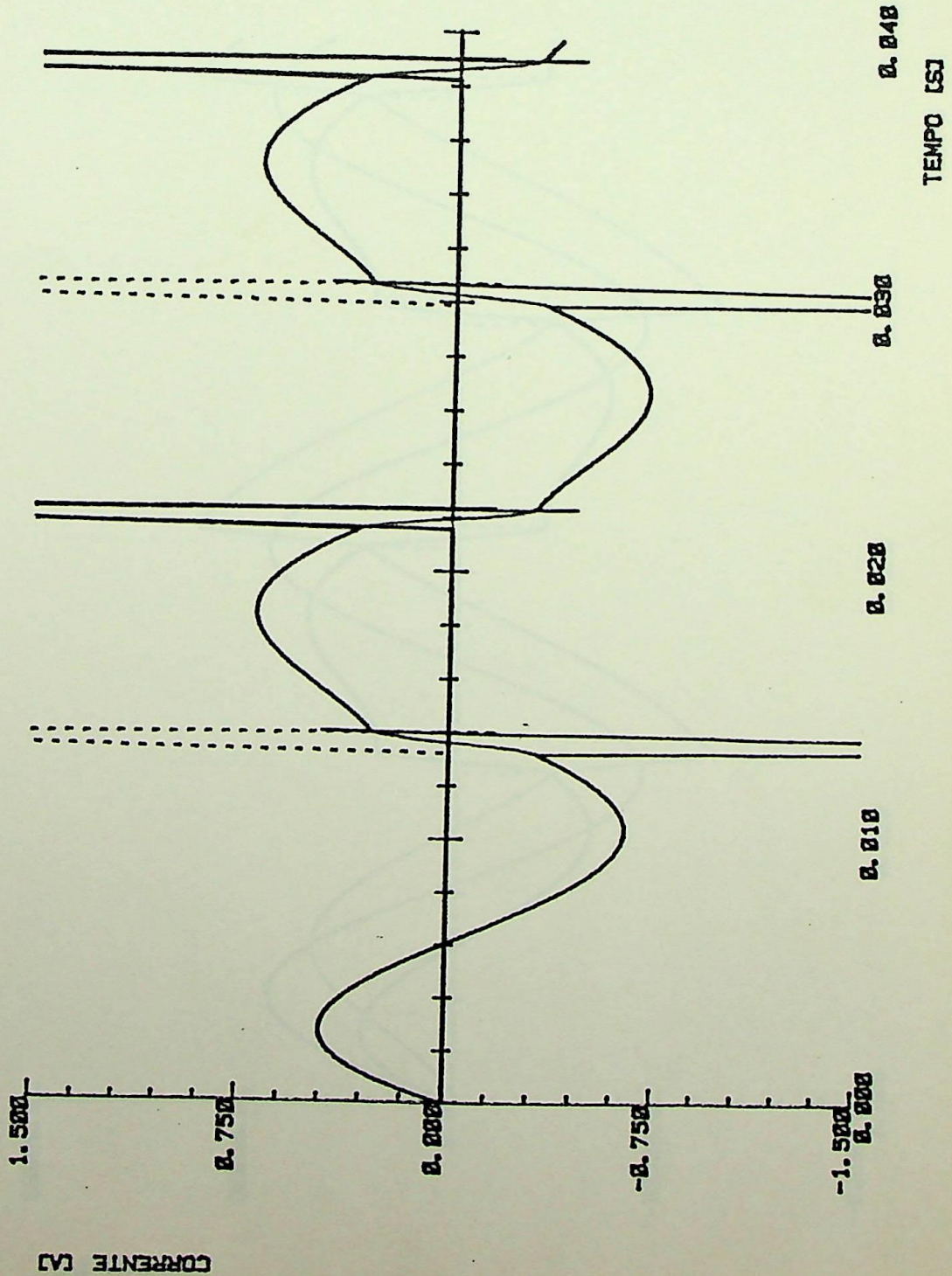


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	TENSÃO - FONTE
1:1.00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSÃO - CARGA
1:1.00	-----	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No 4.26

DATA ABR/86 CAPITULO 4

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ANGULO DE DESFASE = 150
 CARGA RESISTIVA 1.0 CPU

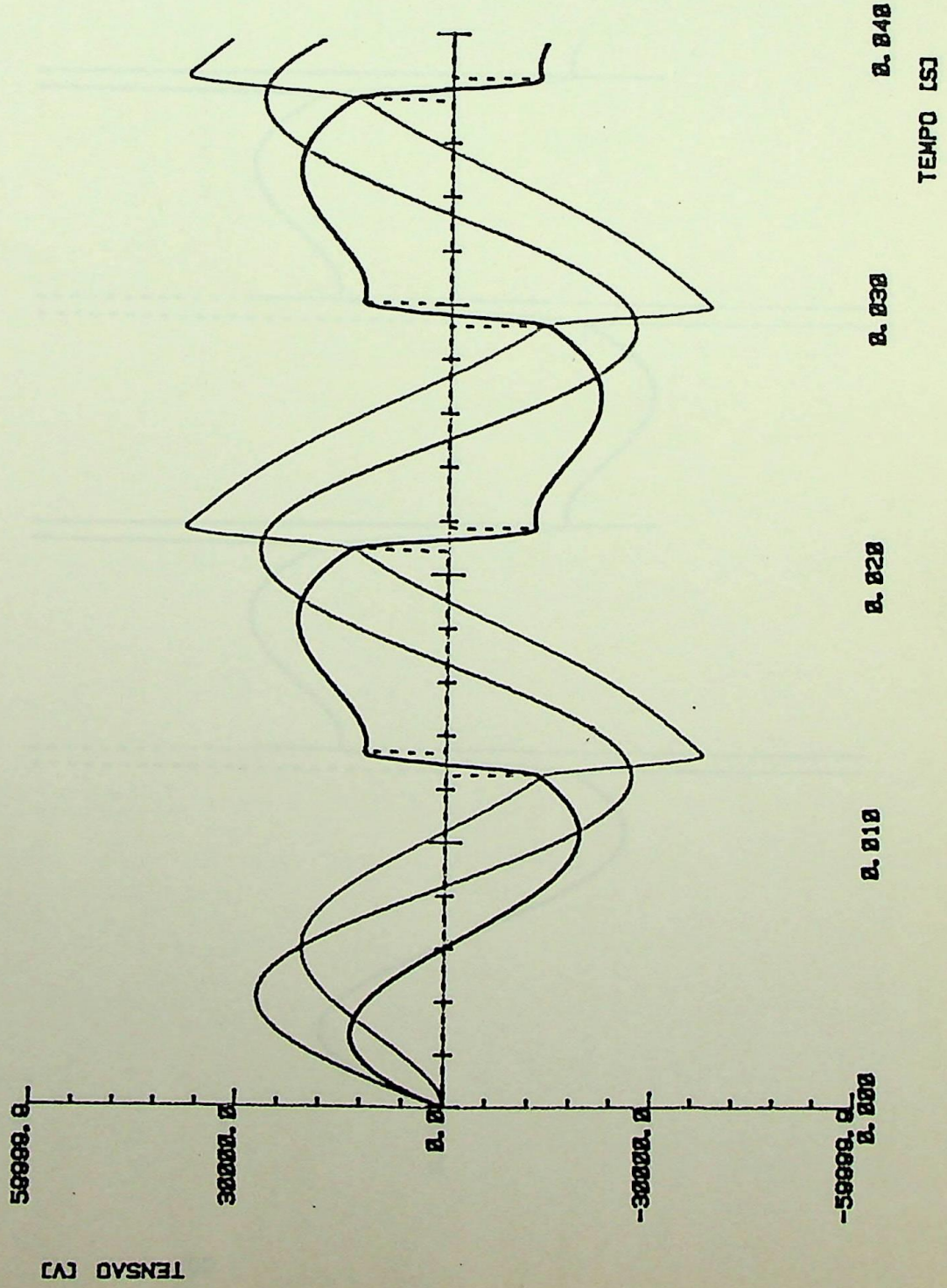


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1.00	—	CORRENTE - CARGA
1: 1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1.00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1: 1.00	- - - - -	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4.27

DATA ABR/88	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ANGULO DE DISPARO = 150
 CARGA RESISTIVA 1.0 (PFD)

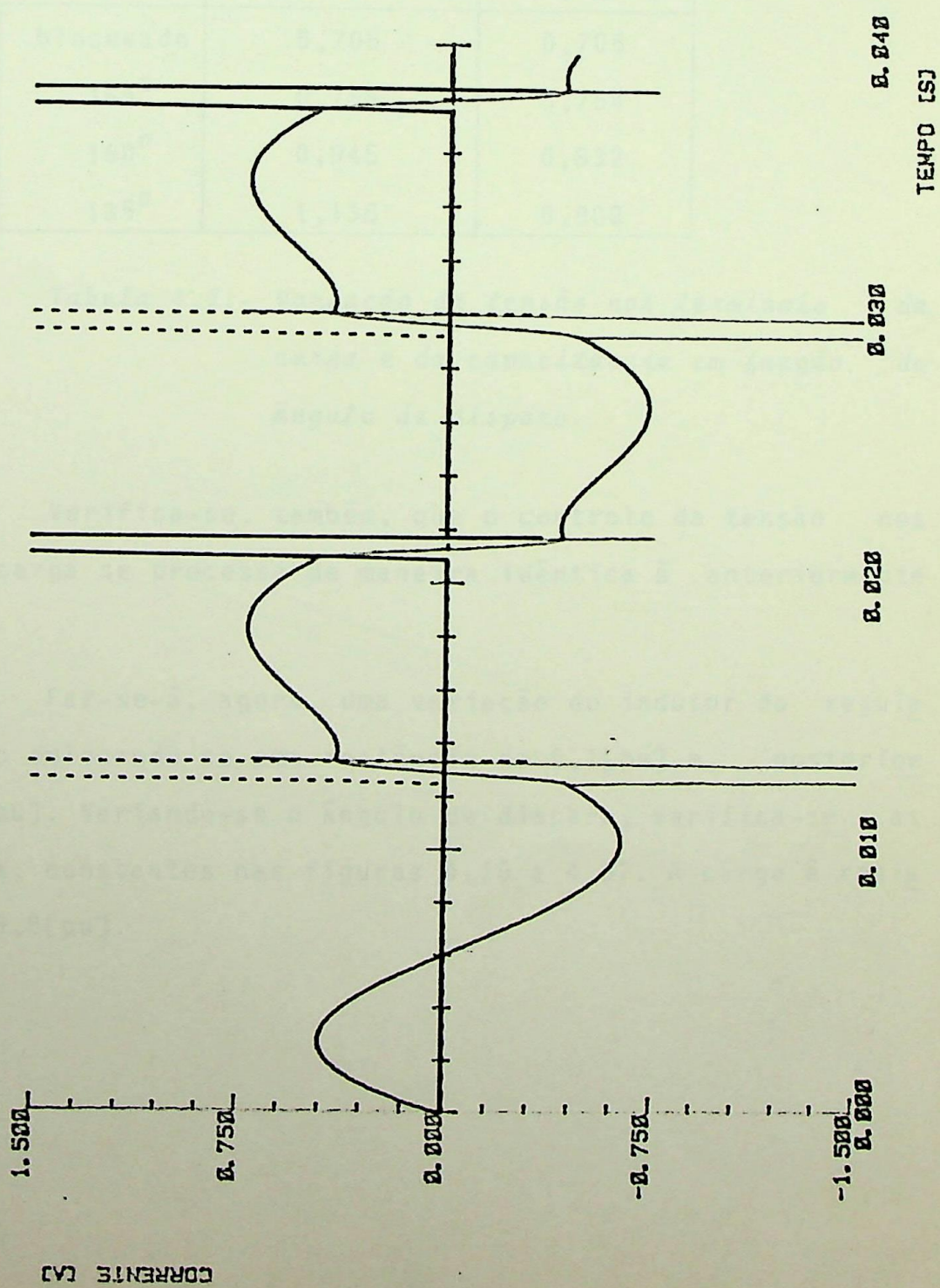


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	TENSÃO - FONTE
1:1.00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSÃO - CARGA
1:1.00	-----	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No 4.28

DATA ABR/86	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ANGULO DE DISPARO = 135
 CARGA RESISTIVA 1.0 (PU)



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE - CARGA
1:1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1:1.00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1:1.00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4.29

DATA ABR/86 CAPITULO 4

OBSERVACOES:

FORMAS DE ONDA DA TENSAO
 ANGULO DE DISPARO = 135
 CARGA RESISTIVA 1.0 OHO

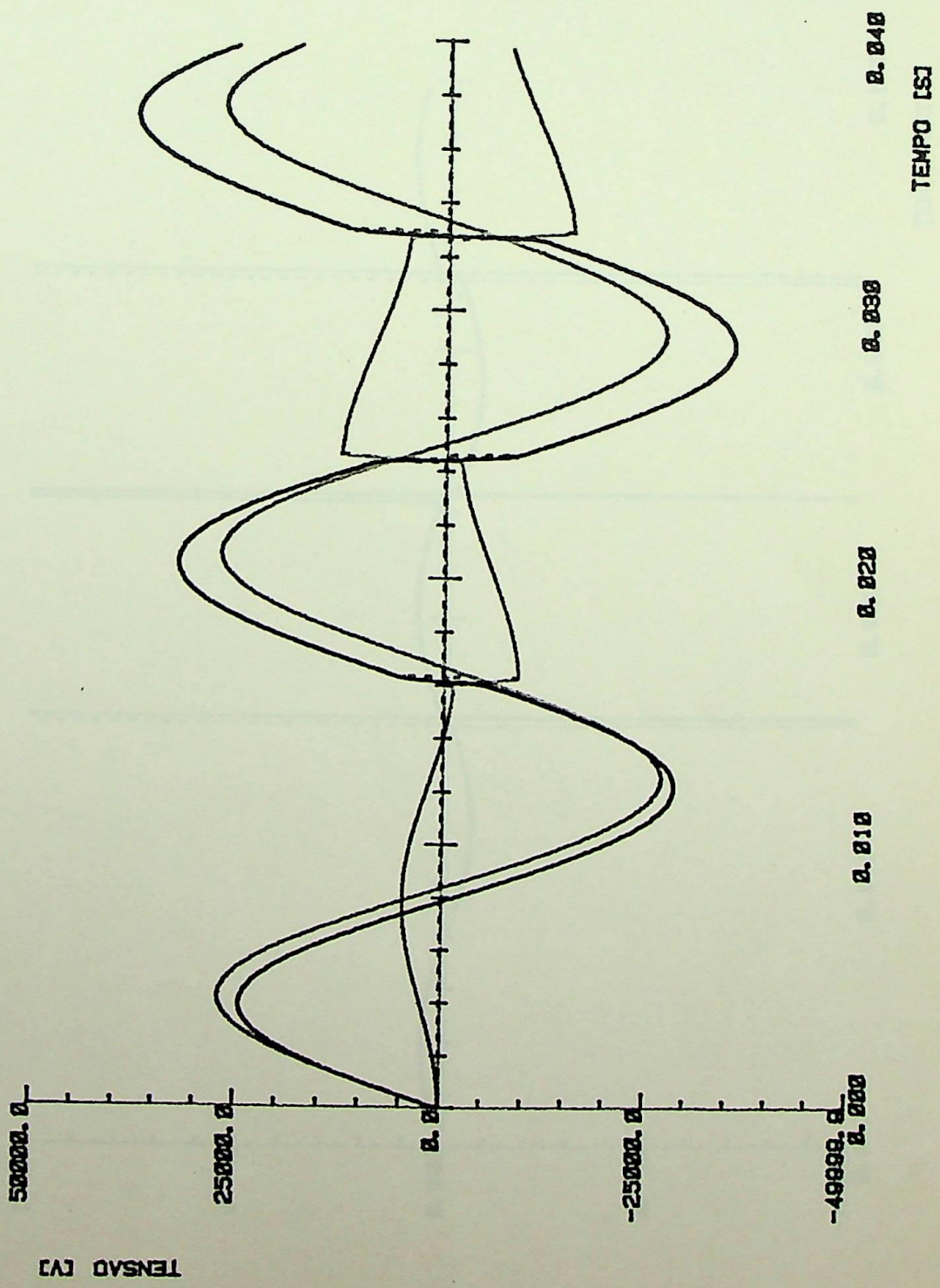
As figuras 4.22, 4.24, 4.26 e 4.28 mostram tensões no circuito, e as figuras 4.23, 4.25, 4.27 e 4.29, correntes, para as situações dos tiristores bloqueados e ângulos de disparo de 165° , 150° e 135° . As tensões verificadas constam da tabela 4.2.

α	Tensão no capacitor[pu]	Tensão na carga[pu]
bloqueado	0,705	0,705
165°	0,766	0,754
150°	0,945	0,832
135°	1,136	0,880

Tabela 4.2.- Variação da tensão nos terminais da carga e da capacitância em função do ângulo de disparo.

Verifica-se, também, que o controle da tensão nos terminais da carga se processa de maneira idêntica à anteriormente descrita.

Far-se-á, agora, uma variação do indutor do regulador eletrônico colocando-se uma reatância de $0,1[pu]$ e, posteriormente, de $10[pu]$. Variando-se o ângulo de disparo, verifica-se as formas de onda, constantes nas figuras 4.30 a 4.37. A carga é resistiva pura de $9,8[pu]$.

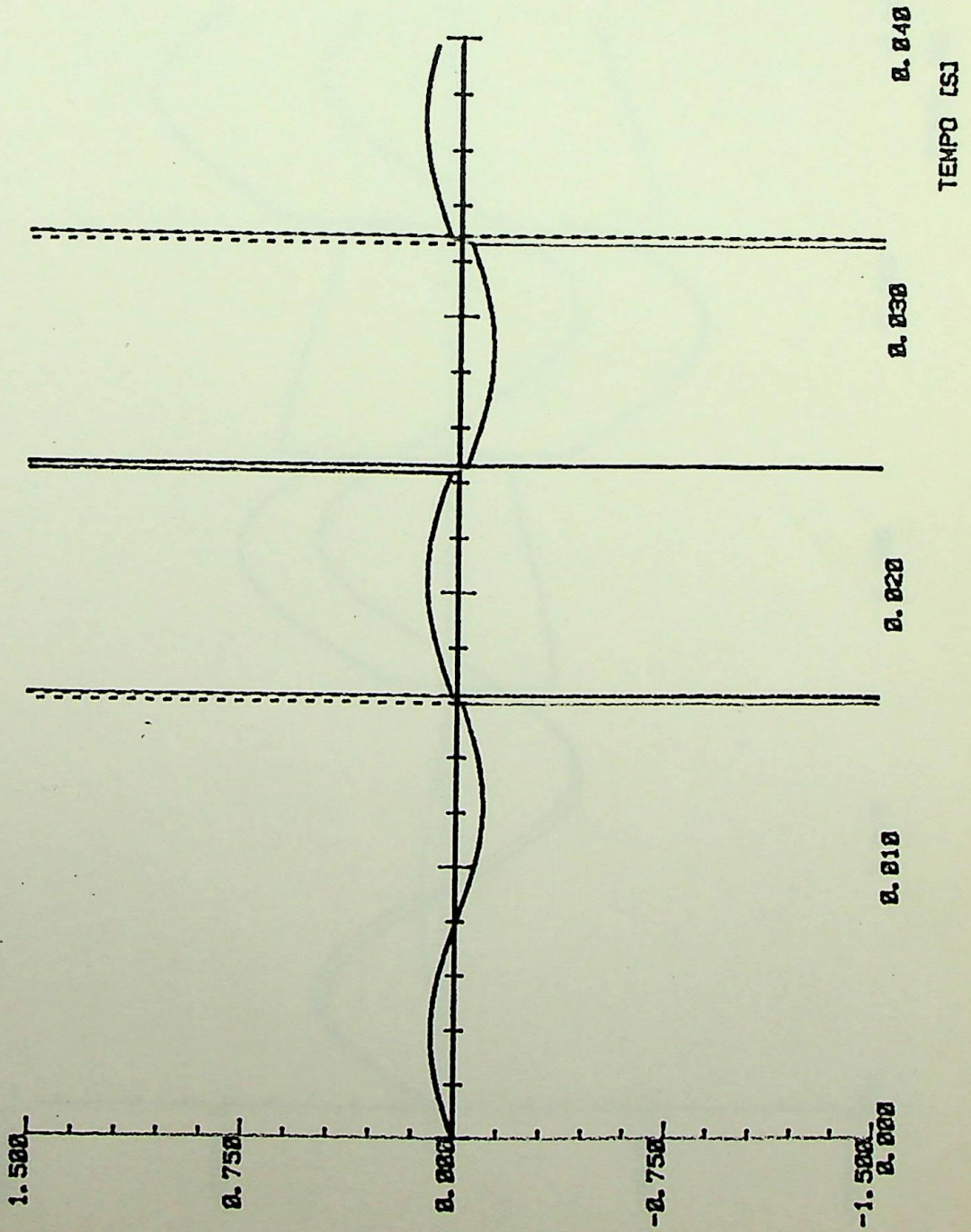


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1. 00	—	TENSAO - FONTE
1: 1. 00	—	TENSAO - CAPACITOR
1: 1. 00	—	TENSAO - CARGA
1: 1. 00	- - - - -	TENSAO - INDUTOR

FIG. No 4,30

DATA ABR/86 CAPITULO 4

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ANGULO DE DISPARO = 165
 INDUTOR DE 0,1 OHM

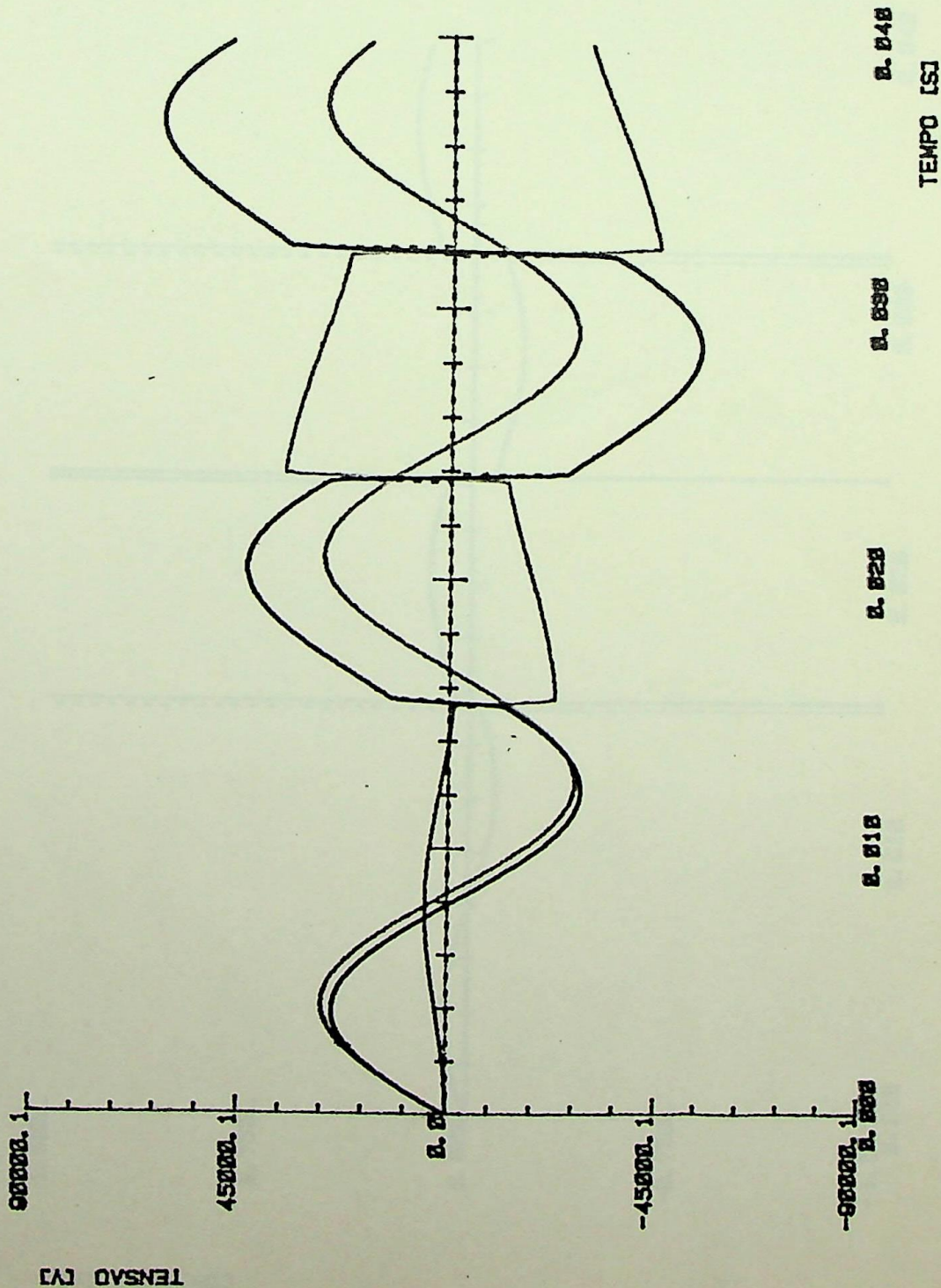


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE - CARGA
1:1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1:1.00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1:1.00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4,3]

DATA ABR/86 CAPITULO 4

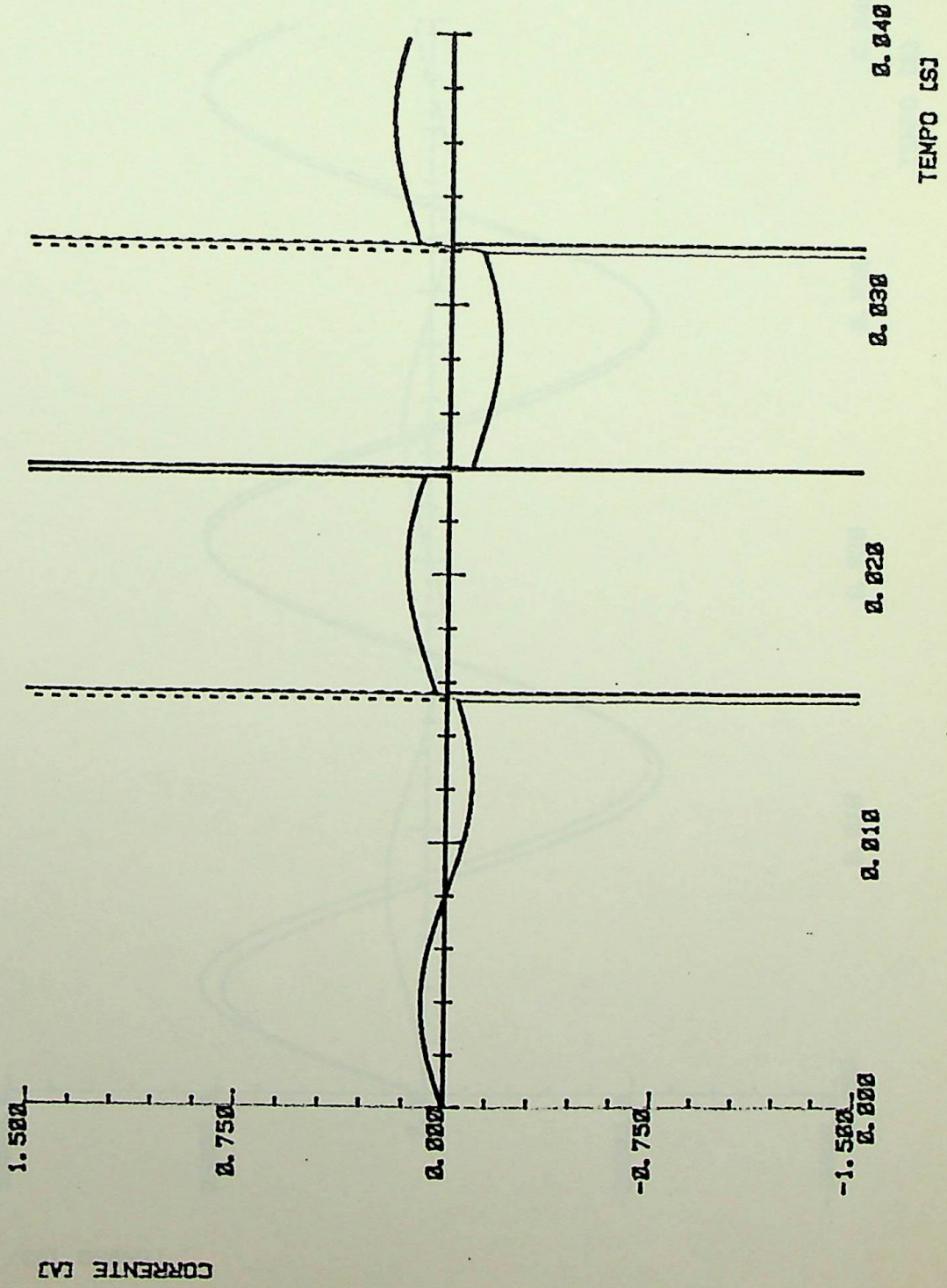
OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DE CORRENTE
 ANGULO DE DESFAZ = 165
 INDUCTOR DE 0,1 [mH]



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1. 00	—	TENSÃO - FONTE
1: 1. 00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1: 1. 00	—	TENSÃO - CARGA
1: 1. 00	-----	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No 4.32

DATA ABR/86	CAPITULO 4
OBSERVAÇÕES: FORMAS DE ONDA DA TENSÃO ÂNGULO DE DESFASE = 150 INDUTOR DE 0.1 [mH]	

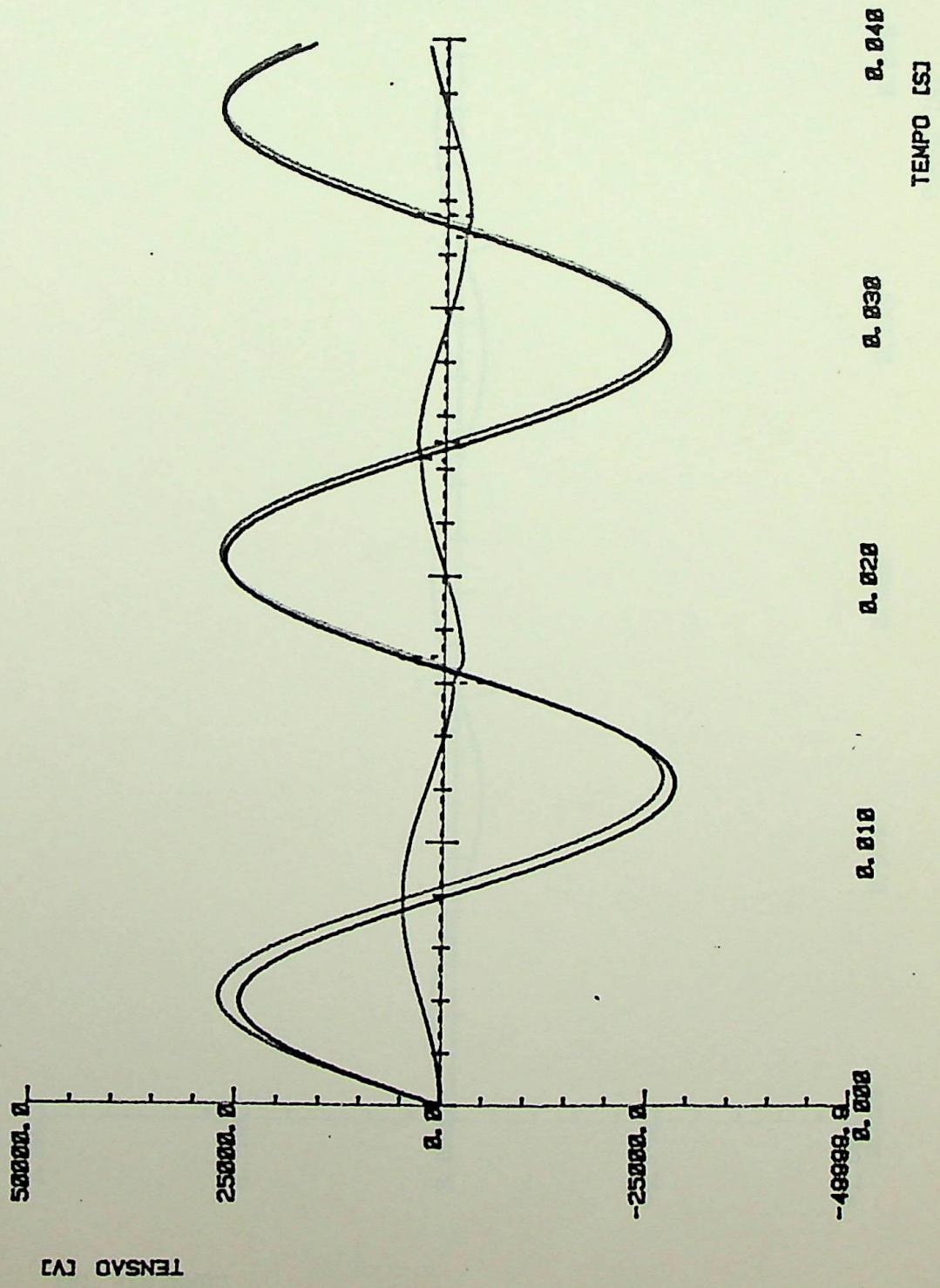


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE - CARGA
1:1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1:1.00	—	CORRENTE - TIRISTORI
1:1.00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4,33

DATA ABR/86	CAPITULO 4
----------------	------------

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ÂNGULO DE DESFASE = 150
 INDUCTOR DE 0.1 [mH]

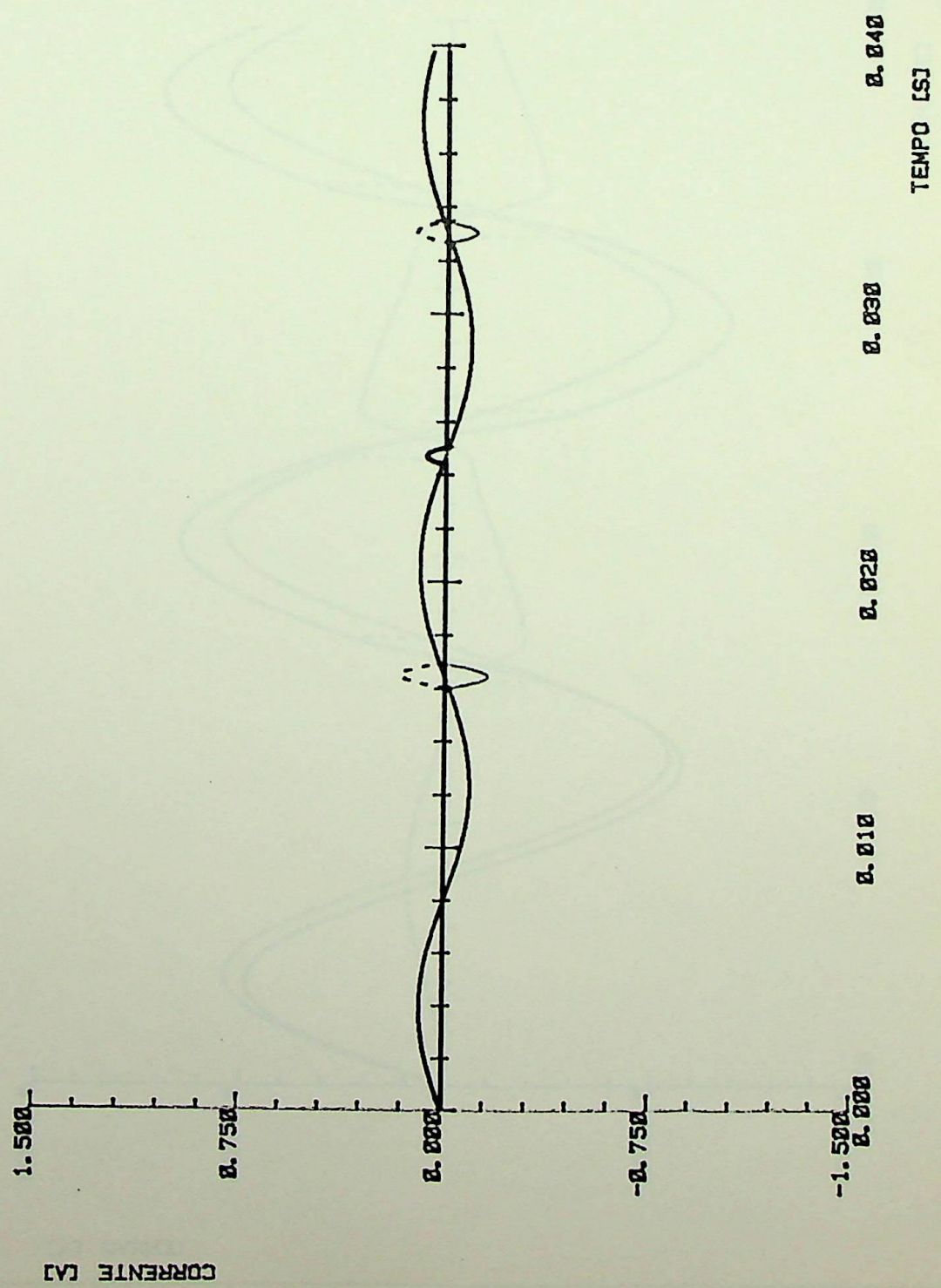


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1. 00	—	TENSÃO - FONTE
1: 1. 00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1: 1. 00	—	TENSÃO - CARGA
1: 1. 00	-----	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No 4,34

DATA ABR/86	CAPITULO 4
----------------	------------

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ANGULO DE DESFASE = 165
 INDUTOR DE 18 [μH]

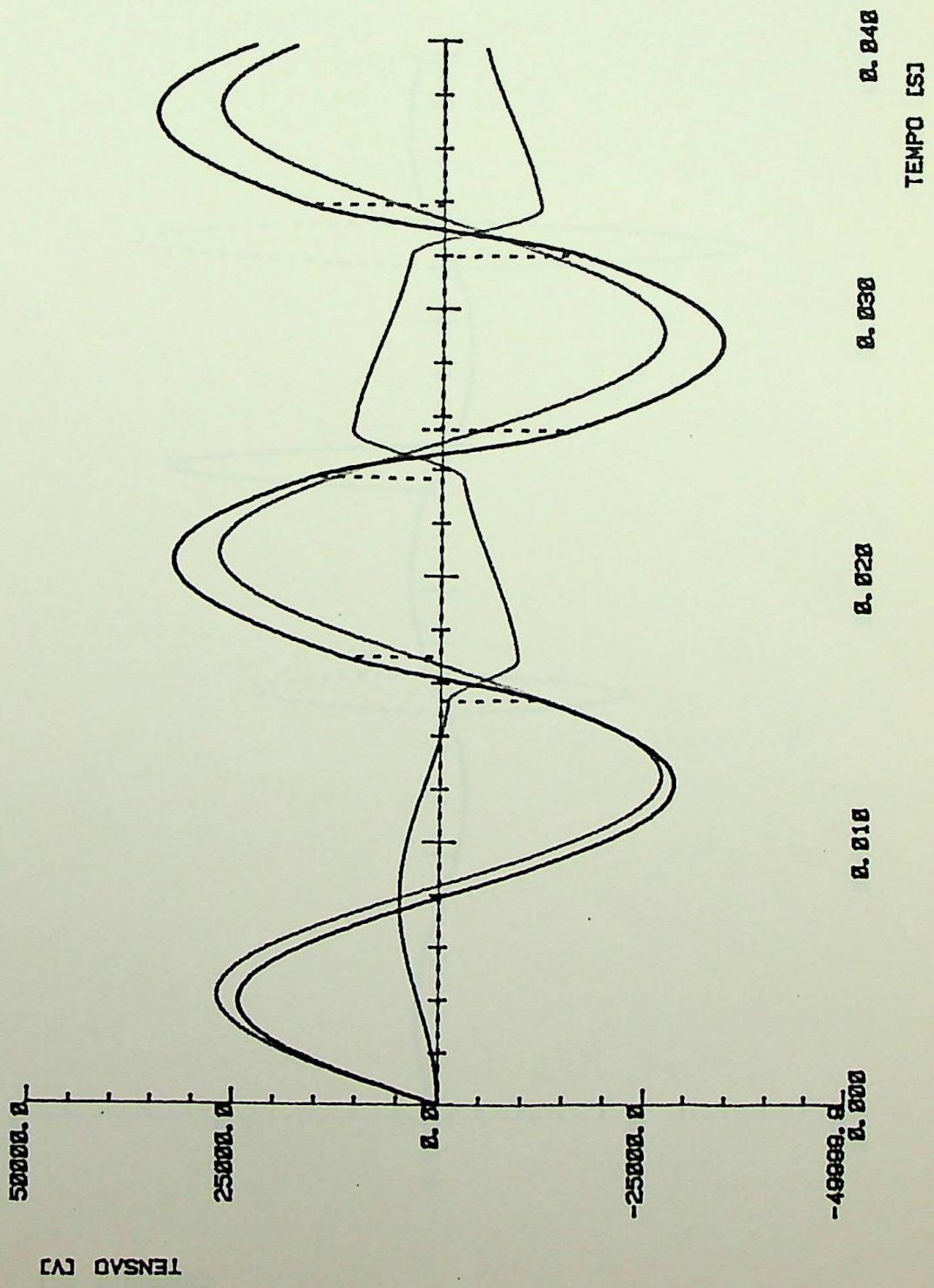


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1.00	—	CORRENTE - CARGA
1: 1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1.00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1: 1.00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4,35

DATA ABR/86	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA CORRENTE
 ANGULO DE DESFAZADO = 165
 INDUTOR DE 18 EPID

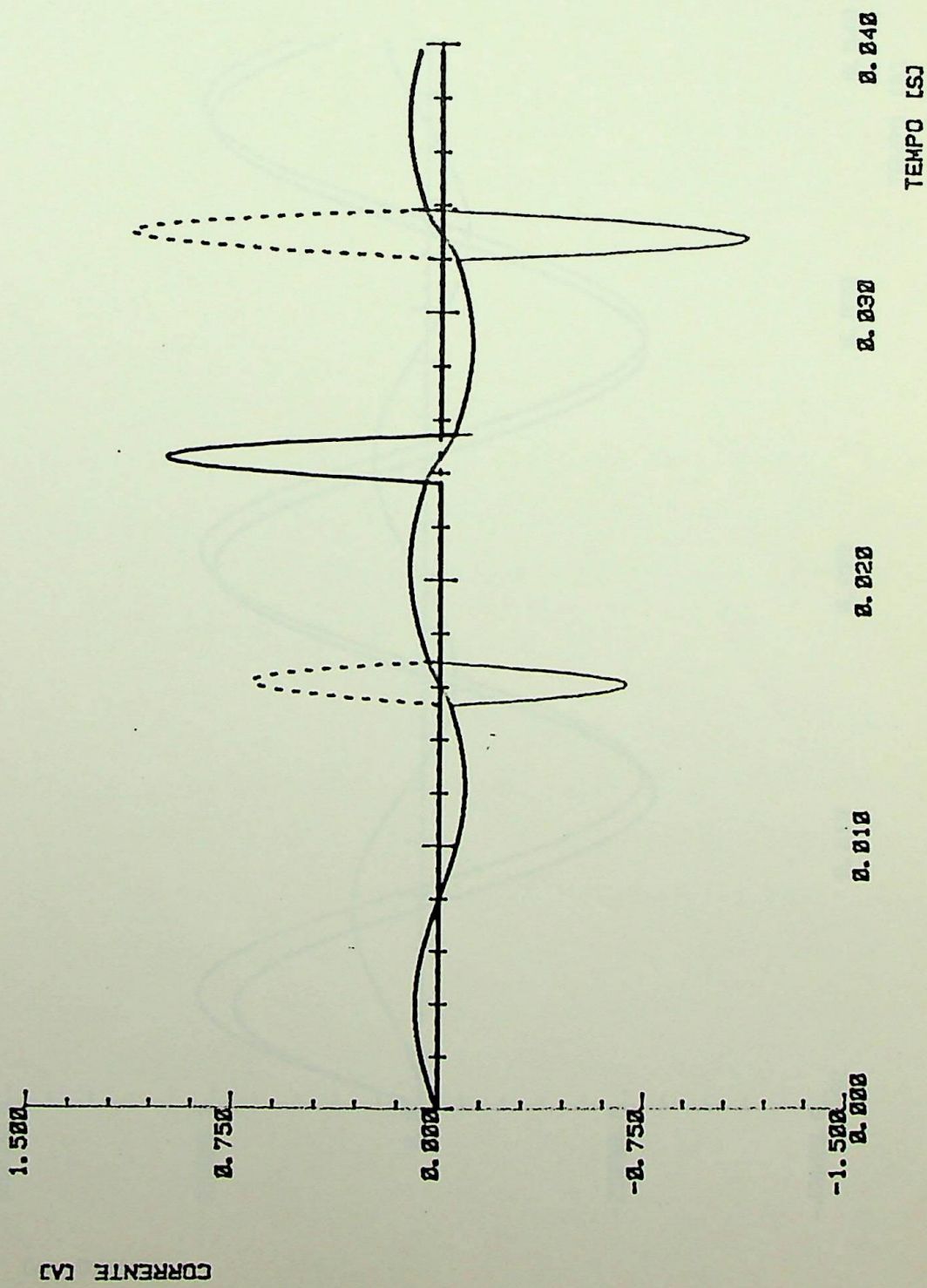


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	TENSAO - FONTE
1:1.00	—	TENSAO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSAO - CARGA
1:1.00	-----	TENSAO - INDUTOR

FIG. No 4.36

DATA	CAPITULO
ABR/86	4

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSAO
 ANGULO DE DISPARO = 150
 INDUTOR DE 18 μH



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE - CARGA
1:1.00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1:1.00	—	CORRENTE - TIRISTORI
1:1.00	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No4,37

DATA ABR/86 | CAPITULO 4

OBSERVACOES:

FORMAS DE ONDA DA CORRENTE
 ANGULO DE DISPARO = 150
 INDUTOR DE 10 IPLO

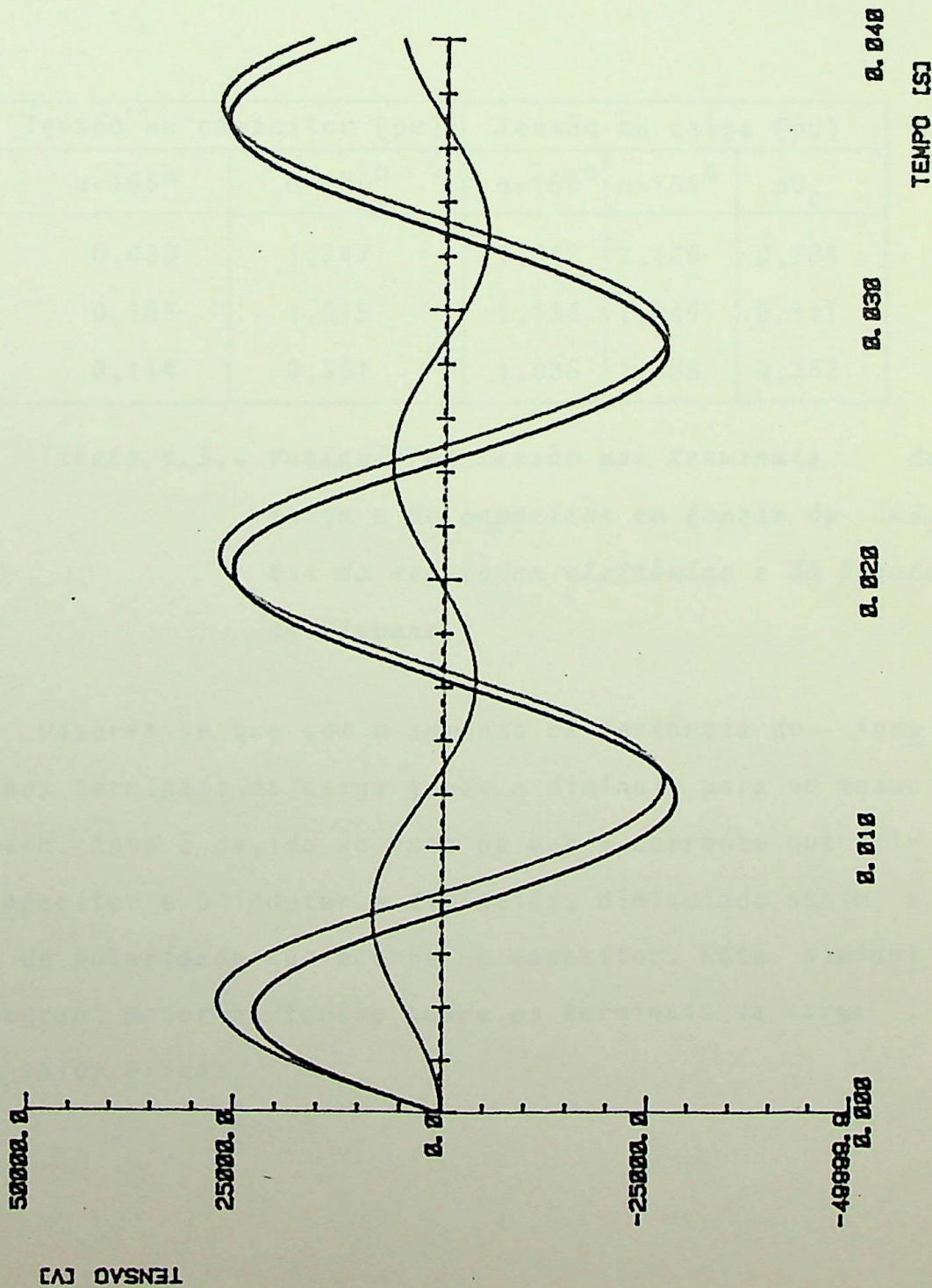


FIG. No 4.38

ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1. 00	—	TENSAO - FONTE
1: 1. 00	—	TENSAO - CAPACITOR
1: 1. 00	—	TENSAO - CARGA
1: 1. 00	-----	TENSAO - INDUTOR

DATA ABR/86	CAPITULO 4
----------------	---------------

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSAO
 TIRISTORES BLOQUEADOS
 CARGA OMNICA-INDUTIVA

As figuras 4.30 a 4.33 mostram tensões e correntes para uma reatância do regulador eletrônico igual a 0,1[pu], com os tiristores operando, primeiramente, com um ângulo de disparo de 165° e, posteriormente, de 150° . As figuras 4.34 a 4.37, possuem as mesmas condições, porém, para uma reatância de 10[pu].

A tabela 4.3 mostra os valores de tensão relevantes nesta análise.

Indutor [pu]	Tensão no capacitor [pu]		Tensão na carga [pu]		
	$\alpha=165^{\circ}$	$\alpha=150^{\circ}$	$\alpha=165^{\circ}$	$\alpha=150^{\circ}$	ΔU_c
0,1	0,430	1,347	1,342	2,126	0,784
1,0	0,185	1,015	1,134	1,845	0,711
10,0	0,114	0,351	1,036	1,288	0,252

Tabela 4.3.- Variação da tensão nos terminais da carga e do capacitor em função do indutor do regulador eletrônico e do ângulo de disparo.

Observa-se que com o aumento da reatância do indutor, a tensão nos terminais da carga tende a diminuir para um mesmo ângulo de disparo. Isto é devido ao fato de que a corrente que circula entre o capacitor e o indutor é diminuída, diminuindo assim a brusca mudança de polaridade que ocorre no capacitor. Esta diminuição gera um "degrau" menor na tensão sobre os terminais da carga, diminuindo seu valor eficaz.

Outro fato verificado, pela tabela, é que quanto menor for o indutor, maior é a faixa de controle da tensão nos terminais da carga, para uma mesma variação do ângulo de disparo.

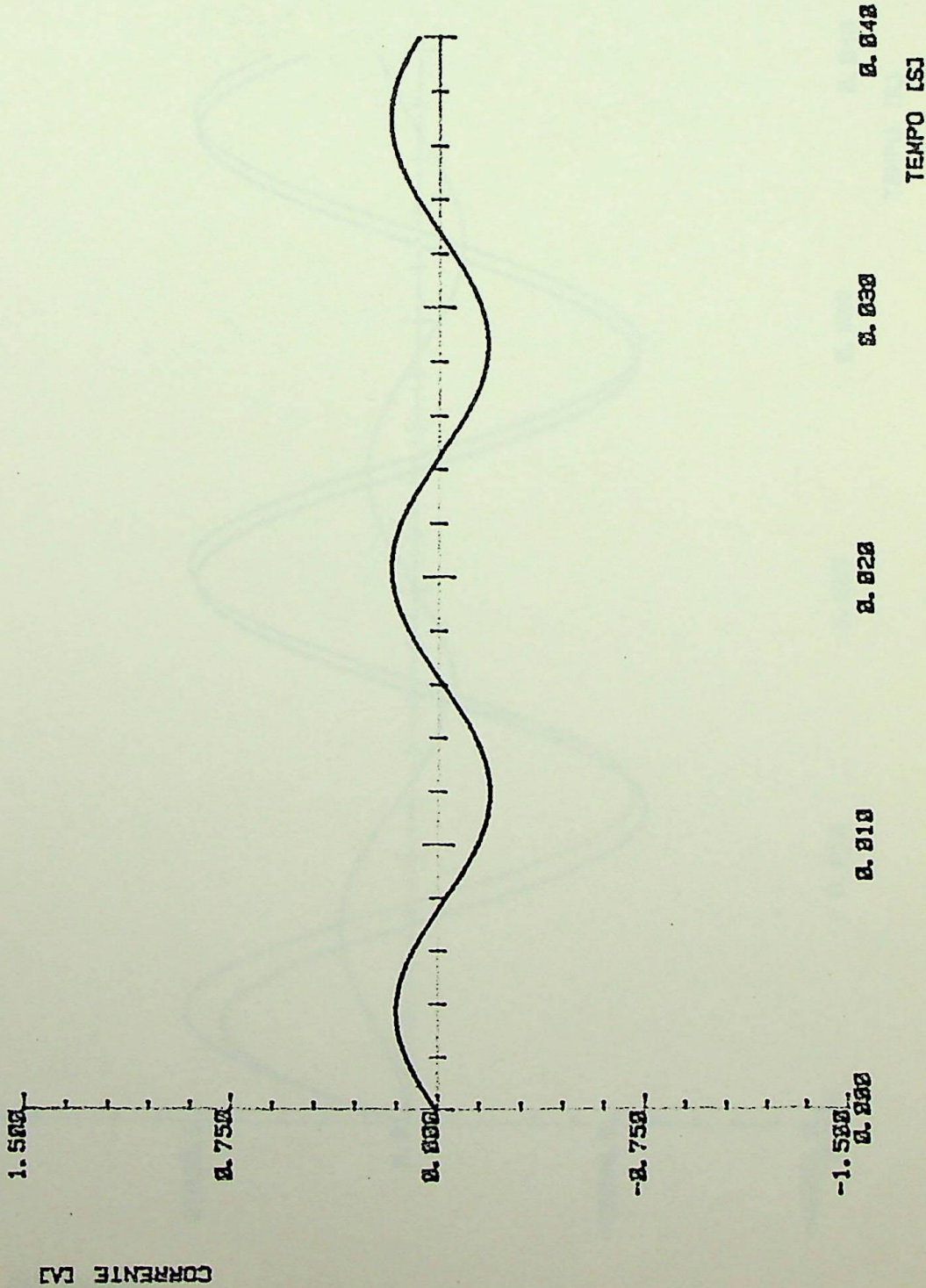
Far-se-á, agora, uma variação da carga, tentando através do ângulo de disparo manter a tensão em seus terminais constante, em 1,1[p.u]. A tabela 4.4 mostra o ângulo de disparo em função da carga; utilizar-se-á, a indutância de 0,1[p.u].

Carga [p.u]	α
10	176°
5	167°
1	136°
0,5	132°
0,25	124°

Tabela 4.4.- Ângulo de disparo em função da carga.

Nota-se da tabela 4.4 que quanto menor for a carga maior é o ângulo de disparo.

As análises feitas até este instante, levaram, por facilidade, em consideração, apenas cargas resistivas puras porém, os resultados podem ser estendidos à cargas com fator de potência diferente de 1. As figuras 4.38 a 4.45 mostram o comportamento das tensões e correntes, para uma carga de parte resistiva 5[p.u] e parte indutiva de 5[p.u], com a variação de ângulo de disparo. O valor da reatância do indutor do regulador eletrônico utilizado neste caso é de 1,0[p.u].

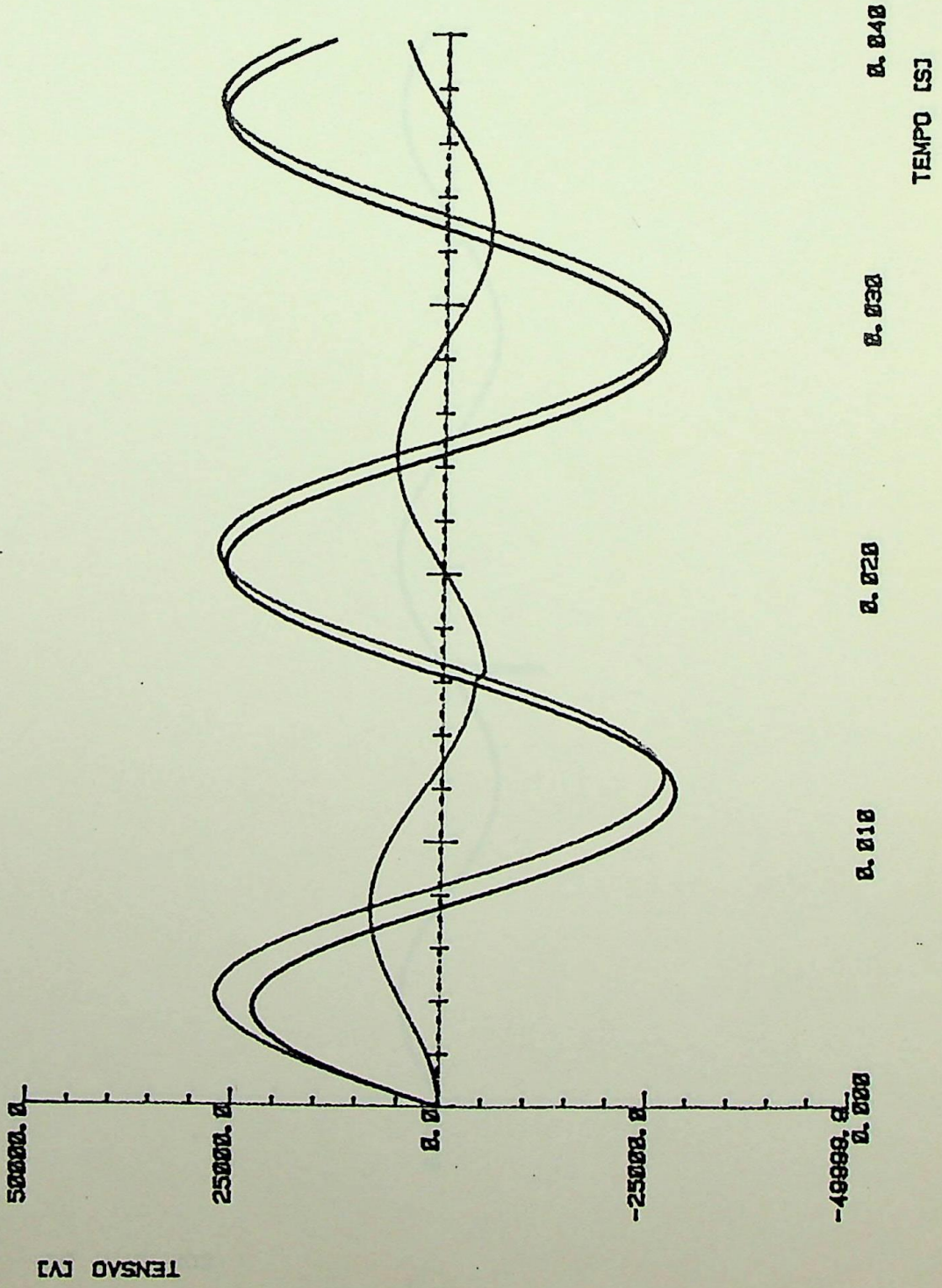


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE-RESISTENCIA

FIG. No 4,39

DATA	CAPITULO 4
------	------------

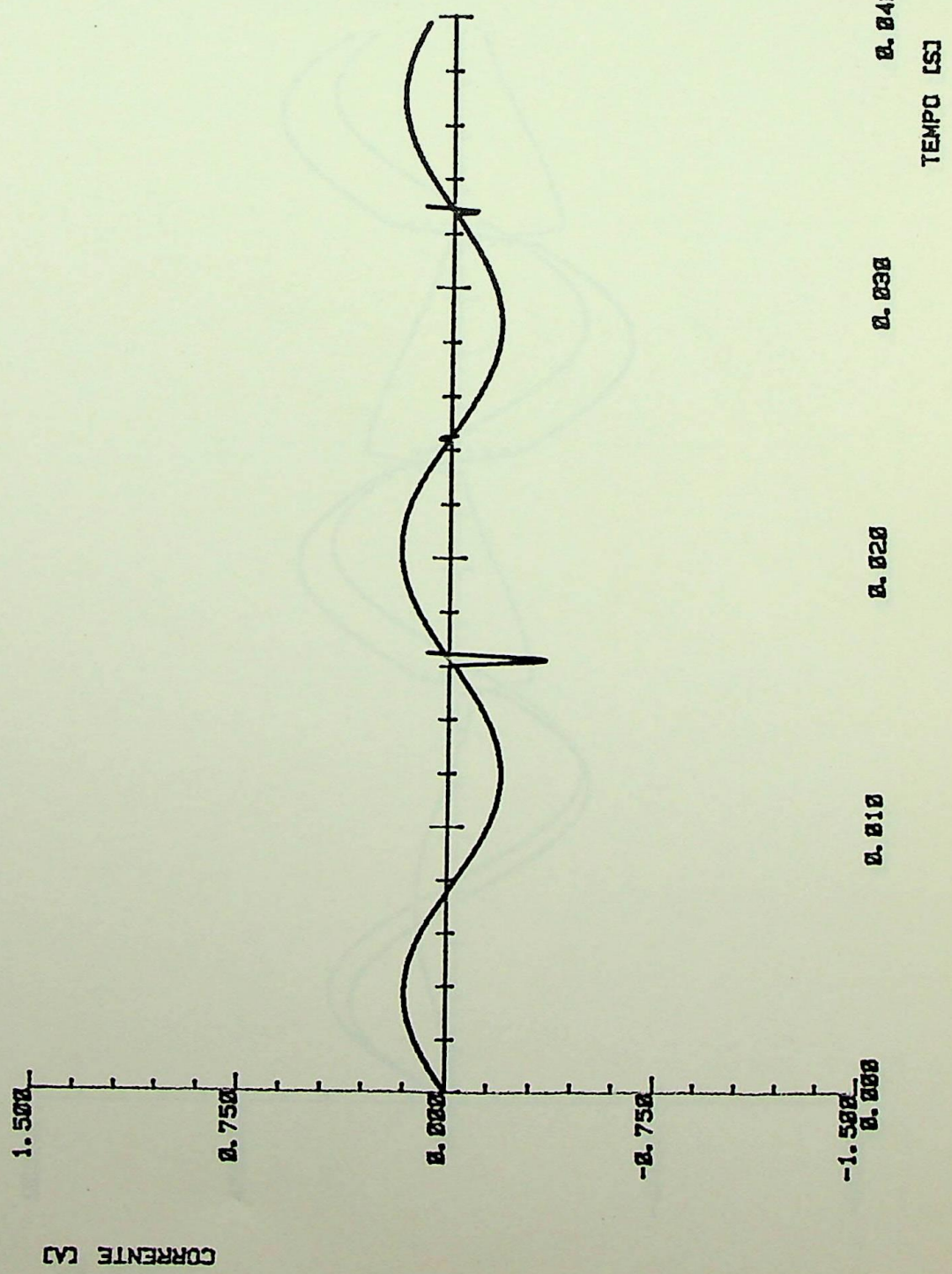
OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA CORRENTE
 TIRISTORES BLOQUEADOS
 CARGA OMFICA-INDUTIVA



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	TENSAO - FONTE
1:1.00	—	TENSAO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSAO - CARGA
1:1.00	TENSAO - INDUTOR

FIG. No 4.40

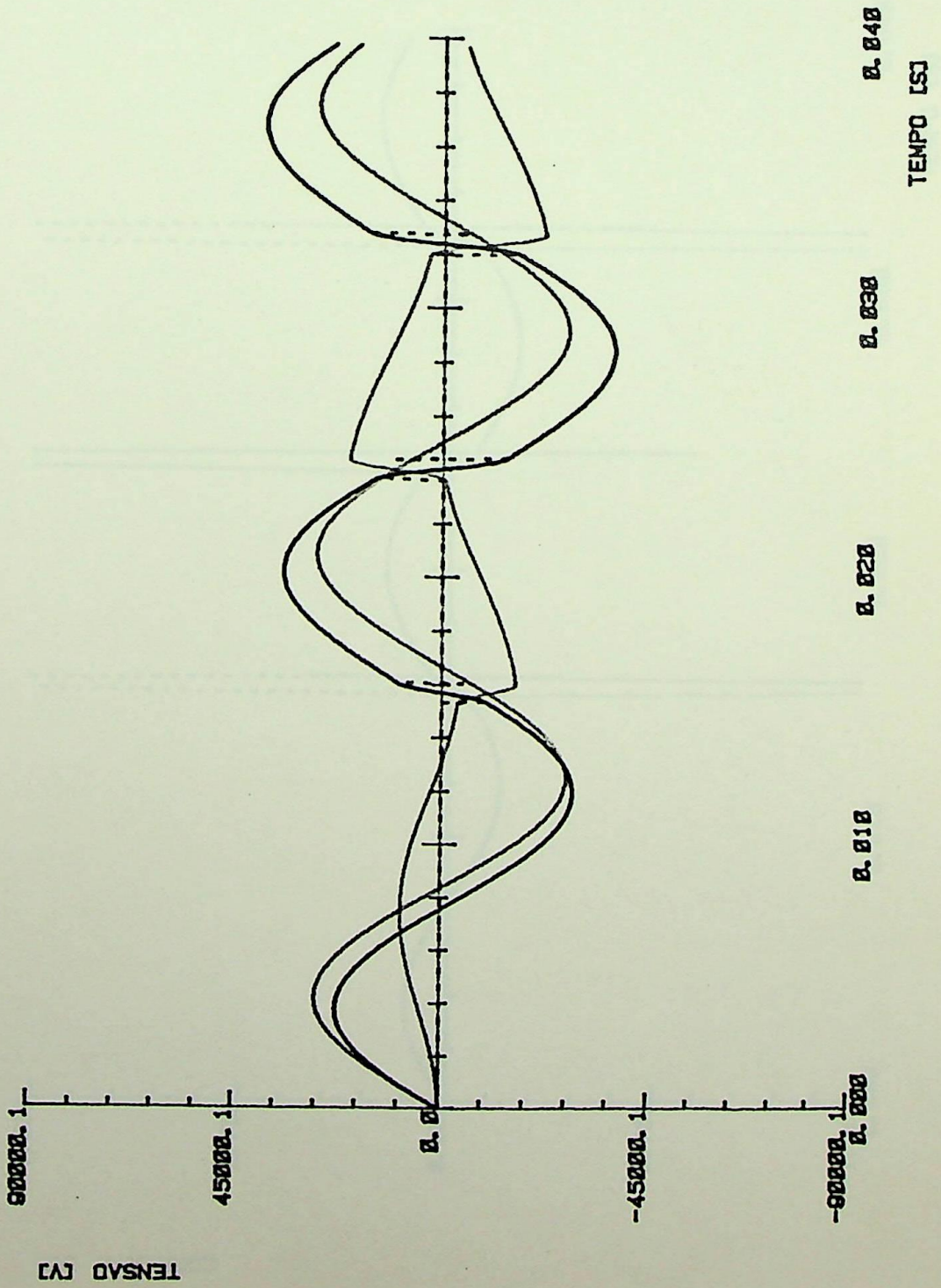
DATA ABR/86	CAPITULO 4
OBSERVACOES: FORMAS DE ONDA DA TENSAO ANGULO DE DESFASE = 16.5 CARGA OHMICA-INDUTIVA	



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1:1.00	—	CORRENTE-RESISTENCIA
1:1.00	—	CORRENTE-INDUTOR
1:1.00	—	CORRENTE-CAPACITOR

FIG. No 4.41

DATA ABR/86	CAPITULO 4
OBSERVACOES: FORMAS DE ONDA DA CORRENTE ANGULO DE DESFASE = 165 CARGA OHMICA-INDUTIVA	

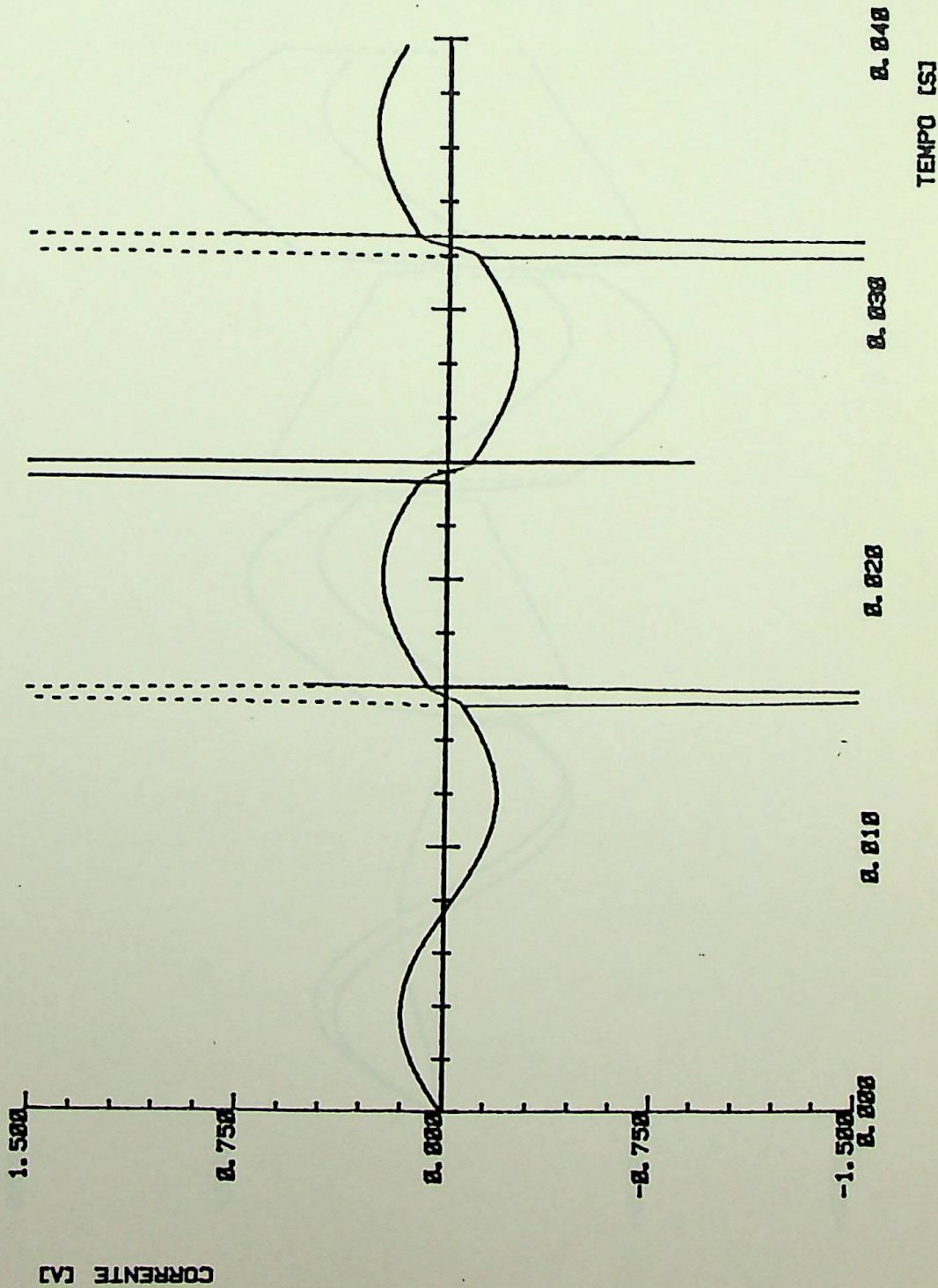


ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1. 00	—	TENSÃO - FONTE
1: 1. 00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1: 1. 00	—	TENSÃO - CARGA
1: 1. 00	-----	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No 4.42

DATA ABR/88	CAPITULO 4
----------------	------------

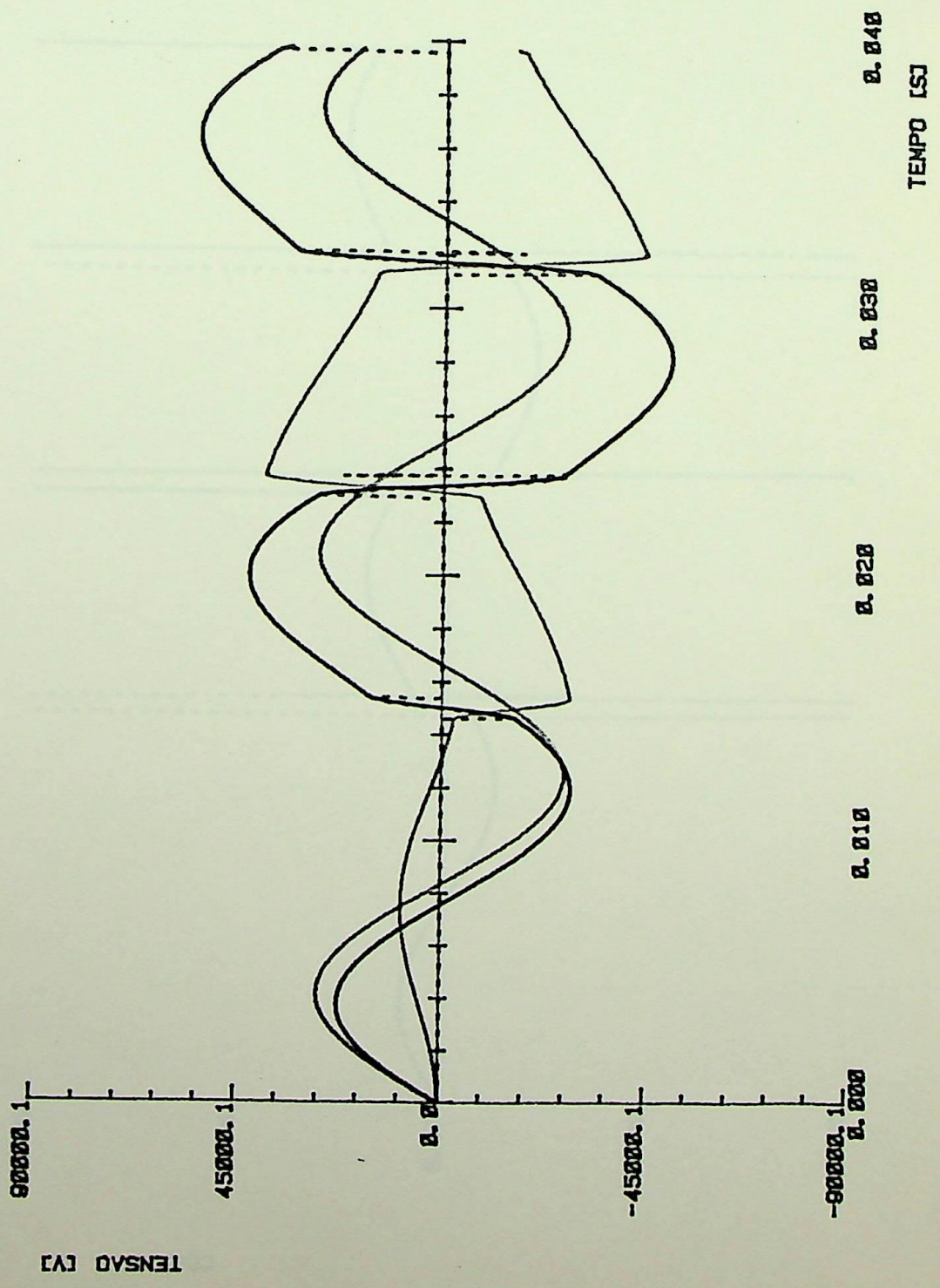
OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ANGULO DE DESFASE = 150
 CARGA OHMICA-INDUTIVA



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1: 1. 00	—	CORRENTE - RESISTENCIA
1: 1. 00	—	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1. 00	—	CORRENTE - TIRISTOR1
1: 1. 00	-----	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4.43

DATA ABR/86	CAPITULO 4
OBSERVAÇÕES: FORMAS DE ONDA DA CORRENTE ÂNGULO DE DISPARO = 150 CARGA ÔHMICA-INDUTIVA	



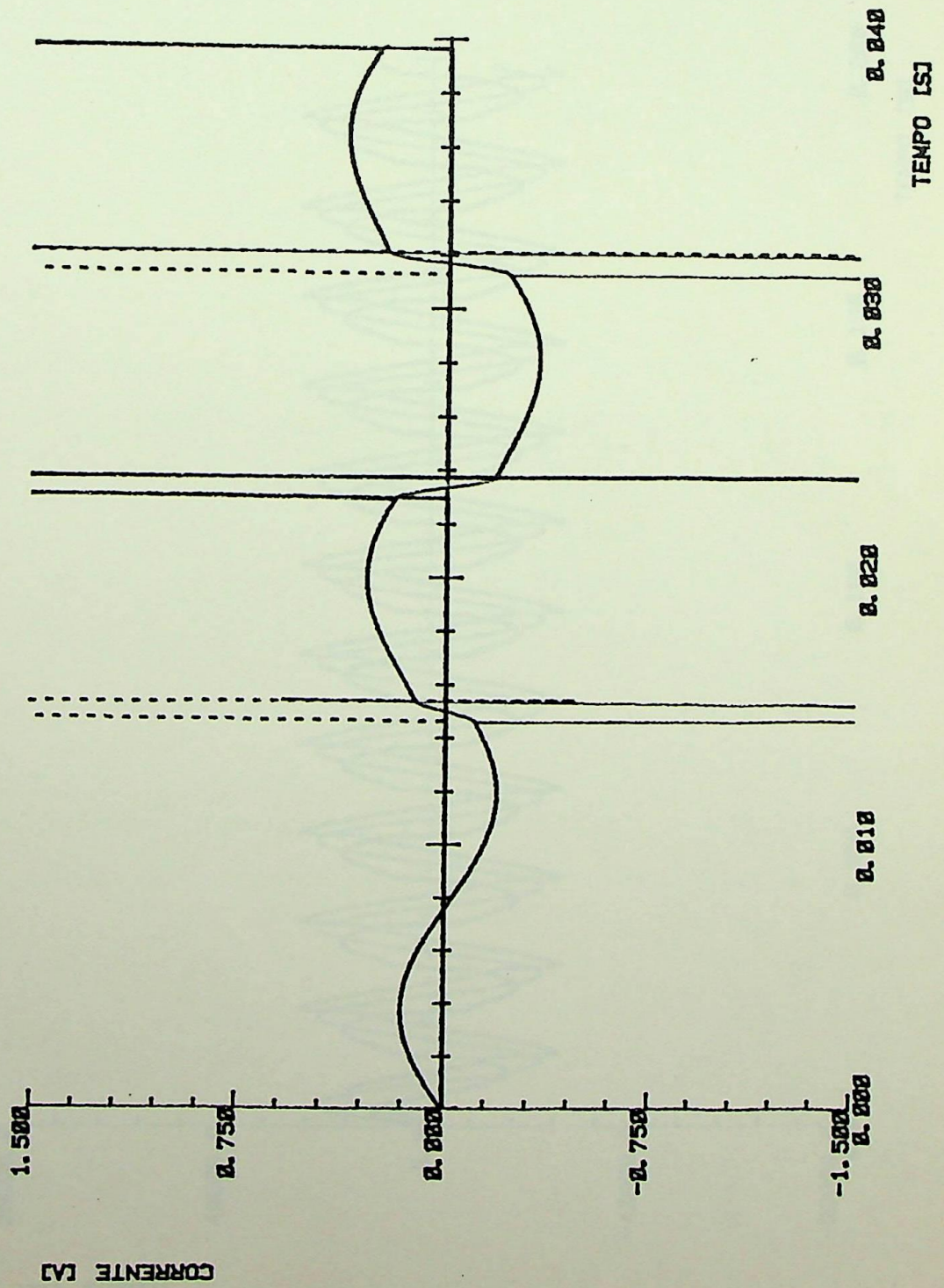
ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1. 00	—	TENSAO - FONTE
1: 1. 00	—	TENSAO - CAPACITOR
1: 1. 00	—	TENSAO - CARGA
1: 1. 00	TENSAO - INDUTOR

FIG. No 4.44

DATA ABR/86	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSAO
 ANGULO DE DISPARO = 135
 CARGA OHMICA INDUTIVA

154



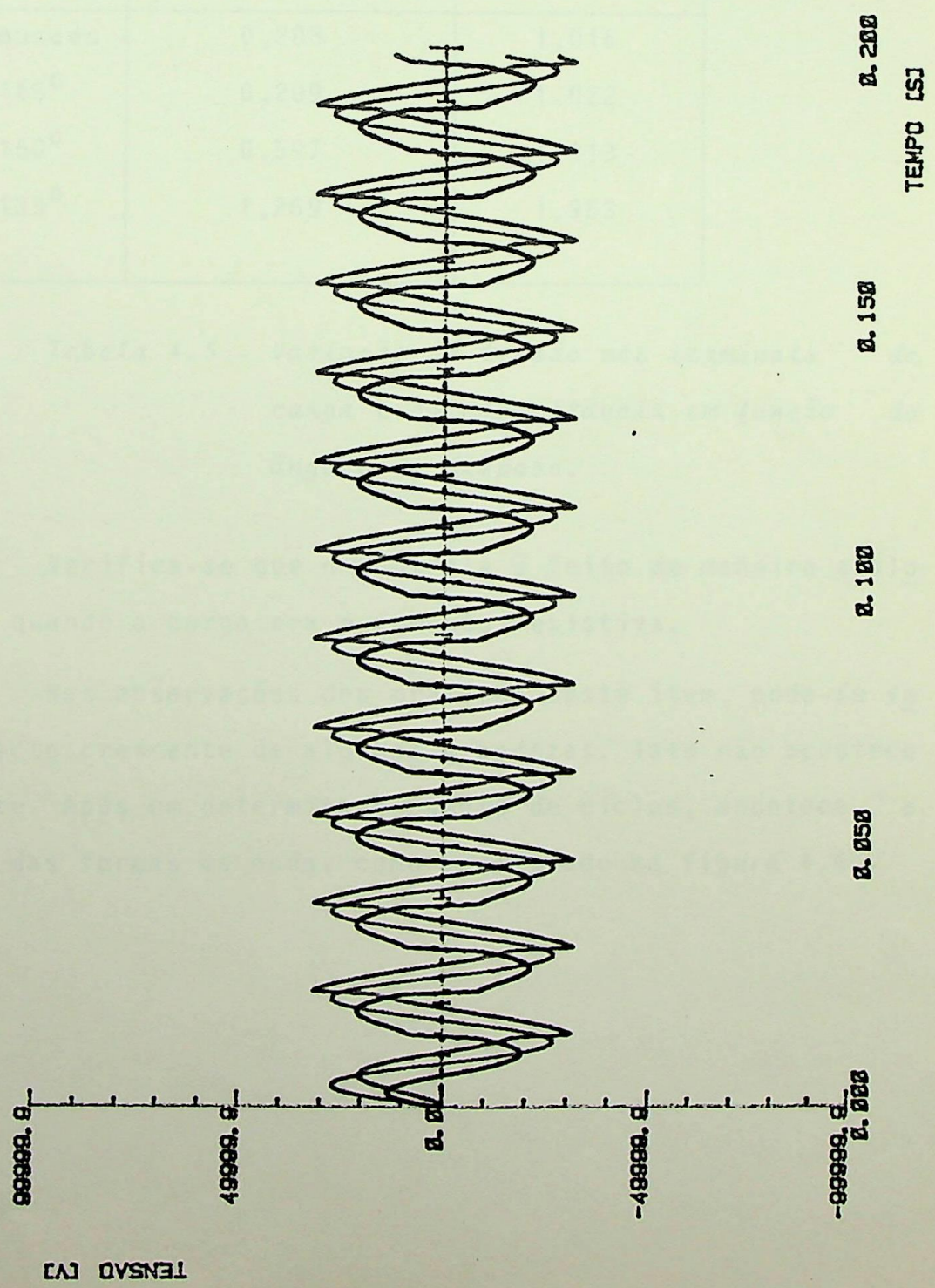
ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNACAO DA CURVA
1: 1. 00	---	CORRENTE-RESISTENCIA
1: 1. 00	---	CORRENTE - CAPACITOR
1: 1. 00	---	CORRENTE - TIRISTOR1
1: 1. 00	- - - - -	CORRENTE - TIRISTOR2

FIG. No 4.45

DATA ABR/86	CAPITULO 4
-------------	------------

OBSERVACOES:

FORMAS DE ONDA DA CORRENTE
 ANGULO DE DISPARO = 135
 CARGA OHMICA-INDUTICA



ESCALA DO EIXO Y	TIPO E COR DA LINHA	DESIGNAÇÃO DA CURVA
1:1.00	—	TENSÃO - FONTE
1:1.00	—	TENSÃO - CAPACITOR
1:1.00	—	TENSÃO - CARGA
1:1.00	TENSÃO - INDUTOR

FIG. No4,46

DATA	CAPITULO
ABR/88	4

OBSERVAÇÕES:
 FORMAS DE ONDA DA TENSÃO
 ANGULO DE DISPARO = 150
 CARGA RESISTIVA

As figuras 4.38, 4.40, 4.42 e 4.44 mostram tensões no circuito e as figuras 4.39, 4.41, 4.43 e 4.45, correntes, para os tiristores: bloqueados e com ângulos de disparo de 165° , 150° e 135° , respectivamente. As tensões verificadas constam na tabela 4.5.

α	Tensão no Capacitor [p.u]	Tensão na Carga [p.u]
bloqueado	0,208	1,016
165°	0,209	1,022
150°	0,597	1,413
135°	1,269	1,953

Tabela 4.5.- Variação da tensão nos terminais da carga e da capacitância em função do ângulo de disparo.

Verifica-se que o controle é feito de maneira análoga a descrita quando a carga era puramente resistiva.

Nas observações dos gráficos deste ítem, pode-se verificar o aspecto crescente de algumas grandezas. Isto não acontece indefinidamente. Após um determinado número de ciclos, acontece a estabilização das formas de onda, como verificado na figura 4.46.

4.6 - CONCLUSÕES

Nota-se das tabelas 4.1 e 4.2 que para os tiristores bloqueados, a tensão nos terminais da carga varia de 1,023[p.u] para 0,705[p.u] quando a impedância representativa da mesma passa de 10[p.u] para 1[p.u], o que denota a má regulação do circuito, fato já verificado anteriormente.

Outra característica notada é que a faixa de controle é tanto mais ampla quanto maior for a impedância representativa da carga, ou seja, para uma mesma variação do ângulo de disparo desde 180° (bloqueado) a 135° , a tensão, para a impedância de 10[p.u], varia de 1,023 a 2,632[p.u], enquanto que para a impedância de 1[p.u], varia de 0,705 a 0,880[p.u].

Da tabela 4.3, verifica-se que quanto menor for o valor do indutor, maior é a sua faixa de regulação, porém, maiores serão os picos de corrente que circulam entre o indutor e o capacitor. Torna-se, então, necessário adotar uma solução de compromisso para a escolha do indutor, entre a faixa de carga que o regulador irá atuar e os picos de corrente que ele pode aguentar. Cabe ressaltar que, os picos de corrente calculados estão em sua condição mais crítica pois foram desprezadas as resistências do condutor isolado e do próprio indutor. É importante lembrar que, os picos de corrente não passam pela carga.

Fazendo-se uma comparação entre o controle de tensão realizada pelo regulador eletrônico e pelo circuito LC, verifica-se que o primeiro é mais eficaz; pois;

- a) mantêm a tensão nos terminais da carga para uma faixa maior de variação da mesma,
- b) mantêm a tensão nos terminais da carga para uma faixa de tensões induzidas, enquanto, no circuito LC, esta variação é transferida para os terminais da carga,
- c) não apresenta problemas de sobretensão nos terminais do transformador.

A desvantagem do regulador eletrônico é que os í tens acima são conseguidos através de distorções nas formas de onda da tensão e da corrente, o que gera o aparecimento de harmônicos no sistema. Porém, isto não chega a preocupar pois este sistema de ex tração de potência deve ser utilizado para surgir pequenas cargas . E, os motores, um dos equipamentos que mais sofrem com a circulação de harmônicos, tem nesta faixa, o seu isolamento super-dimensiona do.

CAPÍTULO 5

ESTUDO SOBRE FERRORESSONÂNCIA

CAPITULO 5

ESTUDO SOBRE FERRORESSONÂNCIA

5.1 - INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência estão continuamente sujeitos a fenômenos transitórios que podem ir de frequências relativamente baixas (fenômenos eletromecânicos) até altíssimas frequências.

Estes fenômenos transitórios podem criar sobretensões que são classificadas, segundo a norma IEC-TC 28, em:

- a) Sobretensões Atmosféricas - causadas por surtos atmosféricos, possuem uma curta duração, da ordem de micro-segundos;
- b) Sobretensões de Chaveamento - causadas por operações de manobra, possuem uma duração da ordem de mili-segundos;
- c) Sobretensões Temporárias - causadas por faltas, perdas de carga, ressonância em circuitos lineares, entre outros.

As sobretensões temporárias podem ser divididas em grupos:

- a) Grupo 1 - com frequência de oscilação próxima a industrial;
- b) Grupo 2 - com frequência de oscilação maior que a industrial;
- c) Grupo 3 - com frequência de oscilação menor que a industrial.

Pretende-se, neste capítulo, fazer uma análise do

fenômeno de ferrossonância, que é associado a sistemas que contêm resistências, capacitâncias e indutâncias não lineares. Devido a este efeito pode ocorrer um substancial aumento da corrente que circula através dos terminais de um ou mais elementos.

Este fenômeno pode ocorrer na extração de potência através de um condutor isolado, pois todos os elementos acima relacionados estão contidos neste circuito.

5.2 - RESSONÂNCIA SÉRIE

Considere o circuito da figura 5.1, onde tem-se uma fonte de tensão senoidal v , uma resistência R , uma capacitância C e uma indutância L .

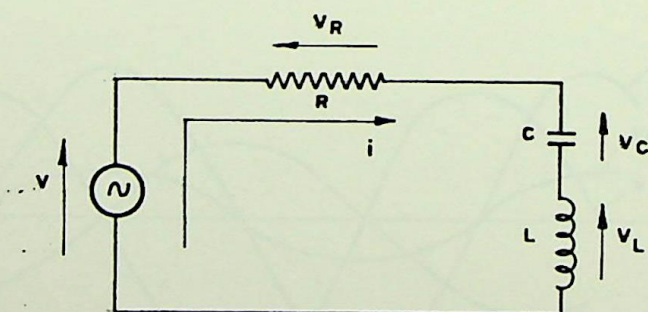


Figura 5.1.- Circuito ressonante série.

Onde \dot{v}_R , \dot{v}_C e \dot{v}_L são os valores instantâneos das quedas de tensão na resistência, capacitor e indutor, respectivamente. Tomando seus valores eficazes vem:

$$V_R = R \cdot I \quad (5.1.a)$$

$$V_L = \omega L \cdot I = X_L \cdot I \quad (5.1.b)$$

$$V_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I = X_C \cdot I \quad (5.1.c)$$

Como V_C e V_L estão em oposição de fase, em uma adição fasorial far-se-á a subtração de seus módulos. Portanto a corrente no circuito da figura 5.1 será:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (5.2)$$

As formas de onda das quedas de tensão e da corrente estão representadas na figura 5.2.

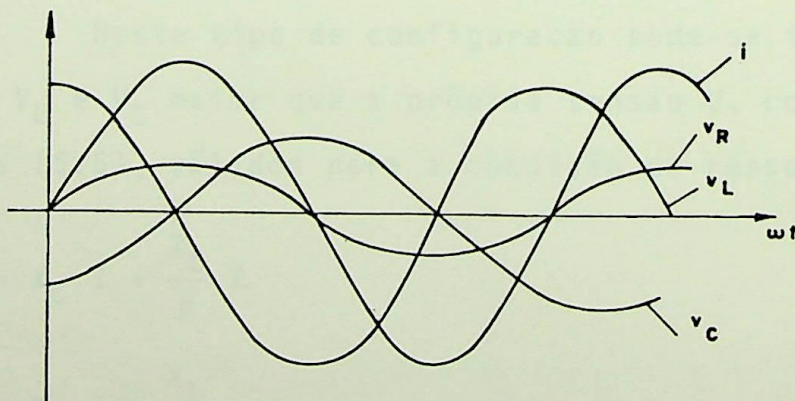


Figura 5.2.- Formas de onda das tensões e correntes

A condição de ressonância série ocorre quando a reatância capacitiva for igual a reatância indutiva, ou seja:

$$X_L = X_C$$

Quando isto ocorrer a corrente terá seu valor eficaz dado por:

$$I = \frac{V}{R} \quad (5.3)$$

e a frequência angular de ressonância dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.4)$$

Se a resistência do circuito da figura 5.1 for muto pequena e a frequência igual a de ressonância, as oscilações de carga e descarga entre o capacitor e o indutor serão não amortecidas e as amplitudes de oscilações de corrente tornar-se-ão grandes.

As tensões de ressonância podem levar a danificar equipamentos em instalações de sistemas elétricos.

Neste tipo de configuração pode-se ter os valores das tensões V_L e V_C maior que a própria tensão V , como mostrado pelas equações (5.5), válidos para a condição de ressonância:

$$V_C = X_C \cdot I = \frac{X_C}{R} V \quad (5.5.a)$$

$$V_L = X_L \cdot I = \frac{X_L}{R} V \quad (5.5.b)$$

Basta para tal que:

$$\frac{X_C}{R} > 1$$

$$\frac{X_L}{R} > 1$$

condições que para o condutor isolado e o transformador são facilmente cumpridas, como será visto posteriormente.

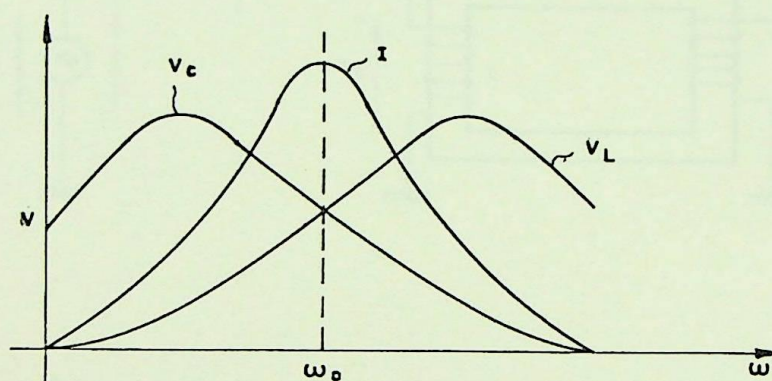


Figura 5.3.- Valores eficazes de tensão e corrente em função de ω .

Nota-se da figura 5.3, que mostra o comportamento das tensões V_L e V_C e da corrente I em função da frequência, que o maior valor da corrente acontece para a frequência de ressonância.

5.3 - O FENÔMENO DA FERRORESSONÂNCIA

No ítem anterior, analisou-se um circuito cuja indutância L era independente da corrente e constante. Isto acontece quando as indutâncias possuem núcleos de material não-ferromagnético, ou com gaps de ar. Porém, quando as indutâncias são construídas sobre núcleos fechados de material ferromagnético, seus valores dependem das correntes que por elas circulam e do grau de saturação

do material do núcleo. Isto é o que ocorre com os transformadores normalmente utilizados em distribuição.

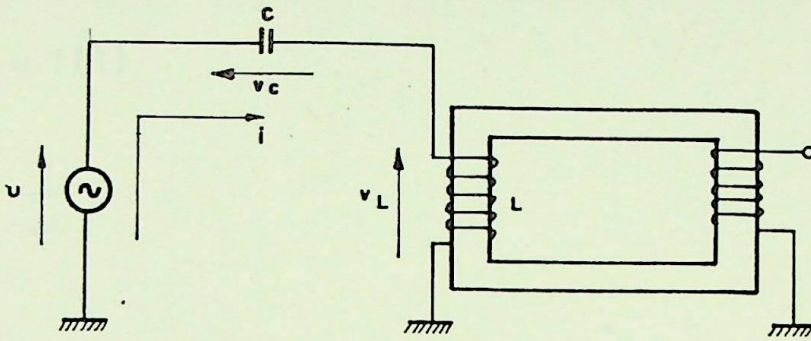


Figura 5.4.- Circuito para o estudo da histerese.

O circuito da figura 5.4 pode estar representando, por exemplo, a capacitância entre a linha principal e o condutor i solado, o transformador a ser utilizado para o abaixamento da tensão do condutor isolado, e a fonte a tensão induzida no condutor i solado.

Na primeira análise será desconsiderada a resistência. A força eletromotriz \mathcal{V} será considerada senoidal. As distorções devido a magnetização serão desconsideradas, adotando-se apenas a frequência fundamental. Pode-se, então, escrever:

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_L + \mathcal{V}_C \quad (5.6)$$

A característica tensão-corrente do indutor, tem ,

como se sabe, a forma indicada na figura 5.5.a, enquanto que a tensão V_C é proporcional à corrente e está em oposição de fase em relação à tensão na indutância.

$$V_L = \omega \cdot f(I) \quad (5.7.a)$$

$$V_C = -\frac{I}{\omega C} \quad (5.7.b)$$

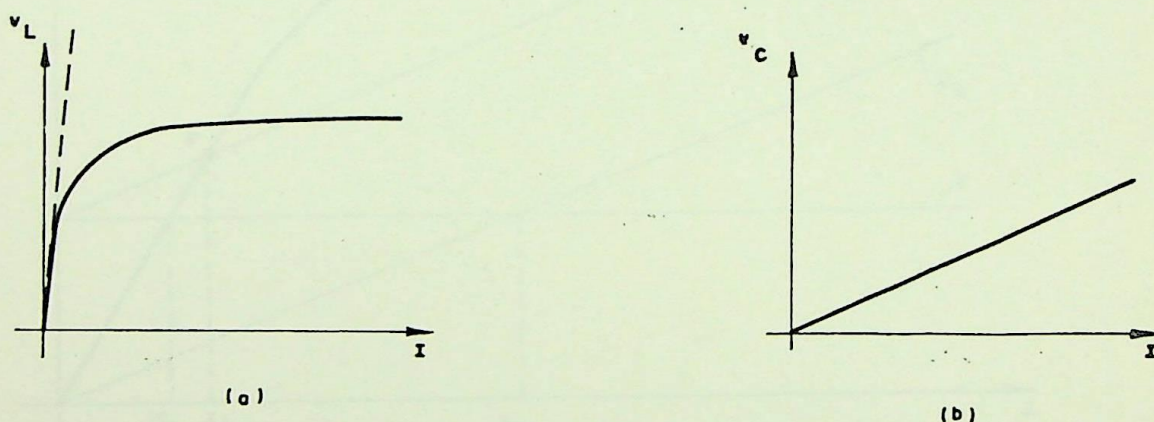


Figura 5.5.- Características das tensões em função da corrente:

- a) em indutor com núcleo ferromagnético;
- b) em capacitores.

A inclinação da característica tensão-corrente do capacitor será tanto menor quanto maior for o valor de ωC .

Da equação (5.6) pode-se escrever:

$$V_L = \omega f(I) = V + V_C \quad (5.8)$$

Da equação (5.8) pode-se montar o gráfico da figura 5.6, onde I_C representa a corrente do circuito se não existisse o indutor, I_L se não existisse o capacitor e I_1 a corrente com os dois elementos.

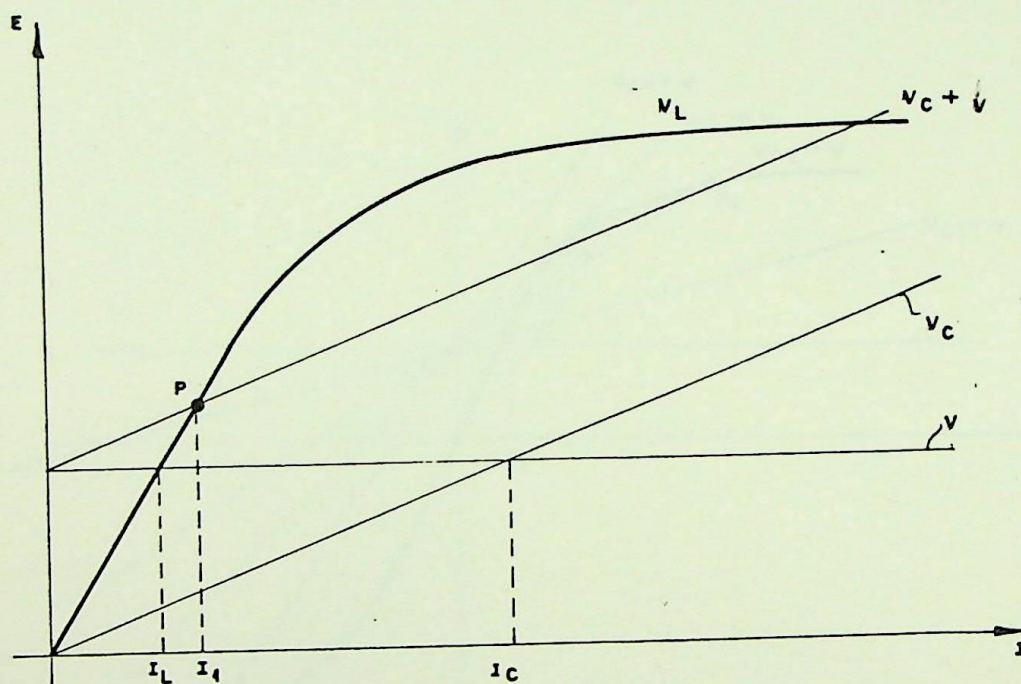


Figura 5.6.- Características tensão-corrente e pontos de funcionamento.

Poder-se-ia obter o mesmo valor de I_C , bastando para tal prolongar a reta $(V_C + V)$, o ponto onde esta corta o eixo das correntes seria I_C .

$$I_C = -\omega CV \quad (5.9)$$

O sinal negativo advém do fato de que a corrente é capacitiva.

A equação (5.8) é obedecida no gráfico da figura 5.6 no ponto P, ponto de funcionamento. Porém, variando-se o valor da capacitância C, altera-se a inclinação da curva, gerando a figura 5.7.

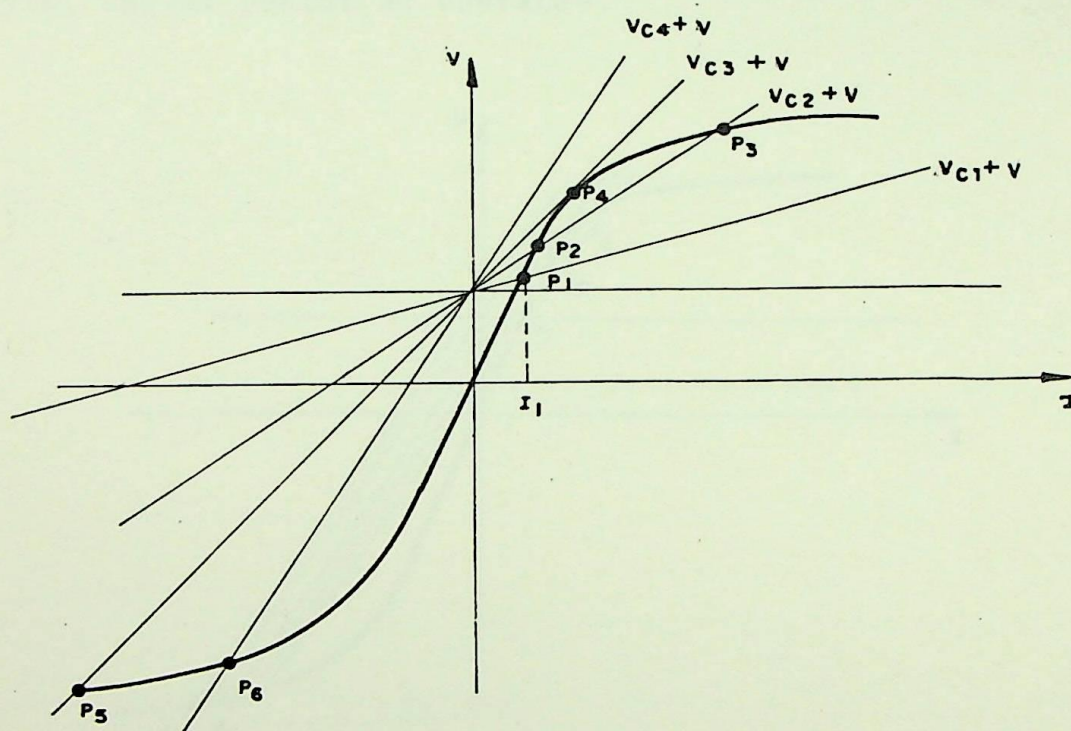


Figura 5.7. Características com a variação da capacitância.

Quando o valor de capacitância for elevado, o ponto de operação será P_1 , com uma corrente I_1 e uma tensão V_{L1} nos terminais do indutor. Com a diminuição da capacitância, haverá um deslocamento do ponto de operação para P_2 , com um aumento da corrente e da tensão V_L . Se continuar a diminuição da capacitância, o ponto de

operação passa a ser P_4 . Para valores de capacitâncias menores que este, não será mais possível a operação no 1º quadrante (ponto de operação P_6 ; 3º quadrante). [13].

Pode-se, também, variar a tensão da fonte V , gerando, assim, vários pontos de operação.

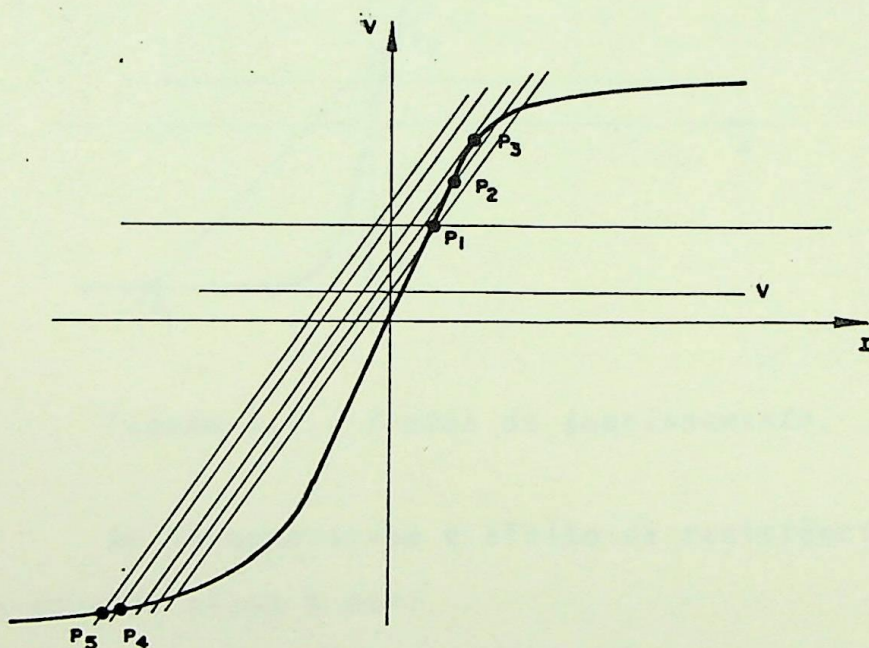


Figura 5.8.- Características com a variação da tensão.

Nota-se do gráfico da figura 5.8, que para um aumento da tensão da fonte, o ponto de operação varia e repentinamente, passa do estado indutivo para o capacitivo, do 1º quadrante para o 3º. Isto acarreta um aumento na corrente que circula no circuito.

Podem existir dois pontos estáveis e distintos de operação, um de baixa tensão e de corrente atrasada e o outro de alta

ta tensão e corrente adiantada. O ponto de operação depende do instante do chaveamento. Porém, pode existir, também, um terceiro ponto de funcionamento que é instável, como mostrado na figura 5.9.

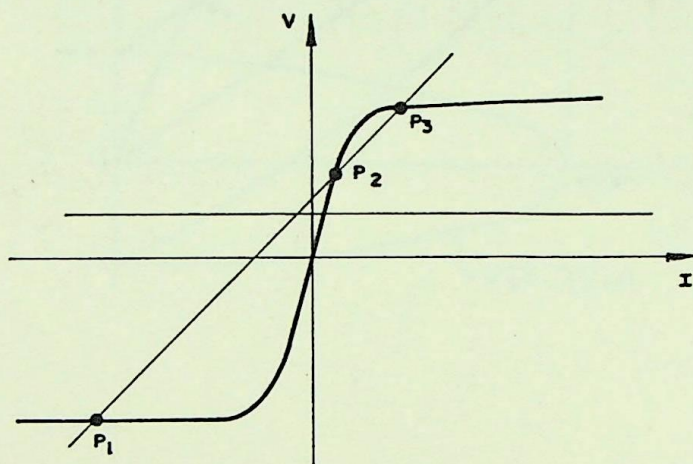


Figura 5.9.- Pontos de funcionamento.

Ao incorporar-se o efeito da resistência série no circuito, a equação passa a ser:

$$V = \sqrt{(V_L + V_C)^2 + (RI)^2} \quad (5.10)$$

donde se pode escrever que:

$$V_L = \omega f(I) = \sqrt{V^2 - (RI)^2} + \frac{I}{\omega C} = \sqrt{V^2 - (RI)^2} + V_C \quad (5.11)$$

Este foi o resultado da equação (5.8), porém, a tensão V_C era somada com uma constante e na equação (5.11) com uma elipse.

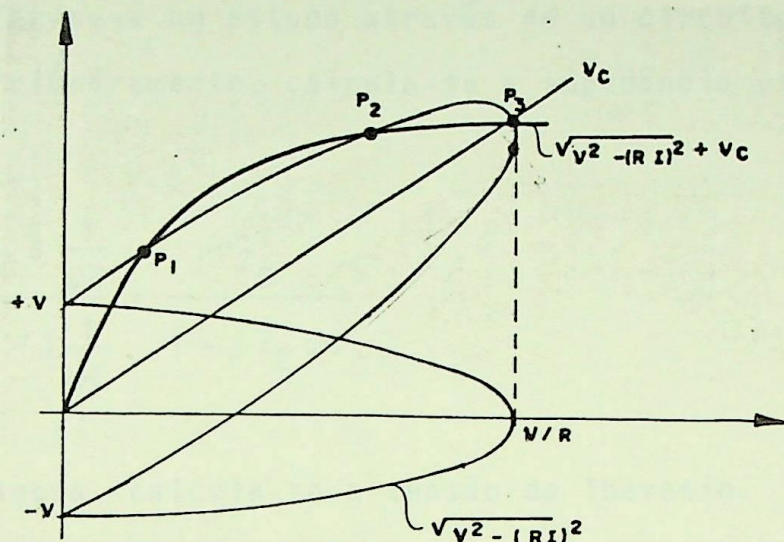


Figura 5.10.- Características com a inclusão de uma resistência.

Caso seja detectado o problema de ferorrressonância, uma das maneiras de solucioná-lo é a colocação de uma carga no secundário do transformador. Segue-se, agora, uma dedução para o cálculo desta carga. Considere-se a figura 5.11.

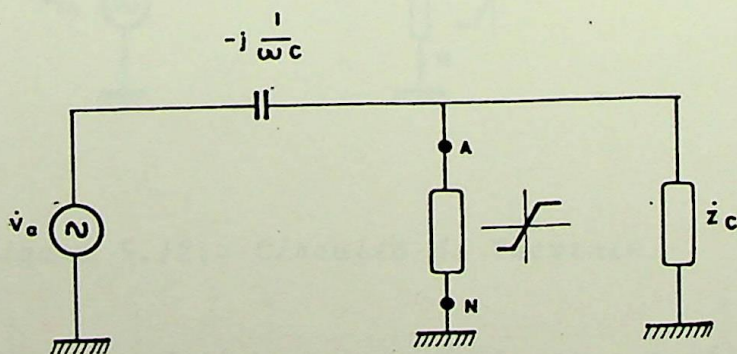


Figura 5.11.- Estudo da carga mínima para a não ocorrência de ferorrressonância.

Far-se-á um estudo através de um circuito equivalente de Thevenin. Primeiramente, calcula-se a impedância vista dos pontos A e N.

$$\dot{Z}_{IN} = \frac{-\dot{Z}_C j \frac{1}{\omega C}}{\dot{Z}_C - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{\dot{Z}_C}{1 + j \dot{Z}_C \omega C} \quad (5.12)$$

Agora, calcula-se a tensão de Thevenin.

$$\dot{i} = \frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}_C - j \frac{1}{\omega C}}$$

$$\dot{V}_{Th} = \dot{V}_a \frac{\dot{Z}_C}{\dot{Z}_C - j \frac{1}{\omega C}} = j \dot{V}_a \omega C \dot{Z}_{IN} \quad (5.13)$$

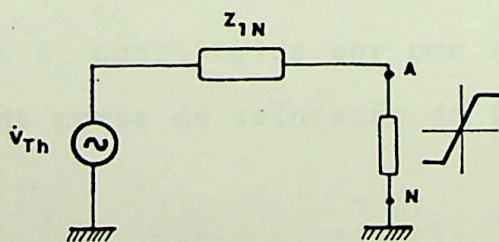


Figura 5.12.- Circuito de Thevenin.

De posse destes dados, monta-se o gráfico da figura 5.13, e determinar o valor de \dot{Z}_{IN} que faz com que a elipse tangencie a curva de magnetização do transformador. Com o valor de \dot{Z}_{IN} ,

calcula-se Z_C mínimo.

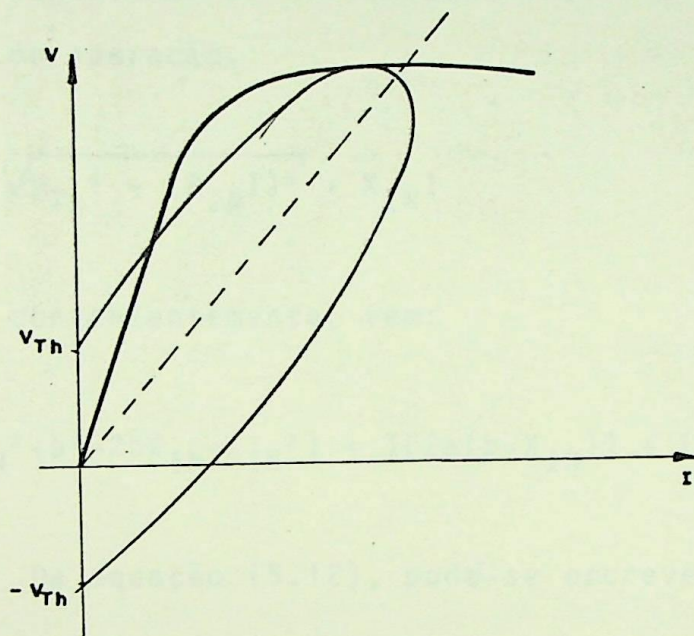


Figura 5.13.- Características para não ocorrência de ferroressonância.

Para uma determinação algébrica deste ponto, considere-se a impedância Z_C constituída por uma resistência pura, r_C , e a parte horizontal da curva de saturação do transformador dada pela equação:

$$V = a + bI \quad (5.14)$$

Sendo a equação da elipse:

$$V = \sqrt{V_{Th}^2 - (R_{IN}I)^2} + X_{IN}I \quad (5.15)$$

donde R_{IN} e X_{IN} representam a parte real e a parte imaginária de

\dot{Z}_{IN} , respectivamente.

Igualando-se as equações (5.14) e (5.15) encontram-se dois pontos de operação.

$$a + bI = \sqrt{V_{Th}^2 - (R_{IN}I)^2} + X_{IN}I$$

Manipulando-se convenientemente, vem:

$$I^2 (R_{IN}^2 + b^2 - 2bX_{IN} + X_{IN}^2) + I[2a(b - X_{IN})] + (a^2 - V_{Th}^2) = 0$$

Da equação (5.12), pode-se escrever os valores de R_{IN} e X_{IN} .

$$R_{IN} = \frac{r_c}{1 + r_c^2 \omega^2 C^2} \quad X_{IN} = \frac{r_c^2 \omega C}{1 + r_c^2 \omega^2 C^2} \quad (5.16)$$

Achando-se o radicando da equação de Baskara e o igualando a zero, garante-se que as duas curvas irão se tangenciar.

$$\Delta = 4a^2(b - X_{IN})^2 - (4R_{IN}^2 + 4b^2 - 8bX_{IN} - 4X_{IN}^2)(a^2 - V_{Th}^2) = 0$$

O módulo da tensão de Thevenin é dada por:

$$V_{TH} = \frac{V_a \cdot r_c}{\sqrt{r_c^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = \frac{V_a \omega C r_c}{\sqrt{1 + r_c^2 \omega^2 C^2}}$$

daí, vem:

$$4a^2 \left[b - \frac{r_c^2 \omega C}{1+r_c^2 \omega^2 C^2} \right]^2 - \left[\frac{4r_c^2}{(1+r_c^2 \omega^2 C^2)^2} + 4b^2 - 8b \frac{r_c^2 \omega C}{1+r_c^2 \omega^2 C^2} - 4 \frac{r_c^4 \omega C}{1+C^2 \omega^2 r_c^2} \right] \cdot \left[a^2 - \frac{V_a^2 r_c^2}{r_c^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \right] = 0 \quad (5.17)$$

Na expressão (5.17), todos os termos têm os seus valores conhecidos com exceção da resistência r_c , representativa da carga, que pode assim ser calculada.

5.4 - ESTUDO DA POSSIBILIDADE DA OCORRÊNCIA DE FERRORRESONÂNCIA NO SISTEMA CONDUTOR ISOLADO - TRANSFORMADOR ABAIXADOR.

A configuração condutor isolado-transformador abaixador é igual à da figura 5.4, se não existir nenhum elemento conectado ao secundário do transformador. Pois, a fonte de tensão seria a tensão induzida no condutor isolado e a capacitância, a de Thevenin, vista do condutor isolado. Devido a isto, surge como um dos problemas possíveis para esta instalação: o fenômeno da ferrorressonância.

Como este sistema apresenta sempre elementos bastante típicos, far-se-á uma análise da curva de saturação de um transformador monofásico de relação 34500:230[V], com a capacitância de Thevenin encontrada no Sistema de Transmissão C, referida a 230[V], que fica igual a 0,5771[mF].

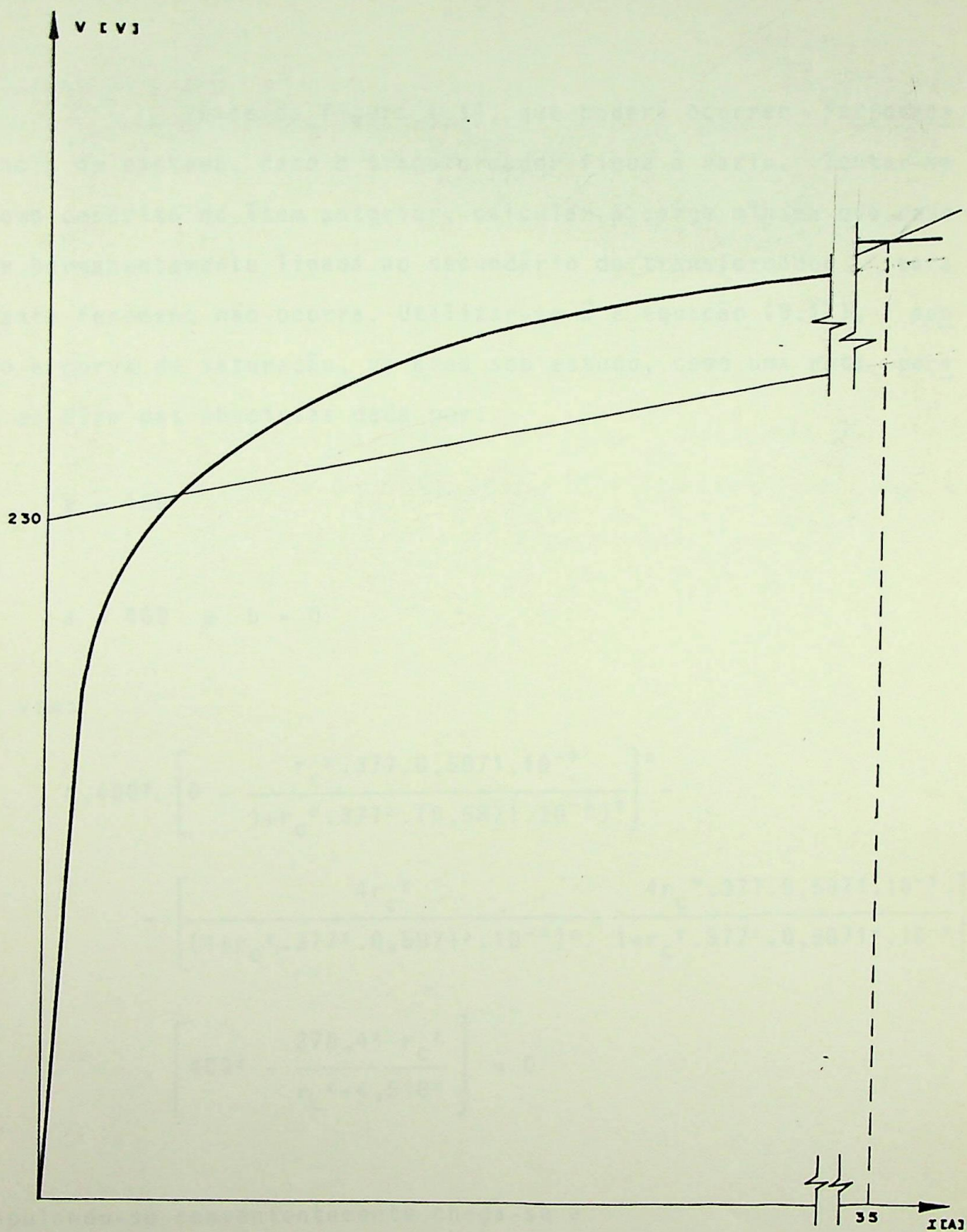


Figura 5.14.- Características do sistema condutor i solado-transformador abaixador.

Vê-se da figura 5.14, que poderá ocorrer ferrores
sonância no sistema, caso o transformador fique ã vazio. Tentar-se
ã, como descrito no ítem anterior, calcular a carga m̃nima que deve
ficar permanentemente ligada ao secundário do transformador para
que este fenômeno não ocorra. Utilizar-se-ã a equação (5.17), ado
tando a curva de saturação, na ãrea sob estudo, como uma reta
paralela ao eixo das abscissas dada por:

$$V = 400$$

onde

$$a = 400 \quad e \quad b = 0$$

daí, vem:

$$4.400^2 \cdot \left[0 - \frac{r_c^2 \cdot 377 \cdot 0,5871 \cdot 10^{-3}}{1 + r_c^2 \cdot 377^2 \cdot (0,5871 \cdot 10^{-3})^2} \right]^2 -$$

$$- \left[\frac{4r_c^2}{(1 + r_c^2 \cdot 377^2 \cdot 0,5871^2 \cdot 10^{-6})^2} - \frac{4r_c^4 \cdot 377 \cdot 0,5871 \cdot 10^{-3}}{1 + r_c^2 \cdot 377^2 \cdot 0,5871^2 \cdot 10^{-6}} \right] \cdot$$

$$\cdot \left[400^2 - \frac{278,4^2 r_c^2}{r_c^2 + 4,518^2} \right] = 0$$

manipulando-se convenientemente chega-se a:

$$r_c^4 - 21,85 r_c^2 - 862,61 = 0$$

tendo como ũnico valor possível:

$$r_c = 6,5[\Omega]$$

Este valor de resistência ligado no secundário do transformador faz com que as curvas de magnetização e a elipse se tangenciem, portanto deve-se colocar um valor de resistência melhor do que este para que não ocorra ferrorressonância.

A título de exemplo, escolhe-se uma resistência de $6,49[\Omega]$. O novo ponto de funcionamento, P' , será aquele em que a elipse cortar a curva de magnetização como na figura 5.15.

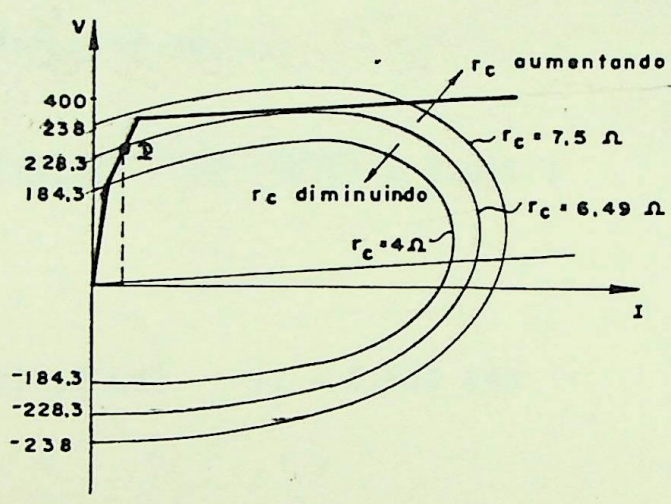


Figura 5.15.- Ponto de funcionamento com o transformador sob carga.

Da curva de magnetização pode-se escrever que, na região mostrada,

$$V = 197 + 37,5 I$$

e sendo a elipse dada por,

$$V = \sqrt{228,16^2 - (2,1181)^2} + 3,043 I$$

donde se tem:

$$V_1 = 230,9 \text{ [V]} \quad I_1 = 0,905 \text{ [A]}$$

Verifica-se, pois, que a potência consumida pela carga de $6,49 \text{ } [\Omega]$ é de 8214 [kW] .

No caso de uma alteração no valor do comprimento do condutor isolado, modifica-se a capacitância de Thevenin e se tem um novo valor de resistência de carga, e com isto, uma nova potência consumida. Isto está representado na tabela 5.1.

Comprimento do condutor isolado [km]	Resistência r_c [Ω]
1	65
2	32,5
5	13
10	6,5
20	3,25

Tabela 5.1.- Resistência mínima em função do comprimento do condutor isolado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES GERAIS

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES GERAIS

CAPITULO 6

CONCLUSÕES GERAIS

Esta dissertação veio confirmar a viabilidade da técnica de extração de potência por efeito capacitivo, através de um condutor isolado próximo a uma linha de transmissão para o suprimento de pequenas cargas localizadas ao longo do seu curso. Esta técnica possibilitará que cargas antes impedidas técnico - economicamente de receber energia, possam ser alimentadas a um baixo custo e com uma qualidade razoável.

No corpo da tese, mostrou-se que a tensão induzida no condutor isolado deve-se basicamente a efeitos eletrostáticos e que depende do posicionamento do mesmo em relação à linha de transmissão. Verificou-se que a colocação de uma carga em um dos extremos do condutor isolado, sem nenhum método de controle de tensão sobre os terminais da mesma, gera uma má regulação do sistema. Propôs-se, então, dois circuitos de controle da tensão; o primeiro, baseado na ressonância de um circuito LC e, o segundo, com um regulador eletrônico.

O circuito LC é dimensionado para ser ressonante com a capacitância de Thevenin vista pelo condutor isolado e com isto a tensão induzida no início do mesmo, que é fixa, dependendo somente do posicionamento do condutor, aparece nos terminais da carga. Surge, porém, uma sobretensão no local de instalação do transformador, sempre que a potência extraída pela carga aumenta. Visan

do minimizar esta sobretensão dimensionou-se o circuito LC com várias relações de ressonância, X_L/X_C , chegando-se a conclusão que a melhor, face às características da carga a ser suprida, seria a de 70%. O problema causado por um circuito não totalmente ressonante é a variação da tensão nos terminais da carga; quanto mais a relação de ressonância se afasta de 100%, maior é a variação da tensão. Para a relação de ressonância de 70%, reduz-se em parte a sobretensão e tem-se uma variação de $\pm 10\%$ na carga, variação aceita como cabível.

O circuito com regulador eletrônico elimina o problema da sobretensão nos terminais do transformador, além de manter fixa a tensão nos terminais da carga, em um valor pré-determinado, e atua em uma faixa maior de controle. Com o regulador eletrônico consegue-se extrair mais potência por quilometro de condutor isolado. Enquanto no controle pelo circuito LC se consegue retirar apenas 2-3 [kW/km], aqui chega-se a 5 [kW/km], como verificado no corpo da dissertação e ainda conforme R. Blais e R. Berthiaume [4,5]. O problema causado pelo regulador eletrônico é a distorção nas ondas de tensão e de corrente, que ficam repletas de componentes harmônicas. Estas componentes não significam um perigo maior para a carga ligada ao condutor isolado pois os equipamentos de baixa potência, via de regra, possuem um isolamento muito superior ao necessário. O outro perigo seria a indução destas componentes harmônicas na linha principal, porém, estas são desprezíveis em intensidade face as ondas de tensão e corrente que circulam na linha principal. É conveniente lembrar que a potência extraída pelo condutor linha é

inferior às perdas da própria linha.

O outro fator analisado no corpo desta dissertação, foi o posicionamento do condutor isolado em diversos pontos da linha principal, concluindo-se que o carregamento desta influi na sua tensão, podendo trazer variações grandes na tensão induzida no condutor isolado e por conseguinte na tensão dos terminais da carga. Este fato é tanto mais acentuado quanto maior for o comprimento da linha principal e quanto mais amplas forem as variações de fluxo de potência.

Concluiu-se, também, que o sistema condutor isolado transformador abaixador favorece a ocorrência do fenômeno de ferroressonância. A única maneira, neste caso, de não ocorrer este fenômeno é a fixação de uma carga mínima no secundário do transformador. O valor desta carga mínima está ligada intimamente com o comprimento do condutor isolado, por causa da capacitância de Thevenin que depende do comprimento. Notou-se que com um aumento do comprimento ocorre um aumento também da carga mínima necessária, de tal maneira que esta é normalmente da ordem de 15% da potência que se pode extrair da linha com o regulador eletrônico. No caso estudado poder-se-ia extrair com o regulador eletrônico 50 [kW] e a carga mínima seria da ordem de 8[kW].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - RODRIGUES, J.F.- "Extração de Pequenas Potências por Efeitos Eletromagnéticos nas Proximidades das Linhas Elétricas de Alta Tensão" - Tese de Mestrado - EFEI - 1985.
- [2] - YURENKOV, V.D.- "Feeding Three-Phase Loads from Ground Wires on 220-750[kV] Lines" - Elektrichestvo, nº7, 65-70 - 1965.
- [3] - BLAIS, R. e BERTHIAUME, R.- "Reliable Power Supply Tapped From the Overhead Ground Wire on 735[kV] Transmission Lines" - Electric Power Systems Research, nº1, 117-119 - 1977/78.
- [4] - BERTHIAUME, R. e BLAIS, R.- "Microwave repeater Power Supply Tapped From the Overhead Ground Wire on 735[kV] Transmission Lines" - IEEE, Vol.PAS-99, Nº1, 183-184 - Jan/Fev-1980.
- [5] - BLAIS, R. e BERTHIAUME, R.- "Supplying Fixed and Stroboscopic Light Beacons From the Overhead Ground Wire on 735[kV] Transmission Lines" - IEEE, Vol.PAS-99, Nº1, 181-182.
- [6] - ELETROPERU S.A.- "Proyecto Piloto de Electrificación Rural , Nahuimpuquio Con el Uso de la Energía Inducida en el Cable de Guarda" - Folheto Técnico - Set./1983.
- [7] - SIFUENTES, F.L. e ROJAS, R.S.- "Uso del Acoplamiento Electrostático para la Alimentación de Pequeñas Cargas Próximas a las Líneas de Transmisión de Alta Tensión" - IV Las Técnicas para la Distribución de la Energía Eléctrica - 1984.

- [8] - WEDEPOHL, L.M.- "Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Polyphase Systems", Proc. I.E.E., 110, 2200-2206 - 1963.
- [9] - NUNES, R.A.F.- "Teoria Modal de Propagação" - Notas de Aula - EFEI - 1983.
- [10]- FUCHS, R.D.- "Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas" - Livros Técnicos e Científicos Editora, RJ - 1979.
- [11]- DEWAN, S.B. e STRAUGHEN, A.- "Power Semiconductor Circuits" - A Wiley-Interscience Publication, 155-174 - 1975.
- [12]- COGO, J.R.- "Tese de Doutorado" - Em elaboração.
- [13]- RUDENBERG, R.- "Transient Performance of Electric Power Systems: Phenomena in Lumped Networks" - Cambridge-MitPress , 642-656 - 1970.
- [14]- ARANGO, H., COGO, J.R., SÁ, J.S.- "Eletrônica de Potência" - Notas de Aula - EFEI - 1981.

ANEXO I

ANEXOS

DESCRIPCION DE LOS PROGRAMAS

UTILIZADOS

ANEXO I

DESCRICAÇÃO DOS PROGRAMAS
UTILIZADOS

ANEXO I

DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS UTILIZADOS

I.1 - PROGRAMA GLT3

I.1.1 - INTRODUÇÃO

Este programa está escrito em Fortran IV e foi desenvolvido para operar em qualquer computador digital que aceite este tipo de linguagem. Durante toda a execução do programa, existirá uma interação entre a CPU, o módulo de disco e o terminal. Porém, este último pode ser dispensado, se trocado por um arquivo de dados, gravado em disco.

O programa calcula as tensões induzidas em condutores isolados localizados próximos da linha de transmissão e, também, as correntes, tensões e potências envolvidas no circuito ressonante e na carga. Utiliza-se um método de solução aproximada.

I.1.2 - TEORIA

Este programa foi desenvolvido utilizando a teoria exposta na Dissertação de Mestrado intitulada "Análise de Problemas Típicos na Extração de Pequenas Potências por Efeitos Eletromagnéticos nas Proximidades das Linhas Elétricas de Alta Tensão", de G.L. Torres, EFEI, 1986.

I.1.3 - ESTRUTURA DO PROGRAMA

O programa lê a configuração da linha e suas características. Calcula as matrizes de impedâncias próprias, de contribuição da geometria, de Carson e total, bem como a matriz de admitâncias. Em seguida, calcula as tensões induzidas no início e no final do condutor isolado sem carga. Com os dados da carga do condutor isolado, o programa calcula também os parâmetros do circuito ressonante, regulador de tensão e as tensões, correntes e potências envolvidas.

O fluxograma do programa GLT3 encontra-se descrito na figura I.1.

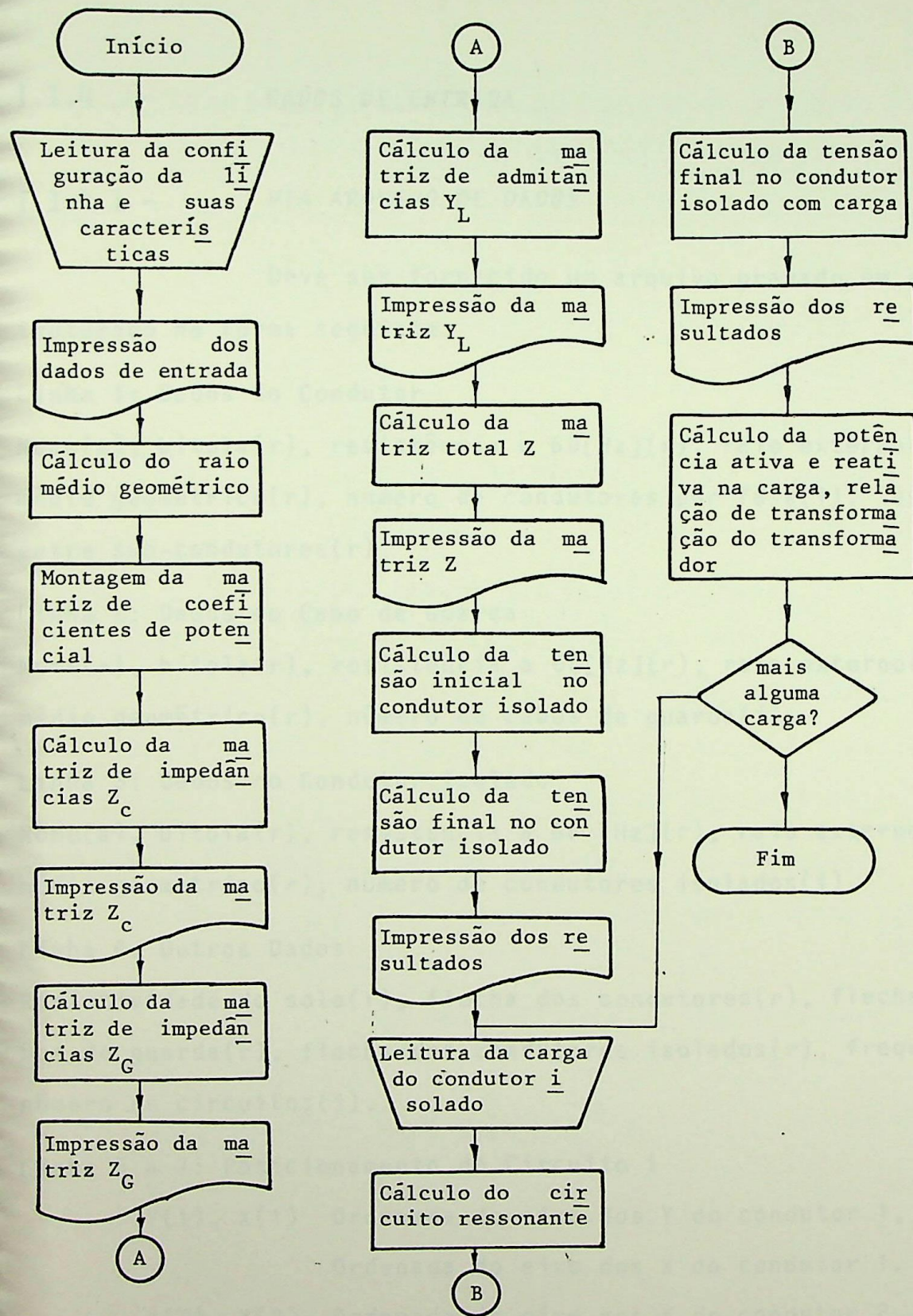


Figura I.1.- Fluxograma do Programa GLT3.

I.1.4 - DADOS DE ENTRADA

I.1.4.1 - VIA ARQUIVO DE DADOS

Deve ser fornecido um arquivo gravado em disco, estruturado na forma seguinte:

Linha 1: Dados do Condutor

Nome(a), bitola(r), resistência a 60[Hz](r), raio externo(r), raio médio geométrico(r), número de condutores por fase(i), espaçamento entre sub-condutores(r).

Linha 2: Dados do Cabo de Guarda

Nome(a), bitola(r), resistência a 60[Hz](r), raio externo(r), raio médio geométrico(r), número de cabos de guarda(i).

Linha 3: Dados do Condutor Isolado

Nome(a), bitola(r), resistência a 60 [Hz](r), raio externo(r), raio médio geométrico(r), número de condutores isolados(i).

Linha 4: Outros Dados

Resistividade do solo(r), flecha dos condutores(r), flecha dos cabos de guarda(r), flecha dos condutores isolados(r), frequência(r), número de circuitos(i).

Linha 5 a 7: Posicionamento do Circuito 1

Y(1), X(1) Ordenada do eixo dos Y do condutor 1,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 1.
 Y(2), X(2) Ordenada do eixo dos Y do condutor 2,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 2.

Y(3), X(3) Ordenada do eixo dos Y do condutor 3,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 3.

Linha 8 a 10: Posicionamento do Circuito 2 (se houver)

Y(4), X(4) Ordenada do eixo dos Y do condutor 4,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 4.

Y(5), X(5) Ordenada do eixo dos Y do condutor 5,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 5.

Y(6), X(6) Ordenada do eixo dos Y do condutor 6,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 6.

Linha 11 e 12: Posicionamento dos Cabos de Guarda

Y(PR-1), X(PR-1) Ordenada do eixo dos Y do cabo de guarda 1,
 Ordenada do eixo dos X do cabo de guarda 1

Y(PR-2), X(PR-2) Ordenada do eixo dos Y do cabo de guarda 2,
 Ordenada do eixo dos X do cabo de guarda 2

Linha 13 e 14: Posicionamento dos Condutores Isolados

Y(CI-1), X(CI-1) Ordenada do eixo dos Y do condutor isolado
 1,
 Ordenada do eixo dos X do condutor isolado
 1.

Y(CI-2), X(CI-2) Ordenada do eixo dos Y do condutor isolado
 2,
 Ordenada do eixo dos X do condutor isoxado
 2.

Linha 15: Controle (fim das coordenadas)

Ø.Ø, Ø.Ø

Linha 16:

Tensão fase-neutro da linha principal(r), corrente na linha principal(r), extensão do condutor isolado(r), ângulo de fase da corrente na linha principal.

Observações:

1. As letras entre parêntesis significam tipos de variáveis: (r) - real, (i) - inteiro, e, (a) - alfanumérica.
2. A leitura dos dados é não formatada e os dados de uma mesma linha devem ser separados por vírgulas.
3. Caso não exista uma determinada linha, por exemplo, um segundo condutor isolado (linha 14), a mesma deve ser simplesmente suprimida.
4. O sistema de eixos adotado para definir o posicionamento dos condutores é escolhido de tal forma que o eixo dos X passa pelo solo e o eixo dos Y passa pelo centro da estrutura, como na figura I.2.

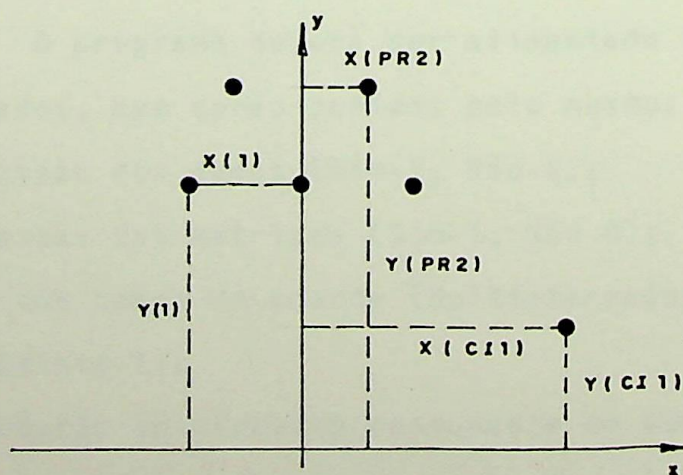


Figura I.2,- Posicionamento dos Cabos.

A seguir, mostra-se o arquivo de dados para o Sistema de Transmissão A.

```

1      'OXLIP',107.,0.2977,0.06629,0.004812,1,0.
2      'NAO TEM',0.,0.,0.,0.,0.
3      'OXLIP',107.,0.2977,0.06629,0.004812,1
4      100.,1.5,0.,1.5,60.,1
5      9.,-3.1
6      9.,0.0
7      9.,3.1
8      8.50,3.1
9      0.0,0.0
10     39884.0,200.0,1.4,30.0

```

Tabela I.1.- Arquivo de dados do Sistema de Transmissão A.

I.1.4.2 - VIA TERMINAL

O programa deverá ser alimentado via terminal com os seguintes dados, que serão pedidos pelo mesmo:

- impressão dos dados (Sim-1, Não-0);
- impressão das matrizes (Sim-1, Não-0);
- tipo dos cabos de guarda (Multiaterrados-0, Isolados ou Não Existe-1);
- introdução do circuito ressonante de controle (sim-1, Não-0);

- valor da capacitância de ajuste em Farad, variável real;
- valor da carga do condutor isolado (resistência e reatância, variáveis reais, separadas por vírgula);
- relação X_L/X_C (percentagem, variável real);
- tensão sobre a carga (em volts, variável real).

I.1.5 - DADOS DE SAÍDA

O programa fornece quando solicitado, individualmente, a seguinte relação de dados de saída:

- configuração da linha e suas características;
- matriz de impedâncias próprias dos condutores, $\dot{\underline{Z}}_C$;
- matriz de impedâncias devido à disposição geométrica dos condutores, $\dot{\underline{Z}}_G$;
- matriz de impedâncias devido aos efeitos do retorno pelo solo, $\dot{\underline{Z}}_T$;
- matriz de impedâncias longitudinais, $\dot{\underline{Z}}_L$;
- matriz de admitâncias transversais, $\dot{\underline{Y}}_T$;
- tensões no início e no final do condutor isolado, sem carga;
- tensões no início e no final do condutor isolado, com carga;
- tensões e correntes no início e no final do sistema de transmissão;
- grandezas relativas à carga do condutor isolado: tensão nos terminais da carga, potência ativa e reativa na carga, potência reativa no indutor, valores do capacitor de

controle, da relação de transformação e potência do transformador.

I.2 - PROGRAMA GLT4

I.2.1 - INTRODUÇÃO

Este programa está descrito em Fortran IV e foi desenvolvido para operar em qualquer computador digital que aceite este tipo de linguagem. Durante toda a execução do programa, existirá uma interação entre a CPU, o módulo de disco e o terminal. Porém, este último pode ser dispensado, se trocado por um arquivo de dados, gravado em disco.

O programa calcula as tensões e correntes em qualquer ponto de uma linha de transmissão com qualquer tipo de configuração e compensação. Calcula, também, as tensões induzidas em condutores isolados localizados próximos da mesma, bem como, a potência que pode ser extraída. Utiliza-se um método de solução exata do problema.

I.2.2 - TEORIA

Este programa foi desenvolvido utilizando a teoria exposta na Dissertação de Mestrado intitulada "Análise de Problemas Típicos na Extração de Pequenas Potências por Efeitos Eletromagnéticos nas Proximidades das Linhas Elétricas de Alta Tensão", de G.L. Torres, EFEI, 1986.

I.2.3 - ESTRUTURA DO PROGRAMA

O programa está estruturado através de subrotinas, sendo as mesmas coordenadas por um programa principal. Este, tem a finalidade de ler a disposição dos trechos da linha de transmissão, que no caso são classificados em:

- a) Linha sem condutor isolado - é o trecho da linha que não possui o condutor isolado, é apresentado através de sua configuração geométrica dos dados dos condutores;
- b) Quadripolo - é o trecho da linha que pode ou não possuir condutor isolado, porém é representado através de seu quadripolo, utilizado, normalmente, para a introdução de compensações;
- c) Linha com condutor isolado - é o trecho da linha que possui o condutor isolado, é apresentado através de sua configuração geométrica e dos dados dos condutores, calcula a potência extraída e a tensão induzida.

O fluxograma deste programa está descrito nas figuras I.3 a I.6.

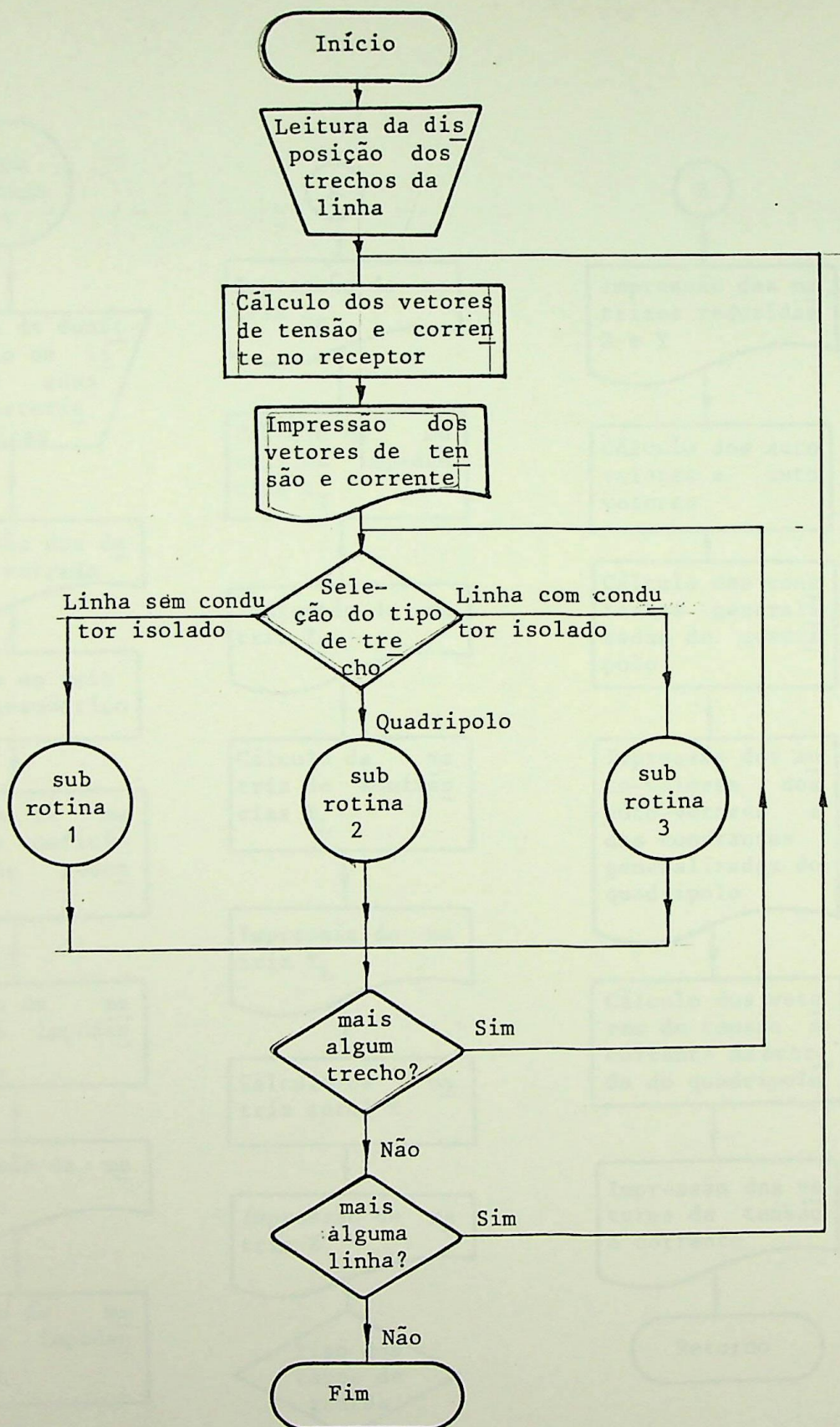


Figura 1.3.- Fluxograma do programa principal.

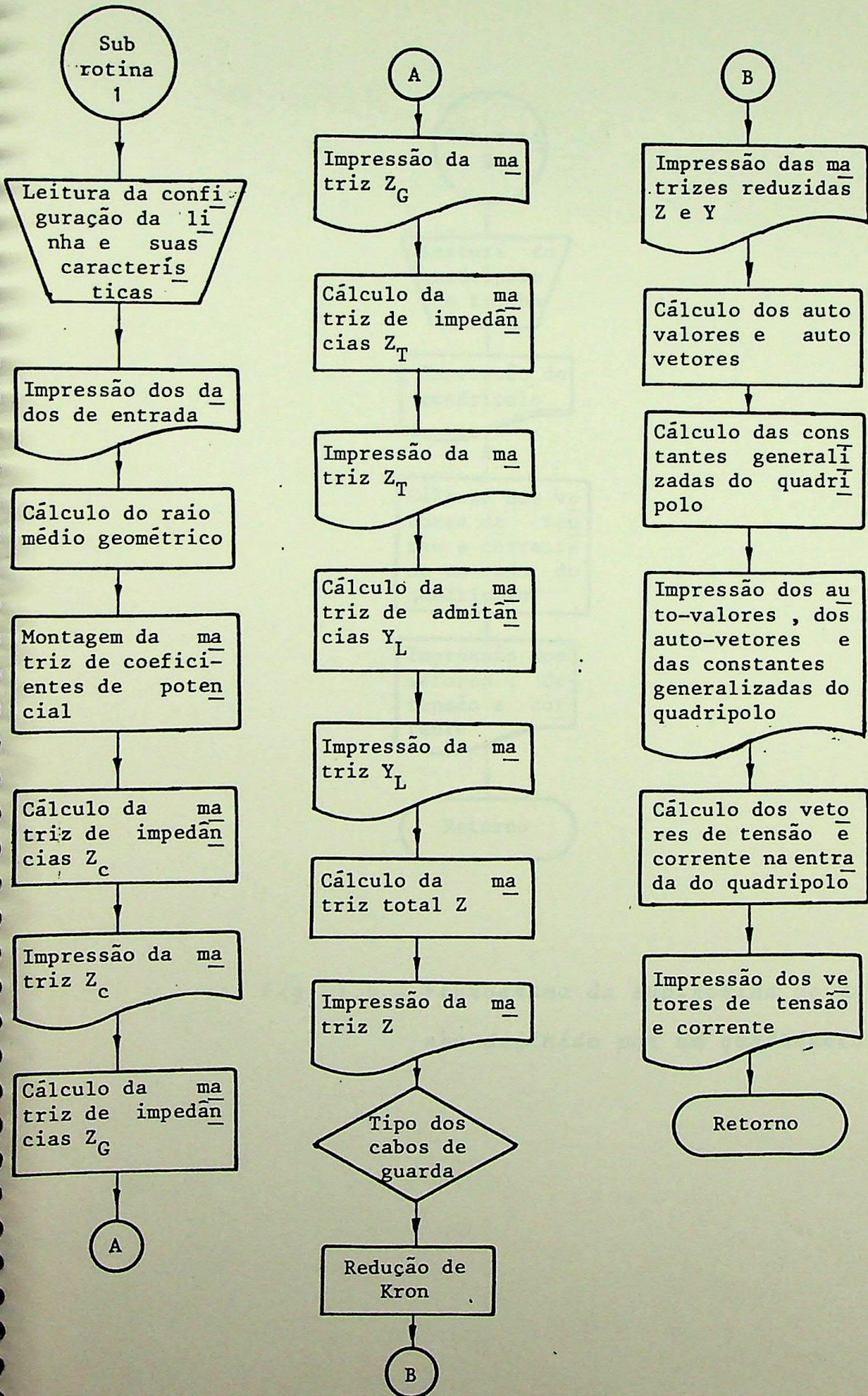


Figura I.4.- Fluxograma da sub-rotina do trecho da linha sem condutor isolado.

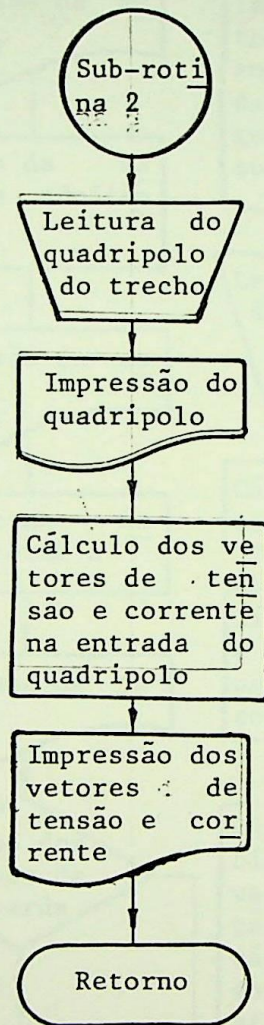


Fig. 1.5.- Fluxograma da sub-rotina do trecho da li
nha definido por um quadripolo.

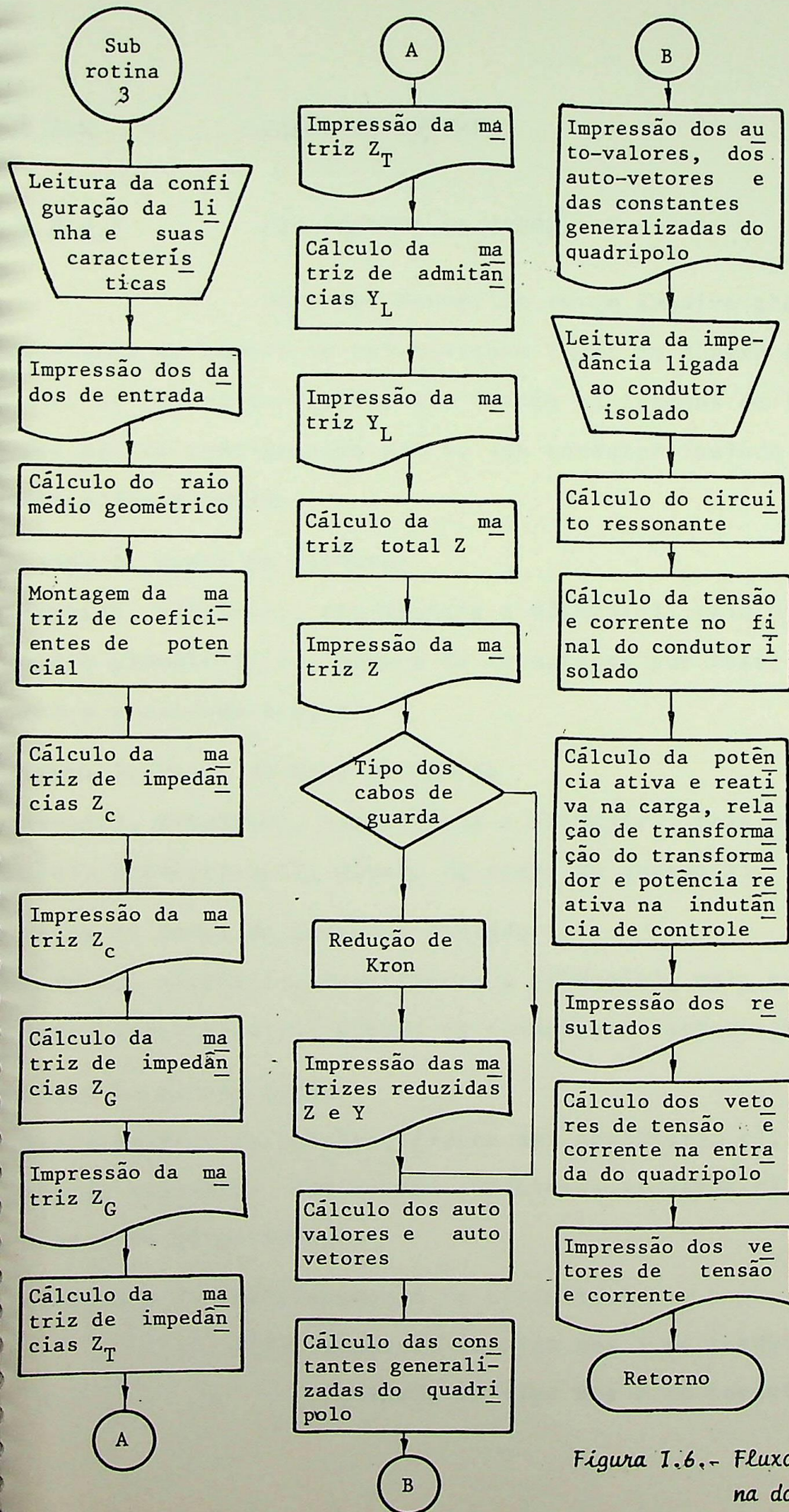


Figura 1.6.- Fluxograma da Sub-rotina do trecho da linha com condutor isolado.

I.2.4 - DADOS DE ENTRADA

I.2.4.1 - VIA ARQUIVO DE DADOS

Deve ser fornecido em um arquivo gravado em disco , contendo um número de sub-divisões igual ao número de trechos da linha. As partes do arquivo que contêm os trechos da linha dada através de sua configuração com ou sem condutor isolado encontram-se descritas a seguir.

Linha 1: Dados do Condutor

Nome(a), bitola(r), resistência a 60[Hz](r), raio externo(r), raio médio geométrico(r), número de condutores por fase(i), espaçamento entre sub-condutores(r).

Linha 2: Dados do Cabo de Guarda

Nome(a), bitola(r), resistência a 60[Hz](r), raio externo(r), raio médio geométrico(r), número de cabos de guarda(i).

Linha 3: Dados do Condutor Isolado

Nome(a), bitola(r), resistência a 60[Hz](r), raio externo(r), raio médio geométrico(r), número de condutores isolados(i).

Linha 4: Outros Dados

Resistividade do solo(r), flecha dos condutores(r), flecha dos cabos de guarda(r), flecha dos condutores isolados(r), frequência(r), número de circuitos(i).

Linha 5 a 7: Posicionamento do Circuito 1

Y(1), X(1) Ordenada do eixo dos Y do condutor 1,
Ordenada do eixo dos X do condutor 1.

Y(2), X(2) Ordenada do eixo dos Y do condutor 2,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 2.

Y(3), X(3) Ordenada do eixo dos Y do condutor 3,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 3.

Linha 8 a 10: Posicionamento do Circuito 2

Y(4), X(4) Ordenada do eixo dos Y do condutor 4,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 4.

Y(5), X(5) Ordenada do eixo dos Y do condutor 5,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 5.

Y(6), X(6) Ordenada do eixo dos Y do condutor 6,
 Ordenada do eixo dos X do condutor 6.

Linha 11 e 12: Posicionamento dos Cabos de Guarda

Y(PR-1), X(PR-1) Ordenada do eixo dos Y do cabo de guarda 1,
 Ordenada do eixo dos X do cabo de guarda 1

Y(PR-2); X(PR-2) Ordenada do eixo dos Y do cabo de guarda 2,
 Ordenada do eixo dos X do cabo de guarda 2

Linha 13 e 14: Posicionamento dos Condutores Isolados

Y(CI-1), X(CI-1) Ordenada do eixo dos Y do condutor isolado
 1,
 Ordenada do eixo dos X do condutor isolado
 1.

Y(CI-2), X(CI-2) Ordenada do eixo dos Y do condutor isolado
 2,
 Ordenada do eixo dos X do condutor isolado
 2.

Linha 15: Controle (Fim dos Dados do Trecho)

Ø.Ø, Ø.Ø

Observações:

1. As letras entre parêntesis significam tipos de variáveis:
(r) - real, (i) - inteira, e, (a) - alfanumérica.
2. A leitura dos dados é não formatada e os dados de uma mesma linha devem ser separados por vírgula.
3. O número de linhas do posicionamento deve ser o mesmo do número de elementos.
4. Caso não exista um tipo de elemento no trecho deve-se no lugar do nome escrever-se 'NÃO TEM' e colocar zero nas demais variáveis.
5. O posicionamento no plano X-Y deve ser feito conforme a figura I.2.

Nas partes do arquivo que representar o trecho em quadripolo, o mesmo deverá ser escrito da seguinte forma:

R(1,1), I(1,1)

R(1,2), I(1,2)

R(1,3), I(1,3)

· ·
· ·
· ·

R(1,N) I(1,N)

R(2,1), I(2,1)

· ·
· ·

R(N,N), I(N,N)

onde os valores $R(i,j)$ representam a parte real do elemento (i,j)

do quadripolo e $I(i,j)$, a parte imaginária.

A seguir, mostra-se o arquivo de dados para o Sistema de Transmissão C, para um determinado exemplo.

```

1      'GROSBEAK',322.0,0.1005,0.012573,0.010210,4,0.40
2      'PENGUIM',107.0,0.3679,0.00715,0.00248,2
3      'NAO TEM',0.0,0.0,0.0,0.0,0
4      100.0,15.70,15.00,0.0,60.,1
5      32.,-15.24
6      32.,0.0
7      32.,15.24
8      41.5,-10.5
9      41.5,10.5
10     0.0,0.0
11     'GROSBEAK',322.0,0.1005,0.012573,0.010210,4,0.40
12     'PENGUIM',107.0,0.3679,0.00715,0.00248,2
13     'GROSBEAK',322.0,0.1005,0.012573,0.010210,1
14     100.0,15.70,9.00,15.7,60.,1
15     32.,-15.24
16     32.,0.0
17     32.,15.24
18     41.5,-10.5
19     41.5,10.5
20     15.0,18.0
21     0.0,0.0
22     'GROSBEAK',322.0,0.1005,0.012573,0.010210,4,0.40
23     'PENGUIM',107.0,0.3679,0.00715,0.00248,2
24     'NAO TEM',0.0,0.0,0.0,0.0,0
25     100.0,15.70,15.00,0.0,60.,1
26     32.,-15.24
27     32.,0.0
28     32.,15.24
29     41.5,-10.5
30     41.5,10.5
31     0.0,0.0

```

I.2.4.2 - VIA TERMINAL

O programa deverá ser alimentado via terminal com os seguintes dados, que serão pedidos pelo mesmo:

- impressão dos dados (Sim-1, Não-0);
- impressão das matrizes (Sim-1, Não-0);
- tipo dos cabos de guarda (Multiaterrados-0, Isolados ou Não Existe-1);
- introdução do circuito ressonante de controle (Sim-1, Não-0);
- valor da capacitância de ajuste em Farad, variável real;
- valor da carga do condutor isolado (resistância e reatância, variáveis reais, separadas por vírgula);
- relação X_L/X_C (percentagem, variável real);
- tensão sobre a carga (em volts, variável real);
- comprimentos dos quadripolos (em quilômetros, variável real);
- potência ativa, fator de potência, tensão e ângulo de fase por fase da linha principal (em watts e volts, variáveis reais separadas por vírgula).

I.2.5 - DADOS DE SAÍDA

O programa fornece quando solicitado, individualmente, a seguinte relação de dados:

- tensões e correntes no receptor da linha principal;
- configuração da linha e suas características para cada trecho;
- constantes generalizadas do quadripolo equivalente do trecho;
- matriz de impedâncias próprias dos condutores, $\dot{\underline{Z}}_C$;
- matriz de impedâncias devidas à disposição geométrica dos condutores, $\dot{\underline{Z}}_G$;
- matriz de impedâncias devido aos efeitos do retorno pelo solo, $\dot{\underline{Z}}_T$;
- matriz de impedâncias longitudinais, $\dot{\underline{Z}}$, no trecho;
- matriz de admitâncias transversais, $\dot{\underline{Y}}$, no trecho;
- auto-valores e auto-vetores no trecho;
- tensões e correntes na entrada do trecho;
- tensões no início e no final dos condutores isolados, sem carga;
- tensões no início e no final dos condutores isolados, com carga;
- grandezas relativas à carga do condutor isolado.

I.3 - PROGRAMA GJRC4

I.3.1 - INTRODUÇÃO

Este programa está escrito em Fortran IV e foi desenvolvido por J.R. Cogo[12].

O objetivo deste programa é o de simular qualquer modelo de circuito elétrico, tanto em sua fase transitória quanto em regime permanente.

I.3.2 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método utilizado consiste em substituir as indutâncias e as capacitâncias do circuito por resistências em paralelo com fontes de corrente. Estas resistências são funções dos valores das indutâncias e capacitâncias e, também, do passo de integração. As fontes de corrente têm a função de representar as condições do elemento no instante imediatamente anterior ao estudado. A figura I.7 mostra estas relações.

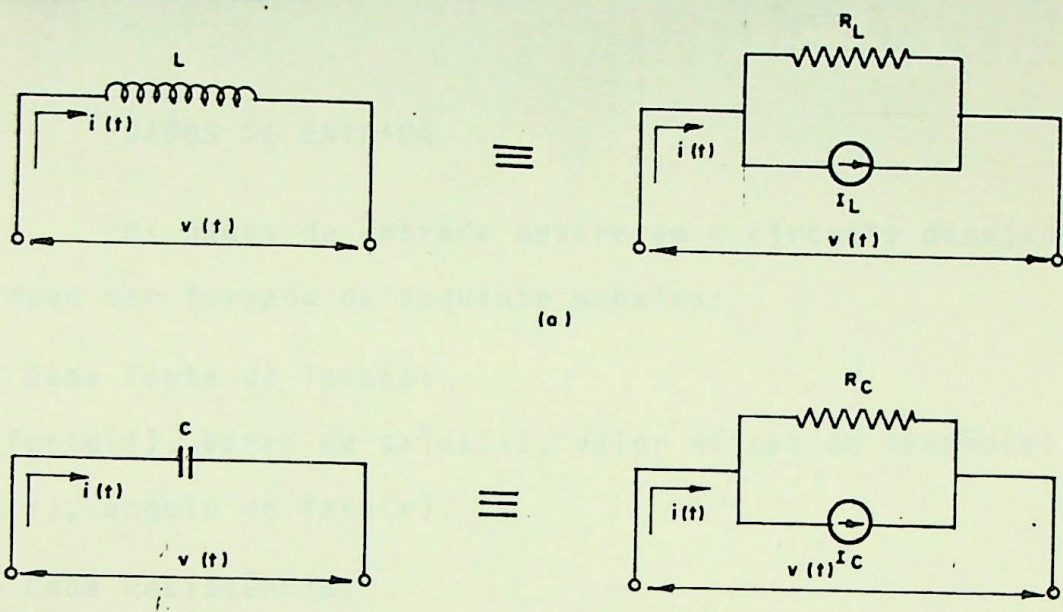


Figura 1.7.- Representação por um modelo equivalente:

(a) indutor;

(b) capacitor.

onde:

$$R_L = \frac{2L}{\Delta t} \quad I_L = i(t-\Delta t) + \frac{U(t-\Delta t)}{R} \quad (I.1)$$

$$R_C = \frac{\Delta t}{2C} \quad I_C = -i(t-\Delta t) - \frac{U(t-\Delta t)}{R} \quad (I.2)$$

Os demais elementos de um circuito elétrico, tais como resistências e fontes, entre outros, não têm a sua representação alterada. Uma descrição mais detalhada do método pode ser encontrada.

trada na referência [12].

I.3.3 - DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada descrevem o circuito desejado .

O arquivo deve ser formado da seguinte maneira:

Linha Para Cada Fonte de Tensão:

Número da fonte(i), barra de saída(i), valor eficaz da tensão(r) ,
frequência(r), ângulo de fase(r).

Linha Para Cada Resistência:

Número do resistor(i), barra de entrada(i), barra de saída(i), va
lor do elemento, em [Ω],(r).

Linha Para Cada Indutância:

Número do indutor(i), barra de entrada(i), barra de saída(i), valor
do elemento, em [mH],(r).

Linha Para Cada Capacitância:

Número do capacitor(i), barra de entrada(i), barra de saída(i), va
lor do elemento, em [F],(r).

Linha Para Cada Tiristor:

Número do tiristor(i), barra de entrada(i), barra de saída(i), ângu
lo de disparo, em graus,(r).

Observações:

1. A primeira linha do arquivo é alfanumérica e define o título do circuito ou da simulação.

2. Após cada grupo de elementos colocar um cartão de controle do tipo:

999,999,999,999.

O circuito simulado está mostrado na figura 4.3 e possui para um dado caso, o arquivo a seguir.

```

1      DADOS REFERENTES AO CASO 16
2      TENSOES CONHECIDAS
3      4, 19000, 60, 0
4      999, 999, 999, 999
5      RESISTORES
6      1, 1, 2, 3.E+4
7      999, 999, 999, 999
8      INDUTORES
9      1, 2, 5, 79.575
10     2, 3, 5, 79.575
11     999, 999, 999, 999
12     CAPACITORES
13     1, 4, 1, 8.645E-08
14     999, 999, 999, 999
15     TIRISTORES
16     1, 1, 3, 0, 345.0
17     2, 3, 1, 0, 525.0
18     999, 999, 999, 999, 999

```

Tabela 1.3.- Arquivo de dados para o programa GJRC4

I.3.4 - DADOS DE SAÍDA

O programa fornece como dados de saída, a formação de dois arquivos, um de tensão, entre as barras do circuito, e o outro de corrente, nos ramos do circuito.

ANEXO II

APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE DISPARO DE TIRISTORES EM ANTI-PARALELO

INTRODUÇÃO

ANEXO I I

APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE DISPARO DE TIRISTORES EM ANTI-PARALELO

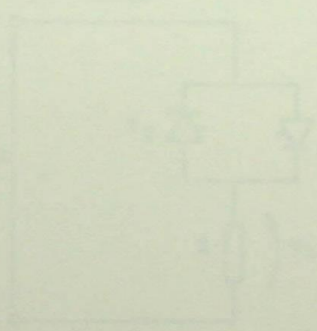


Figura II.1 - Regulador Eléctrico

ANEXO II

APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DE DISPARO DE
TIRISTORES EM ANTI-PARALELO

II.1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste anexo é fazer uma rápida apresentação do circuito de disparo dos tiristores utilizados nos laboratórios da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, que serviram para a realização dos testes apresentados no capítulo 4.

II.2 - REGULADOR ELETRÔNICO

O regulador eletrônico tem como finalidade converter um sinal de tensão alternada cujo valor eficaz é constante em um sinal de tensão alternada cujo valor eficaz é determinado pelo ângulo de disparo dos tiristores. O regulador eletrônico é mostrado na figura II.1.

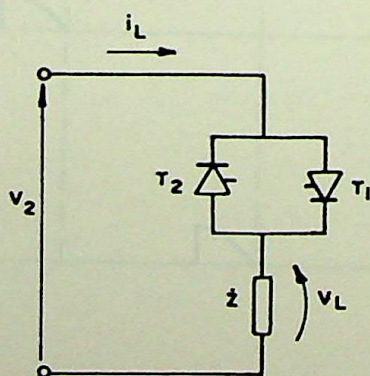


Figura II.1 - Regulador Eletrônico

Se a impedância de carga for apenas resistiva e o ângulo de disparo de 120° , pode-se montar os gráficos da figura II.2, que mostram as tensões terminal e sobre a impedância e as correntes nos tiristores e na impedância.

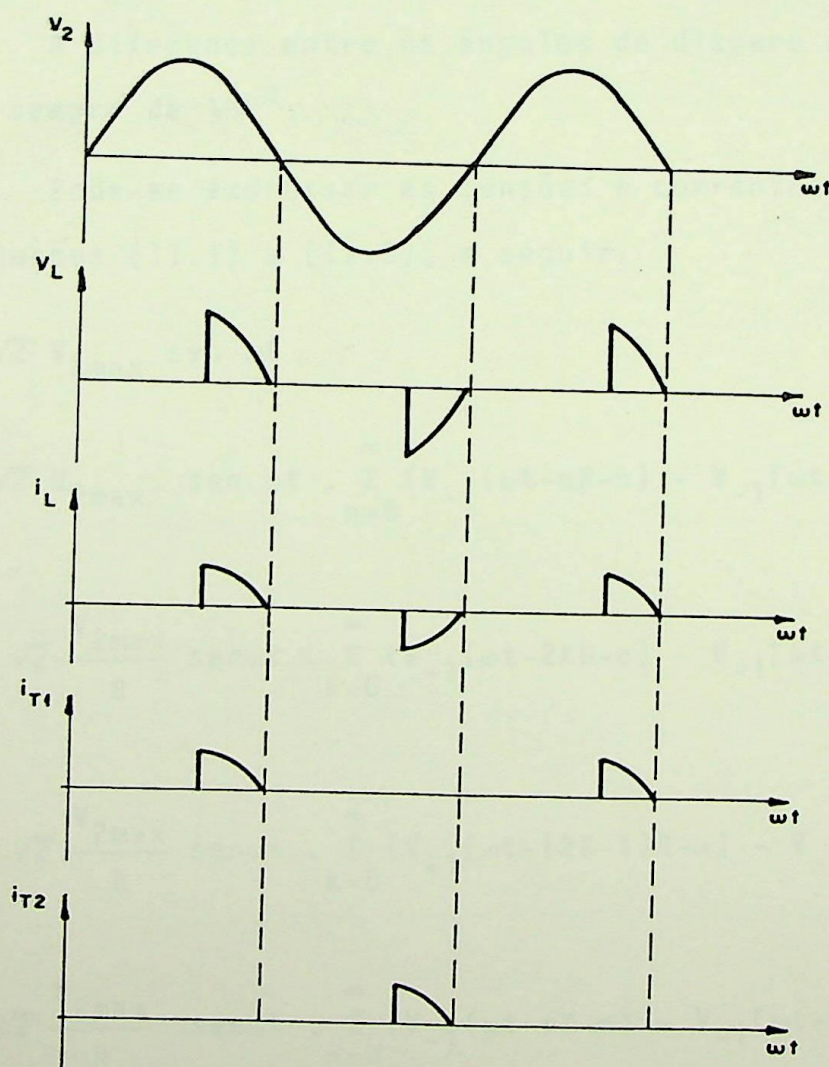


Figura II.2 - Formas de tensão e corrente no regulador eletrônico, para uma carga ôhmica

Observa-se, portanto, que, para uma impedância de carga puramente resistiva, a faixa de atuação do ângulo de disparo dos tiristores está compreendida entre 0° e 180° para o elemento T_1 e de 180° a 360° para o elemento T_2 , inclusive os extremos inferiores. Fora desta faixa o tiristor estará polarizado reversamente, fato que impede sua condução.

A diferença entre os ângulos de disparo dos tiristores T_1 e T_2 é sempre de 180° .

Pode-se expressar as tensões e correntes envolvidas, pelas equações (II.1) a (II.5), a seguir.

$$v_2 = \sqrt{2} V_{2\max} \text{ sen } \omega t \quad (\text{II.1})$$

$$v_L = \sqrt{2} V_{2\max} \cdot \text{sen } \omega t \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \{V_{-1}(\omega t - n\pi - \alpha) - V_{-1}[\omega t - (n+1)\pi]\} \quad (\text{II.2})$$

$$i_{T1} = \sqrt{2} \frac{V_{2\max}}{R} \text{ sen } \omega t \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \{V_{-1}(\omega t - 2k\pi - \alpha) - V_{-1}[\omega t - (2k+1)\pi]\} \quad (\text{II.3})$$

$$i_{T2} = \sqrt{2} \frac{V_{2\max}}{R} \text{ sen } \omega t \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \{V_{-1}[\omega t - (2k-1)\pi - \alpha] - V_{-1}(\omega t - 2k\pi)\} \quad (\text{II.4})$$

$$i_L = \sqrt{2} \frac{V_{2\max}}{R} \text{ sen } \omega t \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \{V_{-1}(\omega t - n\pi - \alpha) - V_{-1}[\omega t - (n+1)\pi]\} \quad (\text{II.5})$$

onde R é a resistência e $V_{-1}(\omega t - \theta)$ é um degrau unitário que começa a partir de $\omega t = \theta$.

Se a impedância de carga for constituída por uma parte resistiva R e uma indutiva X_L , pode-se montar os gráficos da figura II.3, que mostram as tensões e correntes no regulador eletrônico, para um ângulo de disparo de 120° .

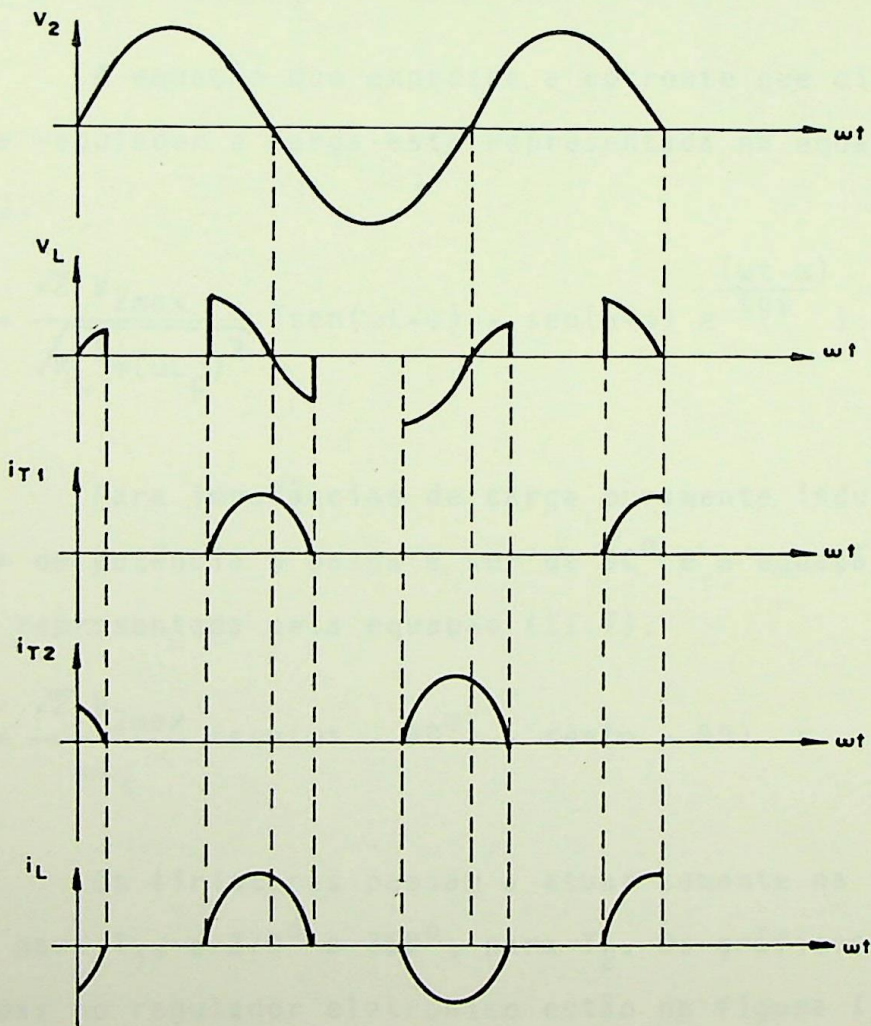


Figura II.3 - Formas de Tensão e Corrente no Regulador Eletrônico, para uma carga ôhmica indutiva.

Nota-se que para uma impedância de carga ôhmica-indutiva, de fator de potência ψ , o tiristor só poderá entrar em condução se o ângulo de disparo α for maior, ou igual, a ψ . Com isto a faixa de atuação do ângulo de disparo do tiristor T_1 está compreendida de α (inclusive) a 180° e do tiristor T_2 de $180^\circ + \alpha$ (inclusive) a 360° .

A equação que expressa a corrente que circula por este tipo de regulador e carga esta representada na equação (II.6), como em [14].

$$i_L = \frac{\sqrt{2} V_{2\max}}{\sqrt{R_c^2 + (\omega L_c)^2}} \left\{ \text{sen}(\omega t - \psi) - \text{sen}(\alpha - \psi) e^{-\frac{(\omega t - \alpha)}{\text{tg}\psi}} \right\} \quad (\text{II.6})$$

Para impedâncias de carga puramente indutivas, o valor do fator de potência ψ passa a ser de 90° e a equação (II.6) passa a ser representada pela equação (II.7).

$$i_L = \frac{\sqrt{2} V_{2\max}}{\omega L_c} \left\{ \text{sen}(\omega t - 90^\circ) - \text{sen}(\alpha - 90) \right\} \quad (\text{II.7})$$

Os tiristores passam a atuar somente na faixa de 90° a 180° , para T_1 , e 270° a 360° , para T_2 . Os gráficos das grandezas envolvidas no regulador eletrônico estão na figura II.4, para um ângulo de disparo de 120° .

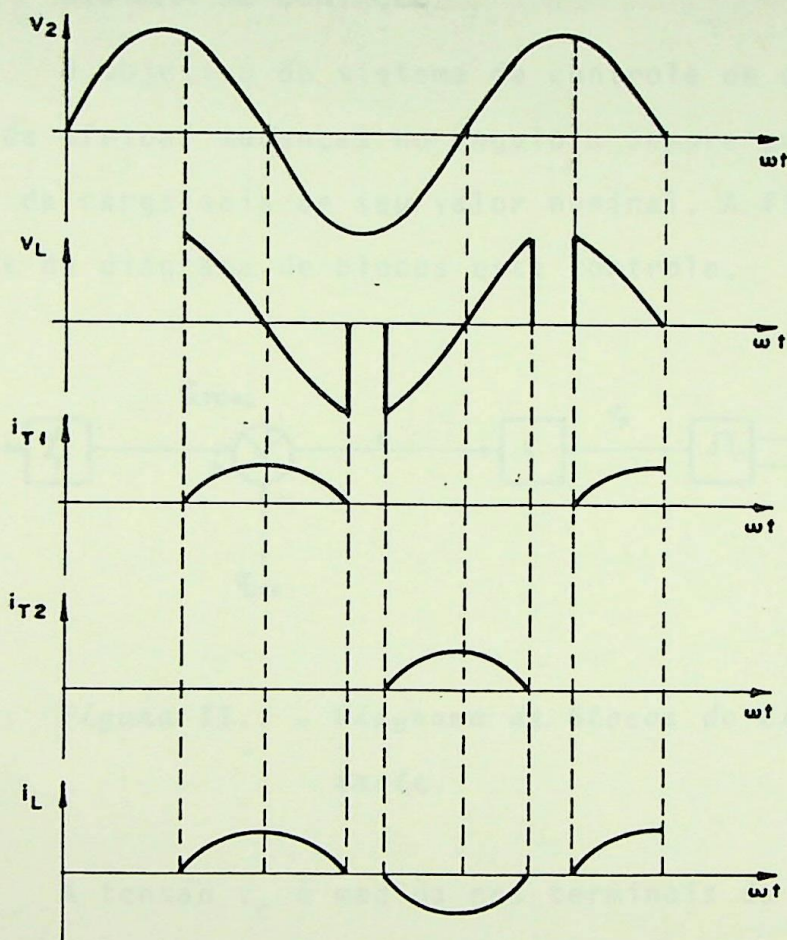


Figura II.4 - Formas de Tensão e Corrente no Regula
dor Eletrônico para uma carga induti
va.

II.3 - SISTEMA DE CONTROLE

O objetivo do sistema de controle de disparo dos tiristores é o de efetuar mudanças no ângulo α sempre que a tensão v_c nos terminais da carga saia de seu valor nominal. A figura II.5 ilustra através de diagrama de blocos este controle.

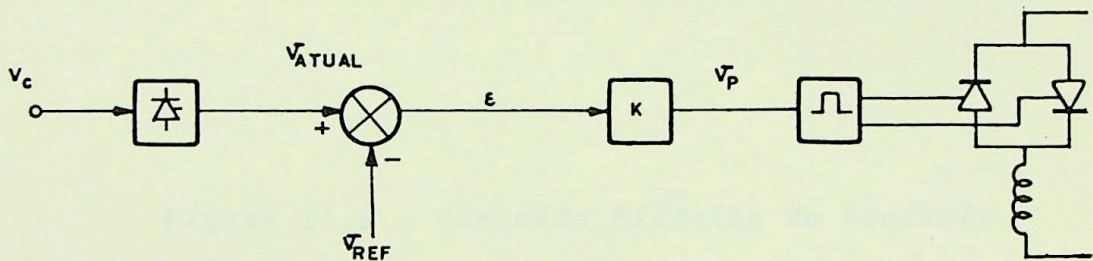


Figura II.5 - Diagrama de Blocos do Circuito de Controle.

A tensão v_c é medida nos terminais da carga, passa por um retificador, e recebe o nome de V_{atual} , que é um valor DC proporcional a v_c . Este é comparado com um valor de referência, V_{REF} , e libera um erro ϵ , que passa por um amplificador e um filtro, representados pelo bloco K. Gera-se, assim, um valor V_p para o trem de pulsos do tiristor que altera convenientemente o ângulo de disparo e que produz os pulsos que executam efetivamente, o disparo dos tiristores.

Pode-se detalhar mais a figura II.5, explicitando se cada bloco do sistema de controle e dando origem a figura II.6.

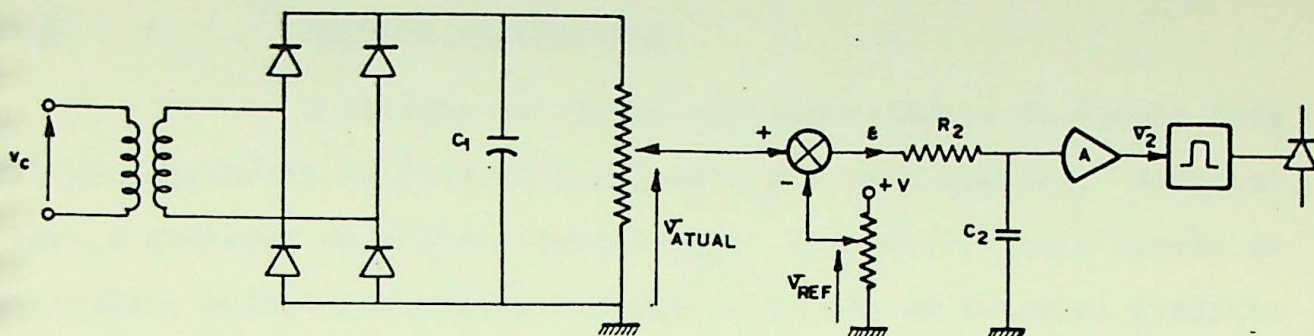


Figura II.6 - Circuito Elétrico do Controle

Esta figura mostra de maneira simplificada, o circuito elétrico de controle do ângulo de disparo. A tensão dos terminais da carga v_c , senoidal, passa por um transformador abaixador e por uma ponte a diodos. O capacitor C_1 tem a função de filtro no sistema. O sinal na saída é o valor de tensão DC, V_{atual} . Este é o primeiro bloco da figura II.5.

A tensão de referência V_{REF} é obtida através de uma bateria e de um potenciômetro. Os dois sinais passam por um comparador que emite um sinal de erro ϵ , que é filtrado por R_2 e C_2 , sendo amplificado por A. O sinal amplificado V_p , chega a um gerador de pulso que varia o ângulo de disparo α e produz um pulso para executar efetivamente, o disparo do tiristor.

O circuito elétrico deste gerador é apresentado a seguir.

II.4 - MÓDULOS DE CONTROLE

O sistema utilizado nos laborat6rios da Escola Federal de Engenharia de Itajub6 e composto por dois m6dulos, desenvolvidos e montados na pr6pria institui76o. O primeiro tem a fun76o de controlar, manual ou automaticamente, o 6ngulo de disparo; enquanto o segundo, registra este 6ngulo em um display. Cabe ressaltar que estes m6dulos possuem outras fun76es que n6o foram utilizadas por n6o serem necess6rias 6 experi6ncia.

A figura II.7 ilustra a liga76o dos m6dulos ao regulador eletr6nico.

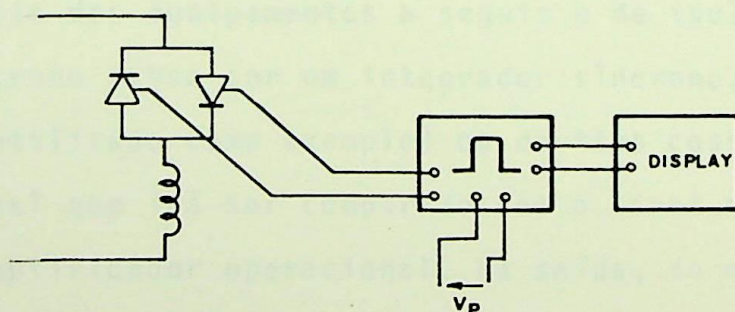


Figura II.7 - Liga76o dos m6dulos do circuito de disparo.

O circuito do 6ngulo de disparo pode ser representado pela figura II.8, como sendo um comparador entre um sinal da rede (sinal s6ncrono) e um de refer6ncia (sinal de controle). Em sua sa6ida, tem-se o sinal correspondente ao disparo.

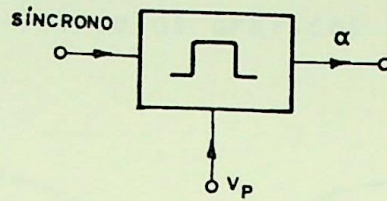


Figura II.8 - Esquema geral do circuito do ângulo de disparo.

Mais apuradamente, pode-se representar este circuito como na figura II.9. O transformador tem a função de abaixar a tensão aos níveis dos equipamentos a seguir e de isolar o circuito. Este sinal síncrono passa por um integrador síncrono, por exemplo, do tipo reta (utilizado como exemplo) ou do tipo cossenoide, resultando em um sinal que irá ser comparado com o sinal de controle, através de um amplificador operacional. Na saída, do mesmo, tem-se a tensão V_0 , que fornece o atraso do ângulo de disparo. Este sinal passa por um amplificador de pulso, constituído por um transistor e um transformador e é obtido, finalmente, o pulso que irá para o gatilho do tiristor, V_{gc} .

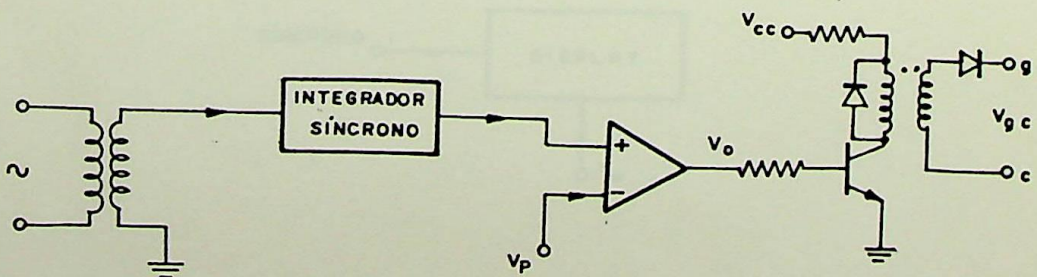


Figura II.9 - Esquema detalhado do circuito do ângulo de disparo.

Quanto aos sinais obtidos em cada ponto da figura II.9, pode-se representá-los pelos gráficos da figura II.10.

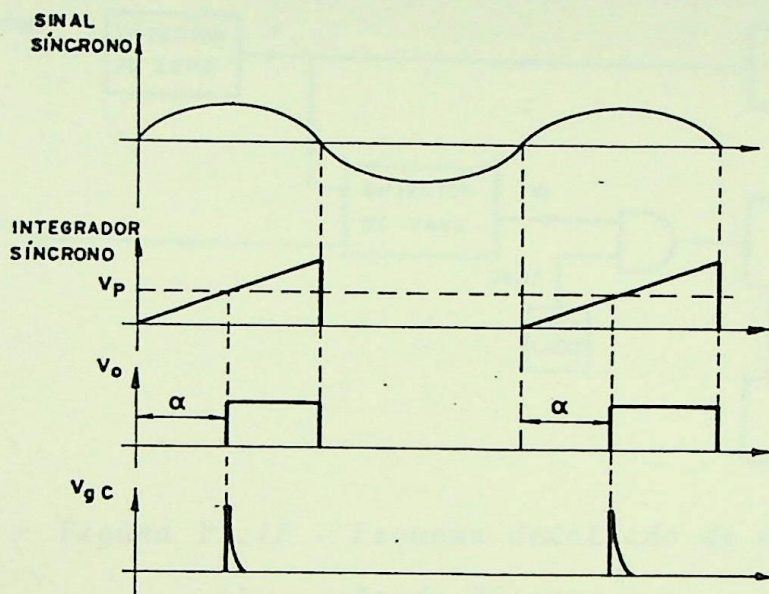


Figura II.10 - Sinais do circuito do ângulo de disparo.

O circuito do medidor do ângulo de disparo tem como objetivo registrar em um display, o valor do ângulo α , recebendo para isto, apenas um sinal síncrono e o sinal de saída do amplificador operacional do circuito anterior, V_o . Como mostrado na figura II.11.

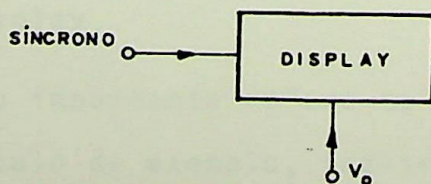


Figura II.11 - Esquema geral do medidor do ângulo de disparo.

Pode-se, agora, montar o diagrama de blocos, deste medidor, o que é feito na figura II.12.

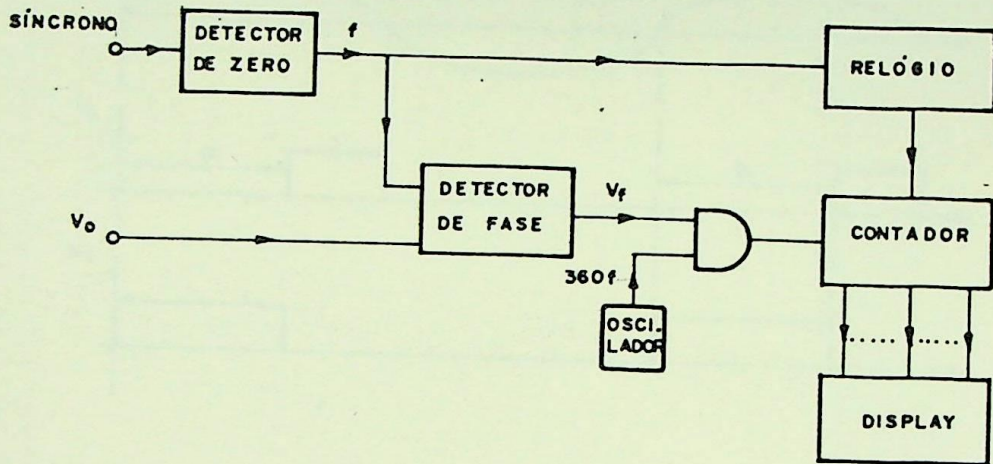


Figura II.12 - Esquema detalhado do medidor do ângulo de disparo.

O sinal síncrono passa por um detector de zero, que é composto por um integrador e um amplificador operacional que possuem a sua entrada (-), aterrada. Este sinal irá possuir uma frequência síncrona f . O detector de fase compara o sinal V_0 com o do detector de zero, e por ser um circuito flip-flop emitirá um sinal V_f , como no gráfico II.13. Este sinal V_f é comparado com um sinal do oscilador de frequência $360.f$ que irá ao contador. O relógio tem a função de zerar o contador a cada ciclo. Finalmente, o contador emite o sinal para o display.

Um fato importante refere-se à frequência do oscilador ser de $360.f$. A título de exemplo, faz-se $\alpha = 90^\circ$, o que seria $1/4$ de onda, ou seja, $1/4$ de período, então tem-se $1/4$ de 360 oscilações pois a cada detecção de zero, o contador zera. Irão existir 90 oscilações que serão enviadas ao contador e este registrará no display, 90° .

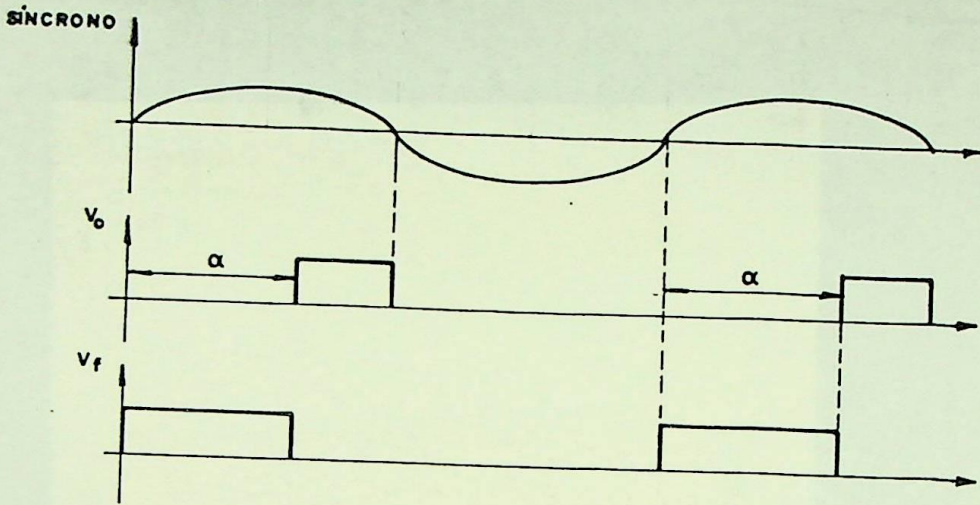


Figura 11.13 - Sinais do medidor do ângulo de disparo.