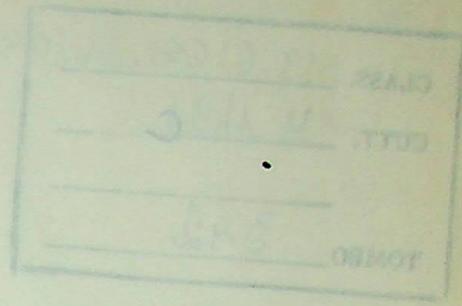


TESE

342

CÁLCULO DIGITAL DE FENÔMENOS TRANSITÓRIOS
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA



CÁLCULO DIGITAL DE FENÔMENOS
TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA

ORIENTADOR: PROF. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA
CO-ORIENTADOR: PROF. JOÃO ROBERTO COGO

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

ITAJUBÁ, JULHO DE 1982



CLASS. 519.6:621.316(043.2)

CUTT. M. H. G. C.

TOMBO 342

CÁLCULO DIGITAL DE FENÔMENOS
TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA

ORIENTADOR PROF. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA
CO-ORIENTADOR PROF. JOÃO ROBERTO COGO

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

ITAJUBÁ, JULHO DE 1982



Agradecimentos

Do prof. José Carlos de Oliveira pela orientação
com que orientou este trabalho, além de ajudar e proporcionar
que eu não desistisse gostaria de expressar meu reconhecimento
a todos gratidão.

Dedicat6ria

A meus pais, Geraldo Lacerda Machado e Sebasti
ana Gomes Machado, e a minhas irm6es C6lia, Helia, Maria Luiza
e Eliane.

Agradecimentos

Ao prof. José Carlos de Oliveira pela dedicação com que orientou este trabalho, além da amizade e compreensão que sempre demonstrou gostaria de externar meu reconhecimento e eterna gratidão.

Aos prof. José Carlos Goulart e João Roberto Cogo pela dedicação e carinho dispensados na revisão desta dissertação.

Ao prof. Renato de Aquino Faria Nunes pela valiosa colaboração.

Aos amigos Antonio Alves de Oliveira Jr. e Regi na Célia Almeida Campos pelo apoio, carinho e participação durante todo este trabalho.

Aos amigos Adail, Ana, D. Augusta, Beatriz, Be tânia, Beth, Ceres, Eduardo, Emilia, Graça, João, D. Maria , Shirley, Teki, Terezinha e Vania pela calorosa acolhida em Ita jubá.

A Cassilda Beatriz Rios da Silva pelo apoio, ca rinho e abnegação demonstrada neste período.

A Roberto Gontijo da Divisão de Treinamento da Centrais Elétricas de Goiás S/A pela dedicação e paciência com que datilografou e corrigiu este trabalho.

A meus superiores e amigos Kleber Cimini Lage, Helvio Alves Cardoso, José Garcia Bueno e Júlio Cezar Costa cu jo empenho e apoio tornaram possível a realização deste tra balho.

A Centrais Elétricas de Goiás S/A pelo apoio financeiro recebido.

Aos professores, colegas do CESE/80 e demais amigos da EFEI, pelo apoio recebido.

Í N D I C E

INTRODUÇÃO.....	1
PARTE I: Fundamentos	6
I1 - Introdução	7
I2 - Propagação de Ondas em Sistemas Monofásicos..	9
I3 - Propagação de Ondas em Sistemas Bifásicos..	21
I3.1 - Método Clássico	21
I3.2 - Método Matricial	26
I4 - Uso do Método Matricial para Solução das <u>E</u> quações de Ondas em Sistemas Polifásicos....	31
I5 - Efeito da Frequência nas Equações de Onda...	37
I6 - Atenuação e Distorção	43
I7 - Análise das Terminações em Elementos a <u>Parâ</u> metros Concentrados	55
I8 - Aproximação de Elementos a <u>Parâmetros</u> <u>Concen</u> trados por Secções de Linhas	63
I9 - Operação de Chaveamento	70
PARTE II: Cálculo Digital	81
II1 - Introdução	82
II2 - Metodologia	83
II3 - Representação da Atenuação e Distorção.....	92
II4 - Representação de Elementos Terminais.....	98
II5 - Representação de Fontes de Corrente e <u>Ten</u> são	104
II6 - Representação de Disjuntores	107
II7 - Representação de Elementos Não Lineares ...	111
II8 - Descrição Geral do Programa Digital <u>Desen</u> volvido	113
II8.1 - Leitura e Impressão de Dados	116
II8.2 - Preparação dos Dados	123
II8.3 - Cálculo do Fenômeno Transitório ...	123
PARTE III: Considerações Finais	132
III1 - Introdução	133

III2 - Estudo de Um Sistema	134
III2.1 - Dados das Barras	134
III2.2 - Dados de Linhas	138
III2.3 - Dados dos Elementos e Parâmetros Concentrados	140
III2.4 - Dados do Disjuntor	141
III2.5 - Resultados Obtidos no Estudo de Energização da LT	141
III2.6 - Resultados Obtidos no Estudo de Abertura da LT	152
III3 - Conclusões Finais	158
APENDICE	160
A1 - Programa para Cálculo de Parâmetros de Linhas "ATENUA"	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177

INTRODUÇÃO

- CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS POR COMPUTADORES DIGITAIS:

O cálculo dos fenômenos transitórios, por computadores digitais tem, de uma maneira geral, merecido grandes atenções dos engenheiros de sistemas de potência. Este grande interesse advem principalmente de três fatos. O primeiro é a utilização de níveis de tensões cada vez mais elevados nos sistemas elétricos de potência. Para se fazer face a necessidade de transportar grandes blocos de energia dos centros produtores aos centros consumidores, geralmente muito distantes. Estes sistemas além de atenderem a necessidade de transporte de energia devem apresentar uma alta confiabilidade, daí a necessidade de se conhecer bem os fenômenos transitórios, pois apesar de sua curta duração eles tem grande influência na performance dos equipamentos.

O segundo fato está intimamente ligado ao primeiro e se refere ao nível de isolamento dos equipamentos. Aumentar a tensão de operação implica necessariamente em aumentar o nível básico de isolamento (NBI) dos equipamentos, o que evidentemente aumenta consideravelmente os custos destes equipamentos. A Westinghouse Electric Corporation apresenta na sua nota técnica nº 48-500 de setembro/81, a seguinte fórmula para cálculo do preço básico de um transformador de potência:

$$\text{preço básico em dólares} = 19800 \times (\text{MVA})^{0.75} + 1.55 \times (\text{NBI})^{1.75}$$

onde:

MVA = potência do transformador em MVA

NBI = nível básico de isolamento.

Nota-se claramente da fórmula que os custos de isolamento crescem com uma potência de 1.75, razão mais

do que suficiente para não se poupar esforços no sentido de se reduzir os níveis de isolamento dos equipamentos, sem contudo colocar em risco a confiabilidade dos mesmos, e conseqüentemente de todo o sistema elétrico de potência. É portanto, evidente a necessidade de se conhecer bem os fenômenos transitórios principalmente aqueles que geram sobretensões.

A terceira razão decorre justamente desta grande necessidade de se conhecer as sobretensões transitórias, o que leva os engenheiros de sistemas de potência a procurarem ferramentas para o cálculo que sejam do seu convívio diário. Este é o caso dos computadores digitais, que são utilizados por estes engenheiros com grande frequência no cálculo de fluxo de carga, curto circuitos, estabilidade transitória de máquinas síncronas, entre outros. É esta facilidade de utilização e acesso aos computadores digitais que tem gerado o grande interesse por programas de cálculo digital de sobretensões transitórias, em substituição aos métodos tradicionais utilizando o "TNA". Para se ter uma idéia das dificuldades de acesso a este equipamento basta dizer que no Brasil existem apenas dois "TNAs", um na MAIN Engenharia, em São Paulo e outro no CEPEL no Rio de Janeiro.

- DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO -

Os programas digitais devem antes de mais nada serem econômicos e precisos. Quanto ao aspecto econômico, a utilização em larga escala dos computadores, associada a grande velocidade de processamento dos computadores das últimas gerações, tornaram viável o desenvolvimento de programas para cálculo de transitórios, resta portanto discutir o problema da precisão.

O programa digital para cálculo de transitórios, desenvolvido neste trabalho, tem como principal preocupação justamente o aspecto da precisão. Assim é que o programa

ma foi dotado de vários recursos capazes de minimizar ao máximo os erros cometidos com simplificações.

Quanto a dissertação em si, ela está dividida em duas partes. A primeira parte de fundamentos procura a apresentar os principais modelos utilizados na representação de elementos de um sistema elétrico, para cálculo digital de transitórios, obtendo assim a teoria básica para o desenvolvimento de um programa. Nas três primeiras seções da primeira parte está desenvolvida de maneira sucinta a teoria de propagação das ondas eletromagnéticas nas linhas de transmissão (elementos a parâmetros distribuídos). Começando por analisar a propagação em uma linha composta de um condutor em presença de um plano de terra infinito, através do método clássico. Utilizando a transformada de Fourier, chega-se na seção I-4 a análise da propagação em sistemas polifásicos através de técnicas matriciais. Neste processo uma transformação linear dos vetores de tensões e correntes é utilizada a fim de possibilitar a análise dos sistemas polifásicos com "n" condutores mutuamente acoplados, em "n" sistemas monofásicos" independentes, isto é, a propagação é feita em "n" modos de propagação independentes. Este processo, que é similar à técnica de componentes simétricas, bastante utilizado no cálculo de faltas, assume dentro do trabalho um papel de grande importância uma vez que tornou possível a simulação polifásica (trifásica) dos sistemas elétricos de potência. O significado da representação trifásica é bastante evidente principalmente quando se trabalha na área de disjuntores.

As seções I-5 e I-6 tratam de fatores que influem na propagação, tais como a influência da frequência nos parâmetros das linhas de transmissão e os efeitos da atenuação e distorção das ondas que se propagam, devido as perdas nas linhas. Estes fatores tem influência principalmente na precisão dos resultados obtidos nos cálculos.

As demais seções da primeira parte tratam principalmente de métodos utilizados na simulação de outros

elementos do sistema elétrico, tais como disjuntores, reatores, capacitores, transformadores e outros elementos com parâmetros concentrados. Na representação de elementos a parâmetros concentrados procurou-se um método que apresentasse um bom desempenho no cálculo digital sem contudo comprometer a precisão. A representação dos elementos a parâmetros concentrados através de pequenas seções de linhas (elementos a parâmetros distribuídos), apresentam bons resultados tanto do ponto de vista computacional quanto de precisão como pode ser visto na seção I-8. Uma boa representação dos disjuntores é obtida com a utilização do princípio da superposição, inclusive na simulação dos resistores de chaveamento.

A segunda parte da dissertação trata do cálculo digital propriamente dito. Nela se mostra os processos utilizados na simulação dos diversos componentes e fenômenos. Assim na seção II-2 faz-se uma descrição geral da metodologia utilizada, ou seja, do processo utilizado na propagação das ondas eletromagnéticas, da discretização do tempo, do efeito das terminações e por fim das transformações lineares dos vetores de tensões e correntes necessárias na simulação polifásica. A seção II-3 trata da representação da atenuação e distorção das ondas que se propagam nas linhas de transmissão, esta representação utiliza resultados obtidos de um programa digital "Atenua". Este programa além das matrizes de admitância característica, velocidade de propagação dos diversos modos, fornece também a resposta, no final da linha, de um degrau unitário de tensão aplicado no seu início, esta resposta contém as informações necessárias para se representar a atenuação e distorção sofrida por uma onda que se propaga na linha em questão. Este programa "Atenua" se presta portanto para formar um banco de dados das linhas de transmissão de um dado sistema, o qual será posteriormente utilizado no programa para cálculo de transientes. As demais seções desta segunda parte tratam da representação dos demais componentes do sistema, tais como elementos terminais (reatores, capacitores, transformadores ,

geradores), fontes de tensões ou correntes, disjuntores, e elementos não lineares (pára-raios, efeito da saturação magnética). A última seção desta segunda parte faz uma descrição suscinta do programa propriamente dito, discorrendo rapidamente sobre cada subrotina.

Finalmente, a terceira parte da dissertação mostra os resultados obtidos na simulação de um sistema e apresenta as conclusões finais a respeito do trabalho.

INTRODUÇÃO

Esta primeira parte do trabalho tem por finalidade apresentar os fundamentos da teoria da propagação de ondas eletromagnéticas em meios materiais, com ênfase na propagação plana e esférica.

O método aqui empregado para a derivação das equações de onda é baseado na teoria da difração, que nos permite obter as equações de onda para ondas planas e esféricas em meios materiais. A partir dessas equações, são obtidas as expressões para os campos elétrico e magnético, bem como para a densidade de energia e o vetor de Poynting.

PARTE I

FUNDAMENTOS

Um dos aspectos mais importantes da teoria da propagação de ondas eletromagnéticas é a conservação da energia. Isso é expresso matematicamente pelo teorema de Poynting, que estabelece que a divergência do vetor de Poynting é igual à diferença entre a derivada temporal da densidade de energia e a densidade de corrente.

I.1 - INTRODUÇÃO

Esta primeira parte da dissertação procura mostrar os fundamentos teóricos dos principais modelos utilizados na representação dos diversos componentes de um sistema elétrico de potência, para cálculo digital dos fenômenos transitórios.

O método aqui empregado para cálculo de tais fenômenos, é uma extensão do método de Lattice, que se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas. Neste método os elementos de um sistema elétrico de potência são divididos em dois tipos principais, ou seja, elementos cujos parâmetros são de natureza concentrada tais como geradores, transformadores, reatores, capacitores nos quais o tempo de propagação das ondas é praticamente nulo, e elementos cujos parâmetros são de natureza distribuída tais como linhas aéreas de transmissão e cabos subterrâneos, nos quais a propagação se processa num tempo considerável.

Uma operação de chaveamento de um componente ou mesmo uma descarga atmosférica em uma linha de transmissão, geram ondas eletromagnéticas que se propagam ao longo do sistema, trazendo como consequência tensões e correntes transitórias de elevadas amplitudes e frequências que variam desde 60 Hz até a faixa dos 100 KHz. Os parâmetros dos elementos, considerados constantes, na maioria dos estudos de um sistema elétrico que se processam na faixa dos 60Hz, variam consideravelmente quando os fenômenos se processam em faixas de frequências mais elevadas. Procura-se portanto aqui meios capazes de representarem bem, tanto elementos a parâmetros concentrados como os elementos a parâmetros distribuídos, assim como reproduzir os efeitos que sofrem as ondas durante o processo de propagação, devido a variação destes parâmetros com a frequência.

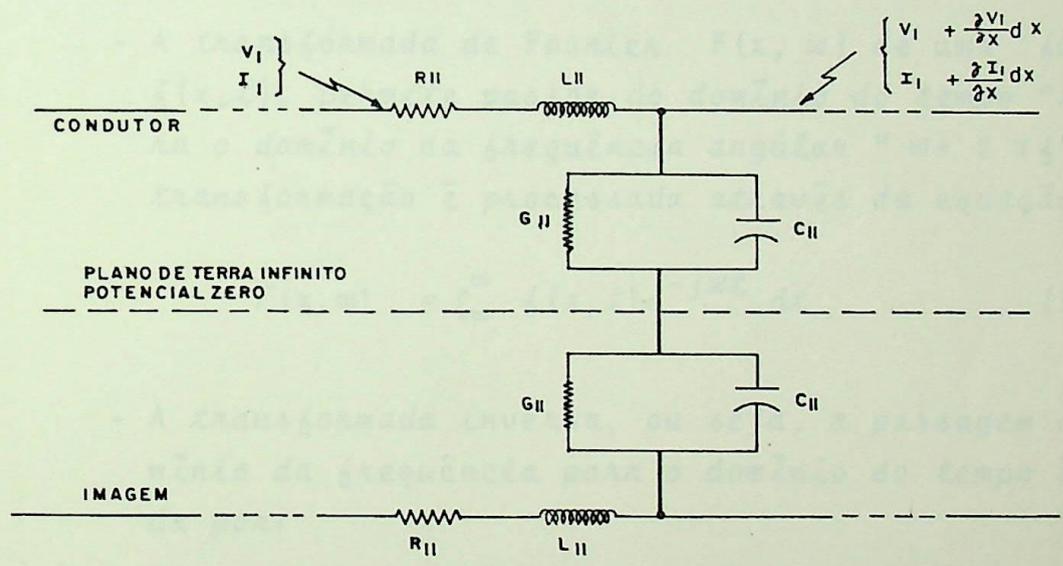
A necessidade do cálculo trifásico dos fenômenos transitórios é bastante evidente principalmente quando se trata de estudos na área de disjuntores. A representação trifásica, no entanto, apresenta uma série de dificuldades oriundas do acoplamento mútuo entre as fases do sistema. Assim se introduz a chamada teoria modal, a qual se baseia na utilização de técnicas matriciais acompanhadas de uma transformação linear dos vetores de tensão e corrente. Com esta transformação, um sistema de "n" condutores mutuamente acoplados é tratado como "n" sistemas monofásicos independentes, tornando possível o processamento trifásico dos sistemas.

A propagação de ondas em sistemas polifásicos (trifásicos), os efeitos da variação dos parâmetros com a frequência, a representação de elementos a parâmetros concentrados, a utilização do princípio da superposição na representação das operações de chaveamento, enfim o equacionamento dos principais fenômenos e efeitos pertinentes ao cálculo digital de transitórios encontram-se nas seções desta primeira parte. Em cada uma destas seções procura-se encerrar toda a informação pertinente ao assunto, tornando-se assim independente das demais.

I.2 - PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM SISTEMAS MONOFÁSICOS

A fim de melhor compreender o efeito da propagação de ondas eletromagnéticas em sistemas de potência trifásicos, analisar-se-á inicialmente a propagação em um sistema constituído de um condutor e um plano de terra infinito. As equações obtidas para este caso simples serão posteriormente estendidas para modelos mais complexos.

O arranjo de um condutor em presença de um plano de terra infinito, é mostrado na figura I2.1, que representa apenas um comprimento infinitesimal.



REPRESENTAÇÃO DE UM ELEMENTO INFINITESIMAL DE LINHA MONOFÁSICA

FIGURA - I 2 . I

Onde:

- R_{11} - Resistência em ohms por unidade de comprimento.
- L_{11} - Indutância em henries por unidade de comprimento.
- G_{11} - Condutância em mhos por unidade de comprimento.
- C_{11} - Capacitância em farads por unidade de comprimento.

As equações diferenciais que relacionam as grandezas da figura-I2.1, são:

$$\frac{\partial V_1(x,t)}{\partial x} = -L_{11} \frac{\partial I_1(x,t)}{\partial t} - R_{11} I_1(x,t) \quad (I2.1)$$

$$\frac{\partial I_1(x,t)}{\partial x} = -C_{11} \frac{\partial V_1(x,t)}{\partial t} - G_{11} V_1(x,t) \quad (I2.2)$$

As equações diferenciais (I2.1) e (I2.2), são transformadas para o domínio da frequência aplicando-se a transformada de Fourier. Antes porém é conveniente ressaltar alguns conceitos básicos relacionados a esta transformação:

- A transformada de Fourier $F(x, w)$ de uma função $f(x, t)$, permite passar do domínio do tempo " t " para o domínio da frequência angular " $w = 2\pi f$ ". A transformação é processada através da equação:

$$F(x, w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-j\omega t} dt \quad (I2.3)$$

- A transformada inversa, ou seja, a passagem do domínio da frequência para o domínio do tempo é dada por:

$$f(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, w) e^{j\omega t} dw \quad (I2.4)$$

- A condição suficiente para existência de $F(x, w)$ é comumente dada por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x, t)| dt < \infty \quad (I2.5)$$

Isto é, a função deve ser absolutamente integrável em relação a " t ".

- A transformada de Fourier (Γ) da função derivada da $\frac{\partial f}{\partial t}$, onde f é contínua e $\lim_{t \Rightarrow \pm\infty} f = 0$, é dada por:

$$\Gamma \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) = j\omega F(x, \omega)$$

Aplicando a transformada de Fourier nas equações (I2.1) e (I2.2), vem:

$$\frac{dV_1(x, \omega)}{dx} = -j\omega L_{11} I_1(x, \omega) - R_{11} I_1(x, \omega)$$

$$\frac{dV_1(x, \omega)}{dx} = - (R_{11} + j\omega L_{11}) I_1(x, \omega)$$

ou:

$$\frac{dV_1(x, \omega)}{dx} = - Z_{11}(\omega) I_1(x, \omega) \quad (I2.7)$$

$$\frac{dI_1(x, \omega)}{dx} = -j\omega C_{11} V_1(x, \omega) - G_{11} V_1(x, \omega)$$

$$\frac{dI_1(x, \omega)}{dx} = - (G_{11} + j\omega C_{11}) V_1(x, \omega)$$

ou:

$$\frac{dI_1(x, \omega)}{dx} = - Y_{11}(\omega) V_1(x, \omega) \quad (I2.8)$$

As equações diferenciais a derivadas parciais (I2.1) e (I2.2), transformaram-se desta forma nas equações diferenciais ordinárias (I2.7) e (I2.8), válidas para uma dada frequência angular ω , onde:

$$V_1(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_1(x, t) e^{-j\omega t} dt = V_1^F \quad (I2.9)$$

$$I_1(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I_1(x, t) e^{-j\omega t} dt = I_1^F \quad (I2.10)$$

As equações (I2.7) e (I2.8) no domínio da frequência são facilmente resolvidas. Derivando-as em relação a "x", vem:

$$\frac{d^2 V_1^F}{dx^2} = - Z_{11} \frac{d I_1^F}{dx}$$

$$\frac{d^2 I_1^F}{dx^2} = - Y_{11} \frac{d V_1^F}{dx}$$

De onde:

$$\frac{d^2 V_1^F}{dx^2} = Z_{11} Y_{11} V_1^F = \gamma_1^2 V_1^F \quad (I2.11)$$

$$\frac{d^2 I_1^F}{dx^2} = Y_{11} Z_{11} I_1^F = \gamma_1^2 I_1^F \quad (I2.12)$$

Resolvendo para V_1^F , tem

$$V_1^F = A_1 e^{-\gamma_1 x} + B_1 e^{\gamma_1 x} \quad (I2.13)$$

Onde:

A_1 e B_1 são constantes arbitrárias

$$\gamma_1 = \gamma_1' = \sqrt{Z_{11} Y_{11}}$$

É conveniente lembrar que de uma forma geral

$$\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1.$$

A equação de onda de tensão de fase no domínio da frequência V_1^F , pode ser interpretada como sendo constituída de duas componentes, uma $A_1 e^{-\gamma_1 x}$ que se propa

O superíndice F exprime valores de "fase", assim $V_1(x, \omega)$ é a tensão na fase 1, no domínio da frequência, esta nomenclatura ficará mais clara no decorrer do texto.

ga no sentido "+x", denominada componente direta, e outra $B_1 e^{\gamma_1 x}$ propagando no sentido "-x", componente reversa.

O coeficiente γ_1 é definido como sendo a constante de propagação. Sua parte real, " α_1 ", expressa a atenuação da onda que se propaga ao longo da linha, a parte imaginária " β_1 ", dá a variação do ângulo de fase da onda ao longo da linha.

A equação de tensão da onda no domínio do tempo, pode ser obtida através da transformada inversa de Fourier da equação (I2.13), que tem a forma:

$$V(x,t) = e^{-\alpha_1 t} \{f_1(x - \mu_1 t) + f_2(x + \mu_1 t)\} \quad (I2.14)$$

Onde:

$$f_1(x - \mu_1 t) = 0 \text{ para } x - \mu_1 t < 0 \quad (I2.15)$$

$$f_2(x + \mu_1 t) = 0 \text{ para } x + \mu_1 t < 0 \quad (I2.16)$$

$$\mu_1 = \omega / \beta_1$$

Aqui pode-se também notar que a equação de onda é constituída de duas componentes, uma que se propaga no sentido direto (f.1) e outra em sentido reverso (f.2), ambas com uma velocidade dada por μ_1 e sujeitas à mesma atenuação, agora dada por $e^{-\alpha_1 t}$.

A expressão para a corrente pode ser obtida a partir de (I2.7) e (I2.13), como:

$$I_1^F = - \frac{1}{Z_{11}} \frac{dV_1^F}{dx}$$

Donde:

$$I_1^F = \frac{1}{Z_{11}} (A_1 e^{-\gamma_1 x} - B_1 e^{\gamma_1 x}) \quad (I2.18)$$

Fazendo:

$$Z_{11}^0 = \frac{Z_{11}}{\gamma_1} = \sqrt{\frac{Z_{11}}{Y_{11}}} \quad (I2.19)$$

Tem-se:

$$I_1^F = \frac{A_1}{Z_{11}^0} e^{-\gamma_1 x} - \frac{B_1}{Z_{11}^0} e^{\gamma_1 x} \quad (I2.20)$$

No domínio do tempo, tem-se:

$$i_1(x,t) = e^{-\alpha_1 t} \{f_1(x - \mu_1 t) - f_2(x + \mu_1 t)\} / Z_{11}^0 \quad (I2.21)$$

As expressões (I2.13), (I2.20), (I2.14) e (I2.21) representam as equações gerais das ondas viajantes, em sistemas formados por um condutor e um plano de terra infinito, no domínio da frequência e no domínio do tempo respectivamente.

Pode-se notar que para cada componente de tensão existe uma componente de corrente associada, relacionadas por uma impedância Z_{11}^0 , definida como impedância característica. Para o caso de uma linha sem perdas, onde R_{11} e G_{11} são considerados nulos, Z_{11}^0 é chamada de impedância de surto, no entanto, não é costume fazer distinção entre as duas nomenclaturas. As constantes arbitrárias A_1 e B_1 são determinadas conhecendo-se as condições de contorno ou condições terminais para cada linha em análise.

Um conceito importante a ser obtido através das equações (I2.13) e (I2.20) é o do coeficiente de reflexão. Para tal, toma-se uma linha, como a representada na figura I2.1, a qual possui uma impedância característica Z_{11}^0 , terminando em um ponto $x = r$ de tensão V_{1r}^F , corrente I_{1r}^F e impedância Z_{11r} , como mostrado na figura I2.2.

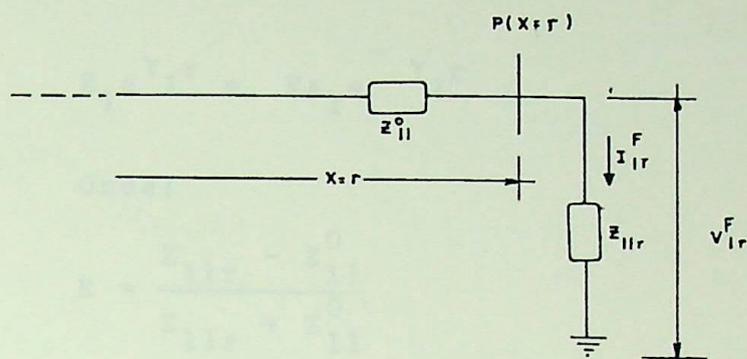


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA TERMINAÇÃO DELINHA
 FIGURA I-22

A tensão no ponto $P(x = r)$ é dada por:

$$V_{1r}^F = Z_{11r} I_{1r}^F \quad (I2.22)$$

Tomando as equações (I2.13) e (I2.20) para $x = r$, tem-se que a mesma tensão V_{1r}^F e corrente I_{1r}^F podem também ser dadas por:

$$V_{1r}^F = A_1 e^{-\gamma_1 r} + B_1 e^{\gamma_1 r} \quad (I2.23)$$

$$I_{1r}^F = \frac{A_1}{Z_{11}^0} e^{-\gamma_1 r} - \frac{B_1}{Z_{11}^0} e^{\gamma_1 r} \quad (I2.24)$$

Substituindo (I2.24) em (I2.22) e igualando o resultado a (I2.23), vem:

$$\frac{A_1}{Z_{11}^0} e^{-\gamma_1 r} - \frac{B_1}{Z_{11}^0} e^{\gamma_1 r} = \frac{A_1}{Z_{11r}} e^{-\gamma_1 r} + \frac{B_1}{Z_{11r}} e^{\gamma_1 r}$$

$$\left(\frac{A_1}{Z_{11}^0} - \frac{A_1}{Z_{11r}} \right) e^{-\gamma_1 r} = \left(\frac{B_1}{Z_{11}^0} + \frac{B_1}{Z_{11r}} \right) e^{\gamma_1 r}$$

$$B_1 e^{\gamma_1 r} = K A_1 e^{-\gamma_1 r} \quad (I2.25)$$

Onde:

$$K = \frac{Z_{11r} - Z_{11}^0}{Z_{11r} + Z_{11}^0} \quad (I2.26)$$

O fator K é conhecido como coeficiente de reflexão uma vez que expressa a parcela da onda incidente que é refletida e propaga no sentido reverso. Como pode ser observado o coeficiente de reflexão K expresso em (I2.26), tem seu valor sempre menor ou igual a unidade.

A melhor maneira de entender completamente o fenômeno é através de um exemplo. Para tal toma-se uma linha de comprimento ℓ_1 , com impedância de surto Z_{11}^0 e constante de propagação $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$, terminada em outra linha de comprimento infinito, impedância de surto $Z_{11r} = 2Z_{11}^0$. Uma tensão $V_1(\omega)$ é aplicada no início da linha ($x = \ell_1$) em $t = 0$, o tempo de propagação desta, desde a fonte até o fim da linha, é dado por:

$$T = \frac{\ell}{u_1}$$

como:

$$u_1 = \frac{\omega}{\beta_1}, \text{ vem:}$$

$$T = \frac{\ell \beta_1}{\omega}$$

No final da linha ($x = 0$) a componente direta ($A_1 e^{-\gamma_1 x}$ ou $f_1(x - \mu_1 t)$) será nula para $t < T$, logo de (I2.25), vem:

$$B_1 e^{\gamma_1 l} = K \times 0$$

portanto:

$$B_1 = 0 \quad p/ \quad t < T$$

No início da linha ($x = -l$), da equação (I2.13) tem se:

$$V_1 = A_1 e^{-\gamma_1(-l)} + 0 \times e^{\gamma_1 x(-l)}$$

$$A_1 = V_1 e^{\gamma_1 l} = V_{1D}^F \tag{I2.27}$$

Em $t = T$ a onda que viaja no sentido direto da linha incide no terminal dando origem a uma onda refletida, dada pela equação (I2.25), como:

$$B e^{\gamma_1 x 0} = K V_{1D}^F e^{\gamma_1 x 0} \quad B_1 = K V_{1D}^F = V_{1R}^F \tag{I2.28}$$

De (I2.26), vem:

$$K = \frac{2Z_{11}^0 - Z_{11}^0}{2Z_{11}^0 + Z_{11}^0} = \frac{1}{3}$$

Levando em (I2.13) a tensão no terminal, será:

$$V_1^F = V_{1D}^F e^{-\gamma_1 x 0} + V_{1R}^F e^{\gamma_1 x 0}$$

$$V_1^F = V_{1D}^F + \frac{1}{3} V_{1D}^F = \frac{4}{3} V_{1D}^F$$

É importante notar que uma onda ao incidir em um ponto de descontinuidade dá origem a uma onda (refletida) que se propaga em sentido contrário ao da onda incidente alterando a tensão na linha que é dada pela equação (I2.13) onde $A = V_{1D}^F$ e $B = V_{1R}^F$. Deve-se notar também que uma onda de tensão $V_1^F = (K + 1) V_{1D}^F$ viajará no sentido direto da linha terminal. Esta onda é normalmente designada por onda transmitida. O coeficiente $K_t = (1 + x)$ é conhecido como coeficiente de transmissão.

A partir do coeficiente de reflexão pode-se obter algumas conclusões importantes a respeito das terminações. Para tal, far-se-á aqui, a análise de algumas terminações típicas:

- *Terminação em curto circuito: neste tipo de terminação $Z_{11n} = 0$, logo o coeficiente de reflexão será:*

$$K = \frac{0 - Z_{11}^0}{0 + Z_{11}^0} = -1$$

Isto significa que uma onda viajando em uma linha de impedância característica Z_{11}^0 ao encontrar uma terminação em curto circuito será totalmente refletida com sinal oposto.

Sendo a tensão terminal a soma das ondas incidentes e refletida, tem-se nesta situação uma tensão terminal nula, o que era de se esperar fisicamente.

- *Terminação em uma impedância igual a impedância característica da linha:*

Neste caso $Z_{11n} = Z_{11}^0$; portanto:

$$K = \frac{Z_{11}^0 - Z_{11}^0}{Z_{11}^0 + Z_{11}^0} = 0$$

Logo não haverá onda refletida.

Este resultado também era esperado uma vez que não houve mudanças nas características do circuito no ponto de descontinuidade, a tensão terminal será igual a tensão da onda incidente.

- Terminação em circuito aberto:

neste tipo de terminação $Z_{11R} = \infty$, assim:

$$K = \frac{Z_{11R} - Z_{11}^c}{Z_{11R} + Z_{11}^c} = \frac{Z_{11R} (1 - Z_{11}^c / Z_{11R})}{Z_{11R} (1 + Z_{11}^c / Z_{11R})} =$$

$$= \frac{1 - Z_{11}^c / Z_{11R}}{1 + Z_{11}^c / Z_{11R}} \quad \text{para } Z_{11R} = \infty$$

$$K = \frac{1 - 0}{1 + 0} = 1$$

portanto a onda refletida terá mesma amplitude e mesmo sinal da onda incidente. Assim, a tensão terminal será o dobro da tensão incidente.

Um outro conceito, muito importante, para a análise das próximas seções, será introduzido aqui. Não se espera contudo, que este conceito seja completamente assimilado neste ponto. Trata-se do conceito de tensão componente, obtido através de uma transformação linear da tensão de fase. Para tal as equações (I2.13) e (I2.20) serão reescritas como:

$$V_1^F = S_{11} \{ V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} + V_{1R}^c e^{\gamma_1 x} \} \quad \text{ou}$$

$$V_1^F = S_{11} V_1^c \quad \text{(I2.29)}$$

* Entende-se por ponto de descontinuidade o ponto onde há variação nas características do circuito no qual a onda se propaga, isto é há mudança na impedância característica.

Onde:

$$V_1^c = V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} + V_{1R}^c e^{\gamma_1 x} \quad (I2.30)$$

e

$$I_1^F = [Z_{11}^0]^{-1} S_{11} V_1^c \quad (I2.31)$$

Onde:

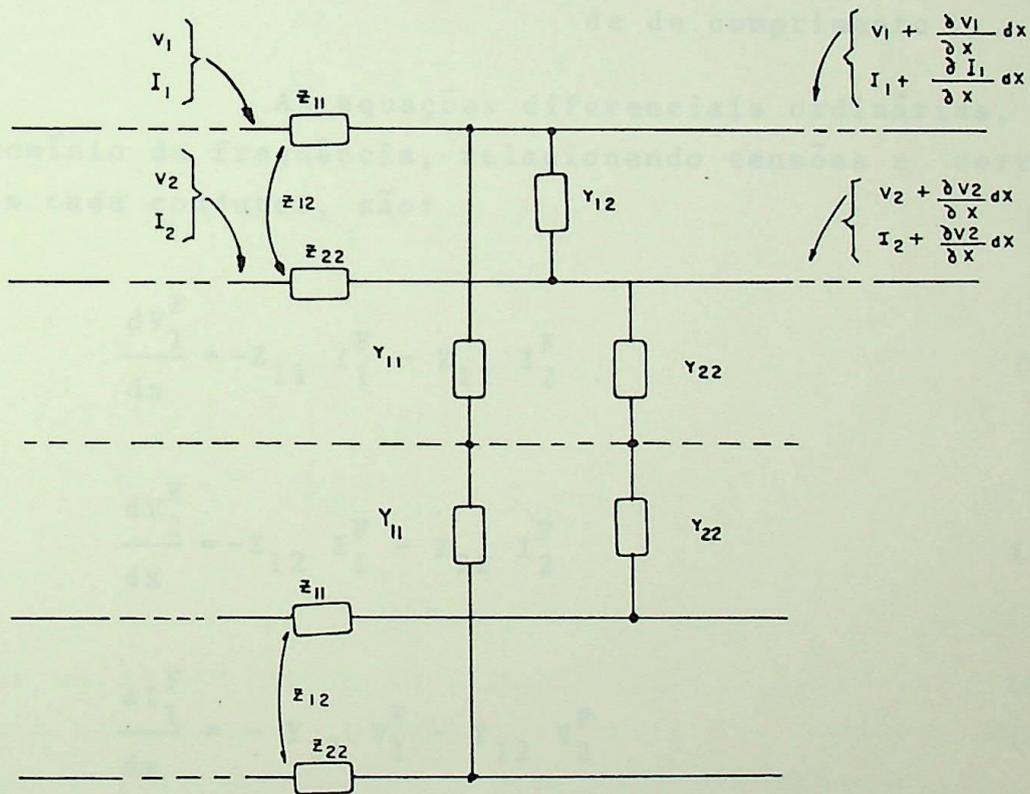
$$\underline{V_1^c} = V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} - V_{1R}^c e^{\gamma_1 x} \quad (I2.32)$$

A razão da transformação da tensão de fase V^F , através de uma constante S_{11} , em uma tensão V^c , denominada aqui de tensão componente, será facilmente compreendida nas seções que se seguem.

I.3 - PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM SISTEMAS BIFÁSICOS

I3.1 - Método Clássico:

Com o proposito de obter uma formulação capaz de representar a propagação de onda em sistemas polifásicos, analisar-se-á a propagação em uma linha constituída de dois condutores e um plano de terra infinito. A figura I3.1 mostra uma secção infinitesimal desta linha.



REPRESENTAÇÃO DE UM ELEMENTO INFINITESIMAL DE LINHA BIFÁSICA
FIGURA I3.1

Da figura I3.1, tem-se:

$Z_{ii} = (R_{ii} + j\omega L_{ii})$ - impedância própria do condutor i por unidade de comprimento.

$Z_{ij} = (R_{ij} + j\omega L_{ij})$ - impedância mútua entre os condutores i e j por unidade de comprimento.

$Y_{ii} = (G_{ii} + j\omega C_{ii})$ - admitância própria do condutor i por unidade de comprimento.

$Y_{ij} = (G_{ij} + j\omega C_{ij})$ - admitância mútua entre os condutores i e j por unidade de comprimento.

As equações diferenciais ordinárias, já no domínio da frequência, relacionando tensões e correntes em cada condutor, são:

$$\frac{dV_1^F}{dx} = -Z_{11} I_1^F - Z_{12} I_2^F \quad (I3.1)$$

$$\frac{dV_2^F}{dx} = -Z_{12} I_1^F - Z_{22} I_2^F \quad (I3.2)$$

$$\frac{dI_1^F}{dx} = -Y_{11} V_1^F - Y_{12} V_2^F \quad (I3.3)$$

$$\frac{dI_2^F}{dx} = -Y_{12} V_1^F - Y_{22} V_2^F \quad (I3.4)$$

Derivando as equações acima e a seguir por um processo de substituição, obtem-se as seguintes equações:



$$\frac{d^2 V_1^F}{dx^2} = P_{11} V_1^F + P_{12} V_2^F \quad (I3.5)$$

$$\frac{d^2 V_2^F}{dx^2} = P_{21} V_1^F + P_{22} V_2^F \quad (I3.6)$$

$$\frac{d^2 I_1^F}{dx^2} = P_{11} I_1^F + P_{21} I_2^F \quad (I3.7)$$

$$\frac{d^2 I_2^F}{dx^2} = P_{12} I_1^F + P_{22} I_2^F \quad (I3.8)$$

Onde:

$$P_{11} = (Z_{11} Y_{11} - Z_{12} Y_{12}) \quad (I3.9)$$

$$P_{12} = - (Z_{11} Y_{12} - Z_{12} Y_{22}) \quad (I3.10)$$

$$P_{21} = (Z_{12} Y_{11} - Z_{22} Y_{12}) \quad (I3.11)$$

$$P_{22} = - (Z_{12} Y_{12} - Z_{22} Y_{22}) \quad (I3.12)$$

As equações para as tensões nos condutores, são então obtidas a partir de (I3.5) e (I3.6). Apresentar-se-a aqui apenas as equações finais das tensões, haja vista a grande quantidade de manipulações matemáticas envolvidas, então:

$$V_1^F = S_{11} (V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} + V_{1R}^c e^{\gamma_1 x}) + S_{12} (V_{2D}^c e^{-\gamma_2 x} + V_{2R}^c e^{\gamma_2 x}) \quad (I3.13)$$

$$V_2^F = S_{21} (V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} + V_{1R}^c e^{\gamma_1 x}) + S_{22} (V_{2D}^c e^{-\gamma_2 x} + V_{2R}^c e^{\gamma_2 x}) \quad (I3.14)$$

Ou:

$$V_1^F = S_{11} V_{-1}^c + S_{12} V_{-2}^c \quad (I3.15)$$

$$V_2^F = S_{21} V_{-1}^c + S_{22} V_{-2}^c \quad (I3.16)$$

Onde:

$$V_{-1}^c = V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} + V_{1R}^c e^{\gamma_1 x} \quad (I3.17)$$

$$V_{-2}^c = V_{2D}^c e^{-\gamma_2 x} + V_{2R}^c e^{\gamma_2 x} \quad (I3.18)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \{ (P_{11} + P_{22}) + \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12} P_{21}} \} \quad (I3.19)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} \{ (P_{11} + P_{22}) - \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12} P_{21}} \} \quad (I3.20)$$

$$\frac{S_{12}}{S_{22}} = \frac{1}{2P_{12}} \{ (P_{11} - P_{22}) - \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12} P_{21}} \} \quad (I3.21)$$

$$\frac{S_{21}}{S_{11}} = \frac{-1}{2P_{21}} \{ (P_{11} - P_{22}) - \sqrt{(P_{11} - P_{22})^2 + 4P_{12} P_{21}} \} \quad (I3.22)$$

As expressões para a corrente, são:

$$I_1^F = \frac{1}{D} \{ \gamma_1 (S_{11} Z_{22} - S_{21} Z_{12}) \underline{V_{-1}^c} + \gamma_2 (S_{12} Z_{22} - S_{22} Z_{12}) \underline{V_{-2}^c} \} \quad (I3.23)$$

$$I_2^F = \frac{1}{D} \{ \gamma_1 S_{21} Z_{11} - S_{11} Z_{12} \underline{V_1^c} + \gamma_2 S_{22} Z_{11} - S_{12} Z_{12} \underline{V_2^c} \} \quad (I3.24)$$

Onde:

$$\underline{V_1^c} = V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} - V_{1R}^c e^{\gamma_1 x} \quad (I3.25)$$

$$\underline{V_2^c} = V_{2D}^c e^{-\gamma_2 x} - V_{2R}^c e^{\gamma_2 x} \quad (I3.26)$$

$$D = Z_{11} Z_{22} - Z_{12}^2 \quad (I3.27)$$

Em relação as equações de tensões e correntes apresentadas anteriormente, faz-se a seguir alguns comentários:

- para cada tensão ou corrente de fase existem dois coeficientes de propagação (γ_1 e γ_2), sendo que cada um está relacionado com um par de ondas viajantes, compostos de uma componente de tensão que se propaga no sentido direto e outra componente que se propaga no sentido reverso.
- Cada tipo de onda viajante aparece em ambas as fases, em uma relação determinada por parâmetros do sistema, porém a relação entre ondas viajantes de diferentes tipos é arbitrária.
- Cada onda viajante de tensão é acompanhada pela sua correspondente onda de corrente. A relação entre tensão e corrente para cada componente é uma constante, que por sua vez é função dos parâmetros do sistema. Estas constantes tem as mesmas características das impedâncias de surto do caso monofásico e seus valores para cada componente em cada fase, são :

$$Z_{11}^c = \frac{D}{\gamma_1 (Z_{22} - S_{21} Z_{12} / S_{11})} \tag{13.27}$$

$$Z_{12}^c = \frac{D}{\gamma_2 (S_{12} Z_{22} / S_{22} - Z_{12})} \tag{13.28}$$

$$Z_{21}^c = \frac{D}{\gamma_2 (S_{12} Z_{22} / S_{22} - Z_{12})} \tag{13.29}$$

$$Z_{22}^c = \frac{D}{\gamma_1 (Z_{11} - S_{12} Z_{12} / S_{22})} \tag{13.30}$$

Estas relações são determinadas através das equações (13.23) e (13.24). Onde as constantes arbitrarias são eliminadas conhecendo-se as tensões e correntes em cada terminal de linha, tal como no caso monofásico.

A solução clássica apresentada anteriormente, mesmo para o caso de apenas dois condutores é bastante trabalhosa. A análise de casos mais complexos seguindo esta mesma metodologia é bastante desestimulante, no entanto a sistemática e mesmo a própria notação usada sugere o tratamento do problema de forma matricial, o que certamente reduzirá em muito o trabalho, chama-se mais uma vez, a atenção para o fato de que as tensões e correntes de fase são determinadas em termos de componentes, de maneira análoga as componentes simétricas usadas em sistemas trifásicos.

13.2 - Método Matricial

As dificuldades em encontrar ou mesmo trabalhar com as equações de propagação em sistemas bifásicos, e mais tarde em sistemas polifásicos reside no fato

de que as equações de tensão e corrente em cada fase dependem das demais fases, isto é, dependem do acoplamento mútuo entre as fases.

O processo que se segue tem por objetivo vencer estas dificuldades, usando a representação matricial para as equações (I3.1), a (I3.8), as quais terão o aspecto dado a seguir:

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_1^F}{dx} \\ \frac{dV_2^F}{dx} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^F \\ I_2^F \end{bmatrix} \quad (\text{I3.31})$$

Ou:

$$\frac{dV^F}{dx} = - Z^F I^F \quad (\text{I3.32})$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_1^F}{dx} \\ \frac{dI_2^F}{dx} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^F \\ V_2^F \end{bmatrix} \quad (\text{I3.33})$$

Ou:

$$\frac{dI^F}{dx} = - Y^F V^F \quad (\text{I3.34})$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 V_1^F}{dx^2} \\ \frac{d^2 V_2^F}{dx^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^F \\ V_2^F \end{bmatrix} \quad (\text{I3.35})$$

Ou:

$$\frac{d^2 V^F}{dx^2} = P V^F = Z^F Y^F V^F \tag{I3.36}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 I_1^F}{dx^2} \\ \frac{d^2 V_2^F}{dx^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} \\ P_{12} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^F \\ I_2^F \end{bmatrix} \tag{I3.37}$$

Ou:

$$\frac{d^2 I^F}{dx} = P_t I^F = Y^F Z^F I^F \tag{I3.38}$$

V^F e I^F são vetores colunas correspondentes as tensões e correntes de fase, Z^F e Y^F são matrizes quadradas, onde os elementos da diagonal são respectivamente as impedâncias e admitâncias próprias de cada fase e os elementos fora da diagonal representam respectivamente as impedâncias e admitâncias mútuas, entre fases. Deve-se notar que ambas as matrizes são simétricas, quando se trata de elementos passivos, assim $Z_t^F = Z^F$ e $Y_t^F = Y^F$.

A matriz "P" é quadrada, sendo utilizada com o intuito de simplificar a análise, e definida como o produto de Z^F por Y^F .

Para obter as equações das tensões e correntes far-se-á uma transformação linear de tal sorte que as equações diferenciais de segunda ordem de tensão e corrente envolvam somente matrizes diagonais. Desta forma será eliminado o efeito do acoplamento mutuo, e a solução é feita componente por componente.

Seja portanto V^c um vetor de componentes de tensão, definido como:

$$V^F = SV^c \tag{I3.39}$$

Substituindo na equação (I3.36), vem:

$$\frac{d^2 V^c}{dx^2} = S^{-1} P S V^c = \gamma^2 V^c \tag{I3.40}$$

Onde:

$$\gamma^2 = S^{-1} P S \tag{I3.41}$$

A matriz de transformação S é tomada de tal forma que γ^2 seja uma matriz diagonal, da forma:

$$\gamma^2 = \begin{bmatrix} \gamma_1^2 & 0 \\ 0 & \gamma_2^2 \end{bmatrix} \tag{I3.42}$$

Em consequência a equação matricial (I3.40) pode ser desmembrada em duas equações diferenciais simples:

$$\frac{d^2 V_1^c}{dx^2} = \gamma_1^2 V_1^c \tag{I3.43}$$

$$\frac{d^2 V_2^c}{dx^2} = \gamma_2^2 V_2^c \tag{I3.44}$$

Estas equações são da forma das equações (I2.11) e (I2.12) do caso monofásico e tem uma solução simples, dada por:

$$V_1^c = V_{1D}^c e^{-\gamma_1 x} + V_{1R}^c e^{\gamma_1 x} \tag{I3.45}$$

$$V_2^c = V_{2D}^c e^{-\gamma_2 x} + V_{2R}^c e^{\gamma_2 x} \tag{I3.46}$$

Onde V_{1D}^c , V_{1R}^c , V_{2D}^c , V_{2R}^c são constantes arbitrarias. A matriz S é determinada de tal sorte que $S^{-1}PS$ seja uma matriz diagonal, desta forma, é possível resolver diretamente as equações anteriores, resolvendo uma componente de cada vez.



I.4 - USO DO MÉTODO MATRICIAL PARA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ONDAS EM SISTEMAS POLIFÁSICOS.

A solução das equações de propagação de ondas em sistemas polifásicos, pelo método matricial é bastante simples, uma vez que o método transforma um sistema de n condutores mutuamente acoplados em n sistemas monofásicos, desacoplados entre si.

As equações diferenciais matriciais de segunda ordem da tensão e corrente, no domínio da frequência, são dadas por:

$$\frac{d^2 V^F}{dx^2} = P V^F \quad (I4.1)$$

$$\frac{d^2 I^F}{dx^2} = P_t I^F \quad (I4.2)$$

Através de uma transformação linear da tensão e corrente, definida como:

$$V^F = S V^c \quad (I4.3)$$

$$I^F = Q I^c \quad (I4.4)$$

Tem-se:

$$\frac{d^2 V^c}{dx^2} = S^{-1} P S V^c = \gamma^2 V^c \quad (I4.5)$$

$$\frac{d^2 I^c}{dx^2} = Q^{-1} P_t Q I^c = \gamma'^2 I^c \quad (I4.6)$$

O método está baseado na escolha conveniente das matrizes de transformação S e Q de tal forma, que γ^2 e γ'^2 tornam-se matrizes diagonais. Como pode ser observado em (I4.5) e (I4.6) as matrizes γ^2 e γ'^2 são dadas por:

$$\gamma^2 = S^{-1} P S \quad (I4.7)$$

$$\gamma'^2 = Q^{-1} P_t Q \quad (I4.8)$$

Isto significa que estas equações, devido ao fato de γ^2 e γ'^2 serem matrizes diagonais, formam um sistema de equações diferenciais simples, onde o efeito mútuo foi eliminado. Desta forma o conjunto de equações diferenciais tem o seguinte aspecto.

$$\frac{d^2 v_1^c}{dx^2} = \gamma_1^2 v_1^c \quad (I4.9)$$

$$\frac{d^2 v_i^c}{dx^2} = \gamma_i^2 v_i^c \quad (I4.10)$$

$$\frac{d^2 v_n^c}{dx^2} = \gamma_n^2 v_n^c \quad (I4.11)$$

Cuja solução, tal como no caso monofásico é dada por:

$$v_i^c = v_{iD}^c e^{-\gamma_i x} + v_{iR}^c e^{\gamma_i x} \quad (I4.12)$$

As equações de corrente podem ser determinadas de maneira semelhante. A matriz Z^c relacionando as componentes de tensão e corrente seria então obtida como:

$$\underline{v}^c = Z^c I^c \quad (I4.13)$$

Onde:

$$Z^c = \gamma^{-1} S^{-1} Z^F Q \quad (I4.14)$$

$$\underline{v}^c = v_D^c e^{-\gamma x} - v_R^c e^{\gamma x} \quad (I4.15)$$

Neste ponto é importante ressaltar que a matriz Z^c é diagonal. Para que as matrizes S e Q tornem γ^2 e γ'^2 diagonais, deve-se ter:

$$\det(P - \gamma_i^2) = 0 \quad (I4.16)$$

As colunas da matriz S são obtidas pela solução de um sistema de equações linearmente dependentes, dado por:

$$(P - \gamma_i^2) S_i = 0 \quad (I4.16)$$

Onde S_i é a i ésima coluna da matriz S , na qual um dos seus elementos deve ser arbitrado para que o sistema tenha solução.

A matriz S assim obtida nada mais é do que a matriz modal da matriz "P", ou seja, a matriz cujas colunas são os autovetores de "P" e " γ_i^2 " são seus autovalores. Em virtude disto passar-se-a chamar os componentes de tensão obtidos pela transformação, através de S , de componentes modais ou simplesmente modos de tensão.

Um raciocínio semelhante deveria ser feito para a matriz "Q", no entanto, uma vez obtida a matriz "S", far-se-á uso da propriedade de que os autovalores de uma matriz e os autovalores da sua matriz transposta são iguais, portanto:

$$\gamma'^2 = \gamma^2 = S^{-1} P S = Q^{-1} P_t Q \quad (I4.17)$$

Como γ^2 é diagonal, vem:

$$\gamma^2 = (S^{-1}PS)^t = S_t P_t S_t^{-1} = Q^{-1}P_t Q, \text{ logo:}$$

$$Q = S_t^{-1} \quad (I4.18)$$

$$Q^{-1} = S_t \quad (I4.18)$$

Para completar a análise da propagação de ondas em sistemas polifásicos, resta determinar os coeficientes de reflexão e as constantes de propagação, tal como foi realizado para o caso monofásico. As equações (I4.12) e (I4.13) mostram que os modos de tensão ou corrente se propagam ao longo da linha de maneira independente uns dos outros, com uma constante de propagação γ_i que define a atenuação e o defasamento (ou velocidade) da onda para uma dada frequência. Isto é, na expressão $\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i$, $\alpha_i x$ representa a atenuação e $\beta_i x$ e o ângulo de fase (ou $\mu_i = \omega / \beta_i$ a velocidade de propagação).

Para encontrar o coeficiente de reflexão considera-se uma onda que se propaga no sentido positivo de uma linha polifásica terminada em uma impedância operacional Z_r , em $x = r$. Das equações (I4.3) - (I4.4) e (I4.12) - (I4.15), vem:

$$V_r^F = S V_r^c = S(V_{Dr}^c e^{-\gamma r} + V_{Rr}^c e^{\gamma r})$$

$$V_{-r}^c = Z^c I_r^c = V_{-Dr}^c e^{-\gamma r} - V_{-Rr}^c e^{\gamma r}$$

Desta forma pode-se relacionar a tensão e a corrente de fase no terminal, considerando que:

$$V_r^F = Z_r I_r^F, \text{ ou}$$

$$S V_r^c = Z_r Q I_r^c, \text{ assim:}$$

$$S (V_{Dr}^c e^{-\gamma r} + V_{Rr}^c e^{\gamma r}) = Z_r Q Z_c^{-1} (V_{Dr}^c e^{-\gamma r} - V_{Rr}^c e^{\gamma r})$$

$$(S + Z_r Q Z_c^{-1}) V_{Rr}^c e^{\gamma r} = (Z_r Q Z_c^{-1} - S) V_{Dr}^c e^{-\gamma r}$$

$$V_{Rr}^c e^{\gamma r} = (S + Z_r Q Z_c^{-1})^{-1} (Z_r Q Z_c^{-1} - S) V_{Dr}^c e^{-\gamma r} \quad (I4.19)$$

De onde se conclue que:

$$k = \{ Z_r + S Z^c Q^{-1} \}^{-1} \{ Z_r - S Z^c Q^{-1} \} \quad (I4.20)$$

A matriz de impedância de surto para linha polifásica, pode ser definida a partir do coeficiente de reflexão, ou seja, quando uma onda viaja em uma linha e encontra no seu terminal uma impedância igual a impedância de surto da linha, o coeficiente de reflexão da onda é nulo, então se Z^0 é a impedância de surto da linha, vem:

$$Z_r = Z^0 \quad e \quad k = 0$$

$$k = 0 = \{ Z^0 + S Z^c Q^{-1} \}^{-1} \{ Z^0 - S Z^c Q^{-1} \}$$

$$Z^0 = S Z^c Q^{-1} \quad (I4.21)$$

Como $Z^c = \gamma^{-1} S^{-1} Z^F Q$, vem:

$$Z^0 = S \gamma^{-1} S^{-1} Z^F \quad (I4.22)$$

A equação (I4.20), é então reescrita como:

$$k = \{ Z_r + Z^0 \}^{-1} \{ Z_r - Z^0 \} \quad (I4.23)$$

Deve-se observar que Z^c é uma matriz diagonal porém Z_r e Z^0 não o são e portanto k também não o é. Isto significa que nas terminações os modos de propagação não se comportam de maneira independente um dos outros.

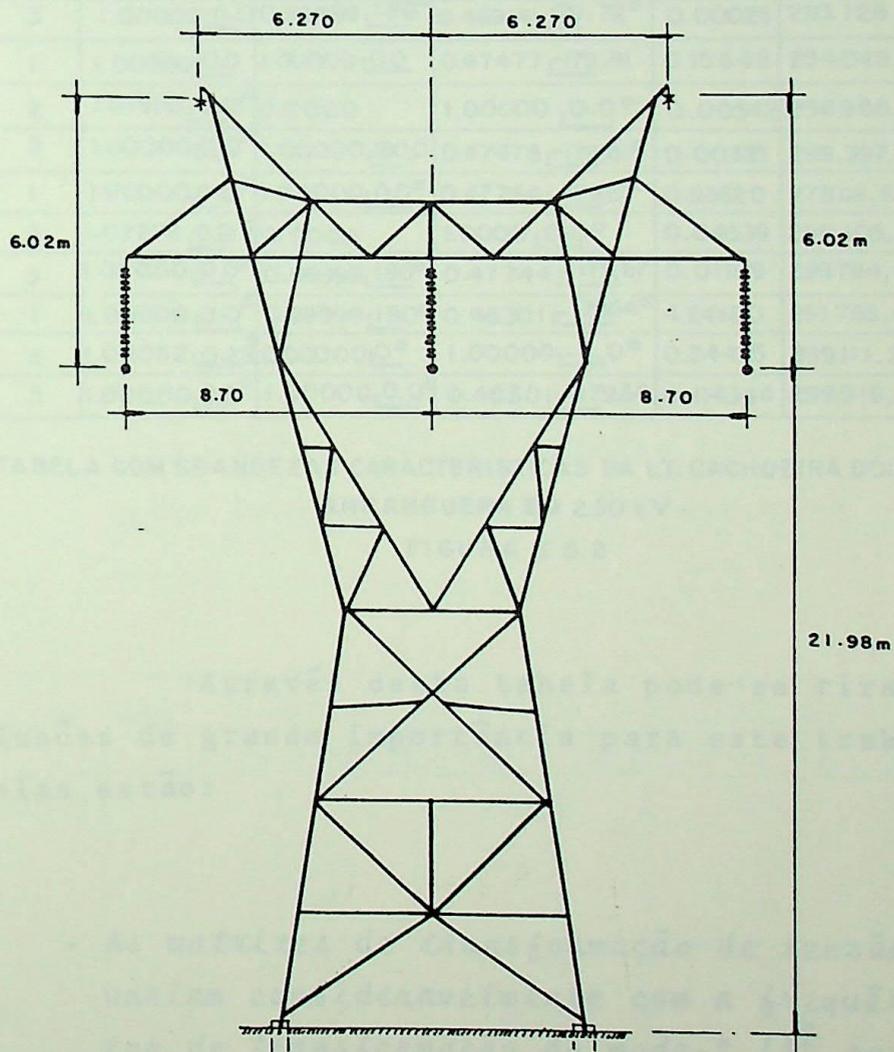
I.5 - EFEITO DA FREQUÊNCIA NAS EQUAÇÕES DE ONDA.

As equações de propagação de ondas eletromagnéticas deduzidas nas seções anteriores são válidas para uma dada frequência angular ω . Esta afirmação, tantas vezes enfatizada: até aqui, se deve ao fato de que determinados parâmetros das linhas de transmissão são dependentes da frequência. É importante, portanto, conhecer o grau de influência dessa variação nas equações de onda, haja visto que os transitórios eletromagnéticos geram ondas que possuem um espectro de frequência muito amplo. Assim a primeira vista, parece bastante razoável uma análise para cada frequência envolvida no processo. No entanto esta ideia é abandonada ao lembrar-se que em muitos casos o espectro de frequência é contínuo, e em tantos outros é impossível precisar a priori quais frequências estão envolvidas. Isto leva ao uso de certos artifícios e muitas vezes a simplificações e aproximações, que podem resultar em imprecisões graves se determinados critérios não forem observados.

A influência da frequência nos parâmetros das linhas de transmissão surge a partir do momento em que se considera um plano de terra de condutividade finita, seguido do efeito PELICULAR e outros fenômenos de menor importância. Vários autores tem se dedicado ao assunto, e alguns fatores foram introduzidos com o intuito de corrigir os parâmetros calculados da maneira convencional. Maiores detalhes sobre tais fatores podem ser encontrados nas referências [2], [4], [5], [9] e [14].

Aqui lançar-se-a mão de um programa de computador ⁽¹⁴⁾, o qual fornece as matrizes Z^0 , Y^0 , S , Q , e Z^c para uma ou mais frequências especificadas.

Os resultados obtidos para a linha de transmissão, que liga a usina de Cachoeira Dourada à Subestação Anhanguera em 230 KV, utilizando tal programa são dados na tabela da figura I5.8. Esta linha faz parte do sistema de transmissão das Centrais Elétricas de Goiás S/A - (CELG), e suas principais características estão mostradas na figura I5.1.



ARRANJO FÍSICO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO
EM 230 kV
FIGURA I 5.1

A tabela da figura 15.2, apresenta as matrizes S , γ , Z^c para as frequências de 60 Hz, 10 KHz, 100 KHz e 1 MHz, a resistividade do solo adotada foi de $500 \Omega \cdot m$. Note que para maior clareza a constante de propagação é apresentada na forma de uma atenuação dada em decibéis/km e uma velocidade de propagação em Km/s.

FREQUENCIA KHZ	MODO	MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO MODAL 'S'			ATENUAÇÃO DB/Km	VELOCIDADE Km/SEG.	IMPEDÂNCIA DE SURTO MODAL OHMS
0.060	1	1.0000,00	1.00000,00	0.46914,179.72	0.00111	198.055,6	288.388, -3.962°
	2	1.01125,018	0.0000	1.000,0.0°	0.00022	291.002,1	220.186, -1.122°
	3	1.00000,0.0	0.99999,180°	0.46914, -179.72°	0.00025	293.126,6	270.716, -1.447°
10.0	1	1.00000,0.0	1.00000,0.0	0.47477, -179.81	0.15642	254.048,4	223.790, -4.245°
	2	1.01910,0.12°	0.00000	1.00000,0.0°	0.00542	296.986,4	215.708, -1.169°
	3	1.00000,0.0°	1.00000,180.0	0.47478, -179.81°	0.00333	299.397,7	262.940, -2.28°
100.0	1	1.00000,0.0°	1.00000,0.0°	0.47744, -179.67°	0.93620	278.116,6	203.638, -2.871°
	2	1.02276,0.21°	0.00000	1.00000,0.0°	0.04539	298.105,5	214.899, -0.142°
	3	1.00000,0.0°	0.99999,180°	0.47744, -179.67°	0.01109	299.784,2	261.645, -0.25°
1000,0	1	1.00000,0.0°	0.99999,180°	0.48301, -179.64°	4.24160	291.755,6	192.982, -1.454°
	2	1.03052,0.23°	0.00000,0.0°	1.00000, -0.0°	0.34495	299.111,2	214.176, -0.108°
	3	1.00000,0.0°	1.00000,0.0°	0.48301, -179.64°	0.04344	299.918,0	259.530, -0.252°

TABELA COM GRANDEZAS CARACTERISTICAS DA LT. CACHOEIRA DOURADA ANHANGUERA EM 230 kV
FIGURA 15.2

Através desta tabela pode-se tirar várias conclusões de grande importância para este trabalho, dentre elas estão:

- As matrizes de transformação de tensão "S" não variam consideravelmente com a frequência. o vetor de transformação do modo-2 (2ª coluna) é praticamente invariante e os demais sofrem pequenas alterações, insignificantes do ponto de vista prático. Assim a matriz é considerada invariante com a frequência.

- As impedâncias características (surto) dos diversos modos variam consideravelmente com a frequência, e estas são mais acentuadas no modo-1 ou modo de terra.

Em todos os modos a impedância característica diminui com o aumento da frequência, sendo que as maiores variações ocorrem na região das baixas frequências, ou seja até 10KHz. Nesta faixa normalmente se encontra a maioria dos fenômenos transitórios.

- Quanto a velocidade de propagação, ela cresce com o aumento da frequência, e tende a aproximar-se da velocidade de propagação da luz no vácuo. As maiores variações também estão situadas nas faixas de frequência mais baixas, sendo o modo-1 o que mais varia.

O quadro da figura - 15.3 evidencia estas variações. Nele a coluna "Outros Casos", mostra variações máximas citadas na literatura.

PARAMETRO	MODO	VARIAÇÕES NAS FAIXAS		OUTROS CASOS	VARIAÇÃO C/A FREQUÊNCIA
		60Hz a 10KHz	10KHz a 1MHz	60Hz a 1MHz	
IMPEDÂNCIA DE SURTO	1	22,4%	13,8%	40%	DIMINUI
	2	2,0%	0,7%	10%	
	3	2,9%	1,3%	10%	
VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO	1	28,3%	14,8%	40%	AUMENTA
	2	2,1%	0,7%	7%	
	3	2,1%	0,1%	7%	

FIGURA 15.3

- A atenuação no entanto requer uma análise mais complexa, pois as ondas de frequências mais elevadas as vezes possuem menor amplitude que as de baixa frequência e uma simples comparação entre as duas não tem muito sentido. Isto no entanto não invalida a observação de que as ondas de alta frequência sofrem maior atenuação.

Neste ponto uma questão desperta grande interesse e pode ser colocada da seguinte forma: Quais as implicações das variações dos parâmetros das linhas de transmissão com a frequência, e que valores devem ser usados nas equações de propagação de ondas? Para respondê-la é necessário voltar as equações (I4.12), (I4.13) e (I4.19) das ondas viajantes e lembrar que nelas dois parâmetros são muito importantes.

O primeiro é a constante de propagação γ , que define a propagação da onda. Em outras palavras, através dela é possível conhecer a amplitude e o ângulo de fase da onda em cada ponto da linha. O segundo parâmetro é a impedância de surto que relaciona as ondas de tensão e corrente, além de estabelecer uma relação entre as ondas incidentes e refletidas num dado ponto de descontinuidade.

No que se refere a impedância de surto, tomá-la como sendo constante para uma faixa de frequência, é bastante razoável, uma vez que dependendo da natureza do estudo a ser realizado, adotar a impedância de surto constante, para uma faixa de frequência leva a resultados mais seguros. Mesmo em caso de dúvidas pode-se repetir o estudo para outras frequências sem grandes dispêndios de tempo de computação.

O mesmo critério no entanto não pode ser adotada para a constante de propagação, a menos que se

despreze o efeito da atenuação. A seção que se segue tra-
ta especificamente deste assunto.

Quando uma onda se propaga ao longo de um meio homogêneo e isotrópico, a equação de onda para o deslocamento ψ é dada por

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

onde v é a velocidade de propagação.

Para ondas planas que se propagam na direção x , a equação de onda pode ser escrita como

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

Se considerarmos uma onda que se propaga na direção x com velocidade v , podemos escrever a solução da equação de onda na forma

$$\psi(x, t) = f(x - vt) + g(x + vt)$$

onde f e g são funções arbitrárias. A primeira função representa uma onda que se propaga na direção x com velocidade v , e a segunda função representa uma onda que se propaga na direção $-x$ com velocidade v .

$$\psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + B \cos(kx + \omega t) \quad (1.1)$$

Onde:

$$A \cos(kx - \omega t) \text{ é a expressão de uma onda que se propaga na direção } x \text{ com velocidade } v$$

$$B \cos(kx + \omega t) \text{ é a expressão de uma onda que se propaga na direção } -x \text{ com velocidade } v$$

$$v = \frac{\omega}{k} \text{ é a velocidade de propagação da onda.}$$

I.6 - ATENUAÇÃO E DISTORÇÃO.

Quando uma onda propaga ao longo de uma linha de transmissão ela sofre gradativamente mudanças na sua forma e amplitude. Em geral três causas são apontadas para este fato.

- corrente de fuga nas superfícies dos isoladores.
- Efeito corona.
- Perdas devido a resistência e a variação dos parâmetros da linha com a frequência.

Em casos práticos, a condutância dos isoladores é desprezada e o efeito corona tem uma pequena influência nas ondas que possuem frente bastante longa. Todavia mesmo assim, o efeito corona se faz sentir apenas acima de determinado nível de tensão, podendo também ser desprezado.

A atenuação de uma onda senoidal de frequência angular ω , ao se propagar através de uma distância "x" da linha de transmissão, pode ser encontrada em valores modais, pela equação (I4.12), da qual se toma apenas a componente que viaja no sentido positivo.

$$V_i^c(x, \omega) = V_i^c(x = 0, \omega) e^{-\gamma_i x} \quad (I6.1)$$

Onde:

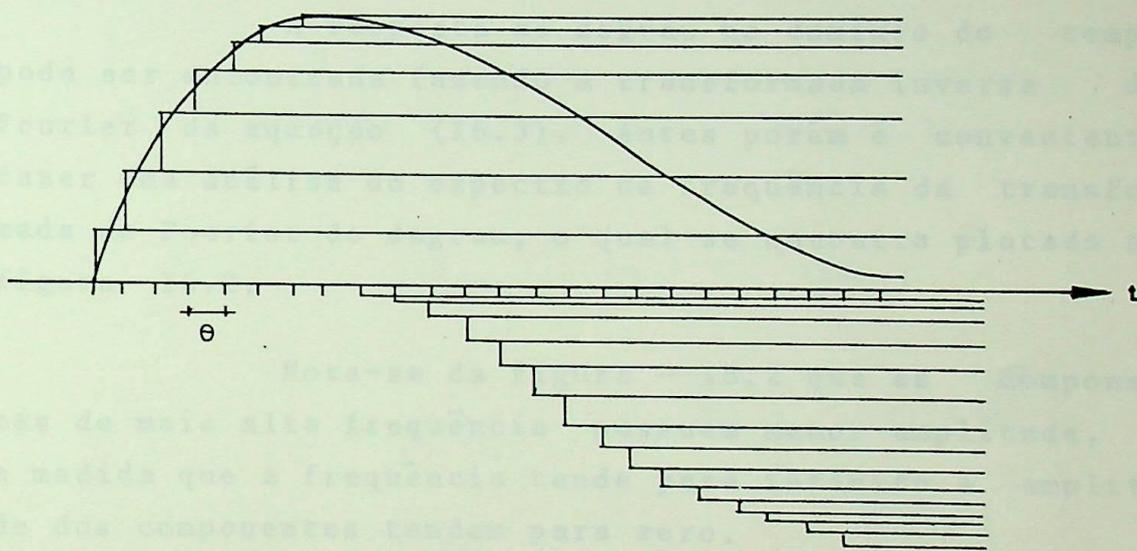
$V_i^c(x, \omega)$ - É a tensão do modo- i em um ponto "x" da linha.

$V_i^c(x = 0, \omega)$ - É a tensão do modo- i injetada no início da linha.

γ_i - É a constante de propagação do modo- i .

Em geral as ondas envolvidas nos fenômenos transitórios não são senoides, e mesmo quando as são torna-se mais conveniente representa-la por uma superposição de degraus, igualmente espaçados de um intervalo de tempo " θ ". Esta representação é muito difundida e tem um interesse todo especial quando se trabalha com ondas viajantes.

A figura I6.1 ilustra melhor a representação.



REPRESENTAÇÃO SIMBÓLICA DE UMA ONDA POR SUPERPOSIÇÃO DE GRAUS
FIGURA I 6.1

Considerando então a aplicação de um de grau no início de uma linha de transmissão, deve-se a agora proceder ao cálculo de sua resposta (forma e amplitude) em um ponto situado a uma distância " x ", do terminal onde foi aplicado.

A transformada de Fourier para um degrau unitário é $(\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega})$, e levando-se tal valor na equação I6.1, tem-se a transformada de Fourier da onda num ponto x , como:

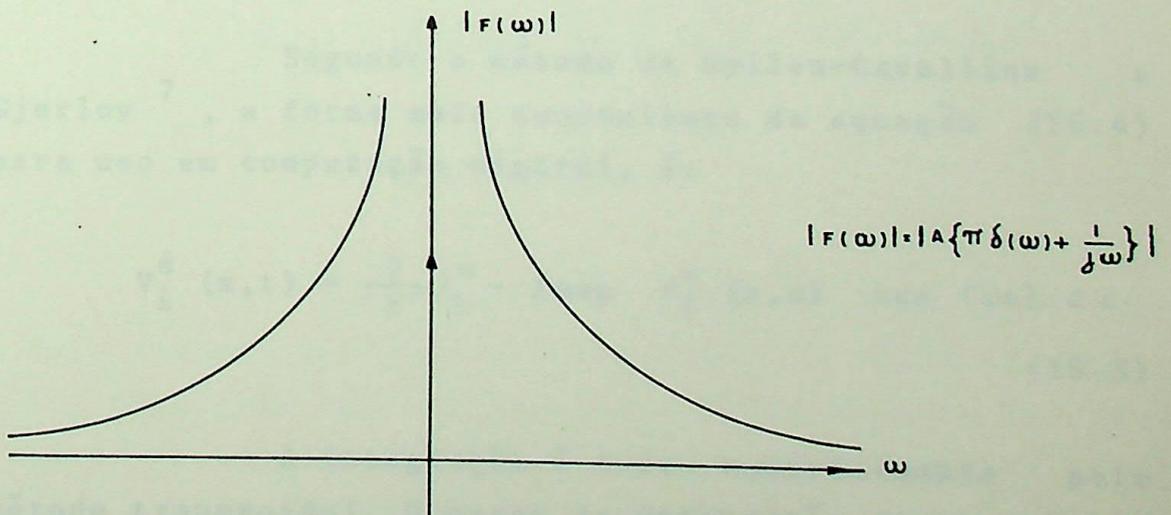
$$V_i^c(x, \omega) = \left(\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right) e^{-\gamma_i x} \quad (I6.2)$$

Desde que a onda degrau leva um tempo para alcançar o ponto "x" é conveniente introduzir um tempo de retardo $e^{j\omega T}$ na equação (I6.2), resultando:

$$\begin{aligned} V_i^c(x, \omega) &= \left(\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right) e^{j\omega T} e^{-\gamma_i x} \\ &= \left(\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \right) e^{(j\omega T - \gamma_i x)} \end{aligned} \quad (I6.3)$$

A resposta ao degrau no domínio do tempo pode ser encontrada fazendo a transformada inversa de Fourier da equação (I6.3). Antes porém é conveniente fazer uma análise do espectro de frequência da transformada de Fourier do degrau, o qual se encontra plotado na figura I6.2.

Nota-se da figura - I6.2 que as componentes de mais alta frequência possuem menor amplitude, e a medida que a frequência tende para infinito a amplitude dos componentes tendem para zero.



ESPECTRO DE FREQUENCIA DA TRANSFORMADA
DE FOURIER DE UM DEGRAU
FIGURA I6.2

Voltando a seção anterior ou mais especificamente à tabela da figura I5.2, vê-se que a velocidade de propagação aumenta com o aumento da frequência e tende para a velocidade da luz no vácuo, quando a frequência tende para infinito. Conclui-se então que o primeiro componente da resposta ao degrau a chegar no ponto "x" tem amplitude zero e velocidade de propagação igual a da luz no vácuo. A tensão no ponto "x" a partir deste instante crescerá assintoticamente com o tempo. Em termos mais exatos isto equivale a dizer que a onda ao se propagar sofre além da atenuação, também distorção.

A transformada inversa de Fourier é então obtida levando a equação (I6.3) em (I2.4):

$$\begin{aligned} V_i^c(x, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_i^c(x, \omega) e^{j\omega t} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega}) e^{(j\omega T - \gamma_i x)} \\ &\quad \cdot e^{j\omega t} \cdot d\omega \end{aligned} \quad (I6.4)$$

Segundo o método de Hyllén-Cavallins e Gjerlov⁷, a forma mais conveniente da equação (I6.4) para uso em computação digital, é:

$$V_i^c(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} -\text{Imag} V_i^c(x, \omega) \text{sen}(\omega t) d\omega \quad (I6.5)$$

A integração é feita numericamente pelo método trapezoidal. O passo de integração deve ser pequeno, normalmente de 2 a 5 Hz, os valores de γ_i são calculados para dez ou mesmo vinte frequências, e os valores intermediários são obtidos por interpolação li

near com o logarítimo da frequência.

Como o passo de integração é pequeno, não é possível realizar a integração para um espectro de frequência infinito, devido ao esforço computacional exigido, tanto de tempo de computação quanto de área na memória.

O fato de truncar o espectro em uma frequência angular " Ω ", faz com que na resposta temporal apareçam oscilações como as da figura I6.3, também conhecidas como oscilações de Gibbs.

A fim de melhorar a convergência da integral um fator " σ " é introduzido na integral (I6.5). Este fator é dado pela referência 6, como:

$$\sigma = \frac{\text{sen} \left(\frac{\pi\omega}{\Omega} \right)}{\left(\frac{\pi\omega}{\Omega} \right)} \quad (\text{I6.6})$$

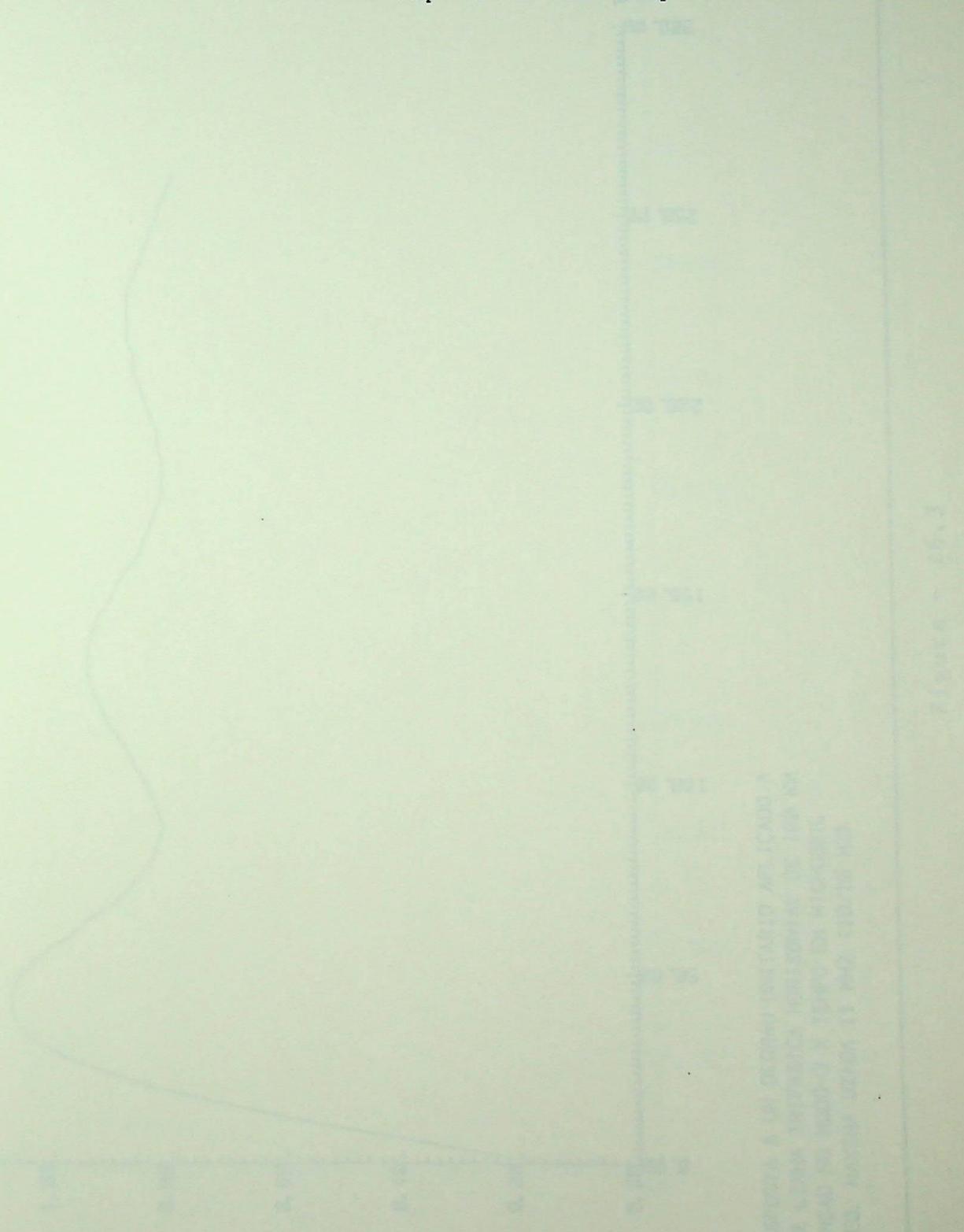
A integral (I6.5) é então redefinida, como:

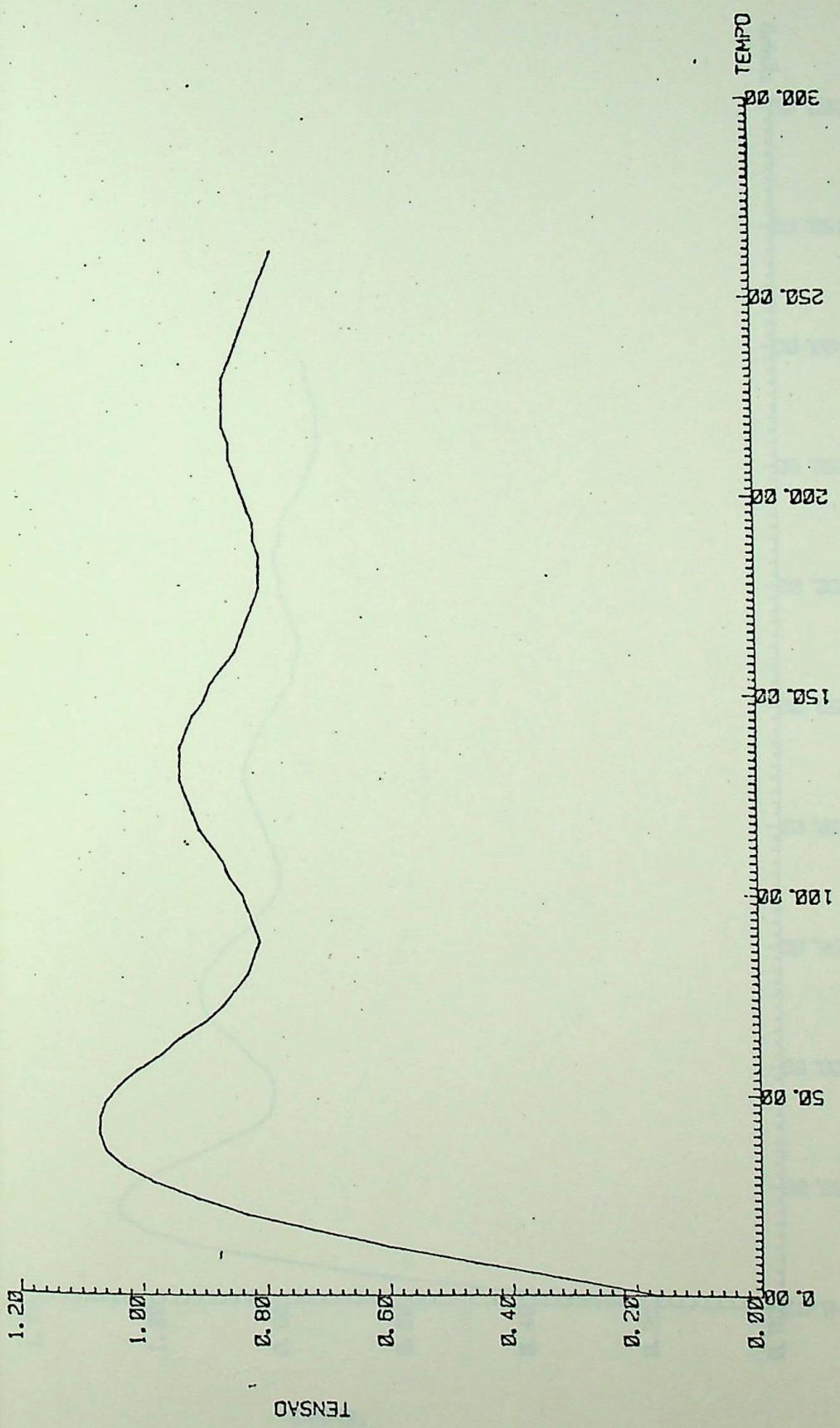
$$V_i^c(x, t) = \int_0^{\Omega} e^{-\text{Imag}(j\omega T - \gamma x)} \frac{\text{sen} \left(\frac{\pi\omega}{\Omega} \right)}{j\omega} \cdot \text{sen}(\omega t) d\omega \quad (\text{I6.7})$$

Com respeito ao valor Ω a ser utilizado dois parametros devem ser avaliados. O primeiro deles é a amplitude das componentes a serem desprezadas. Quando se trunca o espectro em valores relativamente baixos, as componentes de mais alta velocidade são desprezadas, logo se suas amplitudes não forem relativamente baixas, a taxa de crescimento da resposta cai comprometendo o resultado. O segundo é a atenuação que quando muito grande permite truncar o espectro em valores mais

baixos. Aconselha-se que a integração seja feita até uma frequência tal que produza uma atenuação de 75 dB.

Para se ter uma melhor ideia destes efeitos as figuras a seguir mostram as respostas temporais obtidas utilizando espectros de frequência diferentes.





RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO NO MODO-3 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MÁXIMA USADA 11 KHZ (10/10 HZ)

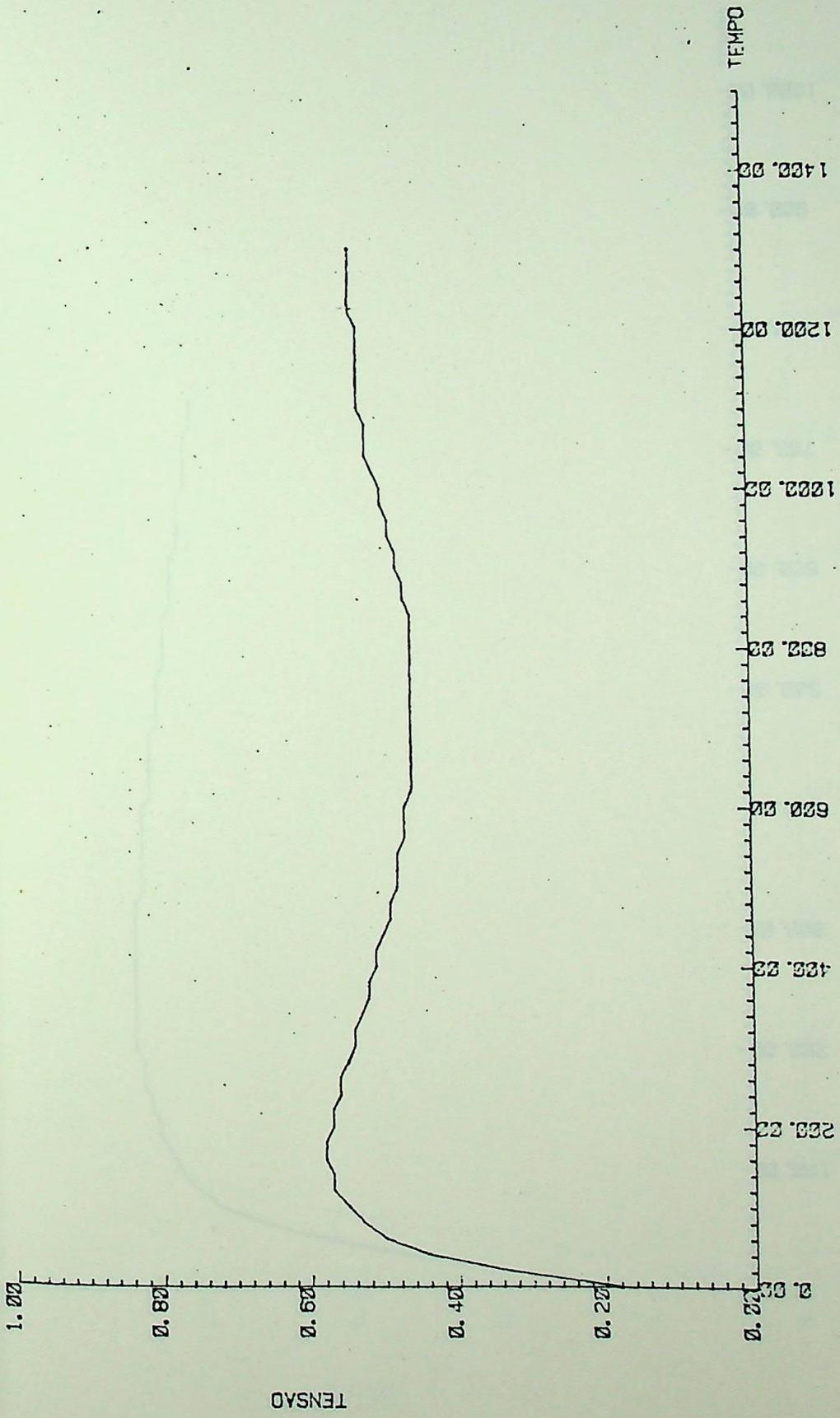
Figura - I6.3





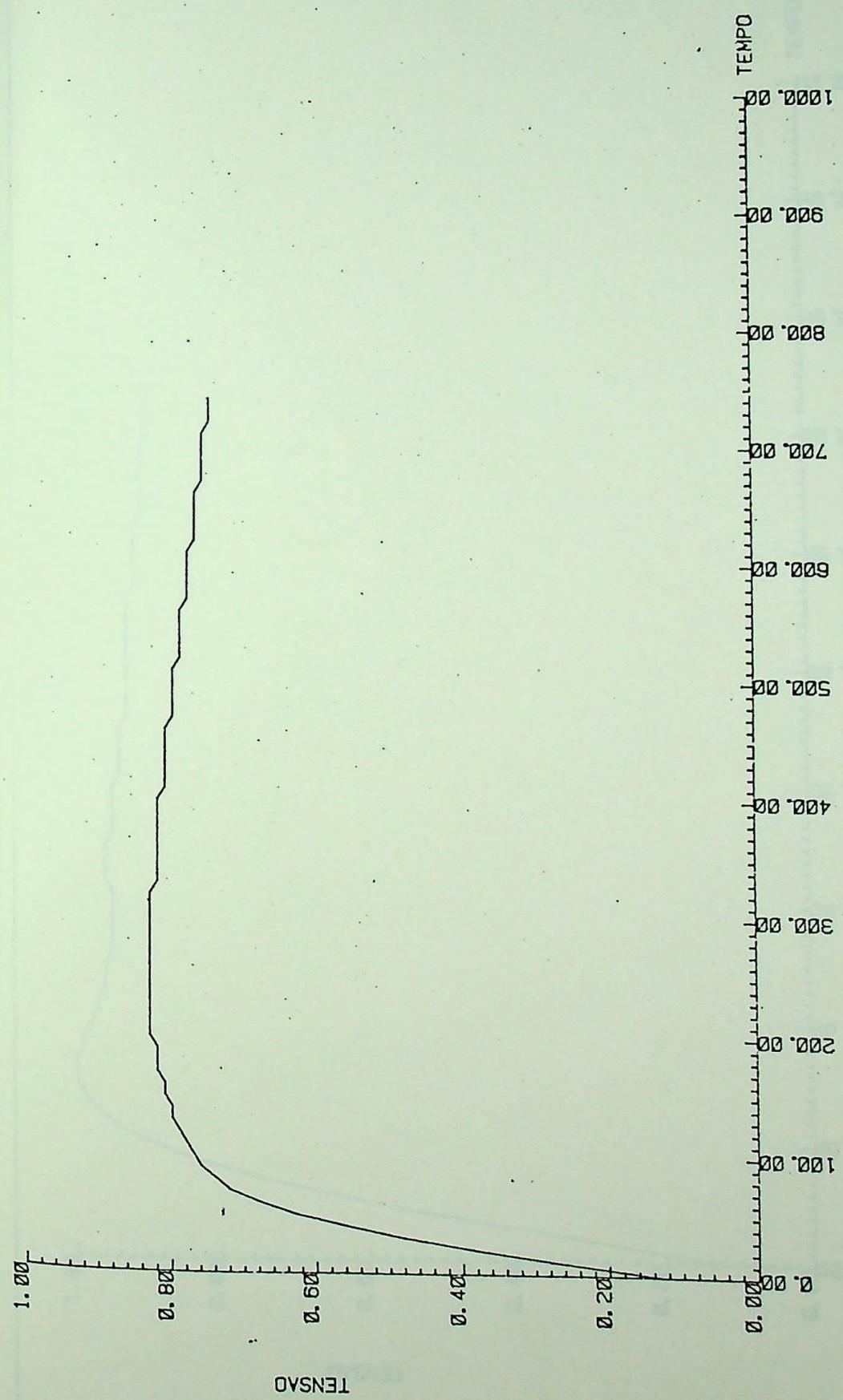
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO NO MODO-2 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MAXIMA UZADA 11 KHZ (10/10 HZ)

Figura - I6.4



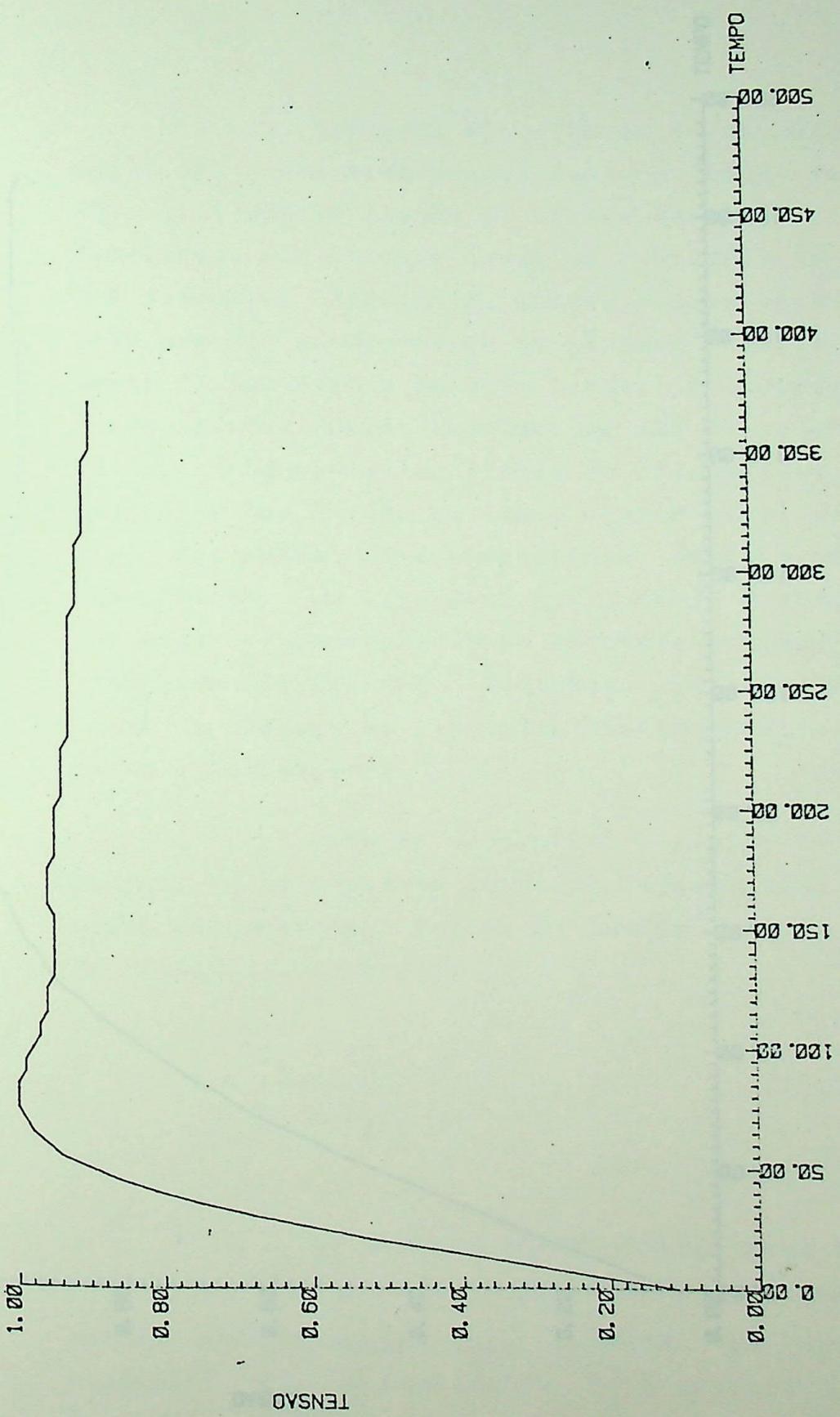
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-1 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MAXIMA UTILIZADA 11 KHZ (10/10 HZ)

Figura I6.5



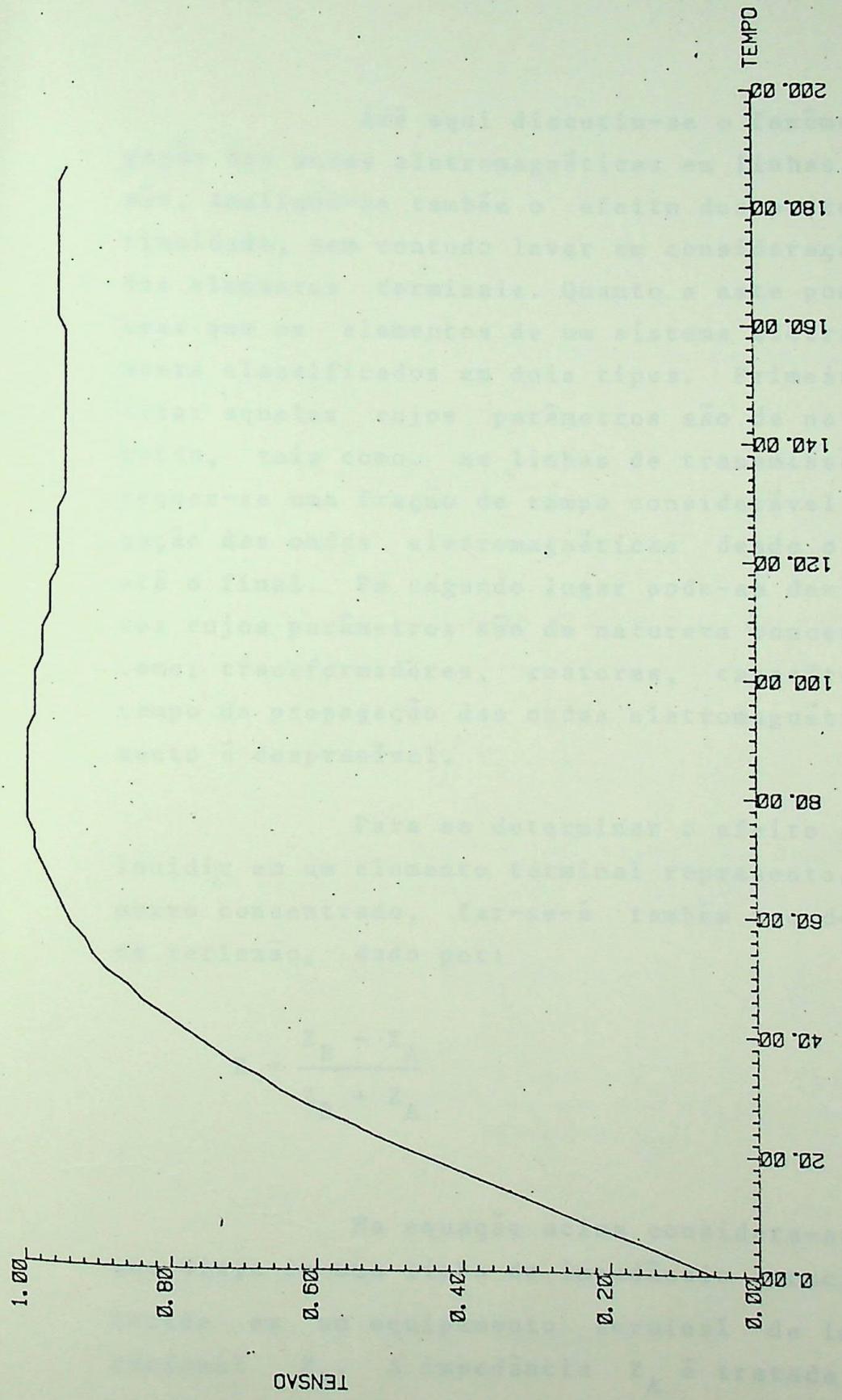
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA DE 230 KV COM 100 KM
TENSÃO DO MODO-1 X TEMPO EM MICROSEG.
FAIXA DE FREQ. 9 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - I6.6



RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA DE 230 KV COM 100 KM
TENSÃO DO MODO-2 X TEMPO EM MICROSEG.
FAIXA DE FREQ. 9 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - I6.7.



RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA DE 230 KV COM 100 KM
TENSÃO DO MODO-3 X TEMPO EM MICROSEG.
FAIXA DE FREQ. 9 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - I6.8

I.7 - ANÁLISE DAS TERMINAÇÕES EM ELEMENTOS A PARÂMETROS CONCENTRADOS

Até aqui discutiu-se o fenômeno da propagação das ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão. Analisou-se também o efeito dos pontos de descontinuidade, sem contudo levar em consideração a natureza dos elementos terminais. Quanto a este ponto vale lembrar que os elementos de um sistema elétrico são normalmente classificados em dois tipos. Primeiramente pode-se citar aqueles cujos parâmetros são de natureza distribuída, tais como, as linhas de transmissão. Neste caso requer-se uma fração de tempo considerável para a propagação das ondas eletromagnéticas desde o seu início até o final. Em segundo lugar pode-se destacar os elementos cujos parâmetros são de natureza concentrada, tais como; transformadores, reatores, capacitores. Nestes o tempo de propagação das ondas eletromagnéticas, no elemento é desprezível.

Para se determinar o efeito de uma onda ao incidir em um elemento terminal representado por um parâmetro concentrado, far-se-á também uso do coeficiente de reflexão, dado por:

$$K = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \quad (I7.1)$$

Na equação acima considera-se que uma onda que viaja em uma linha de impedância característica Z_A incide em um equipamento terminal de impedância operacional Z_B . A impedância Z_A é tratada como uma re

sistência independente da frequência angular ω .

Suponha agora que o equipamento terminal seja um capacitor de capacitância C , então:

$$Z_B(\omega) = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{pC} \quad (I7.2)$$

onde,

$$p = j\omega \quad (I7.3)$$

O coeficiente de reflexão pode então ser obtido como:

$$K = \frac{1/pC - Z_A}{1/pC + Z_A} \quad (I7.4)$$

Tomando a onda incidente como um degrau de amplitude v_D , cuja transformada de Fourier é dada por:

$$V_1(\omega) = \pi\delta_0(\omega) + \frac{1}{j\omega}$$

A onda refletida (no domínio da frequência) será expressa por:

$$V_R(\omega) = K V_1(\omega) \quad \text{ou}$$

$$V_R(\omega) = V_1(\omega) \frac{(1/pC - Z_A)}{(1/pC + Z_A)} = V_1(\omega) \frac{(1/CZ_A - p)}{(1/CZ_A + p)} \quad (I7.5)$$

Lembrando que Z_A tem dimensão de resistência, então $C_1 Z_A$ é interpretada como uma constante de tempo, portanto fazendo:

$$\tau = \frac{1}{CZ_A} \quad (I7.6)$$

Levando esta ultima expressão em (I7.5) e rescrevendo tem-se:

$$V_{1R}(\omega) = V_D \left(\pi\delta_0(\omega) + \frac{1}{p} \right) - V_D \frac{2}{p+\tau} \quad (I7.7)$$

cuja transformada inversa, pode ser facilmente encontrada, como:

$$v_R(t) = v_D (1 - 2e^{-\tau t}) \quad (I7.8)$$

Esta é a equação da onda que irá retornar pela linha (onda refletida), e se superpor a onda incidente para estabelecer a tensão ao longo da linha, que será dada por:

$$v(t) = v_D(t) + v_R(t)$$

$$v(t) = v_D + v_D (1 - 2e^{-\tau t}) \text{ ou}$$

$$v(t) = 2v_D (1 - e^{-\tau t}) \quad (I7.9)$$

Na figura - I7.1 pode-se visualizar melhor o fenômeno, para o caso de uma terminação em capacitor.

ILUSTRAÇÃO DE UMA ONDA DE SE PROPAGA EM UMA LT TERMINADA EM UM CAPACITOR. (a) (b) (c) POSIÇÃO DA ONDA EM DIFERENTES INSTANTES. (d) TENSÃO NO TERMINAL EM FUNÇÃO DO TEMPO, APÓS A CHEGADA DA ONDA INCIDENTE.

FIGURA I7.1

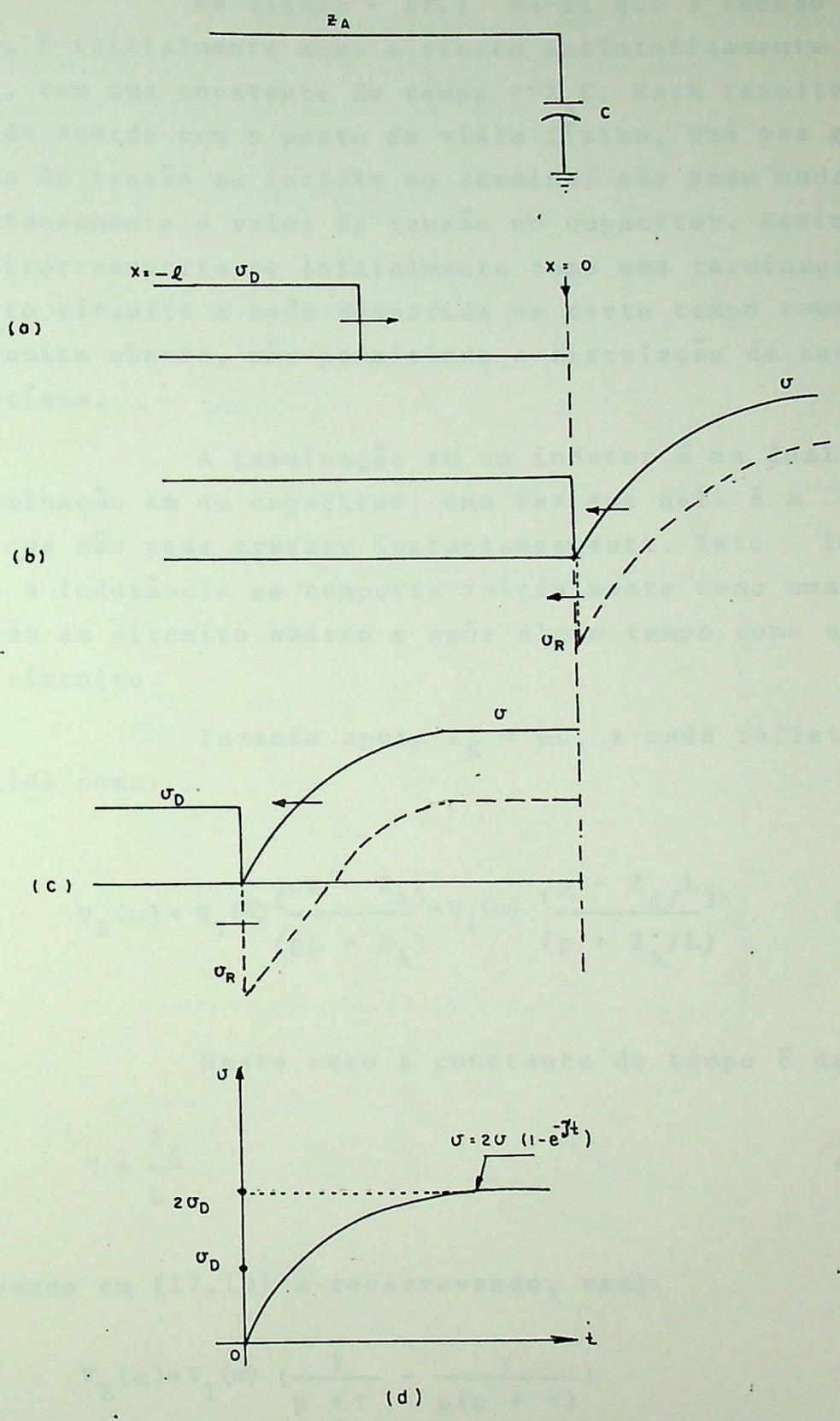


ILUSTRAÇÃO DE UMA ONDA QUE SE PROPAGA EM UMA LT TERMINADA EM UM CAPACITOR. (a) (b) e (c) DISPOSIÇÃO DA ONDA EM DIFERENTES INSTANTES, (d) TENSÃO NO TERMINAL EM FUNÇÃO DO TEMPO, APÓS A CHEGADA DA ONDA INCIDENTE

FIGURA 17.1

Na figura - I7.1 vê-se que a tensão terminal, é inicialmente zero e cresce assintoticamente para $2v_D$, com uma constante de tempo $\tau = Z_A C$. Este resultado está de acordo com o ponto de vista físico, uma vez que a onda de tensão ao incidir no terminal não pode mudar instantaneamente o valor da tensão no capacitor. Assim o capacitor comporta-se inicialmente como uma terminação em curto circuito e após decorrido um certo tempo como um circuito aberto, não permitindo a circulação de corrente contínua.

A terminação em um indutor é um dual da terminação em um capacitor, uma vez que nela é a corrente que não pode crescer instantaneamente. Isto implica que a indutância se comporta inicialmente como uma terminação em circuito aberto e após algum tempo como um curto circuito.

Fazendo agora $Z_B = pL$, a onda refletida é obtida como:

$$V_R(\omega) = V_1(\omega) \frac{(pL - Z_A)}{(pL + Z_A)} = V_1(\omega) \frac{(p - Z_A/L)}{(p + Z_A/L)} \quad (I7.10)$$

Neste caso a constante de tempo é dada por:

$$\tau = \frac{Z_A}{L} \quad (I7.11)$$

levando em (I7.10) e reescrevendo, vem:

$$V_R(\omega) = V_1(\omega) \left(\frac{1}{p + \tau} - \frac{\tau}{p(p + \tau)} \right) \quad (I7.12)$$

A transformada inversa, resulta em:

$$v_R(t) = -v_D (1 - 2e^{-\tau t}) \quad (I7.13)$$

A tensão terminal e que se estabelecerá ao longo da linha, é então encontrada como sendo a soma das ondas incidente e refletida, assim:

$$v(t) = v_D(t) + v_R(t)$$

$$v(t) = v_D - v_D(1 - 2e^{-\tau t})$$

$$v(t) = 2v_D e^{-\tau t} \tag{I7.14}$$

A figura - I7.2 ilustra o caso analisado acima.

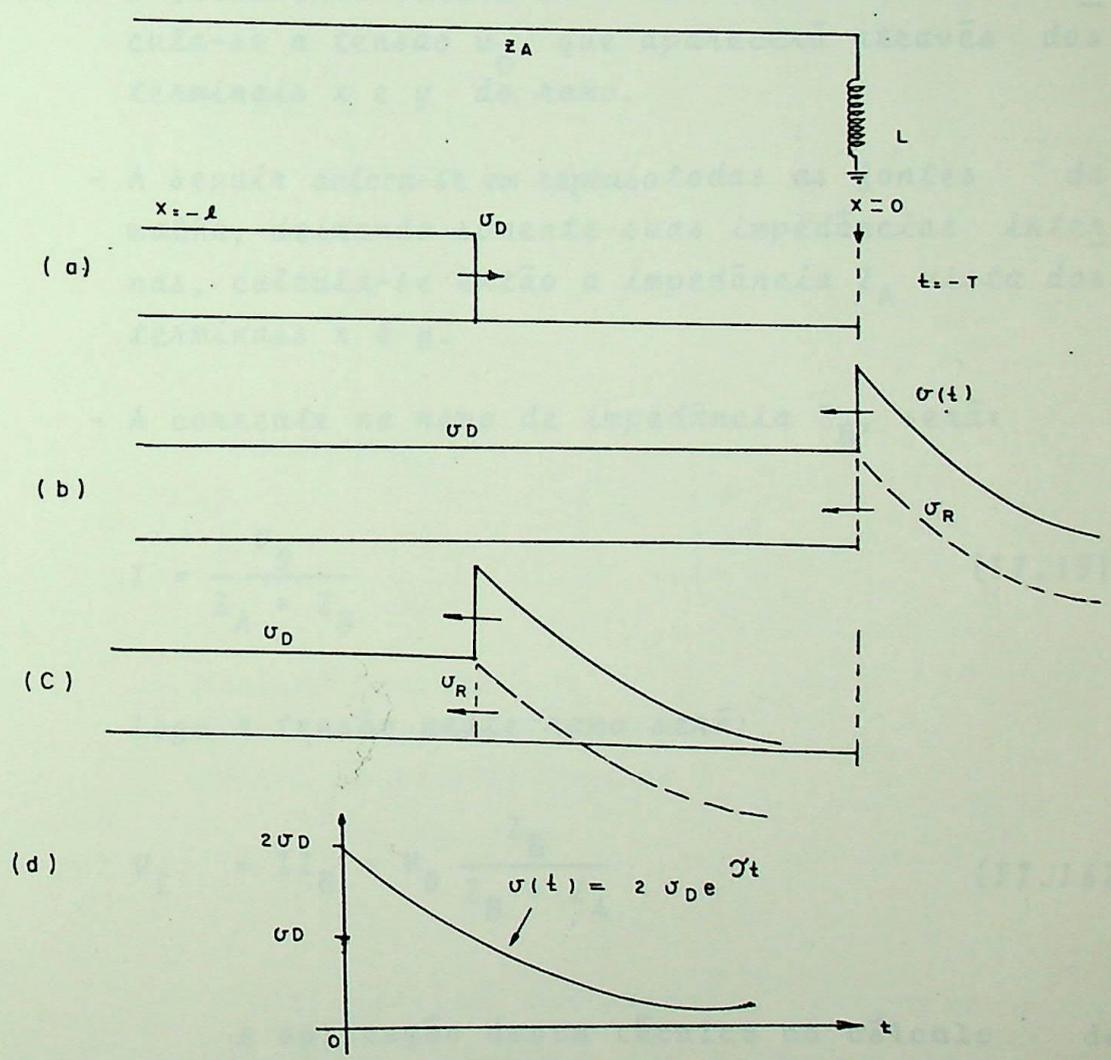


ILUSTRAÇÃO DE UMA ONDA QUE SE PROPAGA EM UMA L T TERMINADA EM UM ÍNDUTOR (a) (b) e (c) DISPOSIÇÃO DA ONDA EM DIFERENTES INSTANTES, (d) TENSÃO NO TERMINAL EM FUNÇÃO DO TEMPO APÓS A CHEGADA DA ONDA INCIDENTE

FIGURA 17.2

Outras configurações terminais podem ser encontradas em Bewley ¹¹.

Uma outra técnica que será bastante útil no cálculo de tensões terminais é a utilização do circuito equivalente obtido pela aplicação do teorema de Thevenin.

Uma das versões deste teorema diz que, para calcular a corrente que flui em um determinado ramo de impedância Z_B de um circuito, deve-se proceder da seguinte maneira:

- Inicialmente retira-se o ramo do circuito e calcula-se a tensão v_0 , que aparecerá através dos terminais x e y do ramo.
- A seguir coloca-se em repouso todas as fontes da malha, deixando somente suas impedâncias internas, calcula-se então a impedância Z_A vista dos terminais x e y .
- A corrente no ramo de impedância Z_B , será:

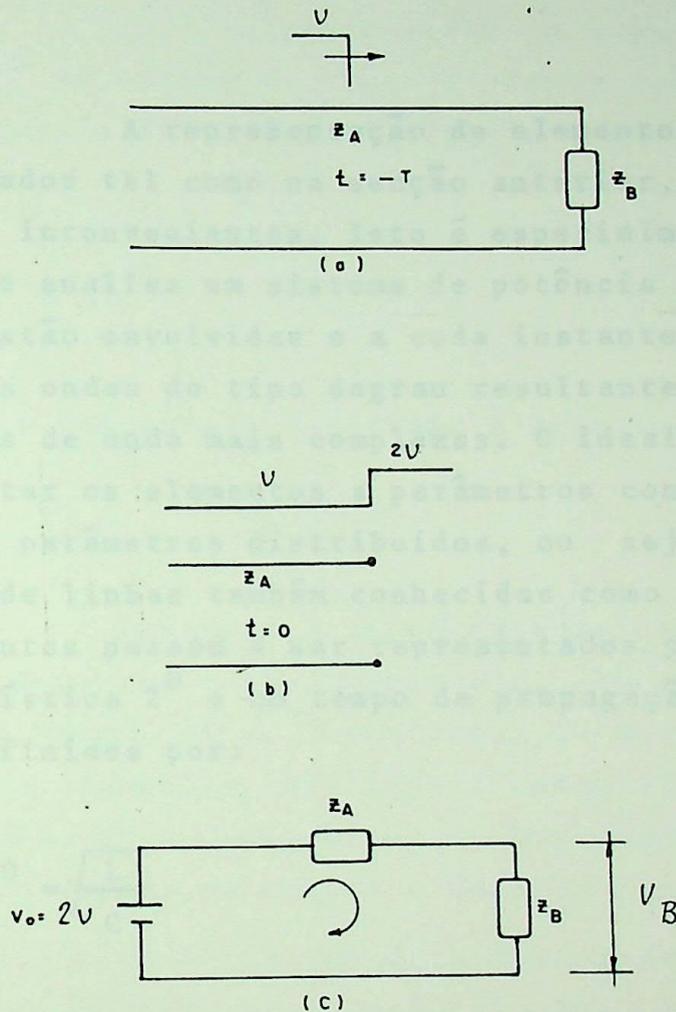
$$I = \frac{V_0}{Z_A + Z_B} \tag{17.15}$$

Logo a tensão neste ramo será:

$$V_L = I Z_B = V_0 \frac{Z_B}{Z_B + Z_A} \tag{17.16}$$

A aplicação desta técnica no cálculo de tensões terminais resultantes da incidência de ondas viajantes é tal como descrita acima. Remove-se a impedância Z_B do elemento em questão, calcula-se a tensão terminal

e a impedância Z_A vista através dele, leva-se então estes valores em (I7.16) e obtém-se a tensão terminal. A figura - I7.3 mostra uma aplicação deste teorema ao sistema indicado na figura - I7.3.



- a) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO
- b) CIRCUITO PARA CALCULO DO EQUIVALENTE
- c) CIRCUITO EQUIVALENTE THEVENIN

FIGURA - I7.3

Esta técnica tem especial interesse quando se trata de elementos terminais não lineares, tais como, pára-raios, transformadores e outros - O envolvimento de elementos não lineares voltará a ser analisado na parte II.

I.8 - APROXIMAÇÃO DE ELEMENTOS A PARÂMETROS
CONCENTRADOS POR SECÇÕES DE LINHAS
(Stub line)

A representação de elementos a parâmetros concentrados tal como na secção anterior, apresenta uma série de inconvenientes. Isto é especialmente verdadeiro quando se analisa um sistema de potência onde várias terminações estão envolvidas e a cada instante incide nestes terminais ondas do tipo degrau resultante da decomposição de formas de onda mais complexas. O ideal nestes casos é representar os elementos a parâmetros concentrados por elementos a parâmetros distribuídos, ou seja, por pequenas secções de linhas também conhecidas como "Stub line". Assim os elementos passam a ser representados por uma impedância característica Z^0 e um tempo de propagação correspondente a θ , definidos por:

$$Z^0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{I8.1}$$

$$\theta = \sqrt{LC} \tag{I8.2}$$

Onde L e C representam a indutância e a capacitância da secção de linha. O valor do tempo de propagação (dado por θ) será analisado posteriormente.

Para se representar um indutor, a indutância "L" da secção de linha é tomada como sendo a própria indutância do indutor. Neste caso substituindo-se, "C" de (I8.2) em (I8.1), tem-se:

$$Z^0 = \frac{L}{\theta} \tag{I8.3}$$



E a capacitância da secção é então dada por:

$$C = \frac{\theta}{Z^0} \quad (18.4)$$

Para se representar um capacitor, a capacitância "C" da secção de linha é tomada como sendo a própria capacitância do capacitor, logo a impedância de surto é dada por:

$$Z^0 = \frac{\theta}{C} \quad (18.5)$$

E a indutância associada à secção de linha, será então:

$$L = \theta Z^0 \quad (18.6)$$

Para que a representação seja precisa o valor de θ deve ser bastante pequeno. Em geral θ é tomado de tal forma que as impedâncias de surto da secção de linha para elementos indutivos e capacitivos seja respectivamente dez vezes e um décimo da impedância de surto equivalente a todos os outros elementos conectados a barra.

Esta condição em muitos casos é obtida reduzindo o intervalo de tempo básico, usado nos cálculos, o que aumenta o tempo de computação. Em alguns desses casos é possível trocar o fator 10 por 6 sem grandes perdas na precisão.

O indutor "Shunt" é simulado aterrando o terminal remoto da secção de linha que o representa. Para o caso de um capacitor "Shunt" a terminação da secção é mantida aberta. O indutor série é representado de maneira similar, mas como ele está ligando dois elementos em série, seus terminais são conectados aos terminais destes elementos, tal como dispostos fisicamente. O capacitor série apresenta certa dificuldade para sua re

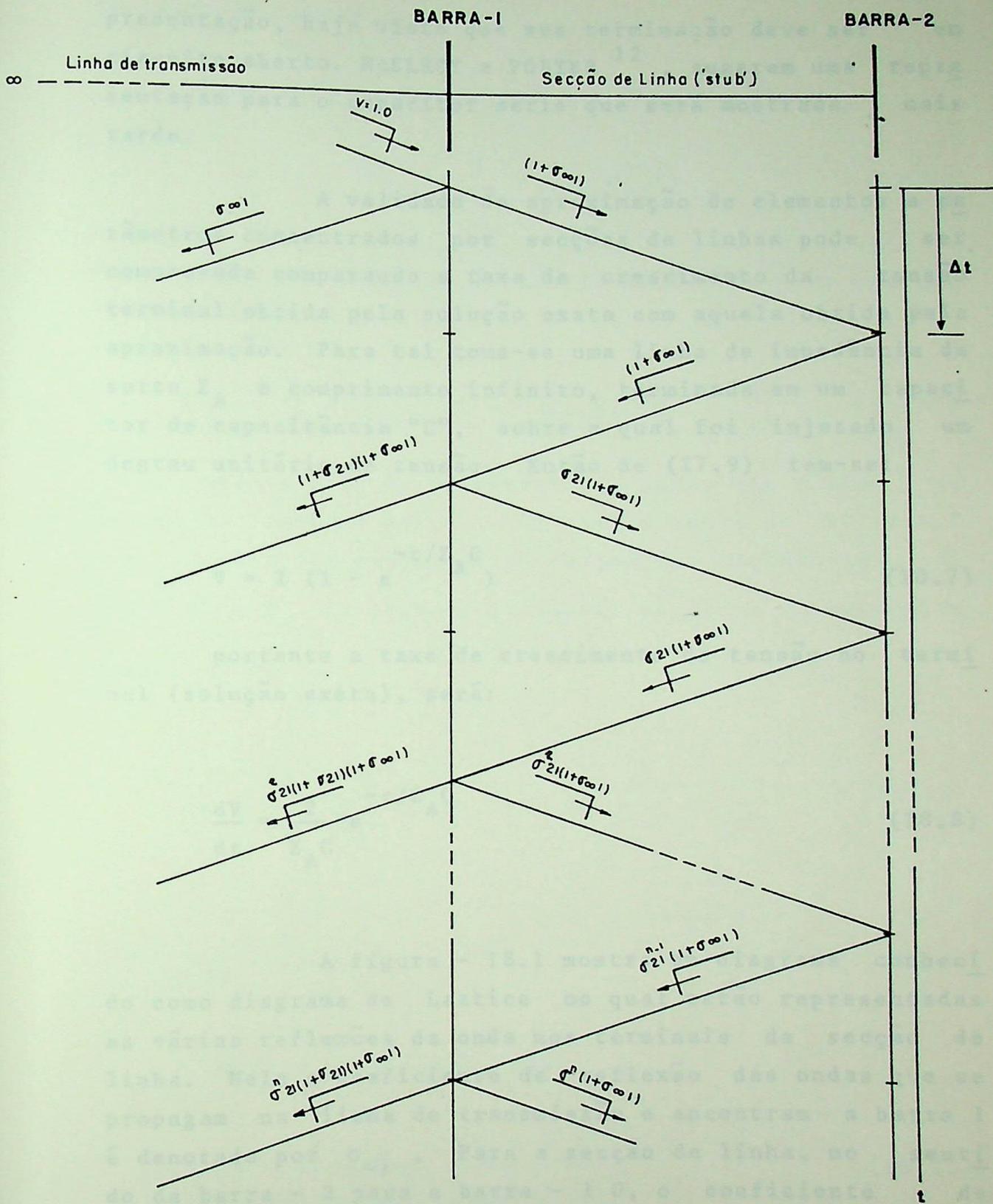


DIAGRAMA DE LATTICE
FIGURA-1 B.1

apresentação, haja visto que sua terminação deve ser em circuito aberto. McELROY e PORTER¹², sugerem uma representação para o capacitor série que será mostrada mais tarde.

A validade da aproximação de elementos a parâmetros concentrados por secções de linhas pode ser comprovada comparando a taxa de crescimento da tensão terminal obtida pela solução exata com aquela obtida pela aproximação. Para tal toma-se uma linha de impedância de surto Z_A e comprimento infinito, terminada em um capacitor de capacitância "C", sobre a qual foi injetado um degrau unitário de tensão. Então de (I7.9) tem-se:

$$V = 2 \left(1 - e^{-t/Z_A C} \right) \quad (I8.7)$$

portanto a taxa de crescimento da tensão no terminal (solução exata), será:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2}{Z_A C} e^{-t/Z_A C} \quad (I8.8)$$

A figura - I8.1 mostra um diagrama conhecido como diagrama de Lattice no qual estão representadas as várias reflexões da onda nos terminais da secção de linha. Nela o coeficiente de reflexão das ondas que se propagam na linha de transmissão e encontram a barra 1 é denotado por $\sigma_{\infty 1}$. Para a secção de linha, no sentido da barra - 2 para a barra - 1 0, o coeficiente de reflexão é σ_{21} .

A tensão na barra - 1 após decorrido um tempo igual a $n \Delta t$ será igual a soma das tensões de todas as ondas que incidiram e refletiram no terminal até es

te instante, ou seja:

$$V_1 = (1 + \sigma_{\infty 1}) + (1 + \sigma_{\infty 1})(1 + \sigma_{21}) + (1 + \sigma_{21} + \sigma_{21}^2 + \dots + \sigma_{21}^{n-1}) \quad (18.9)$$

A variação de tensão produzida pela m -ésima reflexão é, dada por:

$$\Delta V_1 = (1 + \sigma_{\infty 1})(1 + \sigma_{21})\sigma_{21}^{m-1} \quad (18.10)$$

onde m é nº de reflexões das ondas que viajam na secção de linha na barra 1. Os coeficientes de reflexão 1 e σ_{21} podem ser expressos em termos das impedâncias de surto Z_A e Z_B da linha e da secção de linha respectivamente, como:

$$\sigma_{\infty 1} = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \quad (18.11)$$

$$\sigma_{21} = \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (18.12)$$

Levando em (18.10), vem:

$$\Delta V = \frac{4 Z_A Z_B}{(Z_A + Z_B)^2} \frac{(Z_A - Z_B)^{m-1}}{(Z_A + Z_B)^{m-1}} \quad (18.13)$$

O tempo associado a variação de tensão ΔV é duas vezes o tempo de viagem da onda na secção de linha, ou seja $\Delta t = 2\theta$, logo a taxa de crescimento da tensão será dada por:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{2Z_A Z_B}{\theta(Z_A + Z_B)^2} \frac{(Z_A - Z_B)^{m-1}}{(Z_A + Z_B)} \quad (I8.14)$$

mas de (I8.4) $\theta = Z_B C$, então:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{2 Z_A}{C(Z_A + Z_B)} \frac{(Z_A - Z_B)^{m-1}}{(Z_A + Z_B)} \quad (I8.15)$$

Tomando o limite quando Δt tende para zero, e estando atento para o fato de que $K = t/2\theta$ e $\theta = Z_B C$, tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \lim_{Z_B \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (I8.16)$$

então de (I8.15), vem:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \lim_{Z_B \rightarrow 0} \frac{2Z_A}{C(Z_A + Z_B)} \frac{(Z_A - Z_B)^{t/2Z_B C - 1}}{(Z_A + Z_B)} \quad (I8.17)$$

Como o limite de um produto é o produto dos limites, a expressão (I8.17) é dividida em duas partes, a primeira como:

$$\lim_{Z_B \rightarrow 0} \frac{2Z_A}{C(Z_A + Z_B)^2} = \frac{2}{Z_A C} \quad (I8.18)$$

e a segunda como:

$$\lim_{Z_B \rightarrow 0} \frac{(Z_A - Z_B)^{t/2Z_B C - 1}}{(Z_A + Z_B)} = e^{\frac{-t}{Z_A C}} \quad (I8.19)$$

então finalmente, tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Z}{Z_A C} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (18.20)$$

Comparando (18.20) com (18.8) vê-se que a representação de um elemento a parametro concentrado por uma secção de linha tende para a solução exata à medida que se diminui o tempo de propagação da onda na secção de linha ($\theta \rightarrow 0$).

Este estudo é de natureza extensiva ao sistema, causado por descargas atmosféricas. O segundo de natureza interna, tem sua origem nas operações de chaveamento. Ambas as fontes de perturbação são supridas por meios de transmissão de onda que se propagam pelo sistema. As operações de chaveamento, desenvolvidas nos sistemas de transmissão de energia elétrica, quando realizadas, produzem perturbações de natureza interna.

Na operação de abertura de um disjuntor, de natureza interromper o fluxo de corrente com determinada tensão de sistema elétrica de potência. Esta interrupção ocorre normalmente no instante em que a corrente passa por zero e conseqüentemente uma tensão aparece entre os contatos do disjuntor. Em circuitos com baixa fator de potência, como é o caso de um sistema em curto circuito, esta tensão pode, por um período muito curto alcançar valores excessivamente elevados quando comparados com a tensão nominal do sistema. Esta tensão que aparece como conseqüência da interrupção de corrente é conhecida como tensão de restabelecimento transitória. Tem-se seu valor de pico como a taxa de crescimento, para alcançar este valor de pico, tem considerável influência no dimensionamento dos disjuntores.

O fenômeno de interrupção é ilustrado pela figura - 19.1. Quando o disjuntor inicia o processo mecânico

I.9 - OPERAÇÃO DE CHAVEAMENTO

A propagação de onda eletromagnética foi amplamente discutida nas seções anteriores, sem contudo se analisar a sua origem. Basicamente dois fenômenos são apontados como origem dos transitórios eletromagnéticos. O primeiro deles é de natureza externa ao sistema, causados por descargas atmosféricas. O segundo de natureza interna, tem sua origem nas operações de chaveamento. Ambos os fenômenos geram ondas eletromagnéticas que ao viajarem pelo sistema provocam sobretensões generalizadas. Esta seção tratará das operações de chaveamento, desenvolvendo modelos capazes de simular tanto a abertura de disjuntores, quanto o fechamento.

Na operação de abertura de um disjuntor, deseja-se interromper o fluxo de corrente num determinado ramo do sistema elétrico de potência. Esta interrupção ocorre normalmente no instante em que a corrente passa por zero e conseqüentemente uma tensão aparecerá entre os contatos do disjuntor. Em circuitos com baixo fator de potência, como é o caso de um sistema em curto circuito, esta tensão pode, por um período muito curto alcançar valores excessivamente elevados quando comparados com a tensão nominal do sistema. Esta tensão que aparece como consequência da interrupção da corrente é conhecida como tensão de restabelecimento transitória. Tanto seu valor de pico como a taxa de crescimento, para alcançar este valor de pico, tem considerável influência no desempenho dos disjuntores.

O fenômeno da interrupção é ilustrado pela figura - I9.1. Quando o disjuntor inicia o processo mecânico

co de abertura, um arco aparecerá entre seus contatos , ponto "A" da figura-I9.1. O arco provoca uma queda de tensão "Ea", porém esta é pequena quando comparada com a tensão do sistema sendo normalmente desprezada nos cálculos. O arco continua até que a corrente "I" seja insuficiente para se manter, isto ocorre quando esta corrente, que é senoidal, passa por zero. Neste ponto o arco se extingue e a tensão de restabelecimento transitória "E_R" aparece através dos contatos do disjuntor.

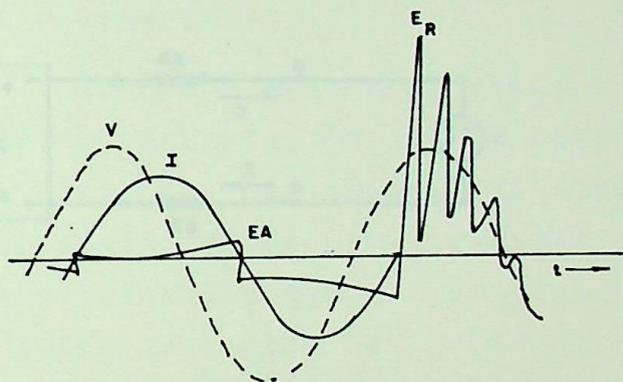
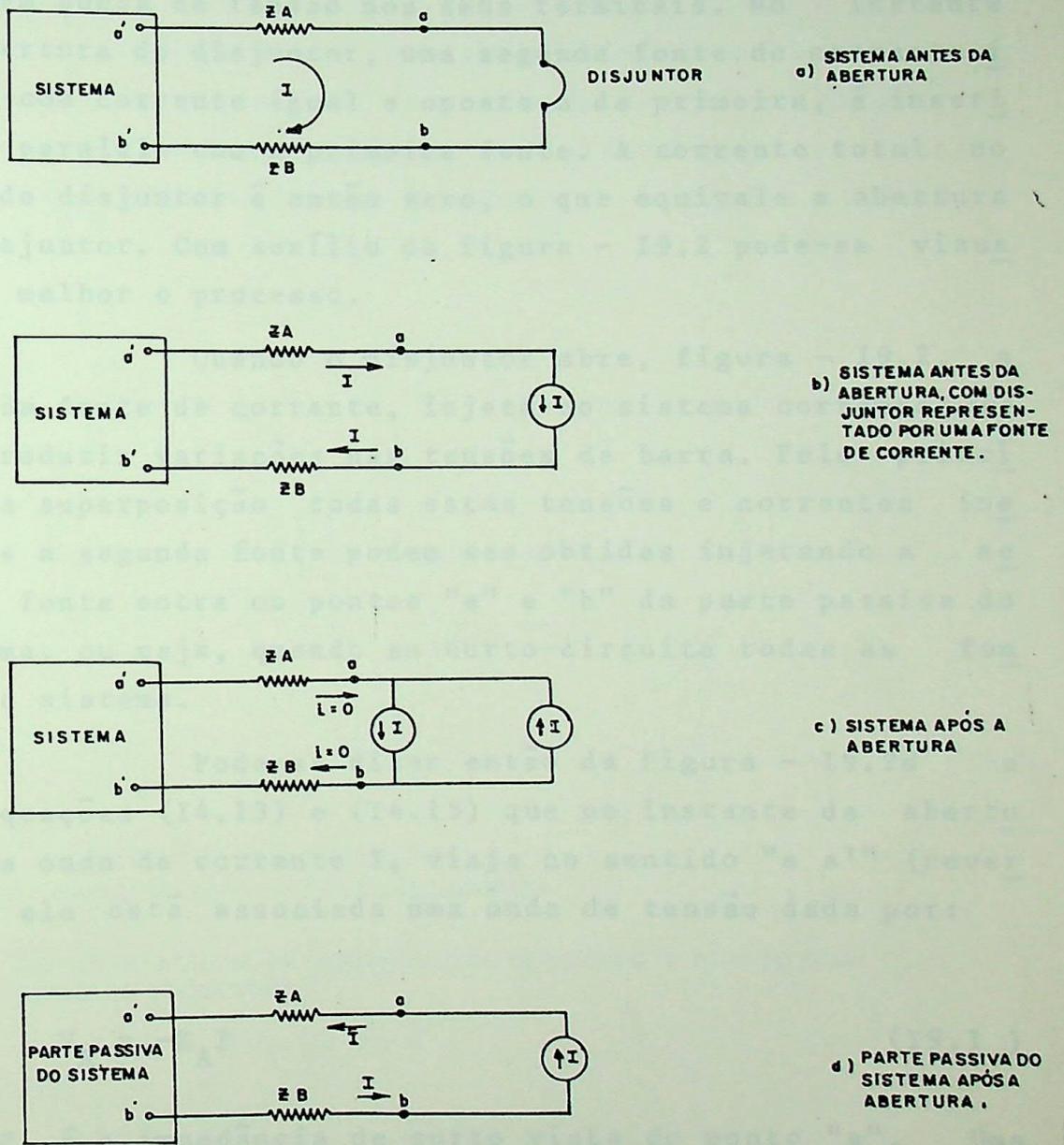


Ilustração do fenômeno da interrupção de corrente

FIGURA - I9.1

Para que a interrupção tenha sucesso, a taxa de crescimento da rigidez dielétrica entre os contatos do disjuntor deve ser maior que a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória, e o valor de pico desta tensão não deve exceder a tensão de ruptura do dielétrico. Se estas condições não forem satisfeitas haverá a reignição do arco e a interrupção ocorrerá algum tempo depois, ou não ocorrerá mais, com consequência danosas para o disjuntor e outros equipamentos do sistema.

O método mais usual para o cálculo da tensão de restabelecimento transitória, e de maneira mais geral, de tensões transitórias no sistema devido a abertura de disjuntores é o "método de injeção de corrente".



SEQÜENCIA UTILIZADA NA APLICACO DO PRINCPIO DE INJECCO DE CORRENTE

FIGURA I9.2

Neste método a corrente que flui no disjuntor, bem como as tensões nas barras do sistema são calculados a priori. O disjuntor é então removido do sistema e uma fonte de corrente ideal, tendo o mesmo valor de corrente que flui no disjuntor no instante da abertura, ocupa o seu lugar. Esta troca é válida já que tanto a fonte de corrente ideal quanto o disjuntor antes da abertura não possuem queda de tensão nos seus terminais. No instante da abertura do disjuntor, uma segunda fonte de corrente ideal, com corrente igual e oposta a da primeira, é inserida em paralelo com a primeira fonte. A corrente total no ramo do disjuntor é então zero, o que equivale a abertura do disjuntor. Com auxílio da figura - I9.2 pode-se visualizar melhor o processo.

Quando o disjuntor abre, figura - I9.2, a segunda fonte de corrente, injeta no sistema correntes que vão produzir variações nas tensões de barra. Pelo princípio da superposição todas estas tensões e correntes inerentes a segunda fonte podem ser obtidas injetando a segunda fonte entre os pontos "a" e "b" da parte passiva do sistema, ou seja, quando se curto-circuita todas as fontes do sistema.

Pode-se dizer então da figura - I9.2d e das equações (I4.13) e (I4.15) que no instante da abertura uma onda de corrente I , viaja no sentido "a a'" (reverso) e a ela está associada uma onda de tensão dada por:

$$V_A = -Z_A I \quad (I9.1)$$

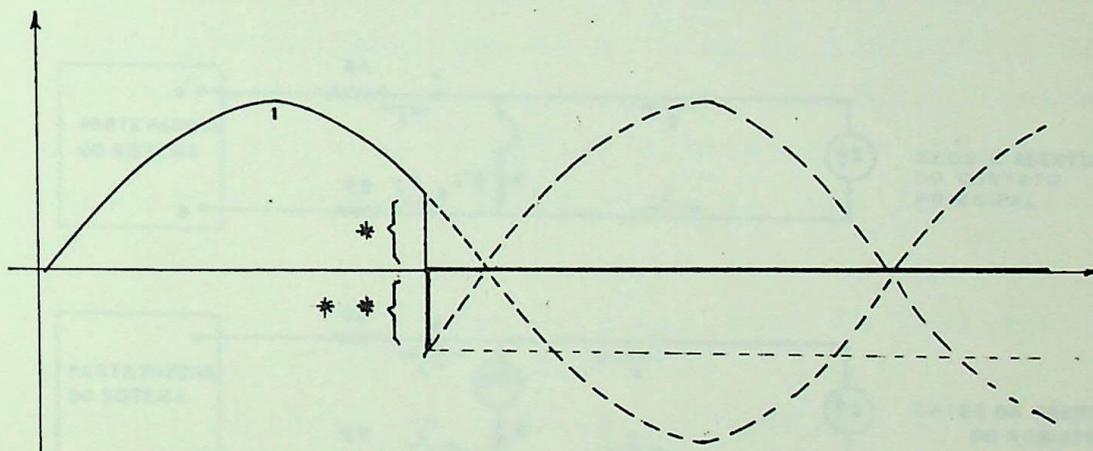
onde Z_A é a impedância de surto vista do ponto "a". Uma outra onda de corrente "I" viaja no sentido "b' b" (direto) e a ela está associada uma onda de tensão dada por:

$$V_B = Z_B I \quad (I9.2)$$

onde Z_B é a impedância de surto vista do ponto "b".

Os valores totais de tensão e corrente no sistema, após a abertura do disjuntor são encontrados somando-se os valores encontrados pela injeção de corrente na malha passiva com os valores obtidos antes da abertura do disjuntor, isto é, pela superposição dos valores encontrados para as figuras I9.2b e I9.2d.

Quando a interrupção da corrente não ocorre no ponto em que a onda de corrente passa por zero, a corrente injetada para simular a abertura deve ser modificada adicionando um degrau como mostra a figura - I9.3.

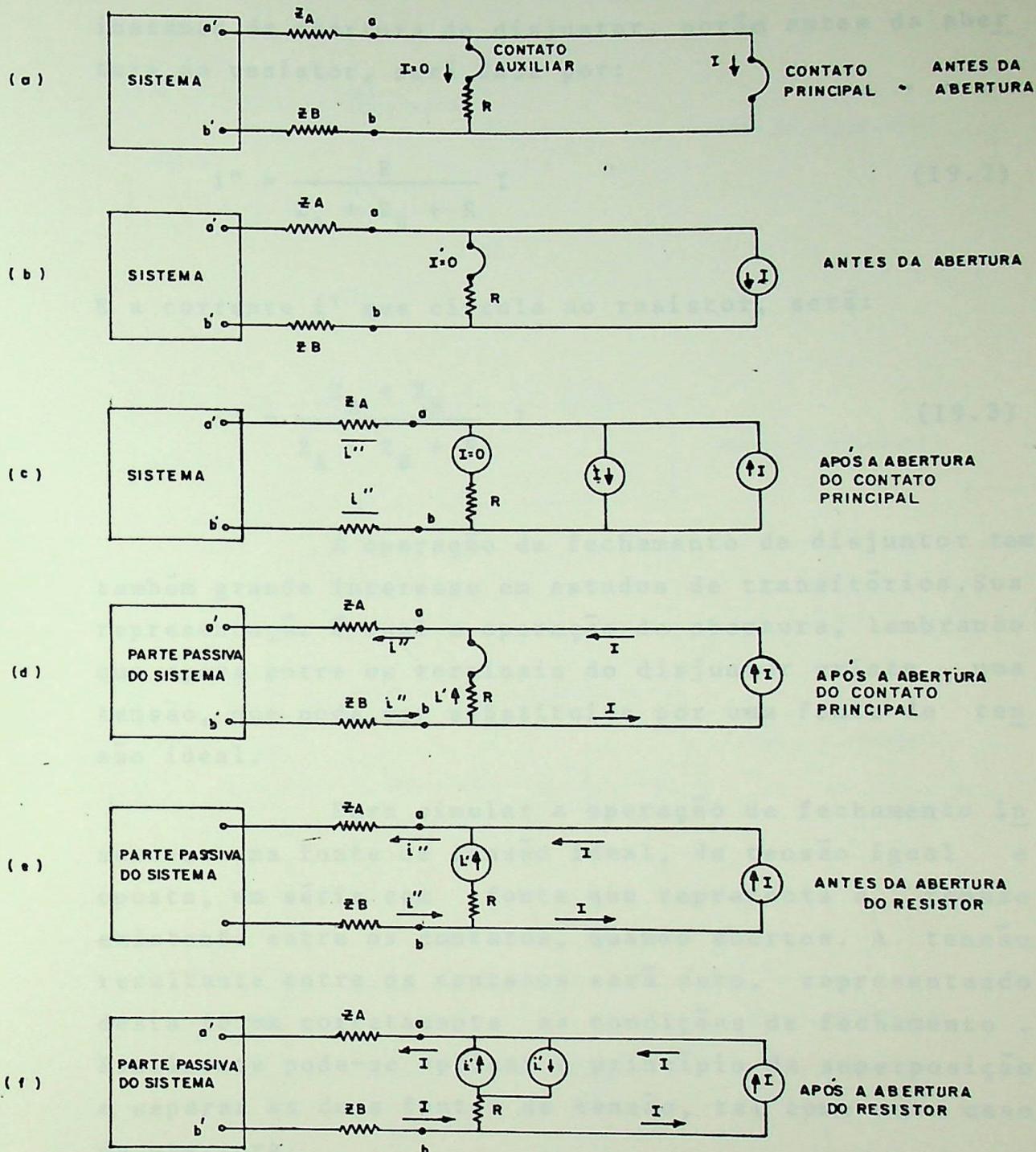


- * A CORRENTE É FORÇADA PARA ZERO
- *** INJEÇÃO DA CORRENTE DE CANCELAMENTO

REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE INJEÇÃO DE CORRENTE, FORA DO ZERO NATURAL DE CORRENTE.

FIGURA I9.3

A inclusão de resistores de chaveamento na abertura, é feita considerando uma chave auxiliar, e aplicando-se o mesmo princípio descrito anteriormente. Na figura - I9.4 está ilustrada a sequência da operação de abertura.



REPRESENTAÇÃO DA ABERTURA DO DISJUNTOR COM RESISTOR DE CHAVEAMENTO.

FIGURA I 9.4

A corrente i'' injetada no sistema no instante da abertura do disjuntor, porém antes da abertura do resistor, será dada por:

$$i'' = \frac{R}{Z_A + Z_B + R} I \quad (I9.2)$$

E a corrente i' que circula no resistor, será:

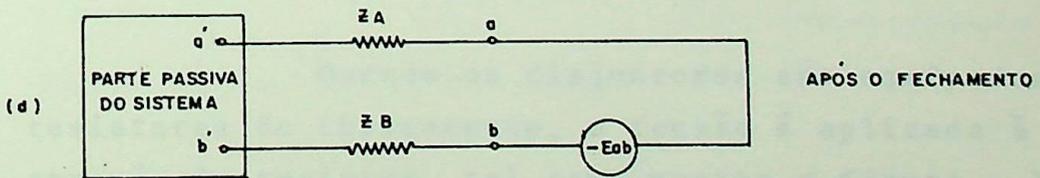
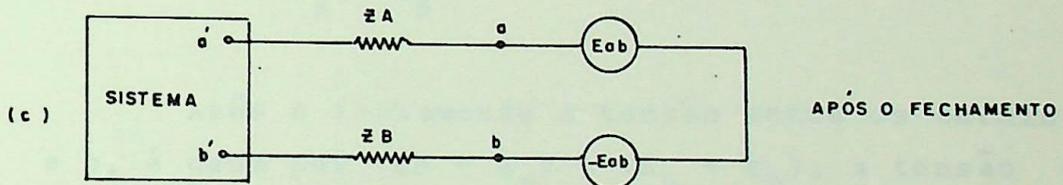
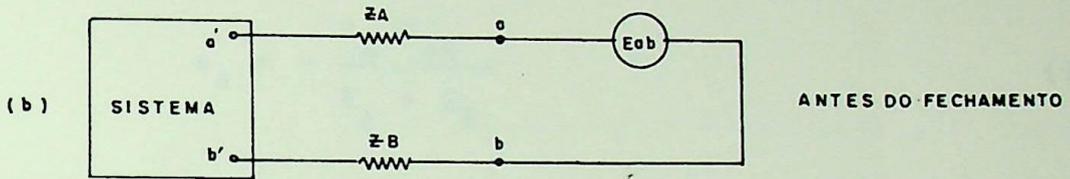
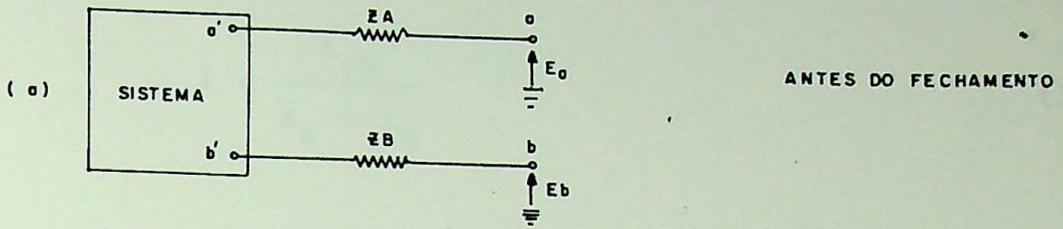
$$i' = \frac{Z_A + Z_B}{Z_A + Z_B + R} I \quad (I9.3)$$

A operação de fechamento de disjuntor tem também grande interesse em estudos de transitórios. Sua representação é dual a operação de abertura, lembrando que agora entre os terminais do disjuntor existe uma tensão, que pode ser substituída por uma fonte de tensão ideal.

Para simular a operação de fechamento insere-se uma fonte de tensão ideal, de tensão igual e oposta, em série com fonte que representa a tensão existente entre os contatos, quando abertos. A tensão resultante entre os contatos será zero, representando desta forma corretamente as condições de fechamento. Finalmente pode-se aplicar o princípio da superposição e separar as duas fontes de tensão, tal como no caso da abertura.

Assim se o disjuntor está conectado entre dois elementos do sistema que tem impedância de surto Z_A e Z_B , tal como na figura - I9.5, e as tensões em cada polo do disjuntor, antes de fechar, são E_a e E_b , então tensão através da chave E_{ab} , é dada por:

$$E_{ab} = E_a - E_b \quad (I9.4)$$



REPRESENTAÇÃO DO FECHAMENTO DE DISJUNTOR

FIGURA I9.5

A impedância do circuito vista dos terminais "a" e "b", é dada por:

$$Z = Z_A + Z_B \quad (I9.5)$$

E a corrente que flui quando a chave é fechada, e dada por:

$$I = \frac{E_{ab}}{Z_A + Z_B} \tag{I9.6}$$

portanto a tensão injetada em cada terminal do disjuntor, é dada por:

$$e_a = - \frac{Z_A E_{ab}}{Z_A + Z_B} \tag{I9.7}$$

$$e_b = \frac{Z_B E_{ab}}{Z_A + Z_B} \tag{I9.8}$$

Após o fechamento a tensão entre os terminais a e b, é dada por $(E_a + e_a)$ e $(E_b + e_b)$, a tensão entre os terminais, será então:

$$E_{ab} = (E_a + e_a) - (E_b + e_b) = 0 \tag{I9.10}$$

Quando os disjuntores são equipados com resistores de chaveamento, a tensão é aplicada à linha através do resistor, tal como mostra a figura - I9.6.

A corrente que flui no disjuntor quando este é fechado, é dada por:

$$I = \frac{E_{ab}}{Z_A + Z_B + R} \tag{I9.11}$$

As tensões que devem ser injetadas nos terminais a e b, são dadas por:



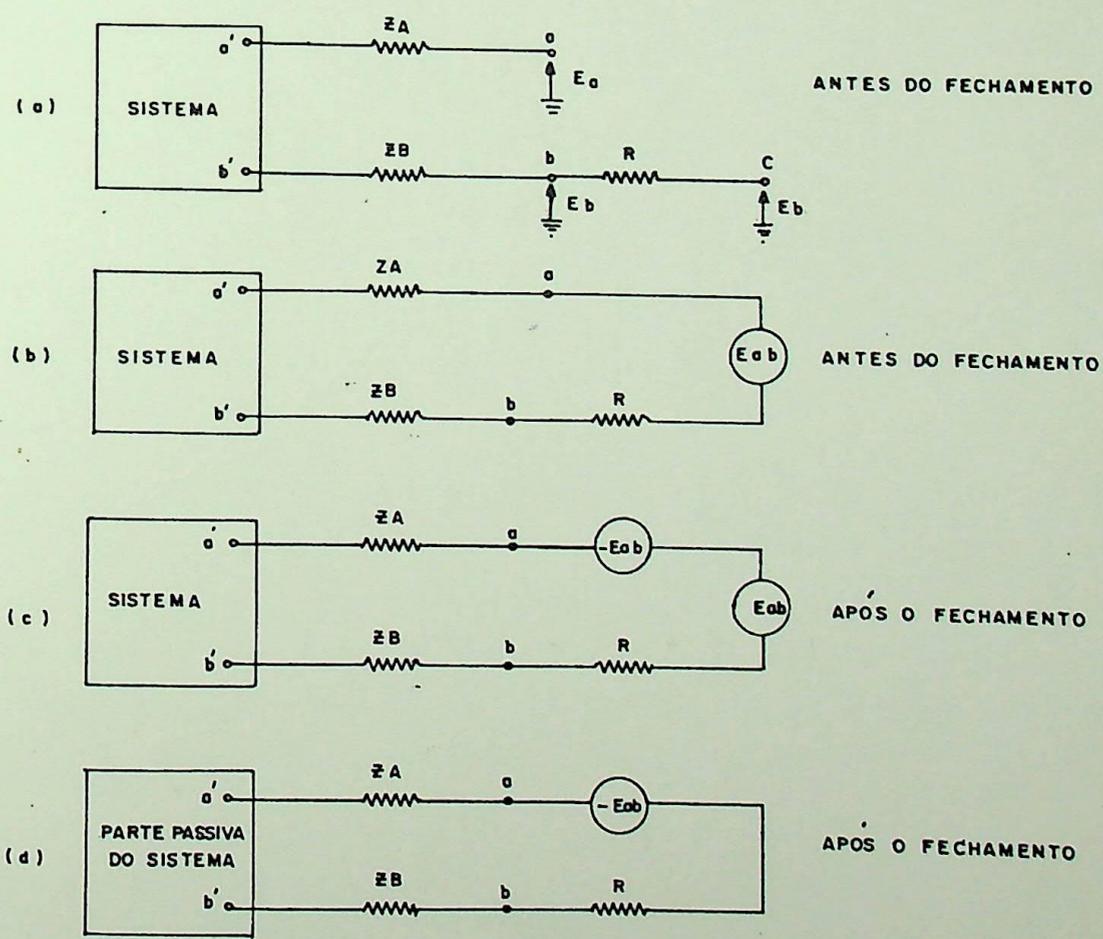
$$e_a = - \frac{Z_A E_{ab}}{Z_A + Z_B + R} \tag{I9.12}$$

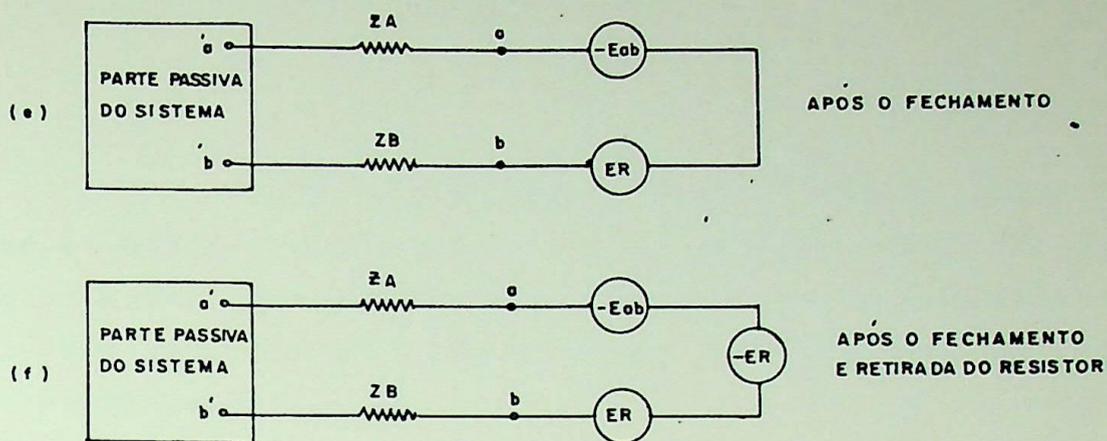
$$e_b = \frac{E_a E_{ab}}{Z_A + Z_B + R} \tag{I9.13}$$

A tensão através do resistor \bar{e} , dada por:

$$E_R = \frac{R E_{ab}}{Z_A + Z_B + R} \tag{I9.14}$$

Após algum tempo o resistor \bar{e} retirado do circuito, as figuras I9.6e e I9.6f ilustram a operação, o procedimento \bar{e} similar ao descrito anteriormente.





REPRESENTAÇÃO DO FECHAMENTO DO DISJUNTOR COM RESISTOR DE CHAVEAMENTO

FIGURA 19.6

II.1 - INTRODUÇÃO

Esta segunda parte da dissertação procura mostrar os métodos utilizados no processamento digital. Todo o procedimento aqui utilizado foi discutido na primeira parte, onde se obteve um equacionamento teórico para os diversos problemas.

A discretização do espaço e do tempo é o ponto de partida para se estabelecer uma rotina de cálculo. Adota-se portanto um intervalo de tempo básico, que será o menor intervalo de tempo mensurável dentro do programa, devendo ser suficientemente pequeno a fim de que não provoque erros de precisão no cálculo mas não tão pequeno que comprometa o tempo total de processamento do programa. Este intervalo de tempo básico é talvez o ponto crucial do programa, pois a ele estão associados a precisão, o tempo total de processamento e quantidades de memória requerida pelo programa. Sua escolha deve portanto ser criteriosa, assim é que apresentar-se-ã algumas regras básicas para tal.

Outra preocupação do programa é utilizar dados que sejam facilmente calculados ou mesmo encontrados em bibliografia usual. A forma como estes dados entram para o programa também é objeto de preocupação.

Enfim, nesta segunda parte procura-se reunir todos os principais aspectos pertinentes ao processamento dando-lhes um tratamento simples, no entanto eficiente do ponto de vista computacional. Por fim far-se-ã uma descrição geral das principais subrotinas do programa, procurando com isto dar uma ideia global do programa.

II.2 - METODOLOGIA

Os distúrbios que incidem em um sistema elétrico, quer seja uma descarga atmosférica ou uma mudança no estado permanente de operação devido por exemplo a um chaveamento, resulta em um processo transitório onde uma ou mais ondas eletromagnéticas são injetadas no ponto onde ocorrem o distúrbio. Estas ondas propagam-se ao longo do sistema e sofrem alterações na sua forma e amplitude, dependendo principalmente da topologia do sistema e da natureza de seus elementos.

As ferramentas básicas para se analisar o processo de propagação foram desenvolvidas na primeira parte deste trabalho e o que se propõe agora é desenvolver um processo racional e sistemático capaz de resolver a principal dificuldade na análise da propagação, onde estão envolvidos vários pontos de descontinuidade. Esta dificuldade surge quando se deseja contabilizar, as ondas que se propagam, mantendo a noção de espaço e tempo. Para melhor avaliar este grau de dificuldade imagina-se um distúrbio, em um sistema integrado, o qual dá origem a uma onda que viaja em uma determinada linha, após algum tempo esta onda chega a barra remota da linha, onde por exemplo estão conectadas duas outras linhas. Se a impedância de surto terminal for diferente da impedância de surto da linha em questão, a onda ao incidir no terminal dará origem a uma onda refletida, que viajará no sentido inverso da linha, e a duas outras ondas que serão transmitidas a partir da barra, através das linhas a ela conectadas. Com tais considerações é fácil imaginar que estas ondas ao encontrarem os terminais das linhas nas quais viajam, darão origem a outras ondas e assim por diante. Após algum tempo torna-se bastante difícil contabilizar as ondas que viajam no sistema e precisar o local que se encontram su

as frentes de onda.

Um método gráfico mais conhecido por diagrama de Lattice, foi proposto por L.V. Bewley em 1930. Este método não será propriamente utilizado neste trabalho, mas impregar-se-a uma extensão sua, adaptada para uso em computador digital. Antes de entrar na formulação do método, recordar-se-a alguns conceitos básicos do diagrama de Lattice e da primeira parte deste trabalho, tais como:

- uma onda aplicada a um terminal de uma linha leva um tempo para alcançar o seu terminal oposto. Este tempo $\bar{\tau}$ é uma função da extensão (ℓ) e dos parâmetros da linha, e pode ser expresso em termos da velocidade de propagação da onda $\mu_1 = \omega/\beta_1$.

$$\tau = \frac{\ell}{\mu_1} \quad (112.1)$$

Se um intervalo de tempo básico θ é considerado, vem:

$$\tau = n\theta = \frac{\ell}{\mu_1} \quad n = \frac{\ell}{\theta\mu_1} \quad (112.2)$$

onde n é o número de intervalos de tempo que a onda gasta para viajar do início ao fim da linha.

- Ao se desprezar as perdas na linha a constante de propagação $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$ tem sua parte real nula ($\alpha_1 = 0$). Portanto uma onda que nela viaja sofre alteração apenas no seu ângulo de fase, ou em outras palavras, numa linha sem perda as ondas viajam sem sofrerem atenuação e com uma velocidade:

$$\mu_1 = \frac{\omega}{\beta_1}$$

- Uma onda ao incidir em um terminal de impedância de surto diferente da impedância de surto do ele

mento no qual ela se propaga, dá origem a uma onda refletida. A variação de tensão no terminal é a soma da onda incidente com a onda refletida, esta variação dá origem a uma onda "transmitida", que viaja nas linhas conectadas ao terminal.

- O coeficiente de reflexão em um ponto de descontinuidade é dado por:

$$K_R = \frac{Z_e - Z_{11}}{Z_e + Z_{11}} \quad (112.3)$$

Onde Z_{11} é a impedância de surto do elemento no qual a onda viaja e Z_e a impedância de surto equivalente de todos os demais elementos conectados ao terminal, como ilustra a figura - 112.1

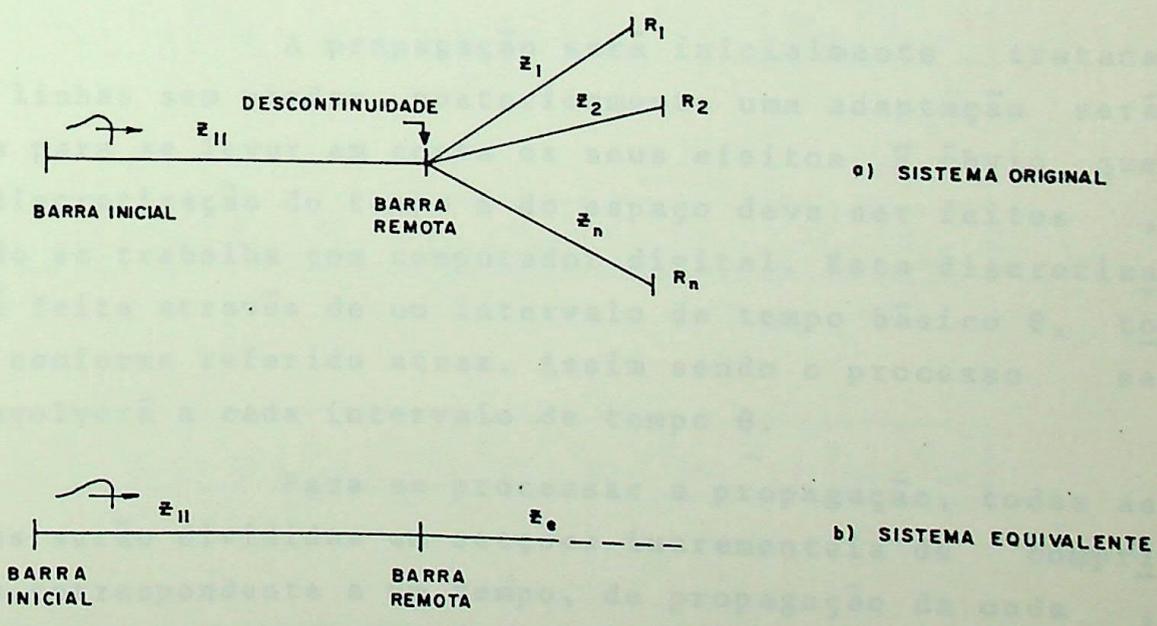


ILUSTRAÇÃO DE UM PONTO DE DESCONTINUIDADE

FIGURA II 2.1

O coeficiente de transmissão definido na secção 1.2, será então:

$$K_T = K_R + 1 = \frac{2 Z_e}{Z_e + Z_{11}} \quad (II2.4)$$

Este coeficiente permite calcular a onda transmida a partir do terminal, através da onda incidente.

Feitas estas observações, passar-se-a a uma descrição do método propriamente dito. Conforme referi do anteriormente, o principal objetivo do método é contabi lizar as variações de tensão (corrente) num dado ponto e manter um controle no espaço e no tempo de todas as ondas envolvidas no processo. No método dois fenômenos devem ser distinguidos, o primeiro é o da propagação e o segundo é o efeito das descontinuidades.

A propagação será inicialmente tratada para linhas sem perdas, posteriormente uma adaptação será feita para se levar em conta os seus efeitos. É óbvio que uma discretização do tempo e do espaço deve ser feitos , quando se trabalha com computador digital. Esta discretiza ção é feita através de um intervalo de tempo básico θ , to mado conforme referido atrás. Assim sendo o processo se desenvolverá a cada intervalo de tempo θ .

Para se processar a propagação, todas as linhas serão divididas em secções incrementais de compri mento correspondente a um tempo, de propagação da onda , igual a " θ ". Assim uma linha de comprimento l e velocidade de propagação de onda μ_1 , será dividida em " n " secções , onde:

$$n = \frac{l}{\mu_1 \theta} \quad (II2.5)$$

A tensão de cada secção será representada por duas componentes que se propagam em sentido contrário, e a soma destas componentes em um dado instante dá a tensão na secção. Ao incrementar o tempo de " θ " estas componentes caminham de uma secção para a seguinte no seu sentido de propagação.

No programa de computador digital os valores das componentes são armazenados em duas tabelas para cada linha (no caso monofásico), uma tabela armazena as tensões das ondas que se propagam no sentido direto da linha e a outra no sentido reverso. A cada intervalo de tempo desloca-se o valores das tensões nas tabelas, como mostra a figura - II2.2:

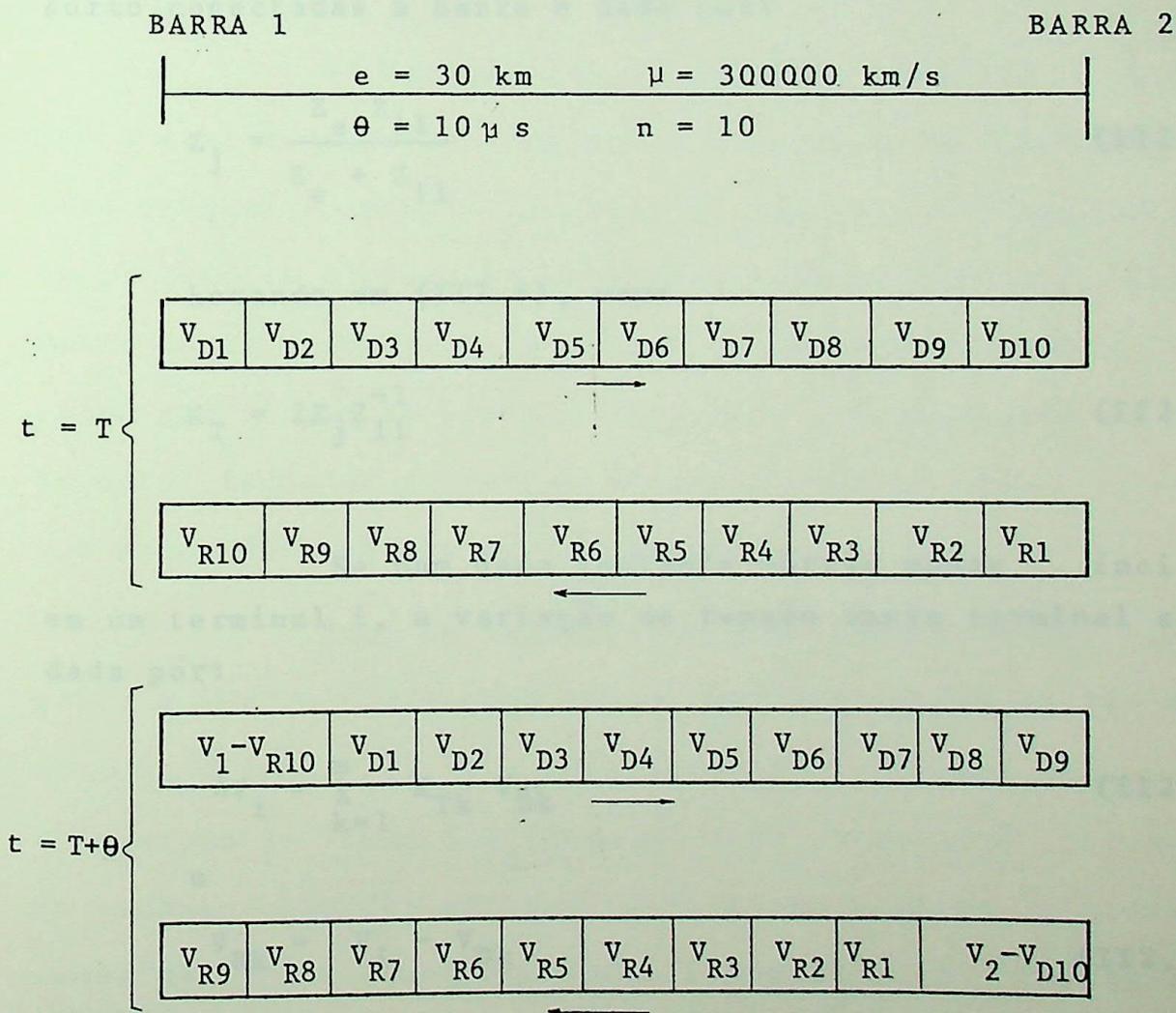


ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE PROPAGAÇÃO
FIGURA - II2.2

Em todos os pontos de descontinuidade, tais como barramentos onde podem estar conectados várias linhas ou elementos de parâmetros concentrados, são calculados os coeficientes de transmissão para todas as linhas e elementos a parâmetros concentrados. Os parâmetros concentrados são representados por secções de linhas. Este cálculo é feito a priori através de uma equação obtida de (II2.4):

$$K_T = \frac{2Z_e}{Z_e + Z_{11}} = \frac{2 Z_e Z_{11}}{(Z_e + Z_{11}) Z_{11}} \quad (\text{II2.6})$$

A combinação em paralelo de todas as impedâncias de surto conectadas à barra é dada por:

$$Z_j = \frac{Z_e Z_{11}}{Z_e + Z_{11}} \quad (\text{II2.7})$$

Levando em (II2.6), vem:

$$K_T = 2Z_j Z_{11}^{-1} \quad (\text{II2.8})$$

Se num dado instante várias ondas incidem em um terminal i , a variação de tensão neste terminal será dada por:

$$\Delta V_i = \sum_{k=1}^m K_{Tk} V_{Dk} \quad (\text{II2.9})$$

e

$$V_{Rk} = V_i - V_{Dk} \quad (\text{II2.10})$$

m - número de elementos conectados ao terminal

V_{Dk} - Onda que viaja no elemento k e incide no terminal

K_{Tk} - Coeficiente de transmissão do elemento k

ΔV_i - Variação de tensão no terminal i , no instante considerado.

ΔV_{Rk} - Onda que viaja em sentido reverso na linha k , no instante considerado.

Note que ΔV_i é a variação na tensão para um dado instante, este valor é então somado ao valor da tensão da barra até este instante afim de se obter então a tensão final.

A onda que irá se propagar numa dada linha "k" a partir da barra terminal é dada pela equação (II2.10), esta ocupará a primeira posição da tabela correspondente ao sentido de propagação na linha, veja na figura - II2.2. Desta forma é possível se manter um registro de todas as ondas que viajam no sistema além de a cada instante de tempo estar definida a posição de sua frente de onda. Ondas com mesmo defasamento são superpostas.

Para se representar uma forma de onda qualquer, a ser injetada numa linha, ela é dividida em degraus como na figura - I5.6. A cada intervalo de tempo um degrau é injetado na linha e a forma da onda original é recuperada somando todos os degraus. O programa permite simular ondas dos tipos senoidal, rampa e degrau ou a composição destes tipos, o que dá uma grande flexibilidade para a simulação.

Na representação de linhas trifásicas uma complicação adicional aparece devido ao acoplamento mútuo das fases. O problema é resolvido através do método modal apresentado na secção I.4. Desta maneira é possível trabalhar com três modos de propagação que viajam ao longo da linha de maneira independentes, ou seja, como se fossem três sistemas monofásicos independentes. As matrizes de transformação de tensões de fase em tensões modais, devem ser fornecidas pelo usuário ao programa, quando esta matriz não for especificada, para uma dada linha, o programa assume a seguinte matriz de transformação:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{3/2} & -1/2 \\ 1 & -\sqrt{3/2} & -1/2 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz S apresentada é conhecida como matriz de Clark ($0 - \beta - \alpha$) para linhas simétricas (completamente transpostas). Assim as tensões de fase a serem transmitidas em uma dada linha são transformadas em valores modais pela correspondente matriz de transformação. Duas tabelas iguais a da figura - II2.2 são criadas para cada modo de propagação de cada linha, conhecendo-se a velocidade de propagação de cada modo o número de secções é então calculado pela fórmula (II2.5), note que o número de secções será diferente para cada modo, já que suas velocidades de propagação são diferentes.

Nas terminações as ondas incidentes são transformadas de valores modais para valores de fase e a variação de tensão na barra é calculada em valores de fase através de um coeficiente de transmissão semelhante ao da equação (II2.8), onde os valores envolvidos são agora matrizes.

$$K_T = 2 Z_j Z^{-1} \quad (\text{II3.1})$$

A onda a ser transmitida na linha num dado instante é calculada transformando a variação de tensão na barra para valores modais pela matriz de transformação correspondente à linha e a seguir subtrai o valor modal da onda incidente, este valor é finalmente colocado na primeira posição da respectiva tabela.

Em resumo, a transmissão é feita em valores modais e os efeitos das terminações são calculados em valores de fase. Duas transformações são então feitas para cada terminal de linha, uma da onda incidente de valores modais para valores de fase e outra da onda refletida (transmitida) de valores de fase para valores modais.

II.3 - REPRESENTAÇÃO DA ATENUAÇÃO E DISTORÇÃO

A representação de uma onda de forma arbitrária é feita aproximando-a por degraus espaçados de um intervalo de tempo igual a θ . De acordo com o processo descrito na seção anterior, estes degraus propagam-se ao longo das linhas sem sofrer qualquer espécie de atenuação ou distorção. Sabe-se no entanto que isto não é verdade, pois as linhas possuem perdas que modificam a forma e a amplitude das ondas viajantes.

Na seção I.6 mostrou-se como obter a resposta no final da linha, para um degrau injetado no início da mesma. Mostrou-se também que uma onda leva algum tempo para alcançar o final da linha e que este tempo é função do comprimento da linha e da velocidade de propagação da onda. A resposta ao degrau, bem como, a velocidade de propagação, além das matrizes de transformação modal e matriz de admitância de surto, são obtidos através do programa de computador "Atenua".

Cada degrau que se propaga ao longo das linhas será modificado, de acordo com a resposta padrão calculada a priori, antes de entrar nas tabelas de propagação. Estas modificações ^[2] se processam da seguinte forma: a resposta ao degrau da linha em questão pode ser aproximada por uma expressão exponencial. Assim se um degrau de tensão V é injetado na linha, ele sofrerá atenuação e distorção durante o processo de propagação. A Tensão que alcança o terminal remoto, para um tempo t pode então ser representada por:

$$v = K_{\alpha} V (1 - e^{-t/T}) \quad (\text{II3.1})$$

Onde K_{α} é um fator de atenuação e T é uma constante de tempo. Fazendo $t = (2n-1) \theta/2$, onde θ é o intervalo

de tempo básico e $n = 1, 2, 3, \dots$, então por substituição em (II3.1), vem:

$$v = K_{\alpha} V (1 - e^{-\theta(2n-1)/2T}) \quad (\text{II3.2})$$

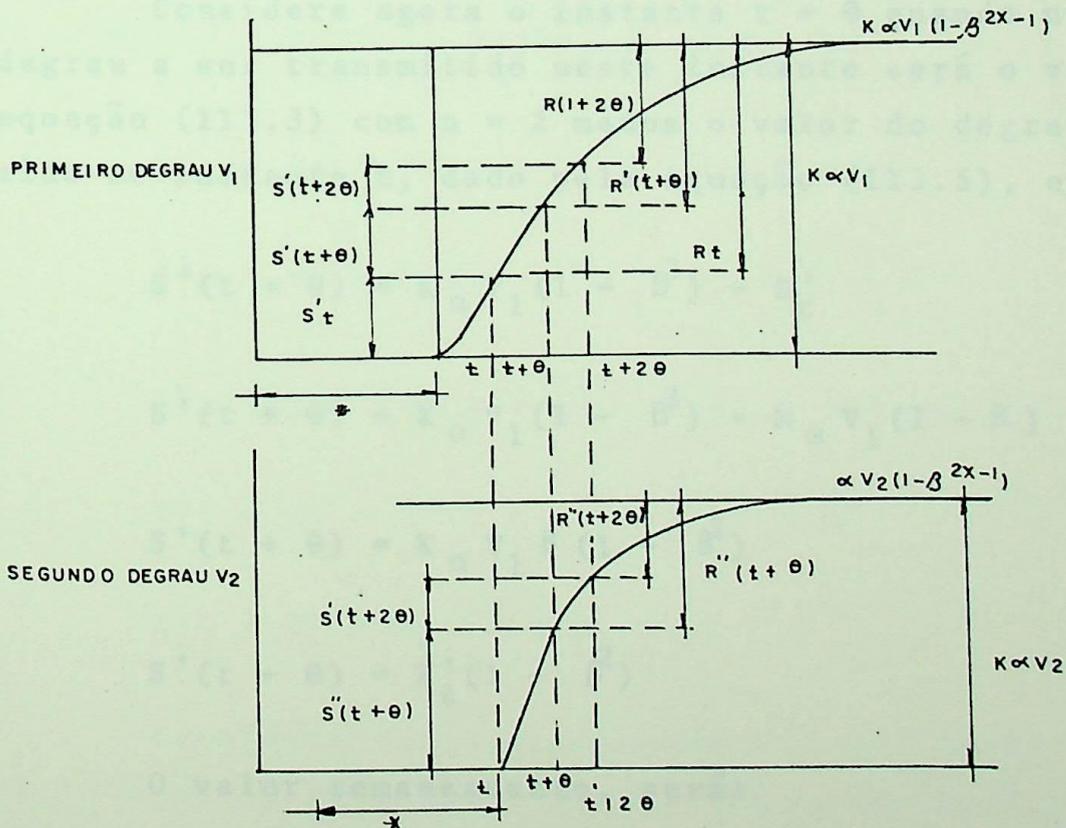
e

$$v = K_{\alpha} V (1 - \beta^{(2n-1)}) \quad (\text{II3.3})$$

onde

$$\beta = e^{-\theta/2T} \quad (\text{II3.4})$$

A tensão v no terminal remoto da linha alcança um valor final igual a $K_{\alpha} V$, dado pela expressão (II3.3), como se mostra na figura - II3.1.



* TEMPO DE VIAGEM

REPRESENTAÇÃO DA ATENUAÇÃO E DISTORÇÃO
FIGURA II3.1

Com relação a figura, considere um tempo t quando $n = 1$. O degrau de tensão a ser transmitido neste instante é obtido pela equação (II3.3) com $n = 1$, logo este valor será:

$$S'_t = K_\alpha V_1 (1 - \beta) \quad (\text{II3.5})$$

E o valor remanescente, ou seja, aquele a ser transmitido nos instantes seguintes, é dado por:

$$R'_t = K_\alpha V_1 - S'_t$$

$$R'_t = K_\alpha V_1 - K_\alpha V_1 (1 - \beta)$$

$$R'_t = K_\alpha V_1 \beta \quad (\text{II3.6})$$

Considere agora o instante $t + \theta$ quando $n = 2$, o degrau a ser transmitido neste instante será o valor da equação (II3.3) com $n = 2$ menos o valor do degrau transmitido no instante t , dado pela equação (II3.5), então:

$$S'(t + \theta) = K_\alpha V_1 (1 - \beta^3) - S'_t$$

$$S'(t + \theta) = K_\alpha V_1 (1 - \beta^3) - K_\alpha V_1 (1 - \beta)$$

$$S'(t + \theta) = K_\alpha V_1 \beta (1 - \beta^2)$$

$$S'(t + \theta) = R'_t (1 - \beta^2) \quad (\text{II3.7})$$

O valor remanescente, será:

$$R'(t + \theta) = K_\alpha V_1 - K_\alpha V_1 (1 - \beta^3)$$

$$R'(t + \theta) = K_\alpha V_1 \beta^3$$

$$R'(t + \theta) = R'_t \beta^2 \quad (\text{II3.8})$$

Suponha que no instante t um segundo degrau V_2 é injetado na linha. No instante $(t + \theta)$ a parcela que é transmitida para o terminal remoto da linha será:

$$S''(t + \theta) = K_\alpha V_2 (1 - \beta) \quad (\text{II3.9})$$

Uma vez que para este degrau $n = 1$, a parte remanescente é dada por:

$$R''(t + \theta) = K_\alpha V_2 - S''(t + \theta)$$

$$R''(t + \theta) = K_\alpha V_2 \beta \quad (\text{II3.10})$$

Então no instante $t + \theta$ o degrau transmitido para o terminal remoto da linha, é dado por:

$$S(t + \theta) = S'(t + \theta) + S''(t + \theta)$$

$$S(t + \theta) = R'_t (1 - \beta^2) + K_\alpha V_2 (1 - \beta) \quad (\text{II3.11})$$

E o valor total remanescente, é dado por:

$$R(t + \theta) = R'(t + \theta) + R''(t + \theta)$$

$$R(t + \theta) = R'_t \beta^2 + K_\alpha V_2 \beta \quad (\text{II3.12})$$

Considere agora o instante $t + 2\theta$, quando $n = 3$ para V_1 e $n = 2$ para V_2 . O degrau a ser transmitido neste instante é:

$$S(t + 2\theta) = S'(t + 2\theta) + S''(t + 2\theta)$$

$$S(t + 2\theta) = K_{\alpha} V_1 (1 - \beta^5) - K_{\alpha} V_1 (1 - \beta^3) \\ + K_{\alpha} V_2 (1 - \beta^3) - K_{\alpha} V_2 (1 - \beta)$$

$$S(t + 2\theta) = (1 - \beta^2) R(t + \theta) \quad (\text{II3.13})$$

A parte remanescente \tilde{e} dada por:

$$R(t + 2\theta) = R'(t + 2\theta) + R''(t + 2\theta)$$

$$R(t + 2\theta) = V_1 - K_{\alpha} V_1 (1 - \beta^5) + \\ + K_{\alpha} V_2 (1 - \beta^3)$$

$$R(t + 2\theta) = K_{\alpha} V_1 \beta^5 + K_{\alpha} V_2 \beta^3$$

$$R(t + 2\theta) = \beta^2 (R'(t + \theta) + R''(t + \theta))$$

$$R(t + 2\theta) = \beta^2 R(t + \theta) \quad (\text{II3.14})$$

Vê-se então que, para um instante "t" qualquer, o degrau correspondente a atenuação e distorção, a ser transmitido para o terminal remoto da linha, \tilde{e} dado pelo valor remanescente no instante de tempo imediatamente anterior (t - θ) multiplicado por (1 - β^2). O novo valor remanescente, a ser transmitido nos instantes seguintes e obtido multiplicando o valor remanescente em t - θ por β^2 .

Desta maneira os degraus de tensão que entram na linha a cada intervalo de tempo são atenuados e distorcidos, a fim de que possam ser transmitidos ao final da linha da maneira descrita na seção II.2

O sucesso deste método depende do intervalo de tempo básico θ utilizado e de uma boa estimativa do fator de atenuação K_α e da constante de tempo T , que deve ser fornecida pelo usuário ao programa.

II.4 - REPRESENTAÇÃO DE ELEMENTOS TERMINAIS

A representação de elementos terminais, tais como transformadores, reatores, geradores pode em muitos casos ser feita simplesmente através de sua indutância, e outros como bancos de capacitores ou mesmo o efeito da capacitância de fuga dos elementos citados acima, podem ser representados por suas capacitâncias. Nestes casos os componentes devem portanto serem tratados como elementos a parâmetros concentrados.

Dentro do método utilizado para o cálculo digital, descrito na seção II.2, a melhor maneira de representar tais elementos é através de seções de linhas (Stub line). Os fundamentos desta representação já foram amplamente discutidos na seção I.8, na qual mostrou-se que a precisão da representação está diretamente ligada ao tempo de propagação da onda na seção. Quanto menor o tempo mais precisa é a representação. A menor seção de linha capaz de ser representada no programa é aquela correspondente a um intervalo de tempo básico θ , logo a escolha deste tempo torna-se muito importante. A escolha deste tempo ² deve levar em consideração três critérios básicos, a saber:

- O tempo de propagação de cada linha de transmissão é definida em termos de um intervalo de tempo básico e o ideal seria que cada linha tivesse um número inteiro de intervalos de tempo básico. Na prática isto é muito difícil de acontecer, e alguma aproximação deve ser admitida, por outro lado, nenhuma linha deve possuir tempo de propagação menor que o intervalo de tempo básico.

- O intervalo de tempo básico deve ser adotado de tal forma que qualquer onda de tensão aplicada seja adequadamente representada.
- A constante de tempo associada com a impedância de surto das linhas de transmissão e a indutância ou capacitância de elementos representados por parâmetros concentrados deve satisfazer a relação:

$$\theta \leq T/3 \quad (II4.1)$$

onde T é a constante de tempo, definida na tabela - II4.1

ELEMENTO	IMPEDÂNCIA DE SURTO	CONSTANTE DE TEMPO
INDUTOR SHUNT	L / θ	L / Z_e
INDUTOR SÉRIE	L / θ	$L / (Z_A + Z_B)$
CAPACITOR SHUNT	θ / C	$R_e C$
CAPACITOR SÉRIE	θ / C	$R_e C$

GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS PARA REPRESENTAÇÃO DE ELEMENTOS A PARÂMETROS CONCENTRADOS.

FIGURA - II4.1

Este ultimo critério garante a precisão da representação de elementos a parâmetros concentrados por secções de linhas.

Em resumo, os elementos a parâmetros concentrados são representados da seguinte forma:

- Indutor Shunt: é representado por uma secção de linha com tempo de propagação igual ao tempo básico, então:

$$\tau = \theta \quad (II4.2)$$

$$Z^0 = L/\theta \quad (114.3)$$

$$T = L/Z_e \quad (114.4)$$

Onde Z_e é a impedância de surto equivalente de todas as linhas conectadas a barra do indutor. O indutor shunt é representado conectando um dos terminais da secção de linha à barra e o outro à referência (terra).

- Indutor Série: é representado por uma secção de linha com tempo de propagação igual ao tempo básico, portanto:

$$\tau = \theta \quad (114.5)$$

$$Z^0 = L/\theta \quad (114.6)$$

$$T = L/(Z_A + Z_B) \quad (114.7)$$

Onde Z_A e Z_B são as impedâncias de surto equivalentes dos barramentos aos quais o indutor está conectado. A representação é feita conectando os terminais da secção de linha aos respectivos barramentos, tal como dispostos fisicamente.

- Capacitor Shunt e capacitância de fuga: por uma secção de linha com tempo de propagação igual ao tempo básico, portanto:

$$\tau = \theta \quad (114.8)$$

$$Z = \theta/C \quad (114.9)$$

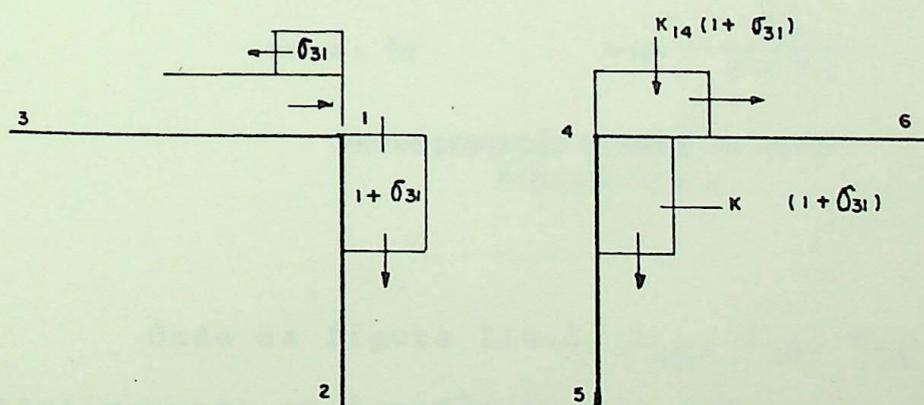
$$T = Z_e C \quad (114.10)$$

um dos terminais da secção de linha é conectado ao barramento e o outro permanece em circuito aberto.

- Resistor shunt - É representado por uma linha de transmissão de comprimento infinito e impedância i igual a resistência, seu valor tem influência apenas na impedância equivalente da barra, sendo representado tal como disposto fisicamente.

A representação de um resistor ou um capacitor série é um pouco mais complicada, uma vez que para o capacitor o terminal remoto da seção de linha que o representa é aberto. A referência [12] dá os circuitos equivalentes capazes de representá-los, porém antes de apresentá-los aqui, o conceito de coeficiente de transferência deve ser introduzido.

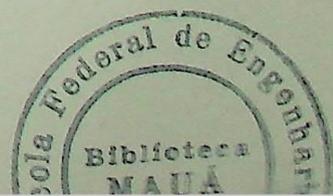
O coeficiente de transferência descreve a propagação instantânea de uma onda de uma barra a outra. Por exemplo, na figura - II4.1 um degrau unitário que se propaga na linha 3 - 1 incide no terminal 1 dando origem a uma onda refletida σ_{31} e uma onda transmitida $(1 + \sigma_{31})$ do terminal 1 para o terminal 2.



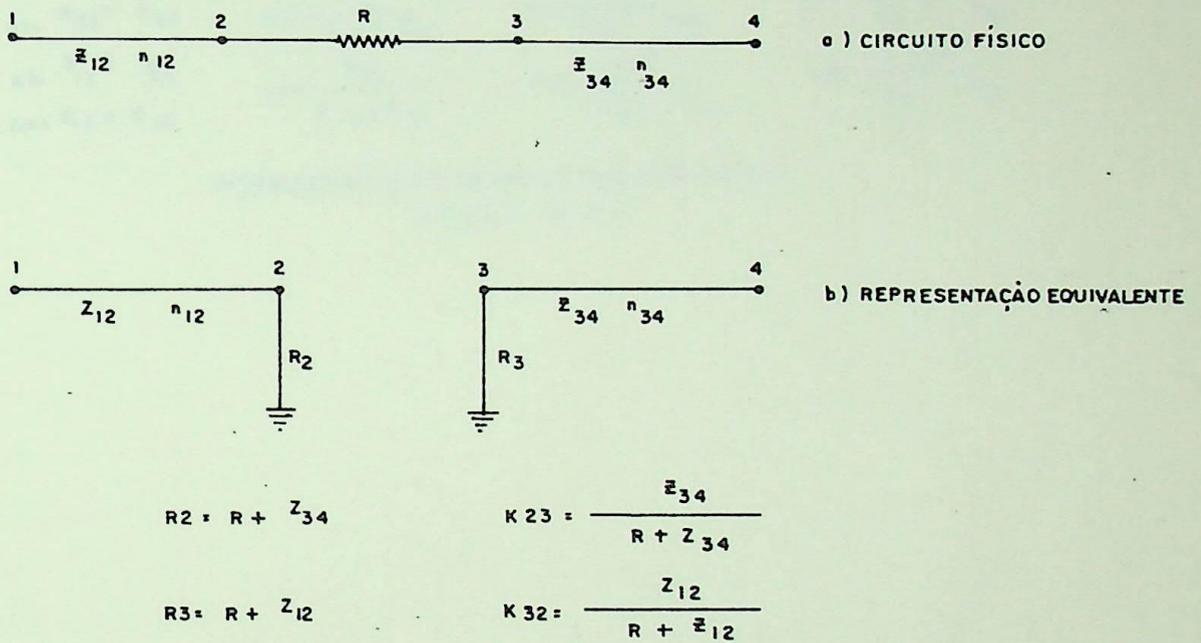
REPRESENTAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA

FIGURA II 4.1

Ale \tilde{m} da onda transmitida do terminal 1 para o terminal 2 uma outra onda é transmitida instantaneamente do terminal 1 para o terminal 4. O coeficiente de transferência K_{14} (que ser \tilde{a} melhor compreendido no exemplo da figura -

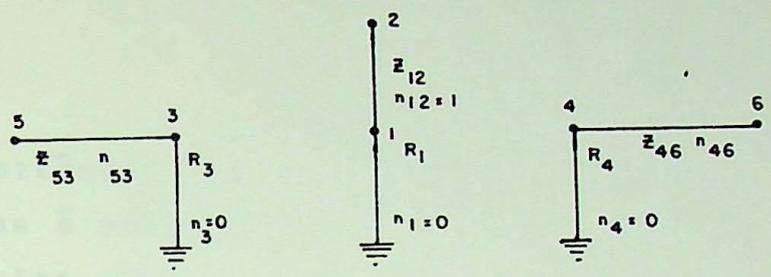
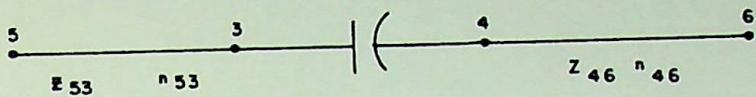


II4.2) multiplicado pela onda transmitida do terminal 1 para o 2, dá a onda que será transmitida do terminal 4 para os terminais 5 e 6. Este coeficiente também tem muito interesse na representação de disjuntores, como será visto na próxima seção. Um exemplo de representação do resistor série, se encontra na figura - II4.2, a qual ilustra fisicamente um coeficiente de transferência.



REPRESENTAÇÃO DE RESISTOR SÉRIE
FIGURA II 4.2

Onde na figura II4.2, Z_{12} , Z_{34} , n_{12} e n_{34} são respectivamente as impedâncias de surto e o número de seções das linhas 1-2 e 3-4, R é a resistência do resistor, K_{23} e K_{32} são os coeficientes de transferência. A representação do capacitor série ¹² é feita tal como na figura - II4.3.



$$R_1 = Z_{53} + Z_{46}$$

$$R_3 = Z_{12} + Z_{46}$$

$$R_4 = Z_{12} + Z_{53}$$

$$K_{31} = \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_{46}}$$

$$K_{34} = \frac{Z_{46}}{Z_{12} + Z_{46}}$$

$$K_{13} = \frac{Z_{53}}{Z_{53} + Z_{46}}$$

$$K_{14} = \frac{-Z_{46}}{Z_{53} + Z_{46}}$$

$$K_{41} = \frac{-Z_{12}}{Z_{12} + Z_{53}}$$

$$K_{43} = \frac{Z_{53}}{Z_{12} + Z_{53}}$$

REPRESENTAÇÃO DE UM CAPACITOR SERIE
 FIGURA II 4.3

II.5 - REPRESENTAÇÃO DE FONTES DE CORRENTE E TENSÃO.

As fontes de tensão e de corrente tem grande importância nos estudos de ondas viajantes, pois através delas é possível representar os fenômenos que dão origem a estas ondas.

Viu-se na seção I.9 que as operações de chaveamento são representadas por fontes de corrente e tensão que injetam nos terminais das chaves ondas que se propagam pelo sistema.

A maioria das ondas geradas por fenômenos transitórios são bem representadas por três formas de ondas básicas ou por combinação delas. Estas três formas de ondas básicas são o degrau, a rampa e a senoide; sendo que as duas últimas são na verdade geradas por uma sucessão de degraus, igualmente espaçados pelo intervalo de tempo básico (θ). Se por alguma razão em determinado barramento do sistema existe uma fonte de tensão, ela é representada da seguinte forma:

- A cada instante calcula-se o degrau correspondente a aproximação da onda.
- Este degrau ao ser injetado no barramento do sistema dá origem a uma variação de tensão. Esta variação, em valores de fase, é então somada às variações provocadas pela incidência de outras ondas no barramento.
- A variação total de tensão no barramento dá origem a ondas que serão transmitidas por todas as linhas a ele conectadas.
- A transmissão é feita transformando a variação de

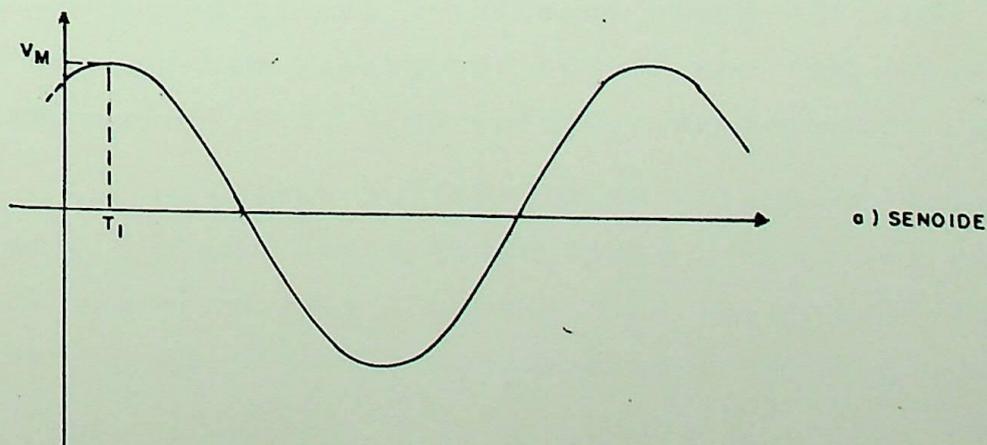
tensão de valores de fase para valores modais , corrigindo estes valores modais de tal forma a incorporar os efeitos da atenuação e da distorção e finalmente colocando-os na primeira posição da ta bela de transmissão correspondente.

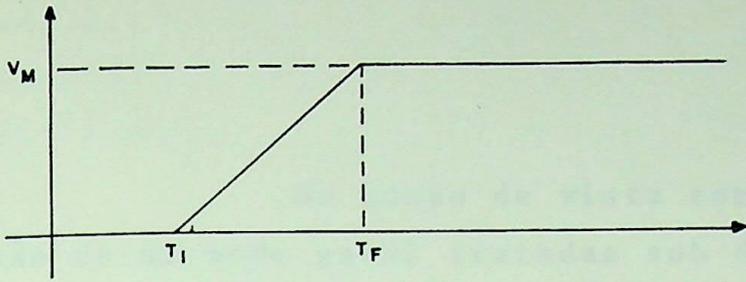
Note que a representação da fonte de tensão é feita simplesmente adicionando o valor do degrau correspondente ao instante considerado ao valor da variação de tensão na barra. Uma fonte de tensão assim considerada é uma fonte ideal de impedância infinita.

Para se considerar a impedância interna da fonte é necessário especifica-la como uma linha de transmissão de comprimento zero ligada à referência, quando se desejar que as ondas nela injetada não sofram reflexões no terminal remoto. Ou como um ou mais elementos a parâmetros concentrados, por exemplo, por um indutor shunt ou série, dependendo do tipo de ligação da fonte e sua capacidade de fuga.

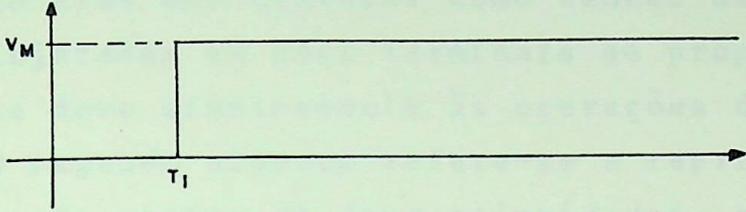
As fontes de corrente são internamente ao programa transformadas em fontes de tensão, multiplicando-as pelas impedâncias de surto equivalentes das barras nas quais estão conectadas.

As formas básicas das fontes são bastantes flexíveis, de tal sorte a facilitar a formação de outras formas de ondas não básicas por superposição. A figura - II5.1 mostra as características das formas básicas.





b) RAMPA



c) DEGRAU

ILUSTRAÇÃO DAS FORMAS DE ONDAS BÁSICAS

FIGURA-II 5.1

II.6 - REPRESENTAÇÃO DE DISJUNTORES

Do ponto de vista computacional as chaves são de um modo geral tratadas sob dois aspectos. No primeiro elas são tratadas como fontes de tensão e corrente que injetadas em seus terminais se propagam pelo sistema. Isto se deve simplesmente às operações de abertura e fechamento. O segundo aspecto refere-se a representação de chaves como sendo pontos de descontinuidades, que tanto podem constituir um circuito aberto como um curto circuito, dependendo da sua condição de operação. Em ambos os aspectos o disjuntor é representado por um resistor série não linear que assume os valores; "zero" quando completamente fechado, "R" quando existe o resistor de chaveamento entre seus terminais e "infinito" quando completamente aberto.

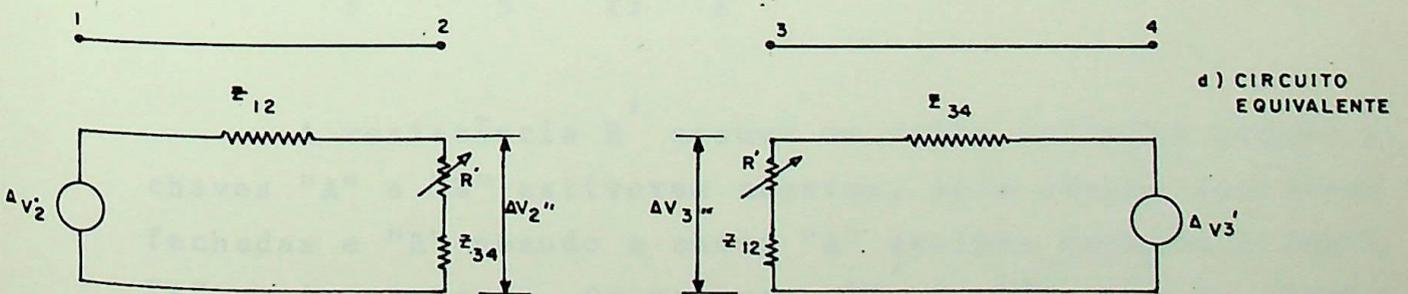
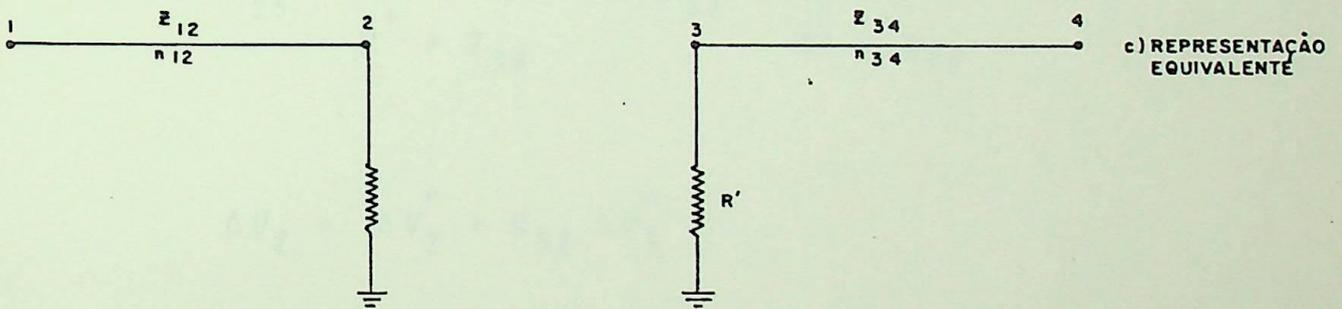
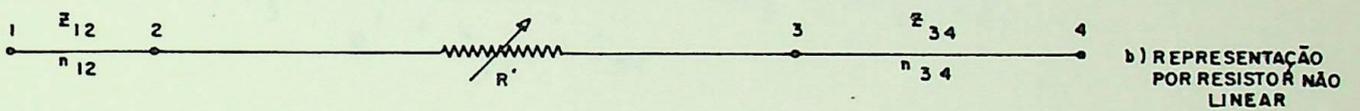
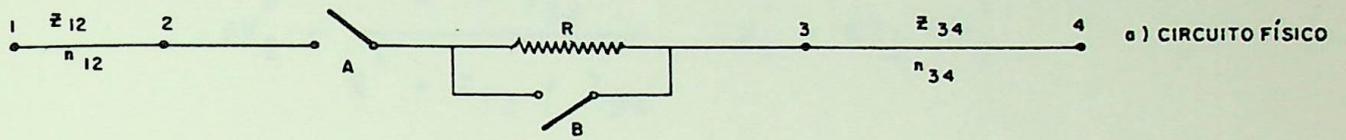
Para simular a operação de chaveamento propriamente dita são criadas no programa duas fontes de tensão para cada terminal, isto porque o resistor de chaveamento é sempre considerado. Se o resistor não existe o programa o assume como zero, se a operação é de fechamento e se a operação for de abertura é usado um valor infinito.

O valor de cada fonte é calculado como descrito na seção I.9. O instante do chaveamento deve ser especificado para cada fase. A abertura de cada contato tem início no instante especificado, no entanto, ela só é realmente efetivada quando a corrente passa por zero ou for menor que um dado valor, que quando não for especificado o programa assume como 0,02 unidade de corrente adotada.

Quanto ao aspecto do disjuntor como elemento terminal, sua representação é feita por um resistor que muda de valor durante o processo de cálculo. É interessante o uso de um circuito equivalente para simular o seu e

feito, pois em caso contrário os coeficientes de transmissão dos elementos conectados aos seus terminais mudariam durante o processo e isto certamente traria dificuldades adicionais.

Das figuras II4.2, I7.3 e da equação (I7.16) vê-se que um disjuntor é adequadamente representado como mostra a figura - II6.1.



REPRESENTAÇÃO DE UM DISJUNTOR CONECTADO ENTRE OS BARRAMENTOS 2 e 3, PARA ESTUDOS DE CHAVEAMENTO

FIGURA II 6.1

Na figura II6.1, tem-se:

Z_{12} - impedância de surto da linha 1 - 2

n_{12} - número de secções da linha 1 - 2

Z_{34} - impedância de surto da linha 3 - 4

n_{34} - número de secções da linha 3 - 4

$$\Delta V_2'' = \frac{R' + Z_{34}}{R' + Z_{12} + Z_{34}} \quad \Delta V_2' = KT_2 \Delta V_2'$$

$$\Delta V_3'' = \frac{R' + Z_{12}}{R' + Z_{12} + Z_{34}} \quad \Delta V_3' = KT_3 \Delta V_3'$$

$$K_{23} = \frac{Z_{34}}{R' + Z_{34}} \quad K_{32} = \frac{Z_{12}}{R' + Z_{12}}$$

$$\Delta V_2 = \Delta V_2'' + K_{32} \Delta V_3''$$

$$\Delta V_3 = \Delta V_3'' + K_{23} \Delta V_2''$$

A resistência R' assume um valor infinito quando as chaves "A" e "B" estiverem abertas, zero quando estiverem fechadas e "R" quando a chave "A" estiver fechada e chave "B" estiver aberta. Os valores $\Delta V_2'$ e $\Delta V_3'$ são as variações de tensões nas barras 2 e 3, respectivamente. Quando se retira o disjuntor do circuito, $\Delta V_2''$ e $\Delta V_3''$ são as variações de tensões provocadas apenas pela onda que inci

de nos terminais 2 e 3 respectivamente, considerando a presença do disjuntor e ΔV_2 e ΔV_3 são as variações finais de tensão nas barras 2 e 3. Os coeficientes KT_2 , KT_3 , K_{23} e K_{32} são calculados a cada vez que muda o valor de R' .

II.7 - REPRESENTAÇÃO DE ELEMENTOS NÃO LINEARES.

Os elementos não lineares são em geral representados por suas curvas características tempo x corrente. Duas destas curvas características tem especial interesse nos estudos de transitórios. A primeira delas é a dos pára-raios e a segunda é de saturação de reatores e transformadores. Ambas podem ser bem representadas pelas equações:

$$E = KI^{1-N} \quad \text{ou} \quad \log E = \log K + (1-N)\log I \quad (\text{II7.1})$$

$$R = KI^{-N} \quad \text{ou} \quad \log R = \log K - N\log I \quad (\text{II7.2})$$

onde:

E - Tensão da barra

R - Resistência não linear do elemento

I - Corrente no elemento

K e *N* - Constantes.

Normalmente não se conhece os valores das constantes *K* e *N*, mas sim alguns pontos da curva característica, a partir dos quais pode-se calculá-las. São necessários apenas dois pontos para calculá-las e eles devem ser escolhidos criteriosamente para se obter uma boa precisão ; Para a curva de saturação um ponto logo no final da parte linear e outro para a máxima corrente de saturação dão bons resultados. Quanto aos para-raios os fabricantes fornecem normalmente apenas os dois pontos necessários.

Elementos não lineares conectados entre fase e terra numa dada barra são representados por linhas

infinitamente longas nas quais não há reflexão no terminal remoto. A impedância de surto da linha é feita igual à resistência não linear. O fato da impedância de surto da linha, que representa o elemento, variar com a tensão da barra sugere o uso de um circuito equivalente para representá-lo, pelas mesmas razões apresentadas na simulação de disjuntores.

Da figura - I7.3 e equação (I7.16), vê-se que a tensão no barramento ao qual se encontrar conectado o elemento não linear pode ser obtida por:

$$E = V_0 \frac{R}{R + Z_e} \quad (\text{II7.3})$$

$$I = \frac{V_0}{R + Z_e} \quad (\text{II7.4})$$

Onde V_0 é a tensão no barramento quando se retira o elemento não linear e E é a tensão final no barramento, considerando o elemento não linear. As equações (II7.2), (II7.3), (II7.4), formam um sistema de equações transcendentes que deve ser resolvido por um processo iterativo. Ao final do processo vê-se que há uma variação na tensão da barra devido ao elemento não linear, esta variação é então injetada na barra. Devido a este fato costuma-se dizer que os elementos não lineares atuam como fontes de tensão.

II.8 - DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA DIGITAL DESENVOLVIDO.

Os princípios fundamentais do programa para computador digital desenvolvido, tais como superposição, geração de ondas viajantes, propagação de ondas em sistemas polifásicos, efeitos de distorção e atenuação, reflexões, representação de elementos terminais por seções de linhas, representação de elementos não lineares por circuitos equivalentes e outros, foram desenvolvidos nas seções precedentes. Também naquelas seções teve-se o cuidado de ilustrar a origem dos fenômenos transitórios e como representá-los. Por outro lado é sempre bom lembrar a utilidade de um programa deste gênero, ou em outras palavras a necessidade de se conhecer os fenômenos transitórios.

Como se sabe os níveis de tensões alcançados durante os fenômenos transitórios são bastante elevados e estão associados a frequências que podem chegar à faixa de 100 KHz. É evidente que tais tensões tem grande influência no desempenho do isolamento dos equipamentos, que devem estar dimensionados para suportá-las ou protegidos contra elas. Assim os resultados obtidos do programa são usados para dimensionamento do nível de isolamento dos equipamentos, bem como de para-raios e outros elementos capazes de reduzir os surtos de tensões transitórias. Em geral é dada maior ênfase aos fenômenos transitórios relacionados às operações de chaveamento e descargas atmosféricas. A representação destes fenômenos e dos sistemas elétricos de um modo geral podem ser feitas através dos elementos básicos estudados nas seções anteriores.

O programa foi desenvolvido para simular um sistema elétrico de potência com qualquer número de fases,

no entanto, devido a limitações de memória no computador usado, as variáveis estão dimensionadas apenas para sistemas com até três fases. Pela mesma razão o número de elementos que o programa aceita está limitado da seguinte forma:

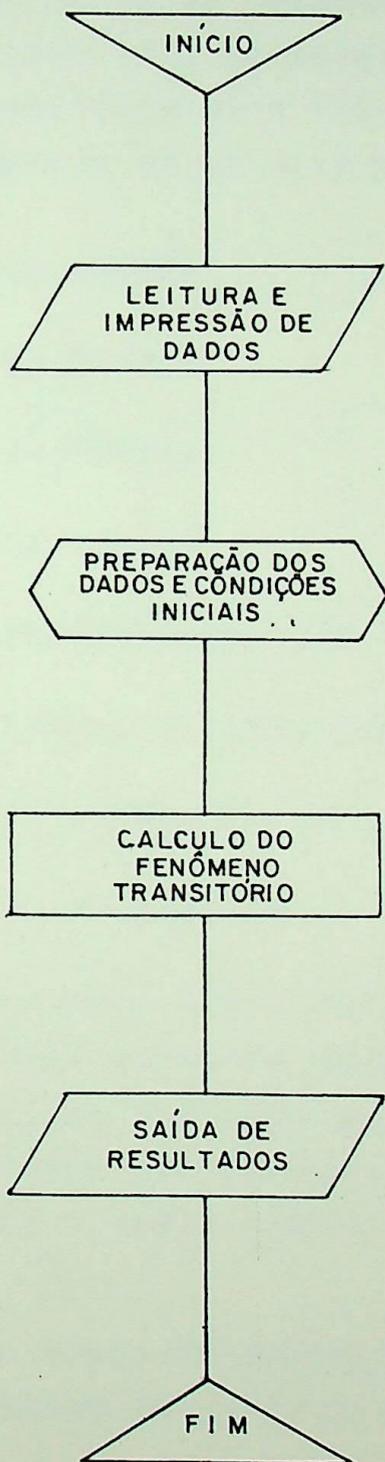
- Número de barras: 50
- Número de Fontes: 10
- Número de elementos não lineares: 9
- Número de coeficientes de transferência: 30
- Número de disjuntores: 10
- Número de linhas de transmissão com mais de uma secção: 85
- Número de linhas de transmissão com extensão nula: 150
- Número de elementos a parâmetros concentrados : 150
- Número de matrizes de transformação: 10

A soma do número de linhas de transmissão, de qualquer número de secções, com o número de elementos a parâmetros concentrados não deve ultrapassar 150.

Estruturalmente o programa pode ser dividido em quatro partes distintas, ou seja:

- Leitura e impressão de dados
- Preparação dos dados e condições iniciais
- Cálculo do fenômeno transitório
- Impressão de resultados.

A divisão do programa em blocos tem mais caráter didático do que prático, embora ela se faça sentir dentro do próprio programa. A sequência natural do programa se encontra na figura - II.8.1, e para melhor compreendê-la, far-se-á uma descrição, mais detalhada de cada bloco.



ESTRUTURA BÁSICA DO PROGRAMA
FIGURA II.8.1

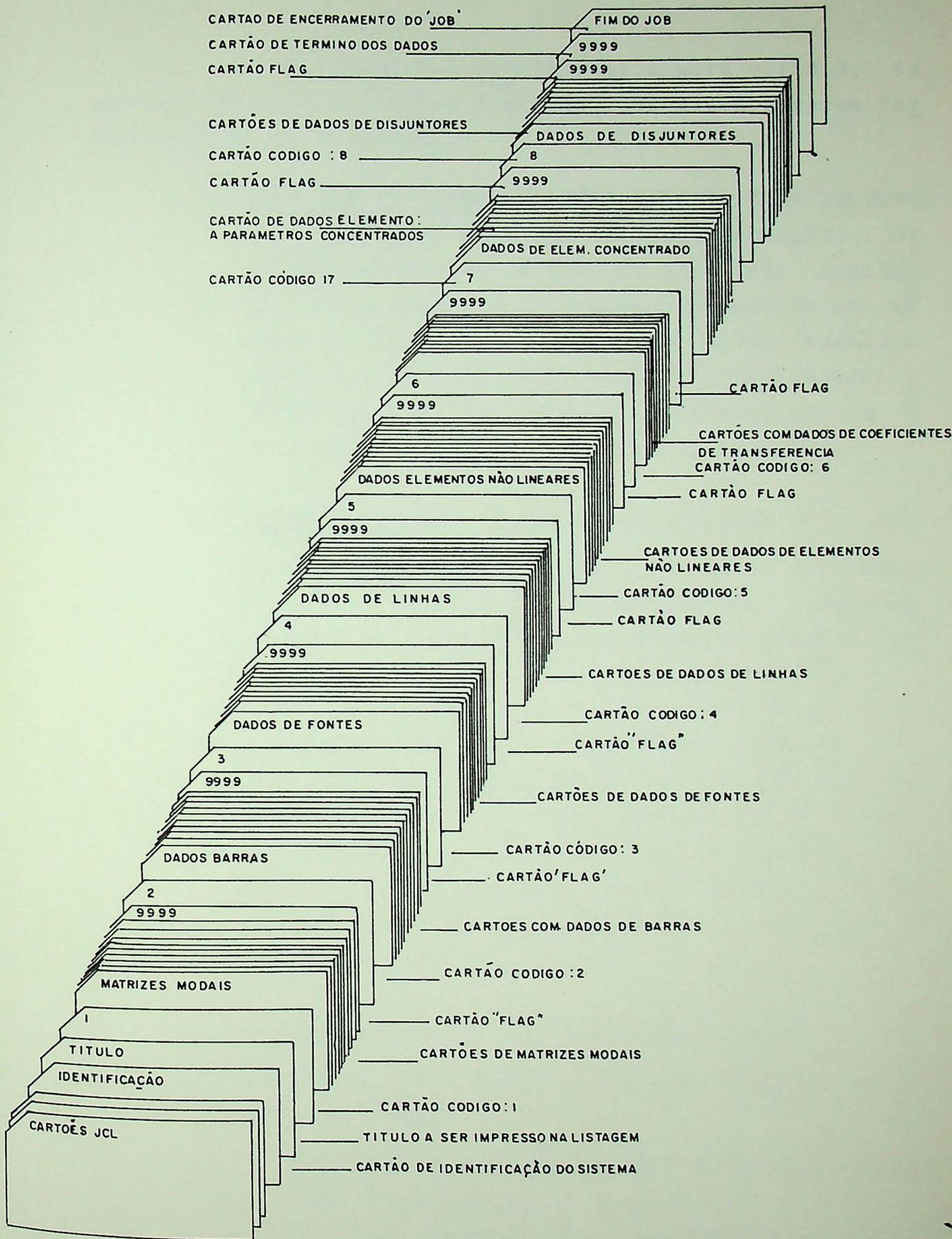
II8.1 - LEITURA E IMPRESSÃO DE DADOS

Os dados requeridos pelo programa, dependendo da representação desejada para os equipamentos, são relativamente fáceis de serem obtidos. A leitura e impressão destes dados é gerenciada, no programa, pela subrotina "Entrada", a qual identifica oito tipos de dados relativos aos diversos elementos de um sistema, eles são:

- 1 - Matrizes modais
- 2 - Dados de Barras
- 3 - Dados de Fontes
- 4 - Dados de Linhas
- 5 - Dados de elementos não lineares
- 6 - Coeficientes de transferência
- 7 - Dados de elementos concentrados
- 8 - Dados de disjuntores.

Estes oito tipos diferentes são agrupados em blocos e a cada bloco antecede um cartão que contém um código que o identifica, o último cartão de cada bloco também é um cartão código que indica o final dos dados daquele bloco, na figura - II8.2 pode-se ver como são formados tais blocos.

Cada bloco de dados é lido por uma sub-rotina específica, a ordem de leitura de cada bloco é aleatória.



EXEMPLO DE MONTAGEM DE ARQUIVO DE DADOS PARA PROCESSAMENTO DO PROGRAMA DE CÁLCULO TRANSITÓRIOS

FIG. I18.2

O fluxograma mostrado na figura - II8.3, da uma boa ideia da subrotina "Entrada". Os dados a serem fornecidos, são os seguintes:

- 1 - MATRIZES DE TRANSFORMAÇÕES MODAIS: Podem ser fornecidas até nove matrizes de transformação de tensões modais em tensões de fase (S), diferentes. Para cada matriz deve ser fornecido um número de 1 a 9 que a identifica. Estas matrizes podem ser obtidas para cada linha do sistema através do programa "Atenua". A décima matriz é a matriz de clark e é interna ao programa.

- 2 - DADOS DE BARRAS: Podem ser fornecidas até quarenta e nove barras, sendo a barra de referência interna ao programa. As barras são identificadas pelo programa por um número de quatro algarismos diferentes de 0000 (zero) e (9999), pois estes representam a barra referência e o final dos dados de barras, respectivamente. Para cada barra além de sua identificação devem ser fornecidos sua tensão de operação de estado permanente no instante inicial do distúrbio, o tipo da tensão que pode ser senoidal ou constante, o tipo de elemento não linear conectado à barra, se existir.

- 3 - DADOS DAS FONTES: Até dez fontes podem ser especificadas pelo usuário, que deve fornecer os seguintes dados:
 - O número da barra na qual a fonte se encontra conectada
 - O tipo de fonte, que pode ser degrau, rampa ou senoide.
 - Para cada fase deve-se fornecer a amplitude

de máxima.

- O instante em que a fonte deve ser conectada ao barramento.
- No caso da fonte ser uma rampa, deve-se fornecer o instante em que ela deixa de crescer.
- O ângulo de fase para o caso da fonte ser senoidal.

Caso a fonte não seja ideal a sua impedância interna deve ser fornecida como dado de linha ou elemento a parâmetro concentrado. Nenhuma restrição é feita quanto ao número de fontes conectadas a mesma barra, desde que o número total de fontes especificadas não ultrapasse dez.

4 - DADOS DE LINHAS: Podem ser especificadas até oitenta e cinco linhas com extensão diferente de zero e mais outras com extensão nula que representam resistores ou linhas infinitas, desde que o número total de linha e elementos a parâmetros concentrados não ultrapasse cento e cinquenta. Para as linhas deve-se fornecer os seguintes dados:

- Números das barras emissora e receptora.
- Matriz de admitância de surto, valores de fase.
- Velocidade de propagação de cada modo
- Constante de tempo e constante de atenuação da resposta a um degrau unitário aplicado à linha.
- Tipo da matriz de transformação de tensões modais em tensões de fase (S), correspon

dente à linha.

- Extensão da linha.

A maioria destes dados podem ser obtidos através do programa "Atenua".

5 - DADOS DOS ELEMENTOS NÃO LINEARES: Podem ser fornecidos até nove tipos diferentes de elementos não lineares, entre para-raios e saturação magnética.

Para cada elemento deve ser fornecido um número de 1 a 9 que o identificará e dois pares de tensão e corrente da sua curva. Se o elemento for um para-raio deve-se fornecer também a tensão disruptiva.

6 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA: Podem ser fornecidos até trinta matrizes destes coeficientes. Deve-se especificar os números que identificam as barras emissoras e receptoras, e os valores dos coeficientes em ambos os sentidos, ou seja, o coeficiente que transfere a variação de tensão da barra emissora para a barra receptora e vice-versa.

Estes coeficientes são matrizes e quando não houver acoplamento entre as fases a matriz é diagonal.

7 - DADOS DE ELEMENTOS A PARÂMETROS CONCENTRADOS :

Parâmetros concentrados normalmente representam equipamentos tais como geradores, reatores, transformadores, mesmo bancos de capacitores. Pode-se representar tais elementos através de suas indutâncias e /ou capacitâncias de fuga ou pela sua capacitância própria, como no caso de bancos de capacitores. Os dados relativos a tais equipamentos são normalmente encontrados'

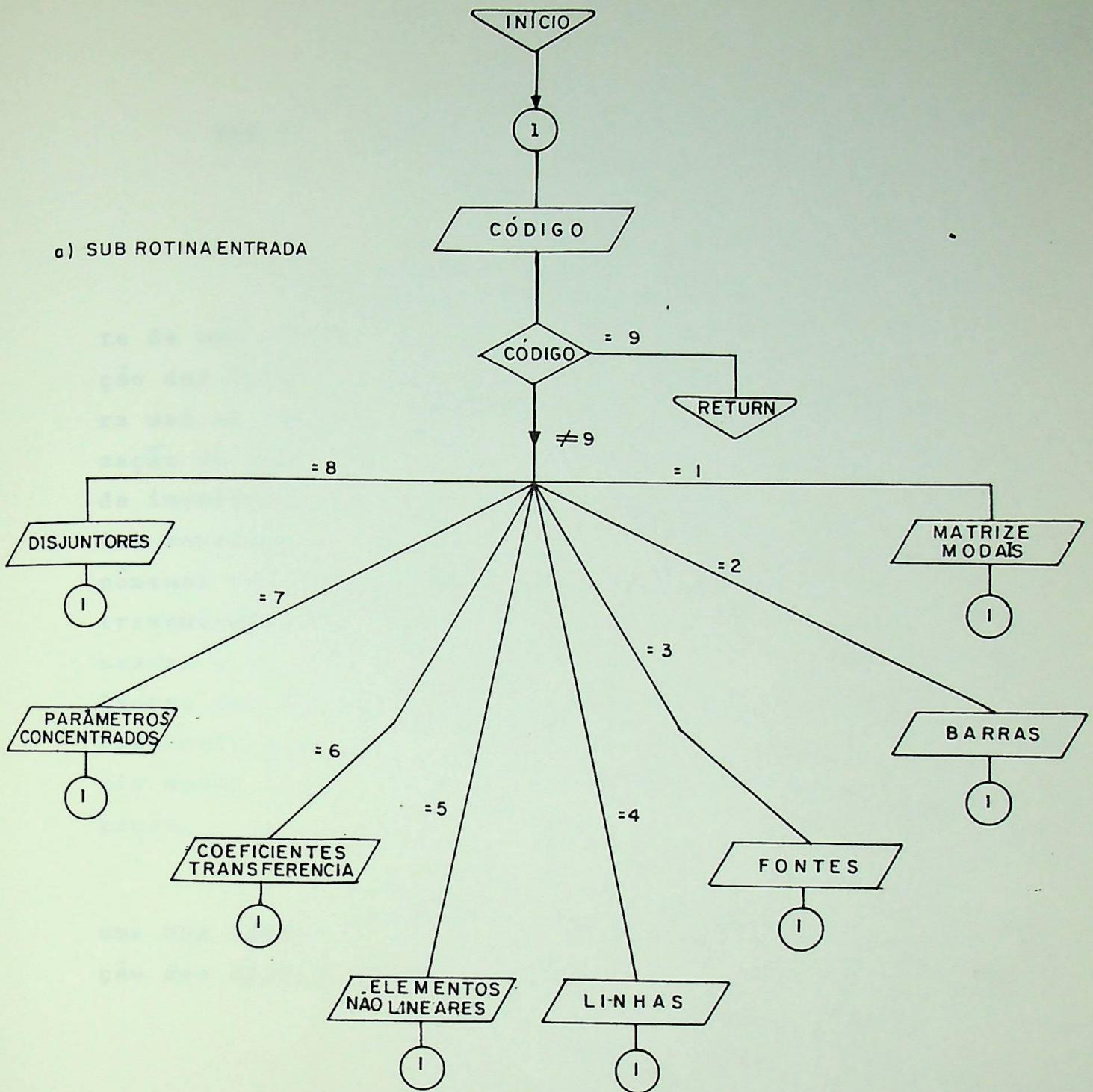
na forma de suas reatâncias percentuais, nas suas bases de potência e tensões nominais. É desta forma que eles entram para o programa o qual os transforma numa secção de linha capaz de representá-lo. Os dados de entrada são portanto, a reatância percentual a potência e tensão nominais, o tipo de conexão, se delta ou estrela aterrada. Evidentemente devem ser especificadas as barras entre as quais os elementos se encontram conectados, obedecendo aos critérios estabelecidos na secção II.4.

8 - DADOS DE DISJUNTORES: A representação dos disjuntores tem grande importância e dela depende em grande parte, o sucesso dos estudos de transitórios. A representação desenvolvida permite a simulação de resistores de chaveamento bem como a operação não simultânea dos polos, entre outras características já expostas. Os dados a serem fornecidos, são:

- Tipo de operação a realizar, abertura ou fechamento
- Instante em que a operação se inicia, para cada polo.
- Resistência de chaveamento para cada polo.
- No caso de abertura, deve-se fornecer a corrente a ser interrompida, em módulo e ângulo, para cada fase. A corrente mínima para a qual o disjuntor interrompe o arco deve ser especificada, quando se deseja interromper a corrente fora do zero natural.

A impressão dos dados é feita logo após a leitura, tal como foram fornecidos.

a) SUB ROTINA ENTRADA



b) SUB ROTINA SAÍDA



FLUXOGRAMA DAS SUB ROTINAS DE ENTRADA E SAÍDA DE DADOS
FIGURA II 8.3

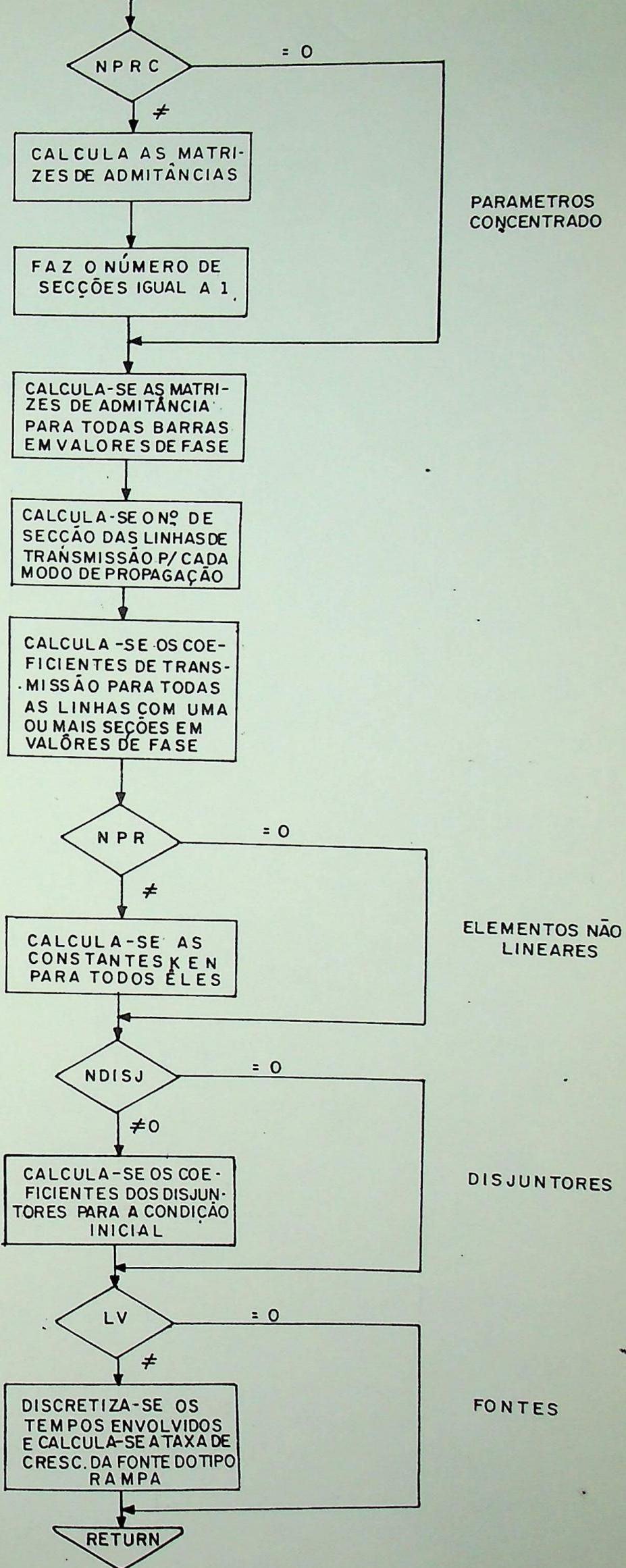
II8.2 - PREPARAÇÃO DOS DADOS:

Este estágio do programa constitui basicamente de uma subrotina, a "PREPDADOS". Nela se faz a adaptação dos dados lidos anterior de forma a condicioná-los para uso no programa digital. Um exemplo disto é a discretização do tempo que passa a ser medido em números inteiros de intervalos de tempo básico (θ). Também se faz o cálculo das constantes que serão usadas durante o cálculo dos fenômenos transitórios, dentre elas estão as constantes de transmissão das linhas, as constantes dos elementos não lineares e os coeficientes envolvidos nos circuitos equivalentes dos disjuntores. É importante lembrar que todos estes coeficientes se referem a valores de fases, pois a teoria modal é utilizada somente durante o processo de propagação.

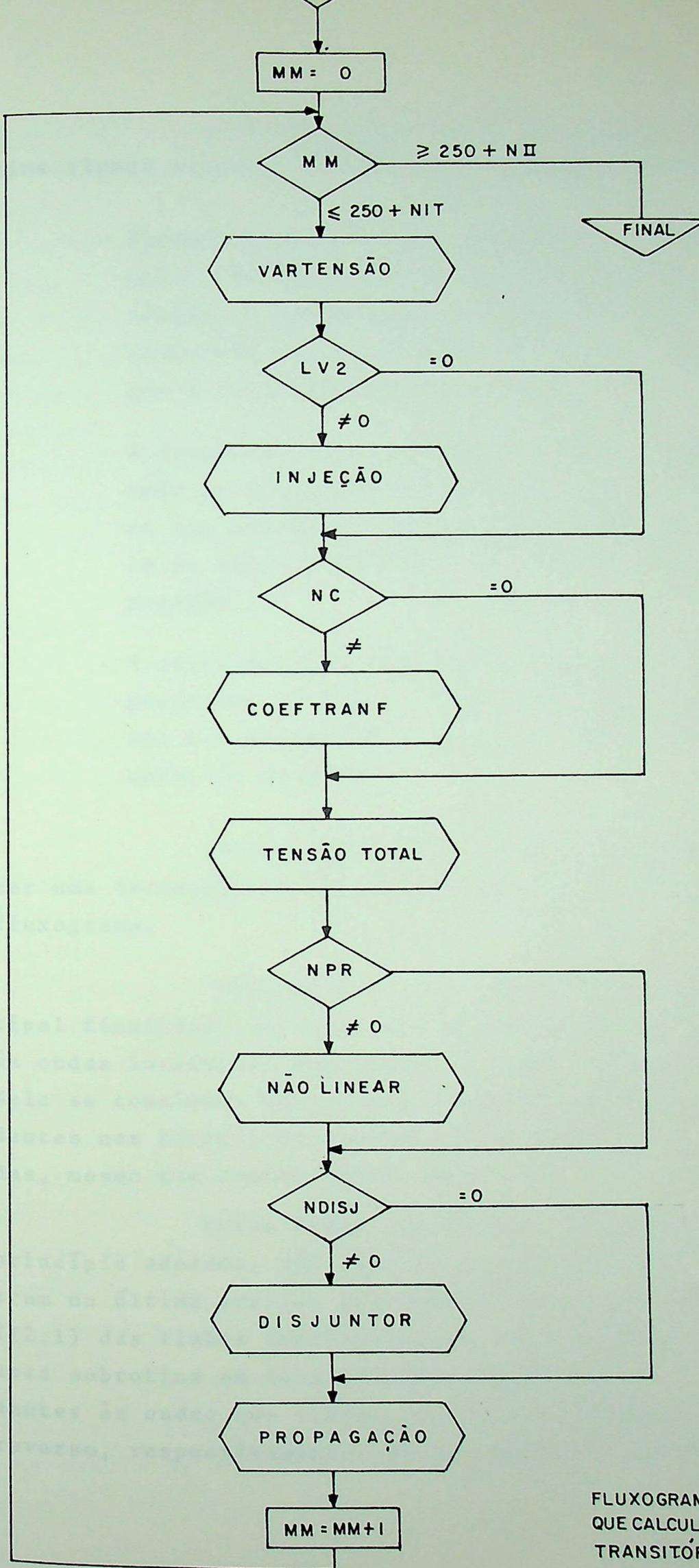
O fluxograma mostrado na figura - II8.4 dá uma boa noção do que é feito durante o estágio de preparação dos dados.

II8.3 - CÁLCULO DO FENÔMENO TRANSITÓRIO.

Este é o estágio de maior importância do programa, nele é desenvolvido todo o processo transitório. É portanto importante conhecê-lo com detalhes, e a melhor maneira de fazê-lo é discutindo cada subrotina envolvida. O fluxograma apresentado na figura - II8.5 a seguir mostra a sequência das subrotinas dentro do estágio.



ESTRUTURA BÁSICA DA SUBROTINA PREPDADAS
 FIGURA II 8,4



FLUXOGRAMA DAS SUB ROTINAS
 QUE CALCULAM O FENOMENO
 TRANSITÓRIO

Antes de entrar na discussão de cada subrotina alguns aspectos devem ser relembrados, são eles:

- Durante o processo de propagação todos os cálculos são efetuados em valores de fase, com exceção evidentemente do processo de transmissão, incluindo os efeitos de atenuação e distorção, que é feito em valores modais.
- A resposta obtida devido ao fenômeno transitório, onde se considera a parte passiva do sistema, deve ser somada a resposta de estado permanente para se obter a resposta final (princípio da superposição).
- A condição de estado permanente é fornecida ao programa, ou seja as tensões nas barras e correntes nos disjuntores, para o instante inicial, são dados de entrada.

Feitas estas observações passar-se-á a fazer uma descrição de cada subrotina, na ordem mostrada no fluxograma.

"VARTENSÃO": Esta subrotina tem como principal finalidade calcular as variações de tensões devido às ondas incidentes nas barras à cada intervalo de tempo. Nela se considera que a cada instante existem ondas incidentes nas barras, provenientes das linhas a elas conectadas, mesmo que tenham valor zero.

Estas ondas incidentes, de acordo com o princípio adotado, são degraus e seus valores se encontram na última posição das tabelas de propagação (figura II.2.1) das linhas correspondentes. Estes valores chegam a esta subrotina em duas matrizes "DVD" e "DVR" correspondentes às ondas que viajam no sentido direto e no sentido reverso, respectivamente. Nestas matrizes as colunas cor

respondem aos modos de propagação e as linhas correspondem às linhas de transmissão com número de secções diferentes de zero. Os valores contidos nestas matrizes são valores modais, eles são transformados para valores de fases e são então multiplicados pelos respectivos coeficientes de transmissão, para se obter as variações de tensões das barras nas quais os terminais da linha estão conectados. Isto é feito para cada linha de transmissão do sistema, portanto para cada linha das matrizes "DVD" e "DVR" que nada mais são do que vetores de tensões modais incidentes respectivamente nas barras receptoras e emisoras das linhas de transmissão.

Uma vez obtidas as variações de tensões de vido as ondas incidentes, provenientes de todas as linhas, estas variações são corrigidas para aquelas barras onde se encontram conectados os disjuntores. Estas correções são feitas levando em consideração as condições de operação dos disjuntores no instante considerado.

"INJEÇÃO": Esta subrotina tem por finalidade de simular as fontes de tensão existentes no programa. Ela calcula os degraus que aproximam as formas de ondas das diversas fontes para cada fase, no instante considerado e os injeta nas barras onde estas fontes estão conectadas. Quando se injeta um degrau de tensão em dada barra ela sofre uma variação de tensão correspondente ao degrau injetado. Assim a injeção de um degrau de tensão a uma dada barra é feita somando o valor do degrau à variação de tensão calculada na subrotina "VARTENSÃO". Isto aliás garante que este degrau, juntamente com a variação de tensão devido às ondas incidentes, serão transmitidos através de todas as linhas conectadas à barra como se verá na subrotina "TRANSMISSÃO".

"COEFTRANS": Esta subrotina simula os coeficientes de transferência especificados. Assim se existe uma matriz de coeficientes de transferência, especificada

pelo usuário, entre duas barras a variação de tensão final, por exemplo, a da barra emissora é obtida somando à sua variação de tensão, a variação de tensão da barra receptora multiplicada pelo coeficiente de transferência correspondente. A variação de tensão final na barra receptora é obtida pelo mesmo processo. Como estes coeficientes são matrizes é possível se considerar o acoplamento mútuo entre fases.

"TENSÃO TOTAL": Esta subrotina como o próprio nome indica calcula as tensões totais nas barras. para tal somam-se as variações de tensões anteriormente calculadas, aos valores das tensões transitórias calculadas no instante anterior, obtendo assim o valor da tensão transitória no atual instante. A estas tensões transitórias somam-se os valores das tensões de estado permanente para o instante em questão, obtendo-se assim as tensões totais nas barras, para este instante.

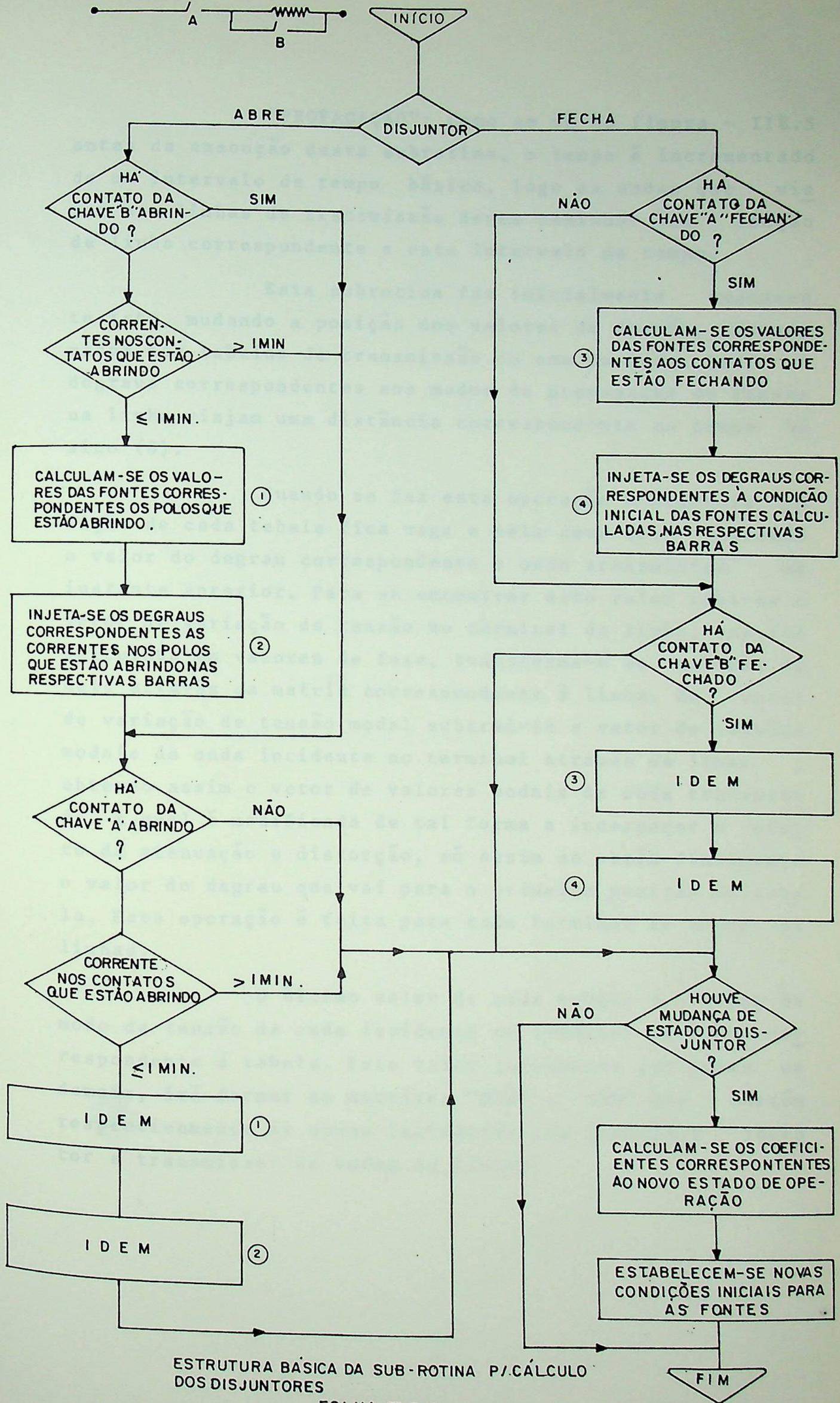
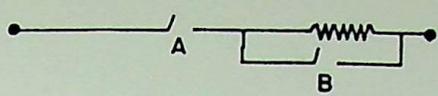
Nesta subrotina calcula-se também as correntes instantâneas totais nos disjuntores e as tensões entre seus terminais (tensões transitórias de restabelecimento).

"NÃO LINEAR": Nesta subrotina se fazem as correções das tensões nas barras onde há elementos não lineares conectados. Os elementos não lineares são representados pela sua curva característica (tensão x corrente), tal como descrito na seção - II.7. Dois tipos de elementos não lineares são considerados, os para-raios que são representados por uma resistência de valor infinito até que a tensão atinja um determinado nível (tensão disruptiva), a partir daí eles são representados pela sua curva característica. A saturação magnética é representada exclusivamente pela chamada curva característica. Isto para efeito de simulação, é como se a tensão disruptiva fosse nula. No programa os elementos não lineares de maneira geral são simulados pelo seguinte algoritmo:

- 1 - Testa se o módulo da tensão \bar{e} é igual ou superior à tensão disruptiva ou se em algum instante anterior o foi. Caso esta tensão para o dado elemento não tenha sido atingida passa-se a outro elemento.
- 2 - Faz-se inicialmente o resistor não linear igual a zero, e a tensão corrigida igual a tensão atual da barra.
- 3 - Calcula-se a corrente no elemento para o valor de resistência atual. Com este valor de corrente calcula-se a nova resistência do elemento não linear.
- 4 - Multiplica-se a corrente pela nova resistência e obtem-se a nova tensão corrigida para a barra.
- 5 - Compara-se a nova tensão corrigida com a anterior, se a diferença entre estas for menor do que a tolerância admitida procege-se, em caso contrário volta-se ao item 3.
- 6 - Corrige-se a tensão e a variação de tensão do barramento em questão e passa-se para outro elemento não linear voltando ao item 1.

"DISJUNTOR": Esta subrotina é responsável pelas operações de chaveamento, nela se estabelece os valores das fontes que representam o chaveamento e estabelece as mudanças de estado da chave. O estado inicial dos polos do disjuntor é fornecido ao programa, e os coeficientes que o representam são calculados para esta condição inicial, no estágio de preparação de dados. As fontes são inicialmente zeradas e sempre que ocorre uma operação de chaveamento o valor da fonte correspondente é calculado, além dos coeficientes para nova condição de operação.

Para cada disjuntor se desenvolve o procedimento mostrado na figura - II.8.6



ESTRUTURA BÁSICA DA SUB-ROTINA P/ CÁLCULO DOS DISJUNTORES

"PROPAGAÇÃO": Como se vê na figura - II8.5 antes da execução desta subrotina, o tempo é incrementado de um intervalo de tempo básico, logo as ondas que viajam nas linhas de transmissão devem caminhar uma secção de linha correspondente a este intervalo de tempo.

Esta subrotina faz inicialmente exatamente isto, mudando a posição dos valores de tensão, armazenados nas tabelas de transmissão de uma posição. Assim os degraus correspondentes aos modos de propagação de tensão na linha viajam uma distância correspondente ao tempo básico (θ).

Quando se faz esta operação a primeira posição de cada tabela fica vaga e nela deve ser colocada o valor do degrau correspondente a onda transmitida no instante anterior. Para se encontrar este valor toma-se o vetor de variação de tensão no terminal da linha, que foi calculada em valores de fase, transforma-o em valores modais através da matriz correspondente à linha. Do vetor de variação de tensão modal subtrai-se o vetor de tensões modais da onda incidente no terminal através da linha, obtendo assim o vetor de valores modais da onda transmitida. A qual é modificada de tal forma a incorporar o efeito da atenuação e distorção, só assim se obtém finalmente o valor do degrau que vai para a primeira posição da tabela. Esta operação é feita para cada terminal de todas as linhas.

O último valor de cada tabela é o valor do modo de tensão da onda incidente no terminal da linha correspondente à tabela. Este valor juntamente com todos os demais, irá formar as matrizes "DVR" e "DVD" que contém respectivamente as ondas incidentes nos terminais receptor e transmissor de todas as linhas.

III.3 - Conclusões

A finalidade desta seção é apresentar as conclusões e recomendações de caráter geral, bem como de exemplos que ilustrem as características básicas.

Dentre estas características, a seguir se descrevem, destacando-se:

- O grau de facilidade de acesso e manutenção de dados armazenados em sistemas de arquivos.
- O tempo total de processamento e a quantidade de memória necessária.
- A forma como são armazenados os dados e o processo de recuperação.

PARTE III

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A possibilidade de adaptação de sistemas de arquivos existentes para atender às necessidades de um sistema de arquivos.

Estas características podem ser utilizadas durante o desenvolvimento de um sistema de arquivos e as conclusões de III-3 de caráter final.

III.1 - INTRODUÇÃO

A finalidade desta última parte é apresentar as conclusões a respeito do programa como um todo, através de exemplos que ilustrem de forma mais eficiente as suas características básicas.

Dentre estas características, a nível de usuário, destaca-se:

- O grau de facilidade em se encontrar e manusear os dados requeridos para o processamento.
- O tempo total de processamento e a quantidade de memória necessários.
- A forma como são apresentados os resultados do processamento.
- O grau de precisão e a completude destes resultados.
- A versatilidade do programa em se adaptar aos diversos sistemas elétricos existentes, ou seja sua capacidade de bem representar os componentes de um sistema elétrico.

Estas características podem ser notadas durante o desenvolvimento do exemplo e serão ressaltadas na seção III-3 de conclusões finais.

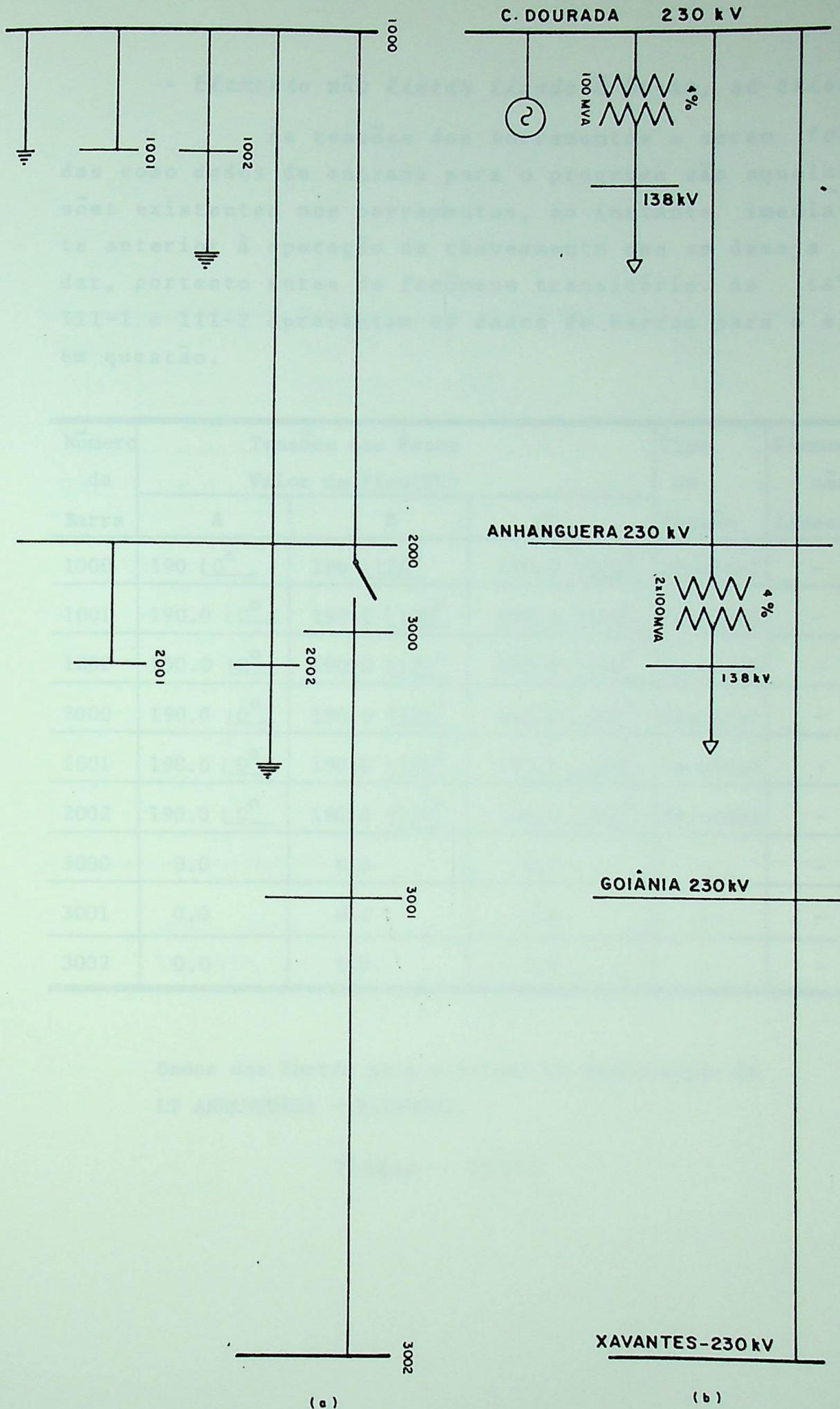
III.2 - ESTUDO DE UM SISTEMA

O sistema apresentado aqui como exemplo é um sistema de transmissão em 230 KV, das Centrais Elétricas de Goiás S/A, responsável pelo abastecimento da cidade de Goiânia. A figura - III.1 mostra um diagrama unifilar do referido sistema.

Tratar-se-á aqui de dois estudos básicos, ou seja a energização da linha de transmissão que liga as barras 3000 - 3001 - 3002 e a abertura desta mesma linha quando ocorre uma falta trifásica na barra 3002. Os dados do sistema necessários dependem de cada caso a ser estudado e estão divididos em dados de linhas, dados de barras, dados de elementos a parâmetros concentrados, dados de disjuntores, matrizes modais de transformação, dados de elementos não lineares e outros descritos na seção II -8.1. Para este sistema tem-se:

III.2.1 - Dados das Barras: Os dados de barras necessários ao programa são:

- O número e nome das diversas barras que compoem o sistema. O número de cada barra deve ser único e constitue a referência do programa.
- As tensões e respectivos ângulos em cada barra. Estas tensões podem ser tensões senoidais com frequência industrial (60 Hz) quando a barra estiver em operação, quer seja com o sistema em regime normal ou com falta em alguma de suas barras. No entanto, uma barra ao ser desenergizada pode permanecer com uma tensão remanescente durante algum tempo que para efeito de cálculo de transitórios é considerada constante.
- Tipo da tensão da barra, se senoidal ou constante.



- a) DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA EM ESTUDO
 b) DIAGRAMA UTILIZADO NO PROCESSAMENTO DIGITAL

FIGURA - III. 2. 1

- Elemento não linear ligado à barra, se existir .

As tensões dos barramentos a serem fornecidas como dados de entrada para o programa são aquelas tensões existentes nos barramentos, no instante imediatamente anterior à operação de chaveamento que se deseja estudar, portanto antes do fenômeno transitório. As tabelas III-1 e III-2 apresentam os dados de barras para o estudo em questão.

Número da Barra	Tensões nas Fases Valor de Pico(KV)			Tipo da Tensão	Elemento não Linear
	A	B	C		
1000	190 $\angle 0^\circ$	190 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
1001	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
1002	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
2000	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
2001	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
2002	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
3000	0.0	0.0	0.0	-	-
3001	0.0	0.0	0.0	-	-
3002	0.0	0.0	0.0	-	-

Dados das Barras para o estudo de energização da
LT ANHANGUERA - XAVANTES.

TABELA - III-1

Número da Barra	Tensões nas Fases Valor de Pico(KV)			Tipo da Tensão	Elemento não Linear
	A	B	C		
1000	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
1001	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
1002	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
2000	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
2001	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
2002	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
3000	190.0 $\angle 0^\circ$	190.0 $\angle 120^\circ$	190.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-
3001	51.0 $\angle 0^\circ$	51.0 $\angle 120^\circ$	51.0 $\angle 240^\circ$	Senoidal	-

Dados para estudo de abertura da LT ANHANGUERA - XAVANTES, com falta trifásica em Xavantes.

TABELA - III-2

III-2.2 - Dados de Linhas: Os dados de linhas são obtidos através do programa "ATENUA", cujos resultados ser vem para se formar um banco de dados. Entre os resultados apresentados pelo programa "ATENUA" estão a matriz de admi tância de surto para uma dada frequência, a matriz de transformação dos vetores de tensão, a velocidade de propa ga ção das ondas dos diversos modos e uma tabela contendo a resposta, no final da linha, a um degrau unitário aplicado no seu início, em função do tempo.

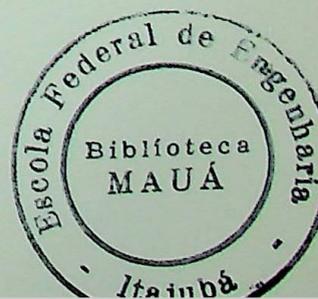
Estes dados entram para o programa de cálcu lo de transitórios na forma como são apresentados pelo pro gra ma "ATENUA", com exceção da resposta ao degrau unitá ri o, que entra para o programa somente quando se deseja considerar os efeitos das perdas e variação dos parâmetros com a frequência. Apenas dois valores da resposta consti tu em dados de entrada, ou seja, o valor final (máximo) da resposta e a constante de tempo desta resposta, isto é, o tempo gasto para a resposta atingir 63,2% do seu valor fi nal. Quando esta constante de tempo não for especificada, o programa a assume como nula e neste caso a onda sofre a pe nas uma atenuação sem distorção, pois a resposta ao de gr au assume a forma de uma constante de atenuação.

Uma observação importante é que as linhas de transmissão com extensão infinita são representadas no pro gra ma com seu terminal remoto ligado à referência e exten s ão nula. Este tipo de linha é muito utilizado quando se deseja considerar apenas os efeitos provocados por um ter mi nal da LT. A tabela III-3 apresenta os dados das linhas, necessários ao processamento. A matriz de transformação mo dal utilizada encontra-se na tabela - I5.2.

RAMO ENTRE AS BARRAS	MODO	EXTENSÃO (KM)	VELOCIDADE ($10^3 \times \text{Km/s}$)	ATENUAÇÃO (P.U.)	CONSTANTE TEMPO (μs)	MATRIZES DE ADMITÂNCIA DE SURTO ($10^{-3} \times \text{MH0}$)
1000 - 2000	1		250.0	0.50	70.0	2.00 -0.48 -0.30
	2	198.0	300.0	0.95	30.0	-0.48 2.00 -0.48
	3		300.0	0.95	30.0	-0.30 -0.48 2.00
3000 - 3001	1		260.0	0.90	20.0	2.00 -0.48 -0.30
	2	12.0	300.0	0.99	15.0	-0.48 2.00 -0.48
	3		300.0	0.99	15.0	-0.30 -0.48 2.00
3001 - 3002	1		260.0	0.90	20.0	2.00 -0.48 -0.30
	2	18.0	300.0	0.99	15.0	-0.48 2.00 -0.48
	3		300.0	0.99	15.0	-0.30 -0.48 2.00
1002 - 0	1		300.0	1.0	0.0	3.10 -0.95 -0.70
	2	0.0	300.0	1.0	0.0	-0.95 3.10 -0.70
	3		300.0	1.0	0.0	-0.70 -0.70 3.00
2002 - 0	1		300.0	1.0	0.0	2.40 -0.72 -0.52
	2	0.0	300.0	1.0	0.0	-0.72 2.40 -0.52
	3		300.0	1.0	0.0	-0.52 -0.52 2.20

DADOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA O SISTEMA EM ESTUDO

TABELA - III.3



III-2.3 - Dados dos elementos a parâmetros concentrados: Os elementos a parâmetros concentrados são aqueles nos quais o tempo de propagação das ondas é praticamente despresível. Estes no programa são representados por secções de linhas. Os dados requeridos pelo programa para representar tais elementos são a sua reatância em valores percentuais , as bases de potência e tensão a que estão referidos e o tipo de ligação, ou a reatância em valores omhicos e o tipo de ligação, neste caso deixa-se em branco os campos da potência e tensão base. As capacitâncias de fuga representadas no estudo são aquelas capacitâncias de fuga das buchas de equipamentos ligados aos barramentos, tais como disjuntores, transformadores de força, transformadores de corrente e potencial, para-raios, chaves seccionadores e outros. A tabela - III.4 mostra os dados dos elementos considerados a parâmetros concentrados no estudo.

ELEMENTO	RAMO	REATÂNCIA (% OU Ω)	POTÊNCIA BASE (MVA)	TENSÃO BASE (KV)	LIGAÇÃO
Geradores	1000-0	30%	3 x 85	230	Y_{\neq}
TRAFO	1000-1002	4%	100	230	Y_{\neq}
C. Fuga	1000-1001	-1.1×10^6	-	-	Y_{\neq}
TRAFO	2000-2002	4%	2 x 100	230	Y_{\neq}
C. Fuga	2000-2001	-1.1×10^6	-	-	Y_{\neq}

Dados dos elementos a parâmetros concentrados do estudo.

TABELA - III.4

III-2.4 - Dados do disjuntor: Nas operações de abertura ou fechamento dos disjuntores estão as origens dos fenômenos transitórios. Assim os dados dos disjuntores devem estabelecer as condições nas quais ocorre o chaveamento; em outras palavras, deve-se indicar o instante em que se inicia o processo. Isto porque na energização de uma linha de transmissão por exemplo, comumente se deseja que o chaveamento ocorra quando a tensão em determinada fase passe por seu valor máximo. Como a tensão nos barramentos é expressa por $V = V_m \cos(\omega t + \theta)$, há que se determinar o instante de tempo em que a tensão da fase em questão passa por seu valor máximo. Quando o disjuntor possuir resistor de chaveamento, deve-se também fornecer o seu valor ohmico e o instante de seu chaveamento. Na operação de abertura fornece-se a corrente que o disjuntor deve interromper e o valor de corrente para a qual o arco se extingue.

O disjuntor do estudo não possui resistor de chaveamento e tanto o fechamento quanto a abertura, ocorrem em $t = 0$. A interrupção do arco se dá para uma corrente de 2.0 Amperes, enquanto que a corrente que o disjuntor deve interromper é 1.5 KA.

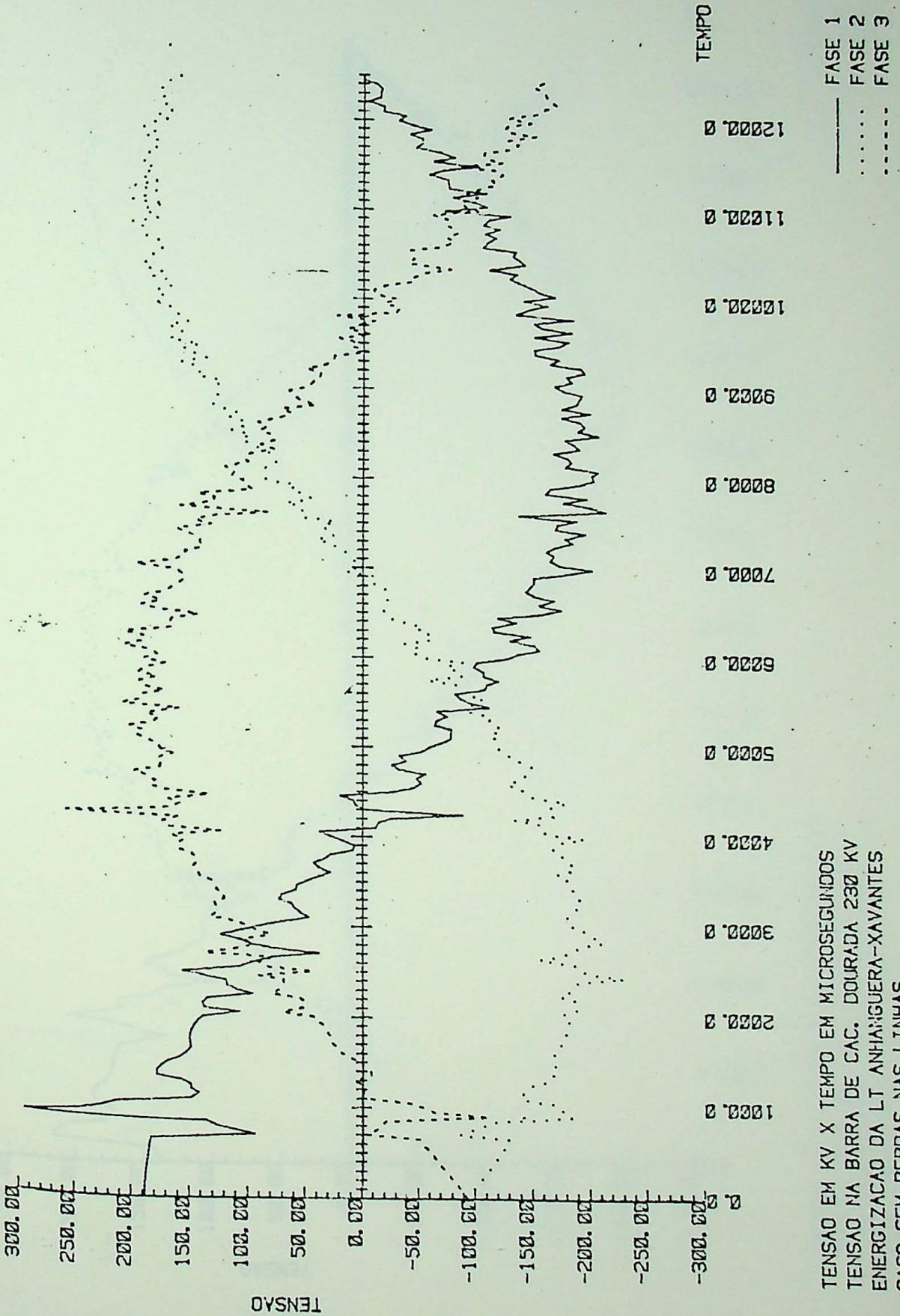
III-2.5 - Resultados obtidos no estudo de energização da LT: Os resultados obtidos durante o estudo de energização da linha de transmissão Anhanguera-Xavantes (3000 - 3001 - 3002), são apresentados a seguir na forma de gráficos da tensão na barra em KV versus tempo em microsegundos. Para o estudo considera-se que a linha foi energizada no instante em que a tensão da fase - 1 passa por seu valor máximo.

Dois casos básicos estão apresentados. No primeiro não se considerou os efeitos da atenuação e distorção das ondas que se propagam nas linhas (efeitos das perdas), enquanto que no segundo tais efeitos foram considerados. Uma

142

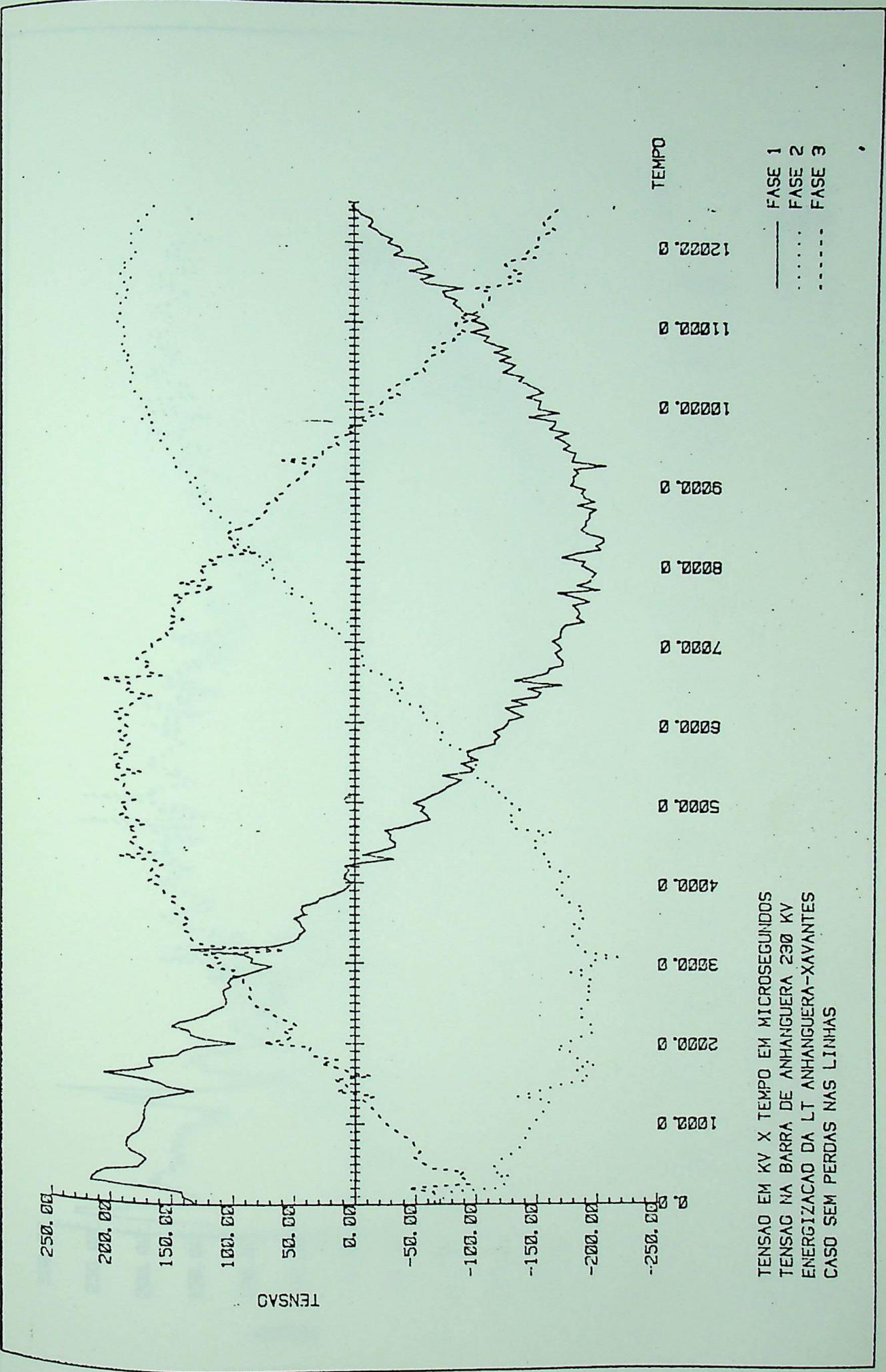
breve análise dos resultados obtidos, mostra claramente a importância de se considerar os efeitos da atenuação e distorção das ondas. Nota-se, por exemplo, que o valor de pico da tensão na barra de xavantes cai de 320 KV para 260 KV quando se considera as perdas, nota-se também a nítida diferença entre as oscilações das tensões nos dois casos.

Estes dois fatos ilustram claramente a importância de se considerar os efeitos da atenuação e distorção das ondas, o que não deixa de ser, por outro lado, uma prova contundente do poderio dos métodos empregados no programa, para a simulação dos elementos do sistema.



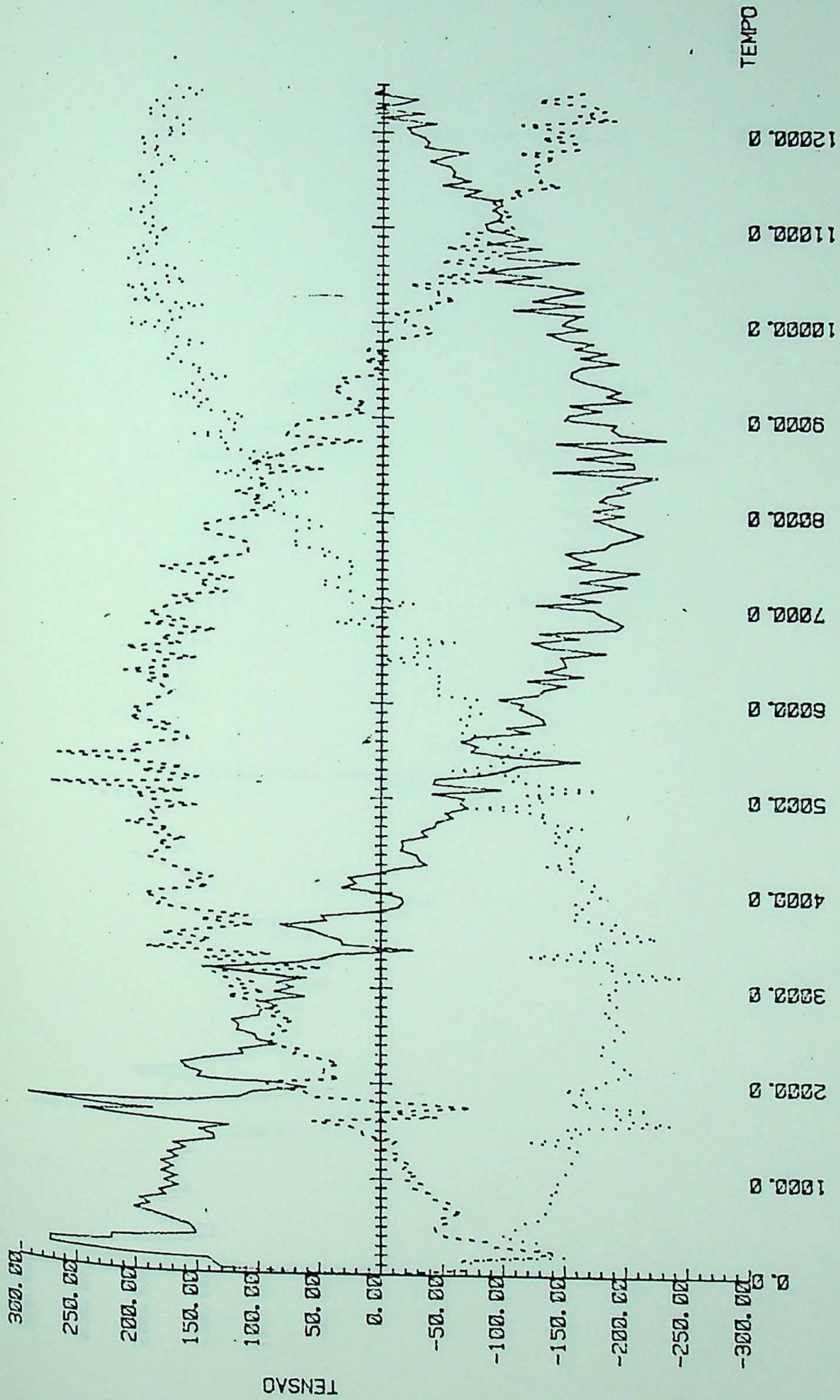
TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
TENSÃO NA BARRA DE CAC. DOURADA 230 KV
ENERGIZAÇÃO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
CASO SEM PERDAS NAS LINHAS

Figura - III.2.2.



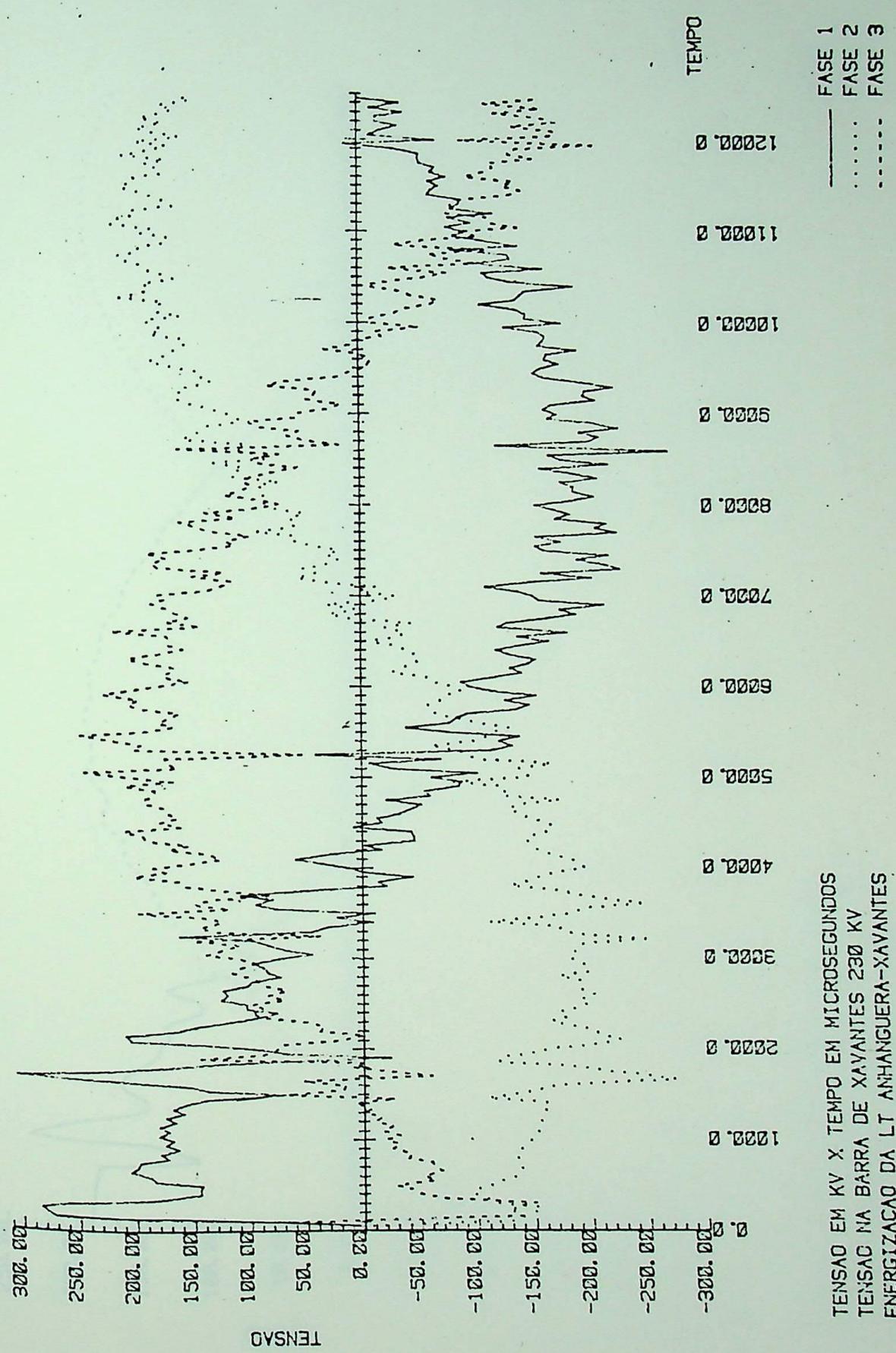
TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
TENSÃO NA BARRA DE ANHANGUERA 230 KV
ENERGIZAÇÃO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
CASO SEM PERDAS NAS LINHAS

Figura - III2.3



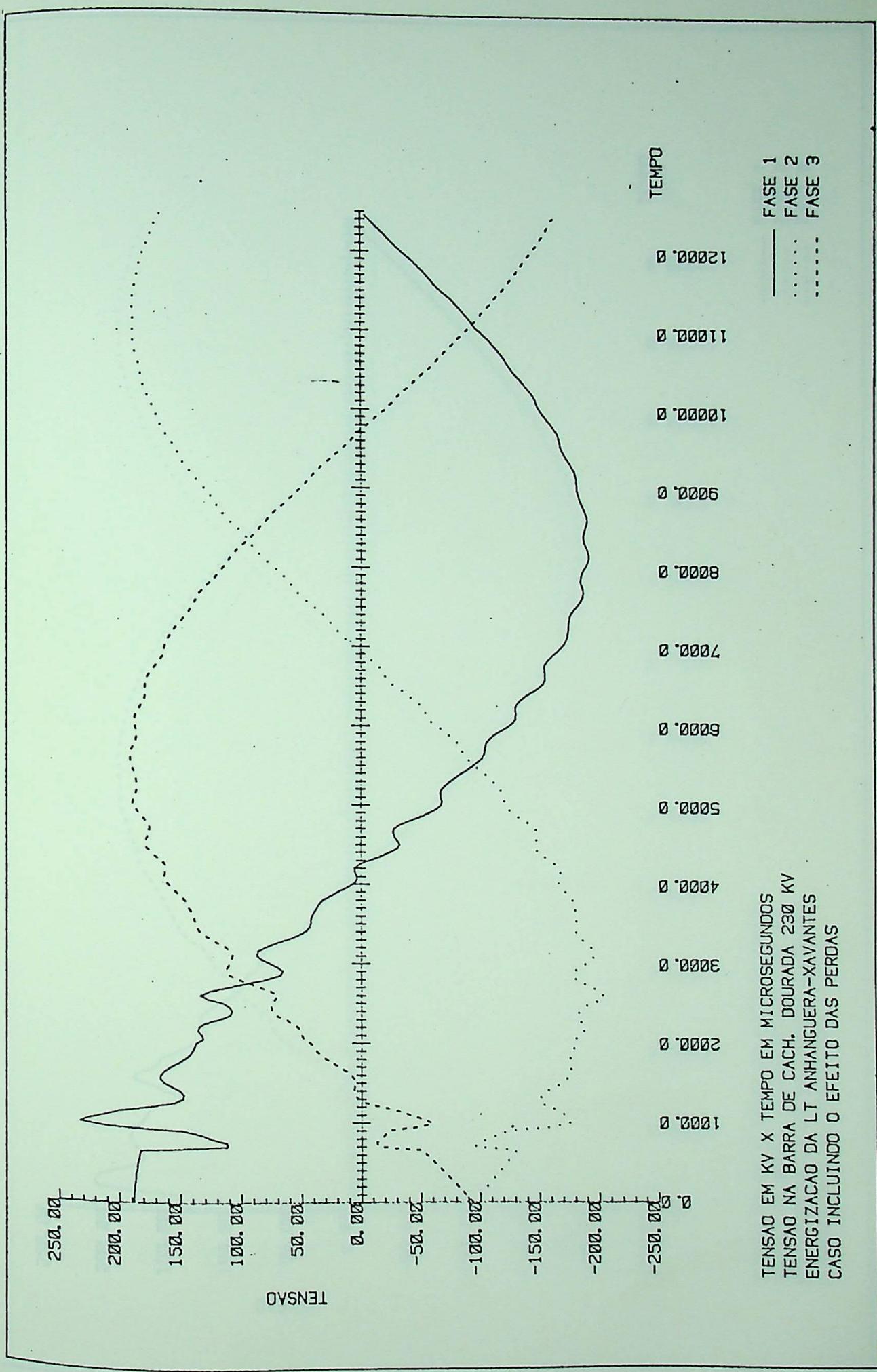
TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 TENSÃO NA BARRA DE GOIANIA 230 KV
 ENERGIZACAO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
 CASO SEM PERDAS NAS LINHAS

Figura - III2.4



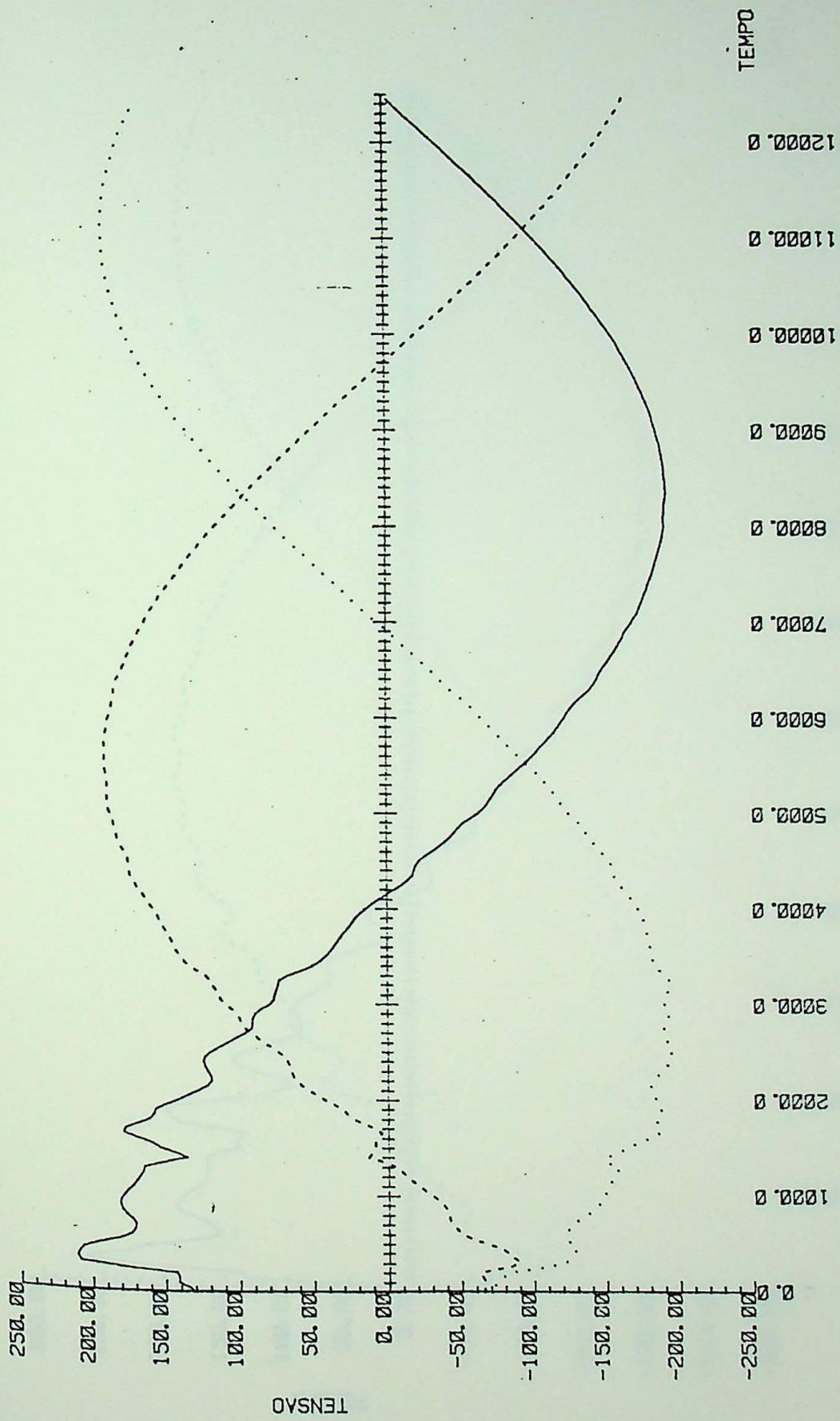
TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
TENSÃO NA BARRA DE XAVANTES 230 KV
ENERGIZACAO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
CASO SEM PERDAS NAS LINHAS

Figura - III.2.5



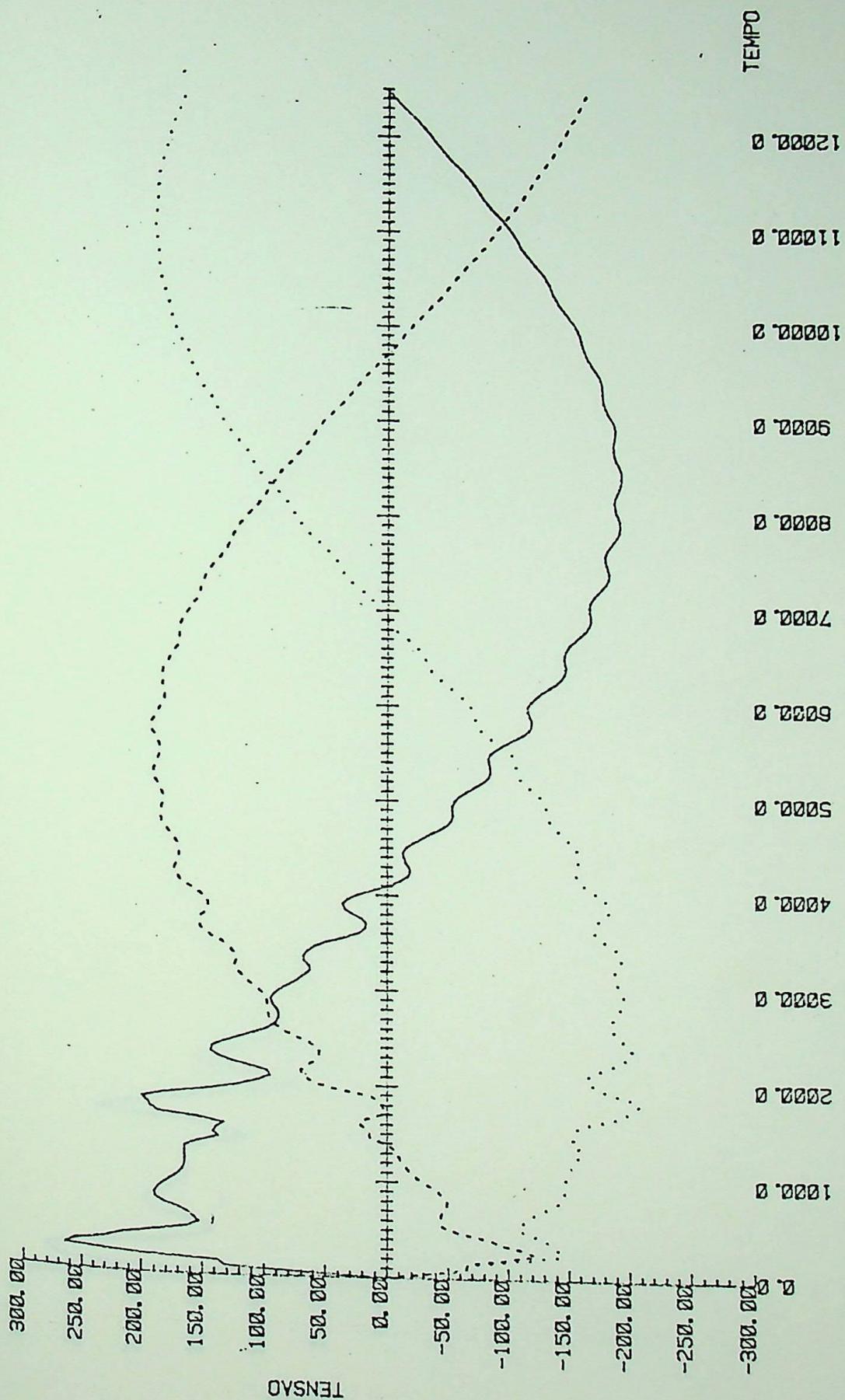
TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
TENSÃO NA BARRA DE CACH. DOURADA 230 KV
ENERGIZACAO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
CASO INCLUINDO O EFEITO DAS PERDAS

Figura - III2.6



TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 TENSÃO NA BARRA DE ANHANGUERA 230 KV
 ENERGIZACAO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
 CONSIDERANDO AS PERDAS NAS LINHAS

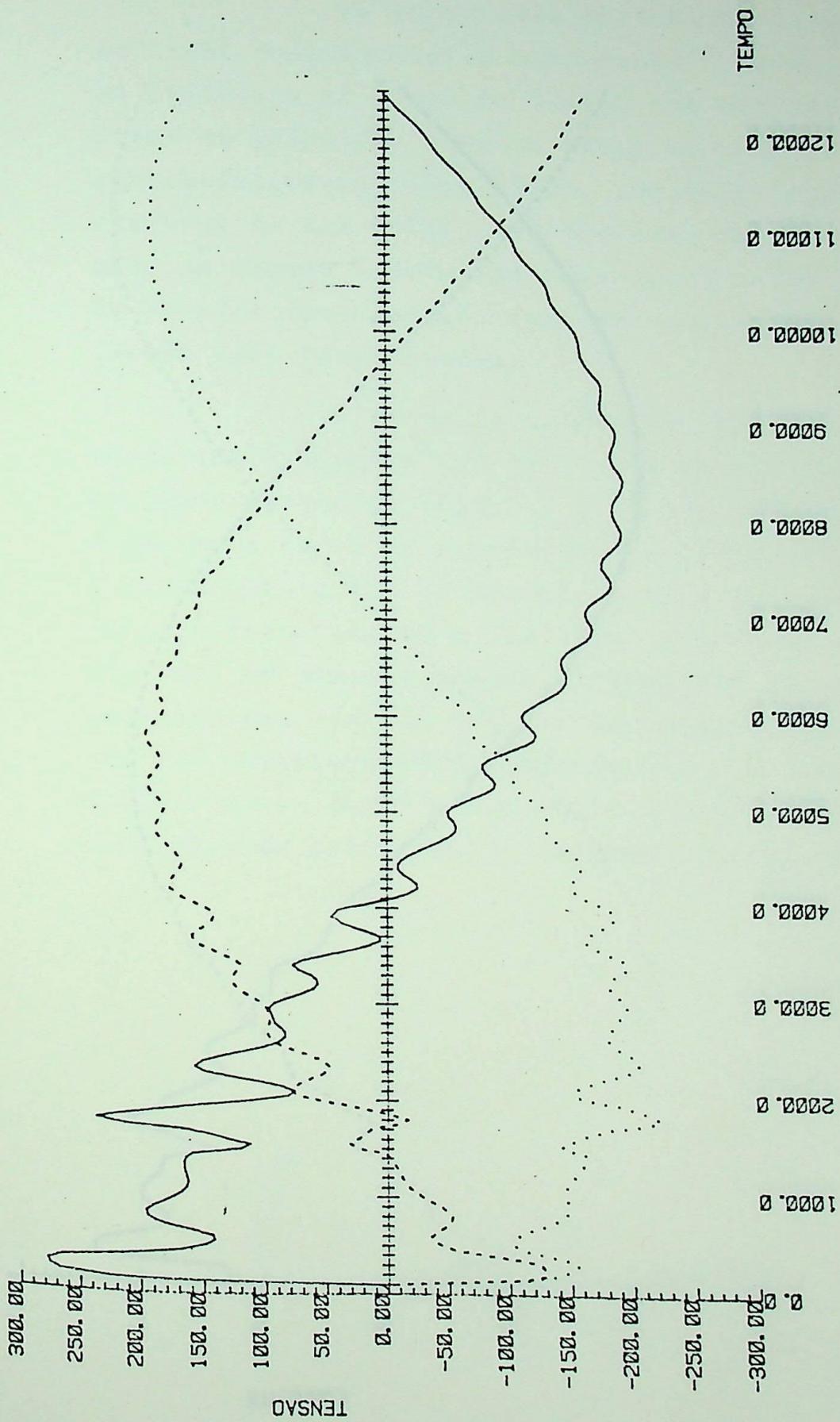
Figura - III2.7.



TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 TENSÃO NA BARRA DE GOIÂNIA 230 KV
 ENERGIZAÇÃO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
 CONSIDERANDO AS PERDAS NAS LINHAS

FASE 1
 FASE 2
 FASE 3

Figura - III2.8



TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 TENSÃO NA BARRA DE XAVANTES 230 KV
 ENERGIZACAO DA LT ANHANGUERA-XAVANTES
 CONSIDERANDO AS PERDAS NAS LINHAS

Figura - III.2.9

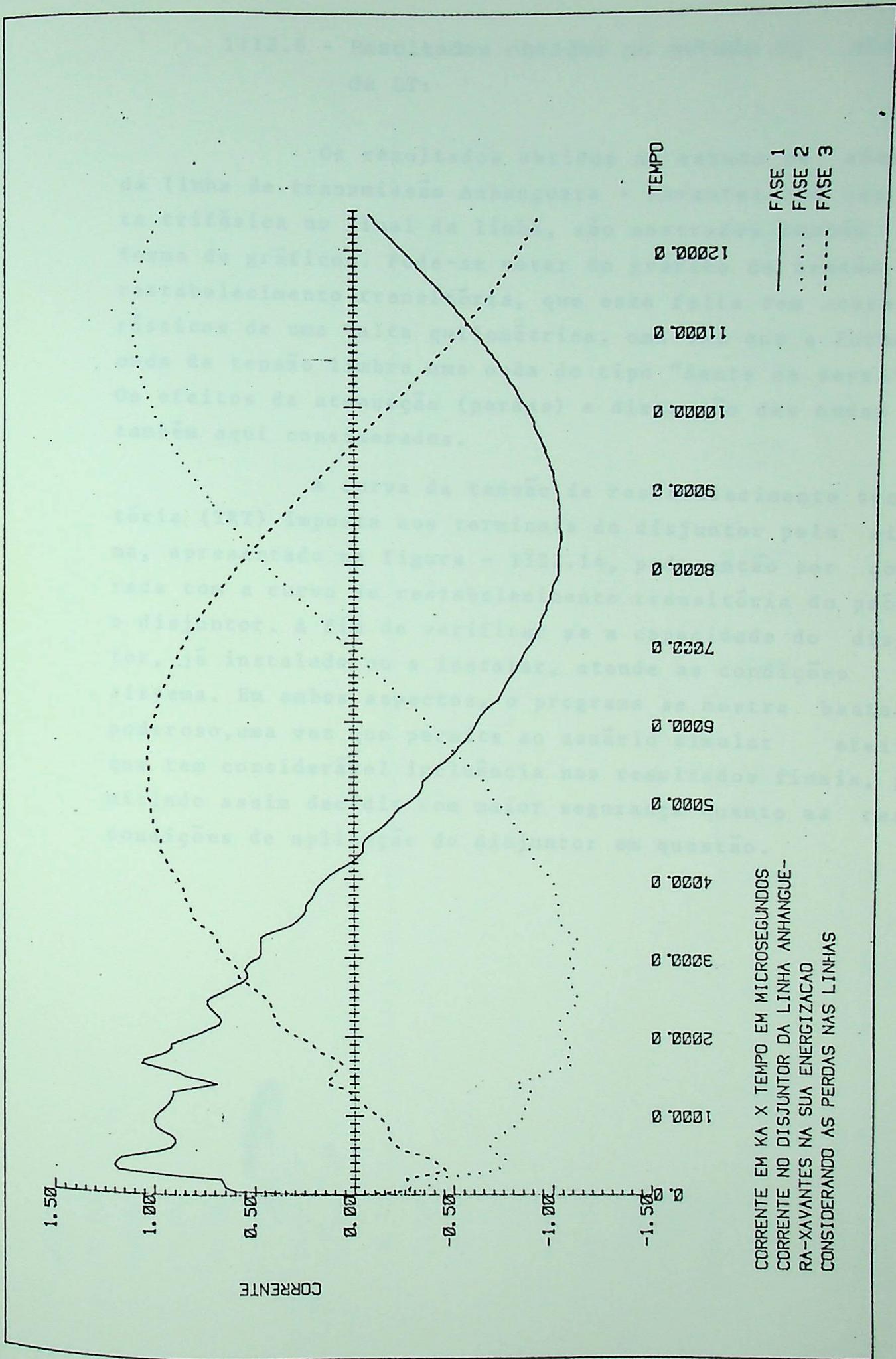
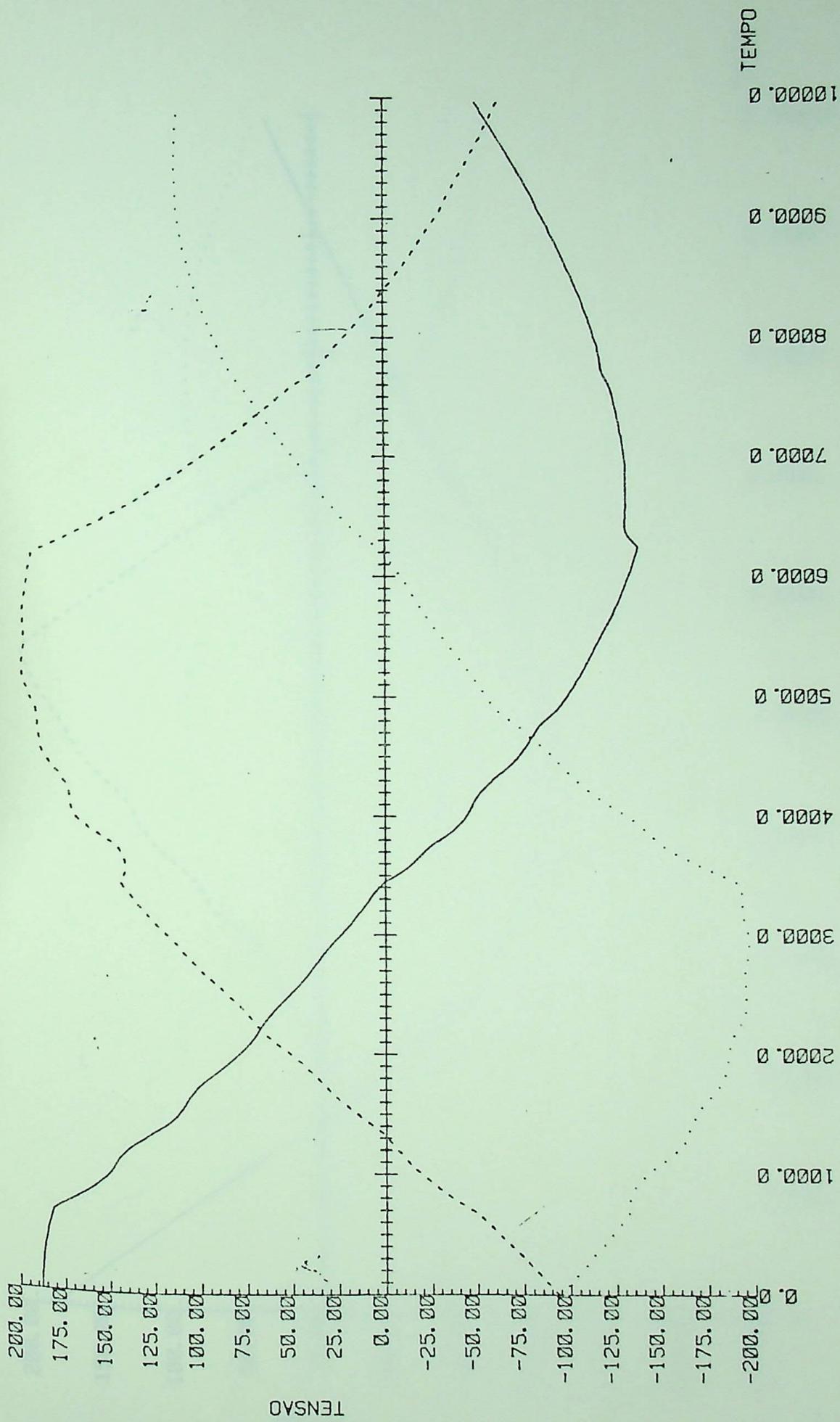


Figura - III.2.10

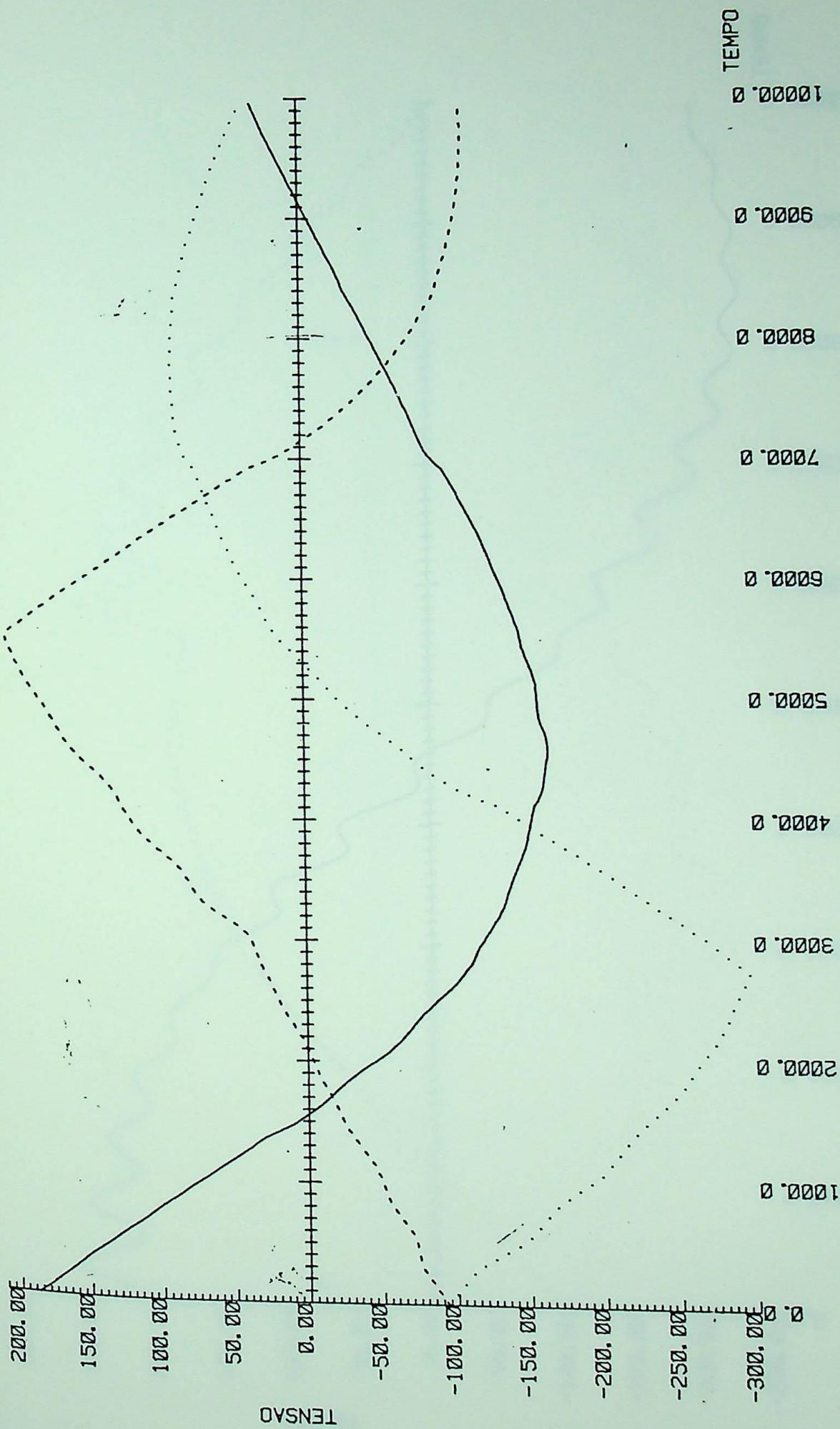
III2.6 - Resultados obtidos no estudo de abertura da LT:

Os resultados obtidos no estudo de abertura da linha de transmissão Anhanguera - Xavantes com uma falta trifásica no final da linha, são mostrados também na forma de gráficos. Pode-se notar do gráfico da tensão de restabelecimento transitória, que esta falta tem características de uma falta quilométrica, uma vez que a forma de onda da tensão lembra uma onda do tipo "dente de serra". Os efeitos da atenuação (perdas) e distorção das ondas são também aqui considerados.

A curva da tensão de restabelecimento transitória (TRT) imposta aos terminais do disjuntor pelo sistema, apresentada na figura - III2.14, pode então ser comparada com a curva de restabelecimento transitória do próprio disjuntor. A fim de verificar se a capacidade do disjuntor, já instalado ou a instalar, atende as condições do sistema. Em ambos aspectos, o programa se mostra bastante poderoso, uma vez que permite ao usuário simular efeitos que tem considerável influência nos resultados finais, permitindo assim decidir com maior segurança quanto as reais condições de aplicação do disjuntor em questão.

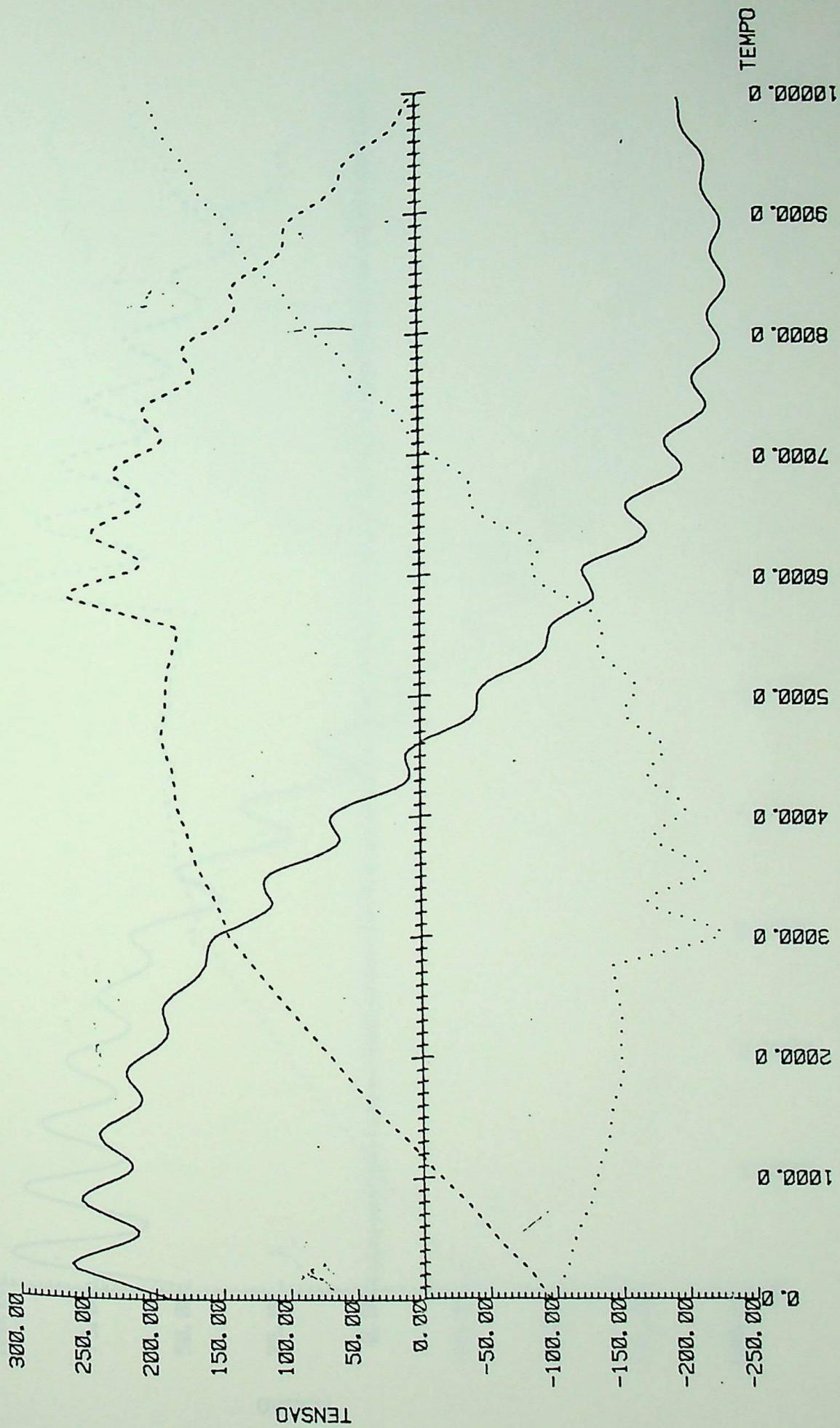


TENSÃO NA BARRA DE C. DOURADA 230 KV
 TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 ESTUDO DE ABERTURA DA LT ANHANGUERA -
 XAVANTES C/ FALTA TRIFÁSICA NO FINAL.



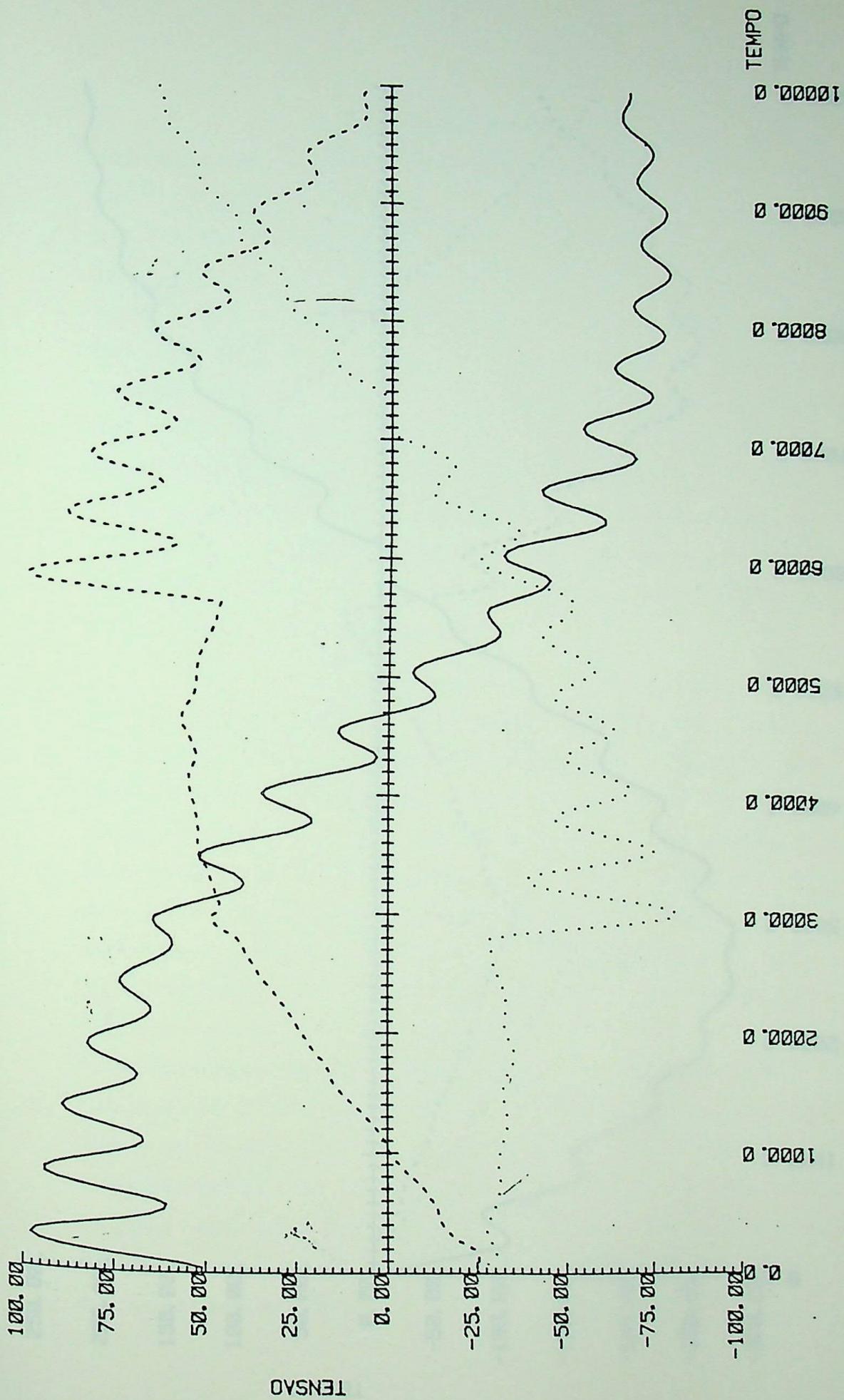
FASE 1
 FASE 2
 FASE 3

TENSÃO NO LADO DA BARRA DE ANANGUERA 230
 TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 ESTUDO DE ABERTURA DA LT ANHANGUERA- XA-
 VANTES COM FALTA TRIFÁSICA NO FIM DA LT.



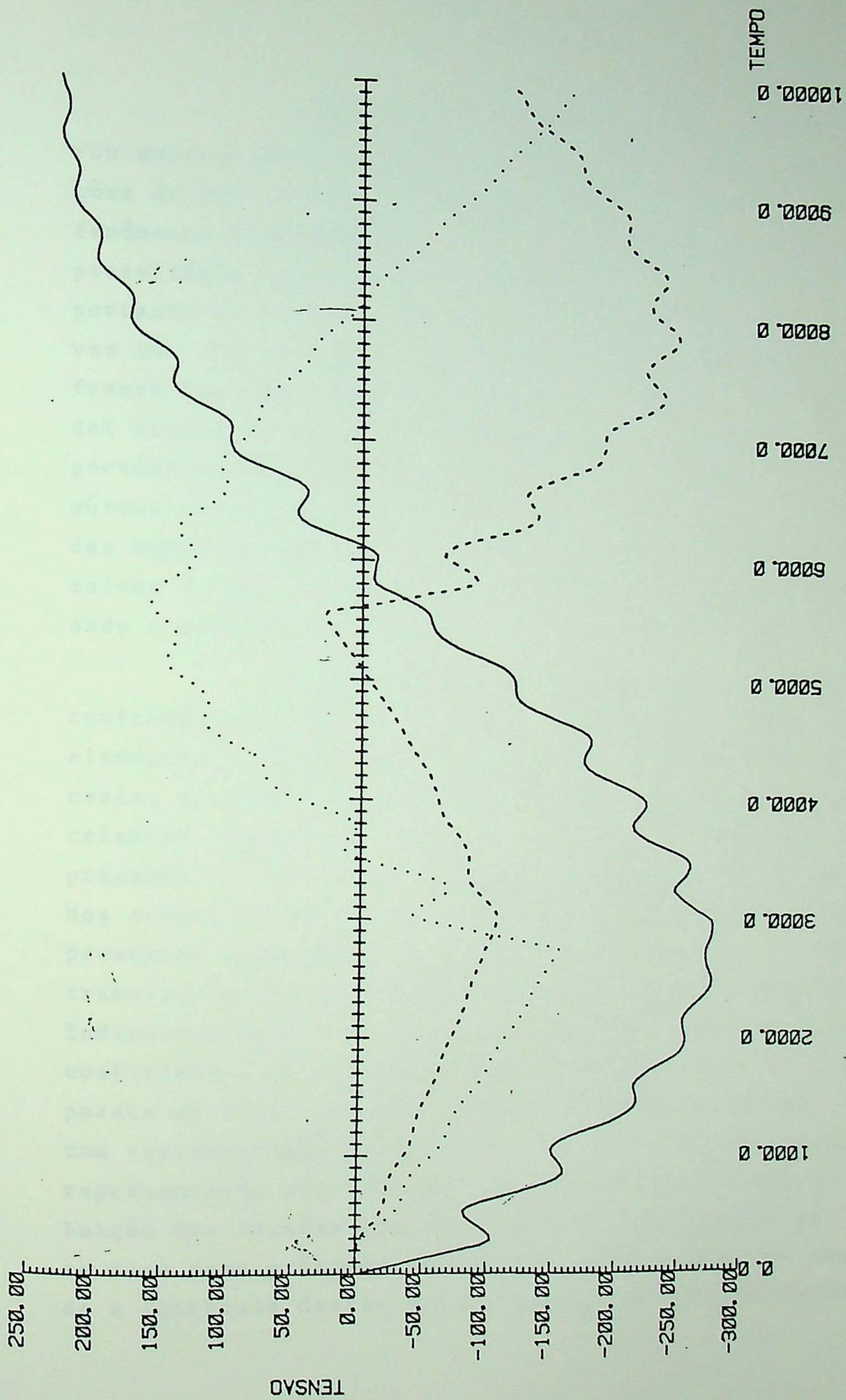
TENSÃO NO LADO DA LT EM ANHANGUERA 230KV
 TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 ESTUDO DE ABERTURA DA LT ANHANGUERA-XA-
 VANTES COM FALTA TRIFÁSICA NO FIM DA LT.

— FASE 1
 FASE 2
 - - - - FASE 3



TENSÃO NA BARRA DE GOIANIA LESTE 230 KV
 TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 ESTUDO DE ABERTURA DA LT ANHANGUERA- XA
 VANTES COM FALTA TRIFASICA NO FIM DA LT.

— FASE 1
 FASE 2
 - - - - FASE 3



TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITORIA
 TENSÃO EM KV X TEMPO EM MICROSEGUNDOS
 ESTUDO DE ABERTURA DA LT ANHANGUERA - XA
 VANTES COM FALTA TRIFASICA NO FIM DA LT.

FASE 1
 FASE 2
 FASE 3

III-3 - CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho tal como apresentado aqui procurou mostrar as principais dificuldades e as melhores soluções de que se dispõe no momento para o cálculo digital dos fenômenos transitórios. A utilização da teoria modal na representação trifásica dos sistemas, constitui um passo importante no desenvolvimento de programas deste gênero, uma vez que com este recurso coloca os programas digitais à frente dos métodos tradicionais de cálculo. Com a teoria modal tornou-se ainda possível computar efeitos de grande importância nos resultados finais, tais como os acoplamentos mútuos entre fases e os efeitos da atenuação e distorção das ondas viajantes. Os estudos na área de disjuntores são talvez os mais beneficiados por este tipo de representação, dado a natureza dos mesmos.

A representação de elementos a parâmetros concentrados através de pequenas seções de linhas, isto é, por elementos a parâmetros distribuídos é também uma técnica recente, e apesar de constituir uma aproximação apresentou excelentes resultados. Mesmo assim, neste ponto o programa apresenta seu primeiro problema, qual seja na representação dos transformadores, pois não se conseguiu uma forma de representar satisfatoriamente a transferência dos fenômenos transitórios de um enrolamento para outro do transformador. Indicou-se apenas um caminho a seguir, com a utilização dos coeficientes de transferência. O problema que a princípio parece de fácil solução, principalmente quando se trabalha com representação monofásica, torna-se bastante complexo na representação polifásica e poderá juntamente com a distribuição das tensões nos enrolamentos, constituir um excelente tema para próximos trabalhos, dado o grau de complexidade e interesse destes dois aspectos dos transformadores.

Por fim, a representação das operações de chaveamento, utilizando o princípio da superposição, com o programa assumindo total controle das operações, representa para o usuário uma grande tranquilidade. Neste ponto, o programa apresenta ainda uma grande flexibilidade, uma vez que cada polo da chave é especificada e controlada independentemente uma da outra, o que permite ao usuário estudar uma gama muito grande de situações que por ventura venham acontecer. É nesta área, apesar do grau de sofisticação apresentado na representação, que está o segundo problema do programa, pois nesta representação não estão incluídos os efeitos da pré-ignição e re-ignição do arco nos disjuntores. E mais uma vez deixou-se de representar tais efeitos devido ao seu grau de complexidade e por constituírem assunto para um novo trabalho. Poder-se-ia neste programa representar tais fenômenos, estabelecendo uma tensão entre os polos dos disjuntores para a qual os fenômenos ocorreriam. No entanto isto não foi feito, pois sabe-se que inúmeros fatores influem neste valor. Entre eles cita-se a taxa de crescimento da tensão. Estabelecer este valor de tensão fugiria portanto da filosofia utilizada, de bem representar os fenômenos. Deixar de representar estes fenômenos não traz prejuízos para o programa, desde que o usuário verifique através dos resultados obtidos, a existência ou não do fenômeno.

O exemplo apresentado nesta terceira parte é um testemunho de que o programa possui as principais características básicas de um programa tanto para uso comercial quanto acadêmico. Espera-se que este trabalho sirva de ponto de partida para outros trabalhos nesta área tão importante, quanto carente de estudos e bibliografia especializadas.

APENDICE - A.1

Programa para cálculo de parâmetros de linhas "ATENUA".

Este programa, originalmente se destina ao cálculo de parâmetros das linhas de transmissão, principalmente aqueles que dizem respeito a teoria modal, com larga utilização no cálculo da transmissão de sinais através das linhas de transmissão (Power line carrier). Nesta área a teoria modal tem grande aplicação, principalmente quando se deseja determinar a atenuação das ondas que se propagam ao longo da linha. Esta atenuação é determinada através da transformação do sinal aplicado aos condutores da linha de transmissão nos seus respectivos modos de propagação, pela matriz modal de transformação de tensão (s). Aos modos de propagação é aplicado o coeficiente de atenuação correspondente à frequência do sinal. Uma transformação inversa dá o sinal no final da linha. Nota-se que este sinal no final da linha além de atenuado é também distorcido na sua forma, haja visto que os modos possuem velocidades de propagação diferentes.

O programa na sua forma original fornece os seguintes parâmetros:

- Matriz de impedância da linha por unidade de comprimento;
- Matriz de admitâncias "Shunt" da linha por unidade de comprimento;
- Matriz de transformação modal de tensão;
- Matriz de transformação modal de corrente;
- Velocidade de propagação dos modos de propagação, numa dada frequência;
- Atenuação dos modos de propagação por unidade de

comprimento, numa dada frequência.

Alguns destes dados poderiam ser utilizados, no programa de cálculo de transitórios, na sua forma original, porém resolveu-se fazer algumas adaptações no programa, de tal sorte que os resultados obtidos se adaptassem melhor ao programa de transitórios evitando desta forma processamentos interno dos dados.

Um outro aspecto importante, é que se deseja a atenuação e distorção para um degrau, o qual envolve um espectro de frequência muito amplo, e o programa na sua forma original fornece apenas a atenuação para ondas de uma dada frequência. Sobre este aspecto foi introduzido ao programa uma subrotina para cálculo da resposta ao degrau unitário, de acordo com a teoria desenvolvida na seção-I6.

A principal dificuldade na utilização deste programa está em se encontrar uma faixa e um degrau de frequência, a ser utilizado na integral que determina a resposta ao degrau unitário de tensão aplicado à linha. Pois quanto maior a faixa de integração e menor o degrau de integração maior a precisão e também o tempo de processamento. Assim, existe a necessidade de se conciliar os fatores tempo de processamento e precisão do resultado, mesmo se levando em conta que para cada linha será feito um único processamento, pois os resultados obtidos formaram um banco de dados. Os gráficos apresentados no final deste apêndice mostram claramente este aspecto.

Os dados requeridos para processamento do programa "Atenua", são os seguintes:

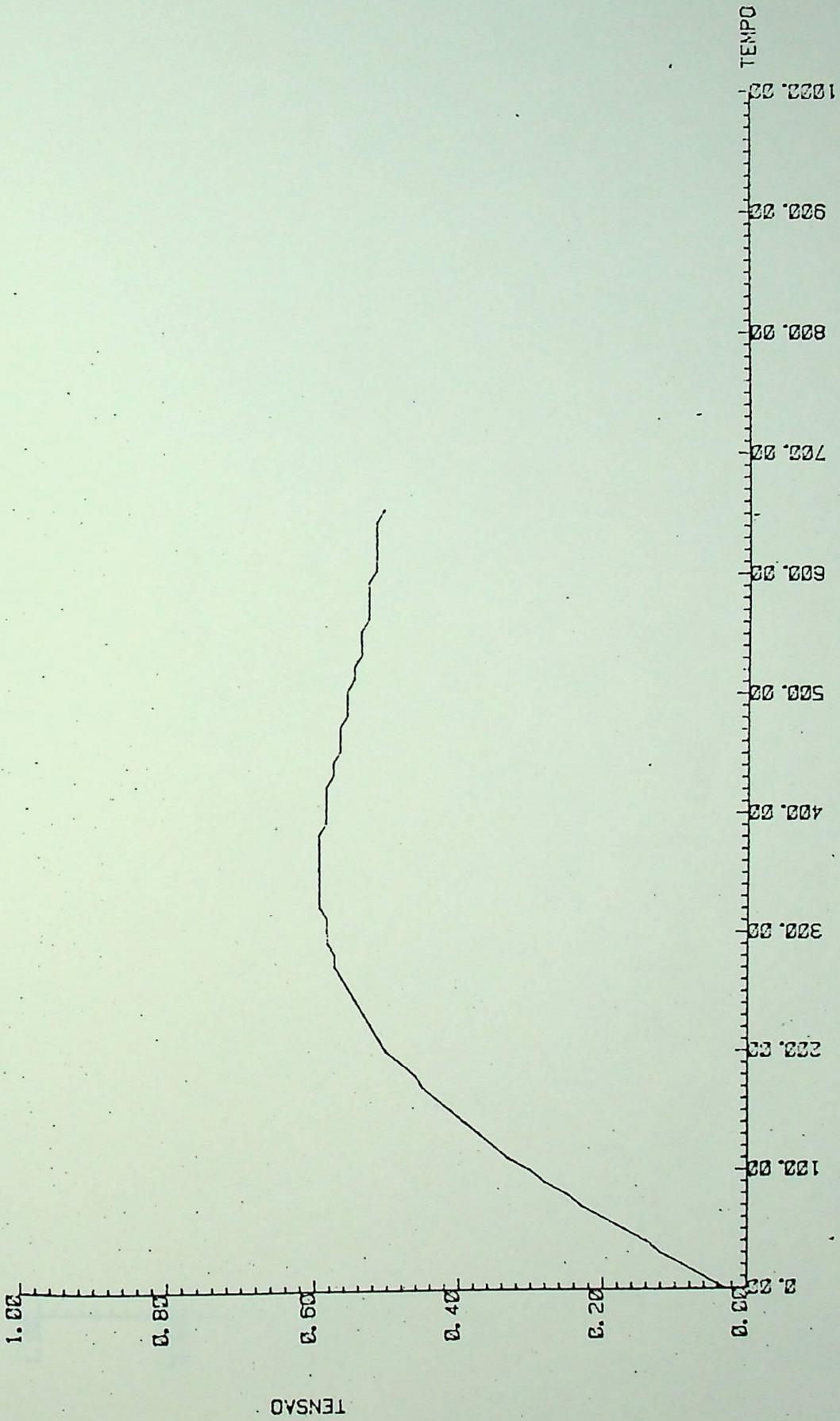
- Quantidade de circuitos que ocupam a mesma faixa de servidão;
- Quantidade de condutores por fase;
- Quantidade de cabos guarda em cada linha;
- Constante de permeabilidade do meio ambiente (E);

- Diâmetro externo dos cabos de fase e guarda;
- Diâmetro de cada condutor que compõe os cabos de fase e guarda;
- Quantidade de condutores que compõem os cabos de fase e guarda;
- Resistividade dos condutores de fase e guarda;
- Resistividade do solo;
- Frequências para as quais se desejam os parâmetros, estabelecendo a faixa e degrau de integração;
- Coordenadas dos condutores de fase e guarda;
- Extensão da linha de transmissão.

Como resultados o programa apresenta na sua saída, o seguinte:

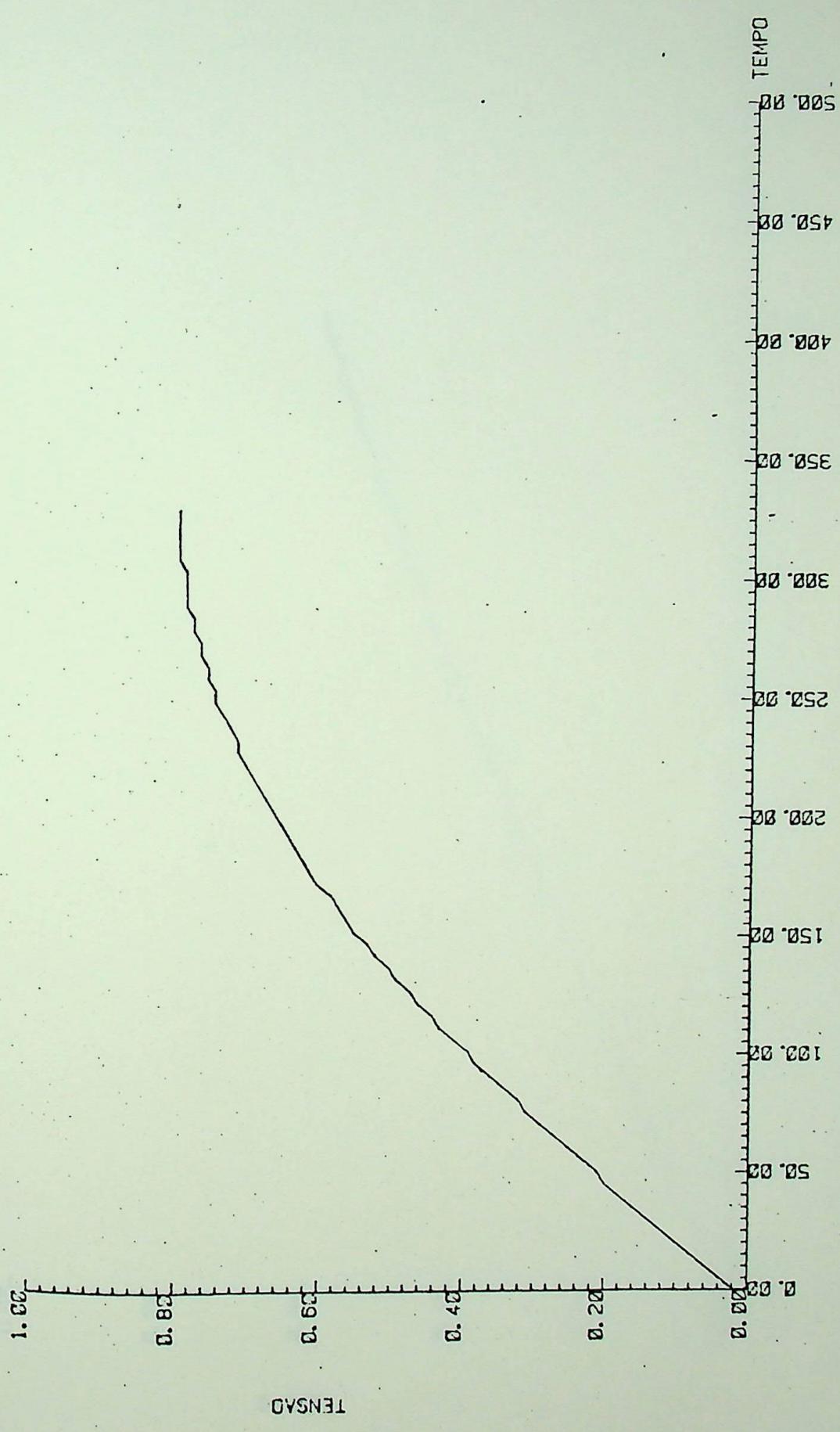
- Matrizes de impedância de surto, nas frequências especificadas;
- Matrizes de admitância de surto, nas frequências especificadas;
- Matrizes de transformação modal dos vetores de tensão, nas frequências especificadas;
- Matrizes de transformação modal dos vetores de corrente, nas frequências especificadas;
- Velocidades de propagação dos modos nas frequências especificadas;
- Atenuação das ondas para as frequências especificadas;
- Impedâncias de surto de cada modo nas frequências especificadas;
- Admitâncias de surto de cada modo nas frequências especificadas;
- Resposta ao degrau unitário para os diversos modos de propagação da linha.

Destes resultados leva-se para o programa de cálculos de transitórios, apenas as matrizes de admitância de surto e de transformação modal dos vetores de tensão, para uma frequência características, e para cada modo de propagação, leva-se à sua velocidade de propagação, o valor máximo da sua resposta ao degrau unitário de tensão e o tempo gasto para esta resposta alcançar um valor igual a 0,63,2% deste valor máximo.



RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-1 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MAXIMA USADA 2 KHZ (10/10 HZ)

Figura - A1.1



RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA HORIZONTAL TRIFASICA DE 100 KM
TENSÃO DO MCDO-2 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MAXIMA USADA 2 KHZ (10/10 HZ)

Figura - A1.2

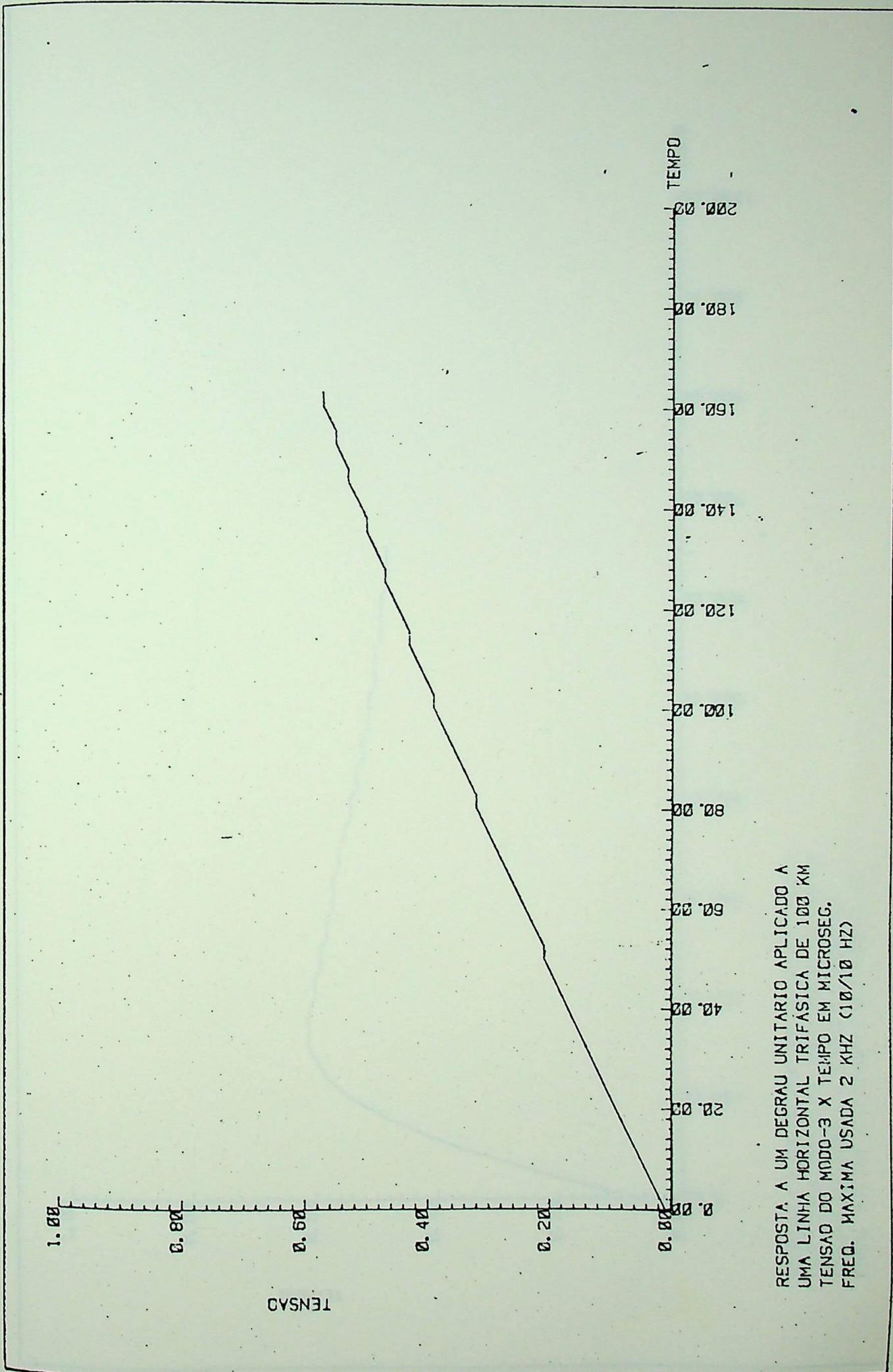
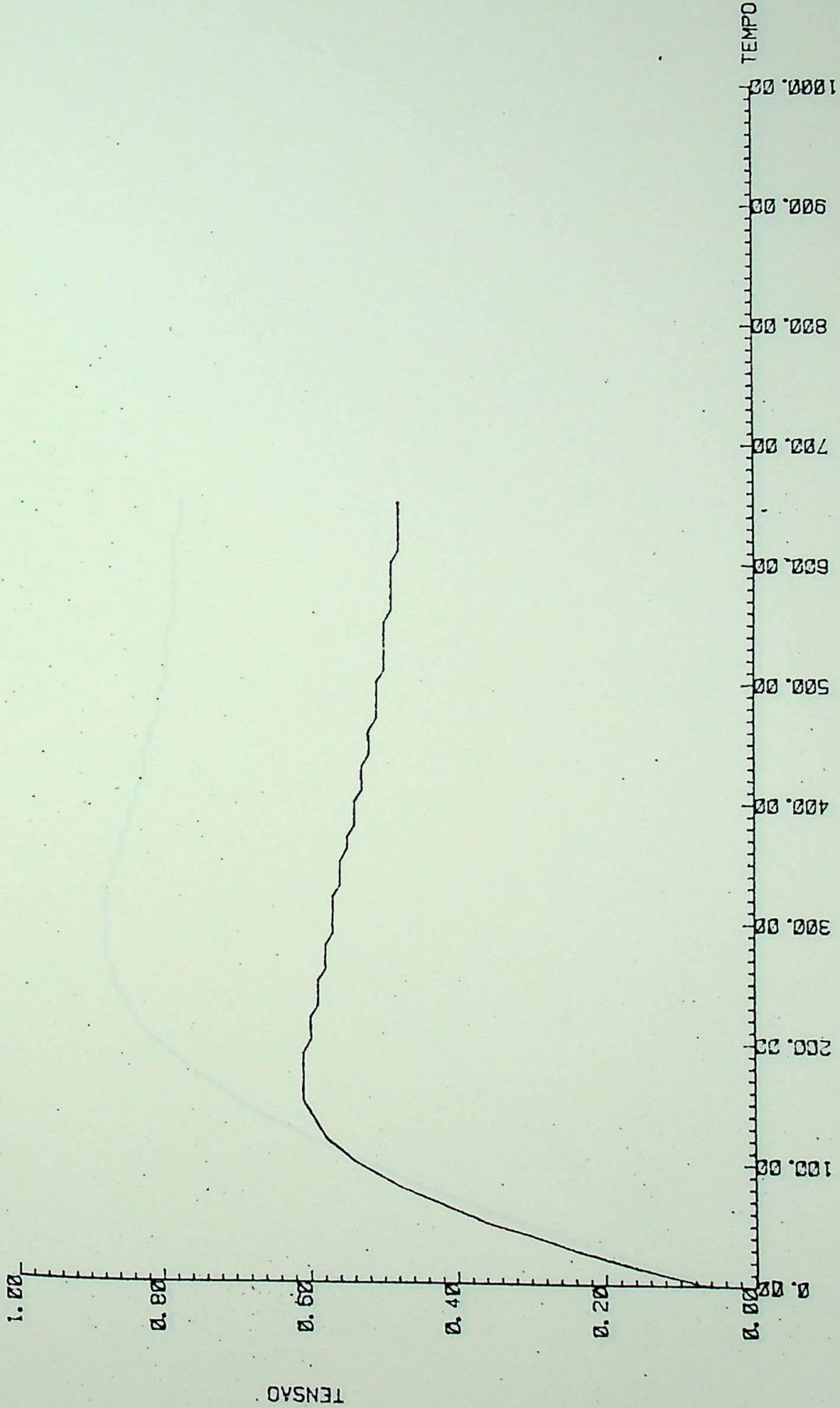


Figura - A1.3



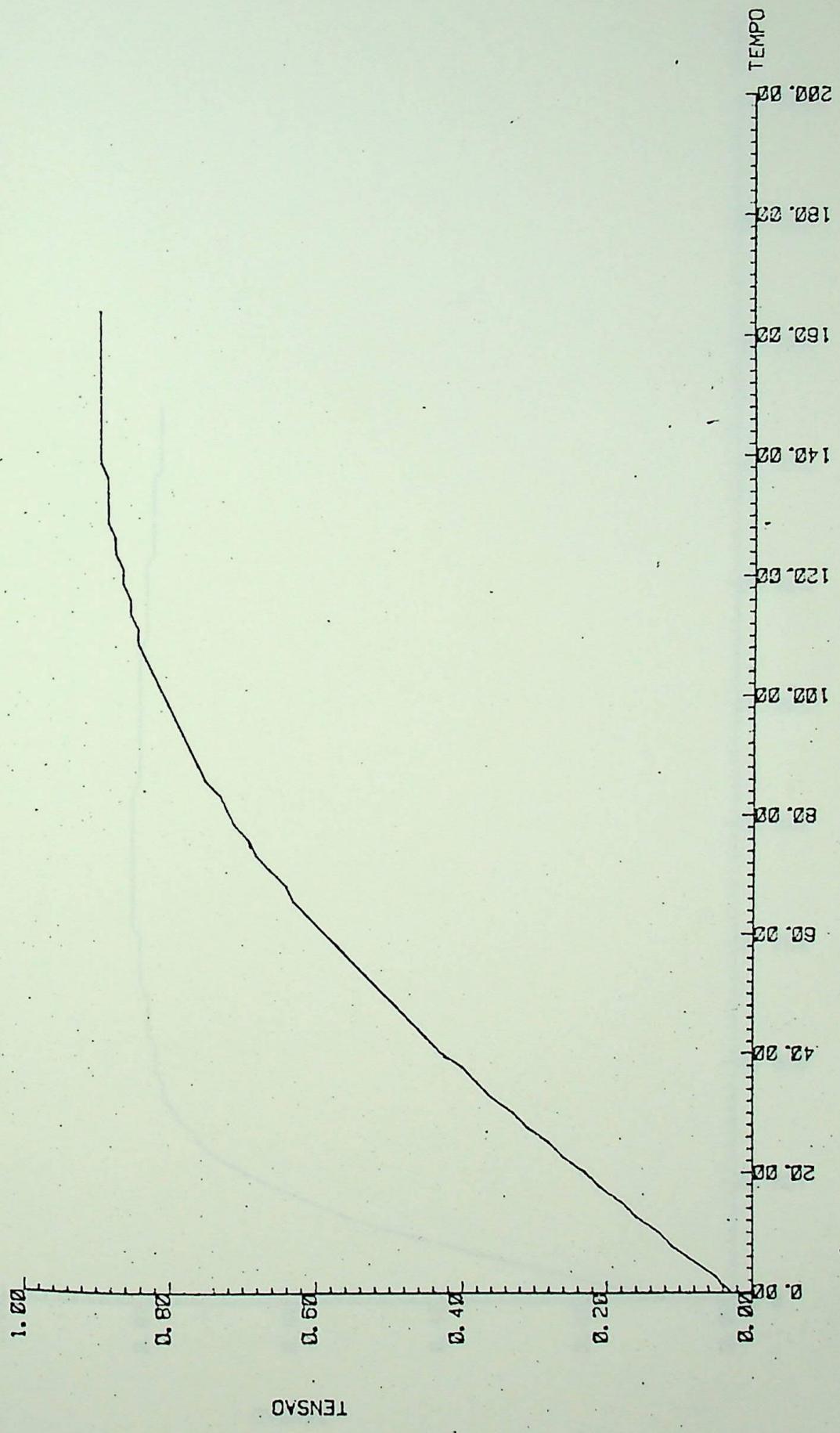
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-1 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MÁXIMA UTILIZADA 5 KHZ (25/25 HZ)

Figura - A1.4



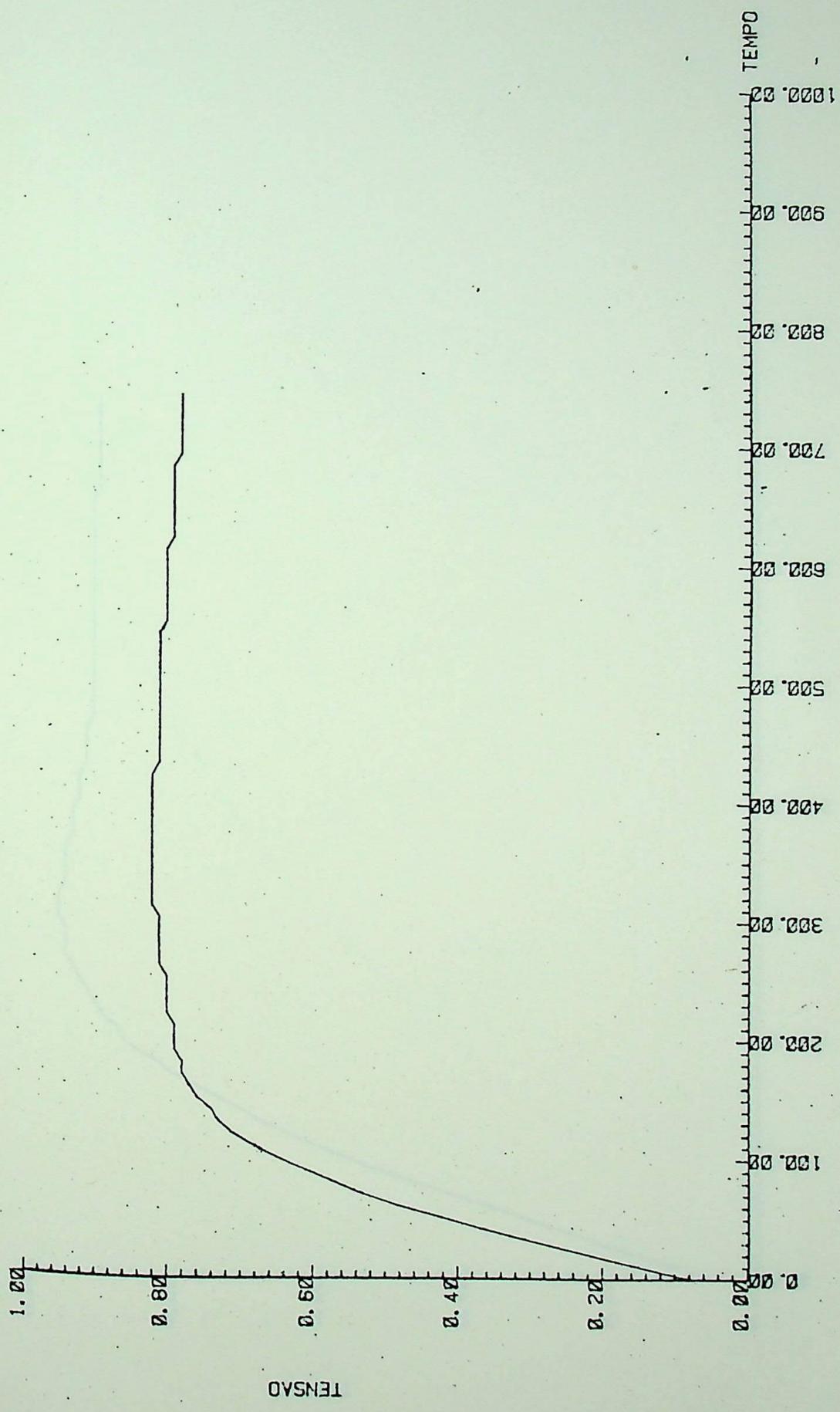
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-2 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MÁXIMA UTILIZADA 5 KHZ (25/25 HZ)

Figura - A1.5



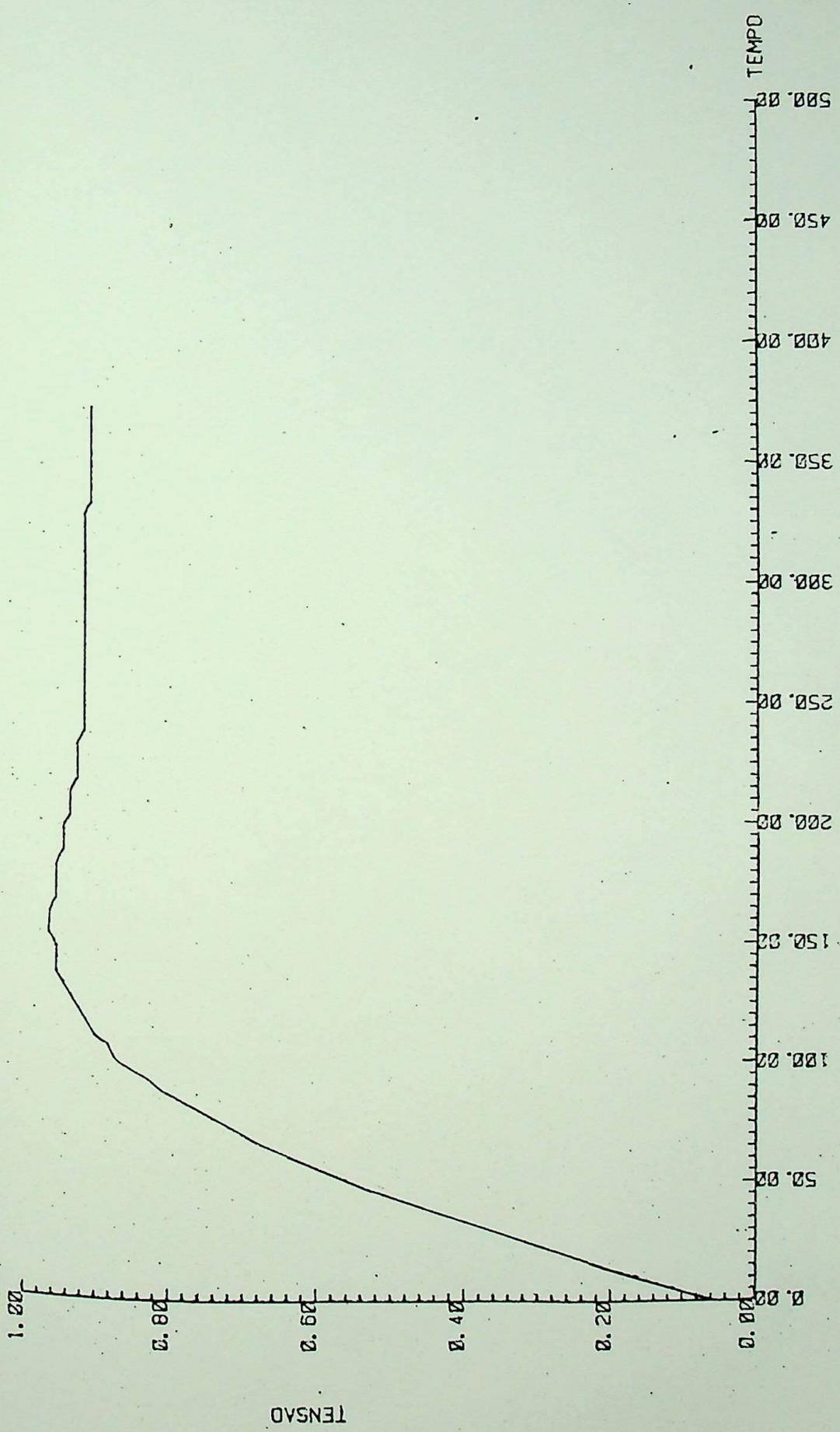
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-3 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MAXIMA UTILIZADA 5 KHZ (25/25 HZ)

Figura - A1.6



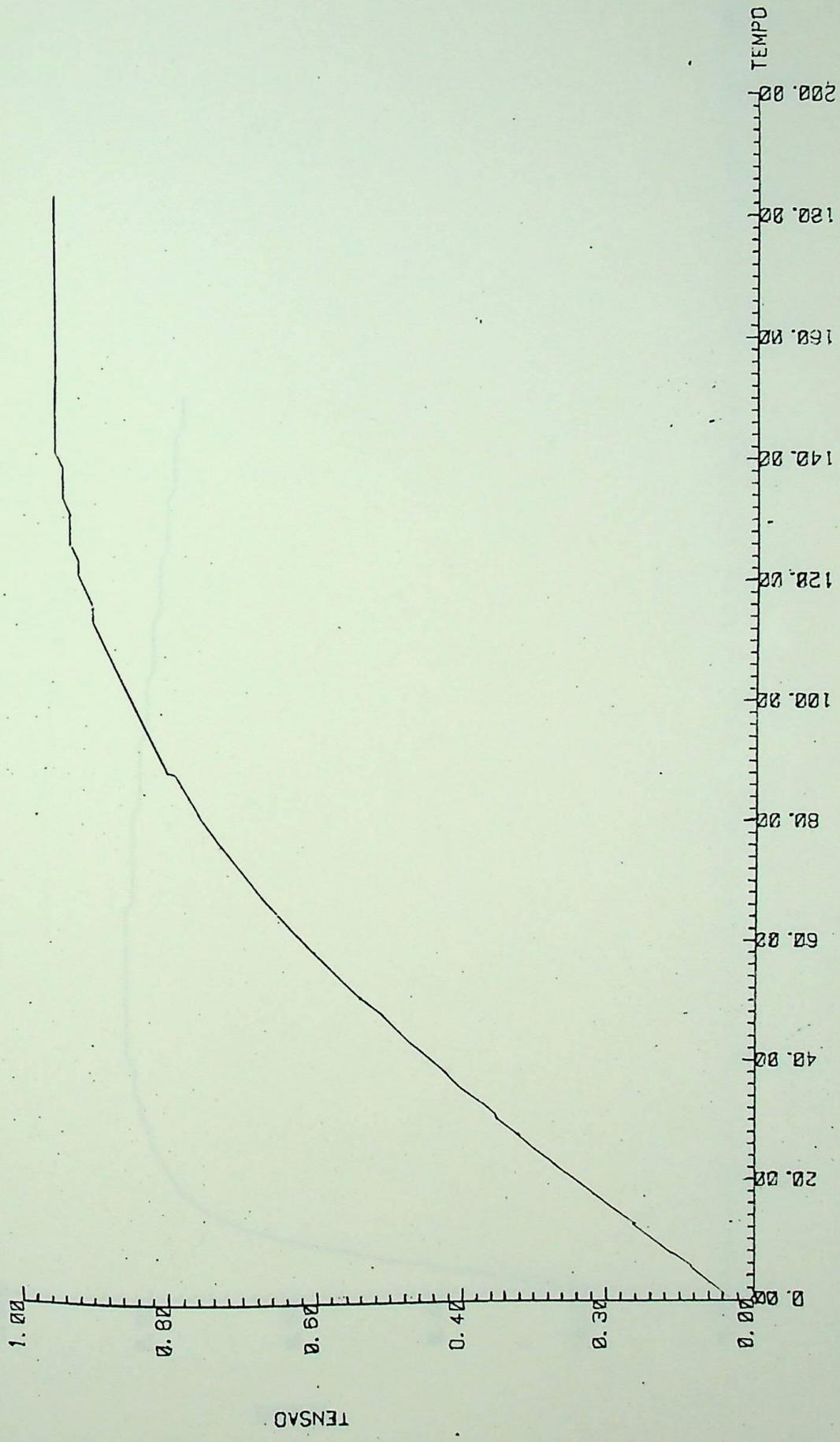
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-1 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MÁXIMA USADA 5 KHZ (10/10 HZ)

Figura - A1.7



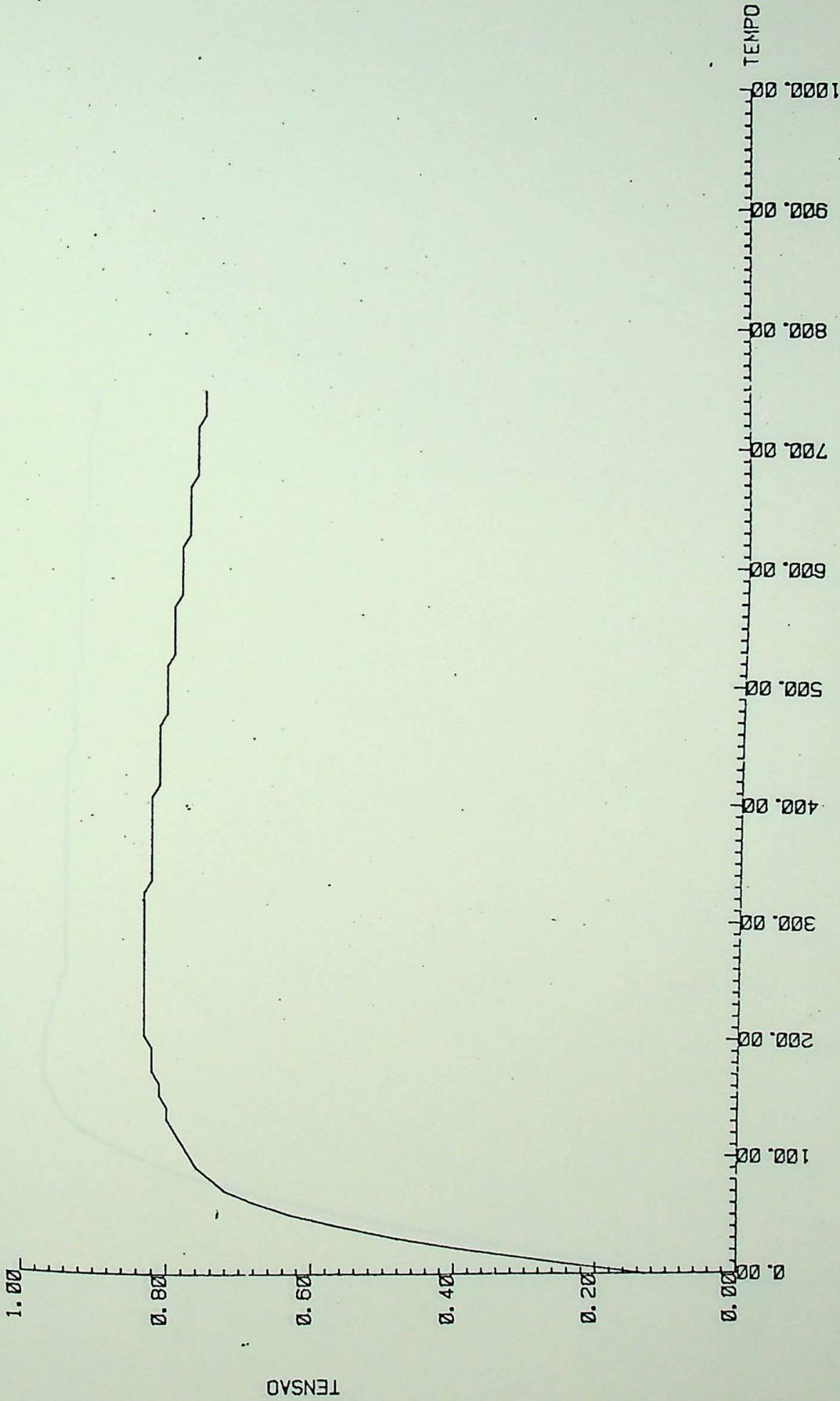
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-2 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MÁXIMA USADA 5 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - A1.8



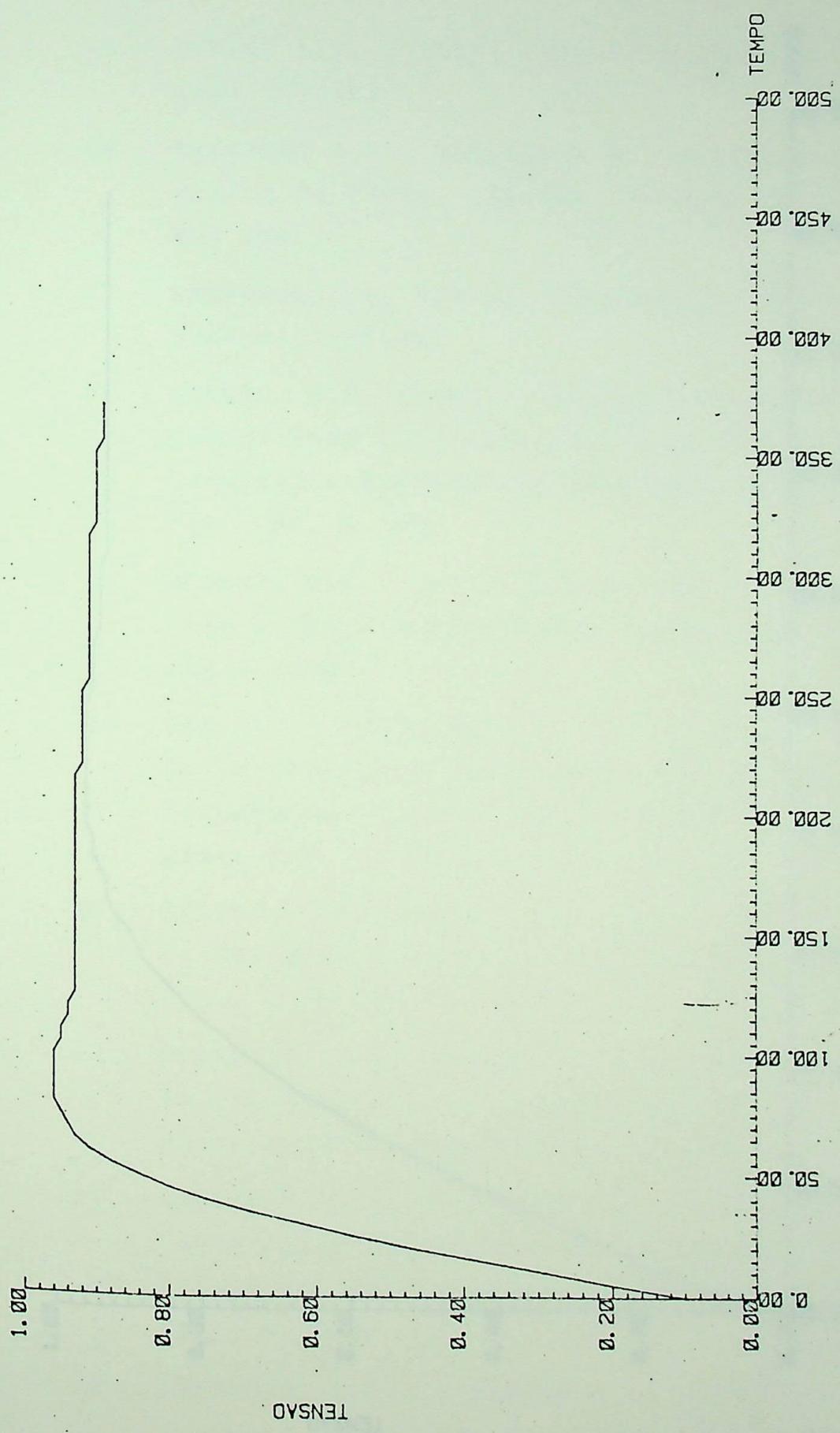
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO NO MODO-3 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MÁXIMA USADA 5 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - A1.9



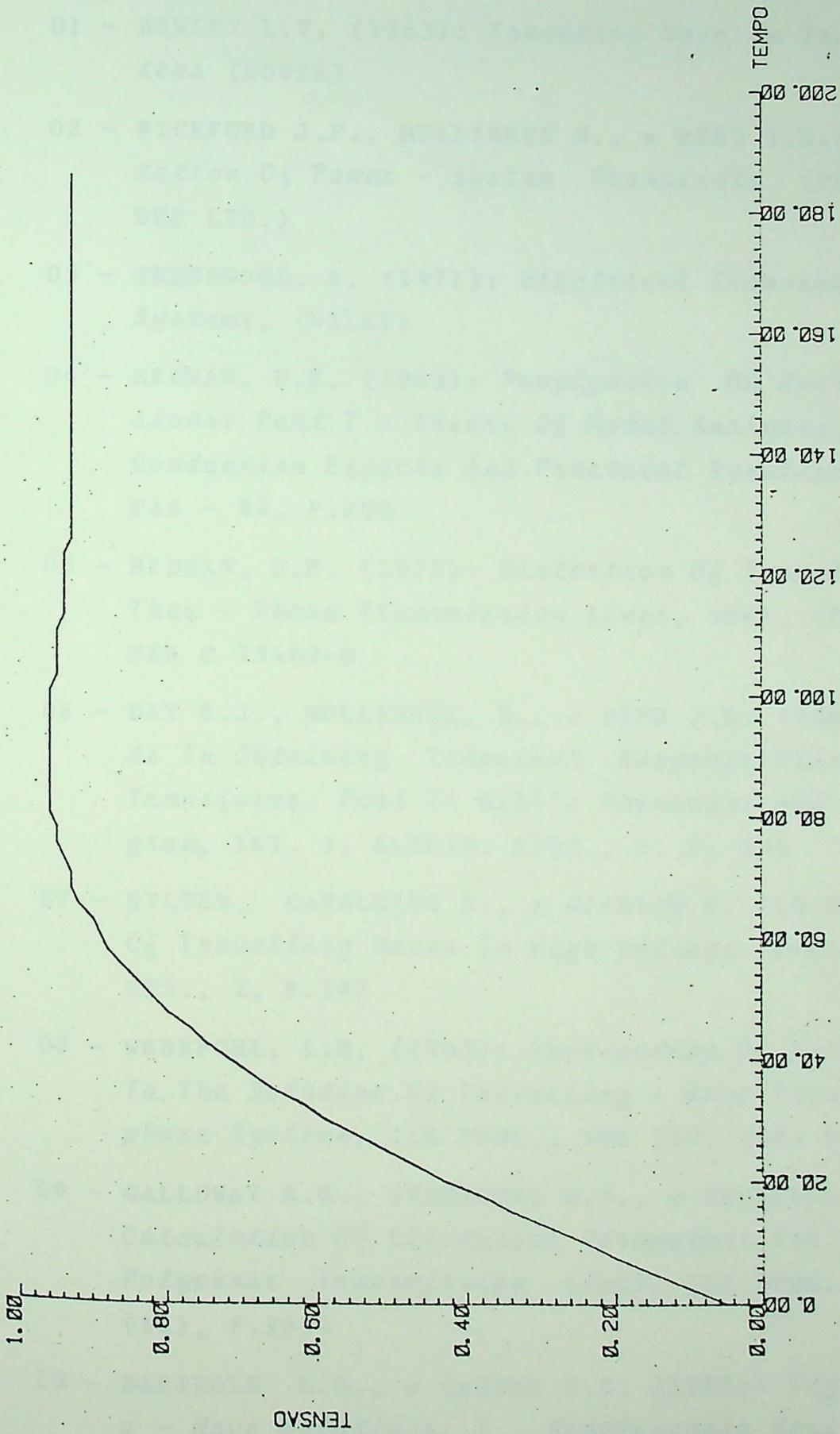
RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA DE 230 KV COM 100 KM
TENSÃO DO MODO-1 X TEMPO EM MICROSEG.
FAIXA DE FREQ. 9 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - A1.10



RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-2 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MAXIMA USADA 9 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - A1.11



RESPOSTA A UM DEGRAU UNITARIO APLICADO A
UMA LINHA TRIFASICA HORIZONTAL DE 100 KM
TENSÃO DO MODO-3 X TEMPO EM MICROSEG.
FREQ. MAXIMA USADA 9 KHZ (10 EM 10 HZ)

Figura - A1.12

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - BEWLEY L.V. (1963): *Traveling Wave In Transmission Systems* (DOVER)
- 02 - BICKFORD J.P., MULLINEUX N., e REED J.R. (1980): *Computation Of Power - System Transients*. (PETER PEREGRINUS LTD.)
- 03 - GREENWOOD, A. (1971): *Electrical Transients In Power Systems*, (WILEY)
- 04 - HEDMAN, D.E. (1965): *Propagation On Overhead Transmissions: Part I - Theory Of Modal Analysis, II - Earth Conduction Effects And Practical Results*; IEE TRANS. , PAS - 84, P.200
- 05 - HEDMAN, D.E. (1973): *Distortion Of Traveling Waves on Three - Phase Transmission Lines*, IEEE, CONFERENCE PAPER C 73409-0
- 06 - DAY S.J., MULLINEUX, N., e REED J.R. (1965): *Developments In Obtaining Transient Response Using Fourier Transforms. Part I: Gibb's Phenomena And Fourier integrals*, INT. J. ELECTR. EDUC., 3, P. 501
- 07 - HYLTEN, CAVALLIUS N., e GJERLOW P. (1959): *Distortion Of Travelling Waves In High-Voltage Power Lines*, ASEA RES., 2, P.147
- 08 - WEDEPOHL, L.M. (1963): *Application Of Matrix Methods To The Solution Of Travelling - Wave Phenomena In Polyphase Systems*, IEE PROC., VOL 110, (12) P.2200
- 09 - GALLOWAY R.N., SHORROCKS W.B., e WEDEPOHL L.M., (1964), *Calculation Of Electrical Parameters For Short And Long Polyphase Transmission Lines*, IEE PROC. VOL. 111 , (12), P.2054
- 10 - BARTHOLD L.O., e CARTER G.K. (1961): *Digital Traveling - Wave Solutions: I - Single-phase Equivalentes* , TRANS AIEE III, 80, P. 812

- 11 - HOLMDAHL G., e LUNDIN R. (1966): *Digital Solution Of Travelling Wave Problems In Three - Phase Systems* , PROC. PSCC, PT 3, REPT. 5.12
- 12 - MCELROY A.J., e PORTER R.M. (1963): *Digital Computer Calculation Of Transients In Electric Networks*; IEEE TRANS., PAS - 82, P. 88
- 13 - THORÉN H.B. e CARLSSON K.L. (1970): *A Digital Computer Program For The Calculation Of Switching And Lightning Surges On Power Systems*; IEEE Trans. PAS- 89 , Nº 2, P 212
- 14 - NUNES R.A. F. (1975): *Influence Of The Earth Wires On Power Line Carrier Communications*; M.Sc. DISSERTATION, UMIST

Sergio Gomes Machado
Engenheiro das Centrais Elétricas de
Goiás S/A
Departamento de Transmissão
Av. Anhanguera, 5.105
Fones: 233-1133 - Ramais 324/322
233-2577
233-3311
74.000 - Goiânia - Goiás



