TESE
100

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

UM SISTEMA DE PROGRAMAÇÃO DIGITAL PARA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE BALANÇO DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

ESCOLA FEDERAL - ENGENHARIA
BIBLIOTECA
Itajubá

TESE DE MESTRADO

Prof. Hélio Mokarzel

1972

À minha esposa e meus cinco filhos que compartilharam comigo o sacrifícios da realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao colega e amigo José Abel Royo dos Santos pela orientação segura e incentivo que me emprestou durante a realização deste trabalho.

(2)

INDICE

Resumo

1.0.0 - Introdução 3

2.0.0 - Equação de Balanço 3

2.1.0 - Introdução 3
2.2.0 - Potência Mecânica 4
2.3.0 - Potência Aceleradora 4
2.4.0 - Potência Elétrica 7
2.4.1 - Potência Elétrica Assíncrona ou Amortecedora 7
2.4.2 - Potência Elétrica Transferida 8
2.5.0 - A Equação de Balanço 10

3.0.0 - O Método de Runge-Kutta 10

3.1.0 - Introdução 10
3.2.0 - Sistema de 2 Equações Diferenciais de 1ª Ordem 11
3.3.0 - Equação Diferencial de 2ª Ordem 12
3.4.0 - Sub-Rotina de Integração - RK4 12
3.4.1 - Chamada da Sub-Rotina RK4 12

4.0.0 - Sub-Rotinas de Plotagem 14

5.0.0 - Solução da Equação de Balanço 14

5.1.0 - Preparação da Equação 14
5.2.0 - Preparação do Programa Principal e Sub-Programas. 15
5.2.1 - Nomenclatura Adotada 15
5.2.2 - Sub-Programas 16
5.2.3 - Programa Principal 16

6.0.0 - Exemplos de Aplicação 17

6.1.0 - Exemplo 1 17
6.2.0 - Exemplo 2 19
6.3.0 - Exemplo 3 23

7.0.0 - Conclusões 30

Bibliografia

RESUMO

É desenvolvido e apresentado um método para solução, em Computadores Digitais, da Equação de Balanço das Máquinas Síncronas para todos os sistemas que possam ser colocados - sob a forma de duas máquinas interligadas por um sistema T equivalente. O programa usa as equações convencionais e o algoritimo de Runge-Kutta para solução numérica das equações diferenciais

1.0.0 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa estabelecer um método para solução das Equações de Balanço das Máquinas Síncronas em Computadores Digitais, usando as Equações Convencionais e o Método de Runge-Kutta de 4ª ordem para solução das equações diferenciais.

Este método resolve todos os problemas de estabilidade de Sistemas que possam ser colocados na forma de duas máquinas interligadas por um sistema T.

O processo aqui desenvolvido é muito mais preciso que o método passo a passo usado atualmente não só pela maior precisão inerente ao Runge-Kutta mas também pela possibilidade de se levar em conta os fatores de amortecimento despreza - dos naquele método.

Será possível também, e o faremos em uma segunda etapa levar em consideração a ação dos Reguladores de Tensão e de Velocidade pela simples modificação das equações que entram nos sub-programas, sem alterar em nada o método aqui desenvolvido

2.0.0 - EQUAÇÃO DE BALANÇO

2.1.0 - *Introdução*

As máquinas síncronas podem ser tratadas indistintamente como geradores ou como motores.

Neste trabalho tratá-la-emos como gerador.

Assim a equação que rege o movimento da mesma, também chamada Equação de Balanço pode ser escrita.

$$T_a = T_m - T_e \qquad (2.1)$$

onde

T_a = Torque acelerador

T_m = Torque mecânico no eixo da máquina

T_e = Torque elétrico desenvolvido no gerador

Considerando que as variações em torno da velocidade síncrona são relativamente pequenas a equação (2.1) pode ser escrita como o balanço de potências :

$$P_a = P_m - P_e \qquad (2.2)$$

onde

P_a = Potência aceleradora

P_m = Potência mecânica no eixo da máquina

P_e = Potência elétrica desenvolvida no gerador

Estudaremos agora separadamente cada um destes termos para finalmente por substituição obter a equação diferencial que rege o movimento das Máquinas Síncronas

2.2.0 - *Potência Mecânica*

A potência mecânica ou potência no eixo é a potência desenvolvida pela máquina motriz e entregue ao gerador.

Geralmente é considerada constante nos estudos de estabilidade, mas se quisermos levar em consideração a ação dos reguladores de velocidade ela poderá ser uma função da velocidade ou do tempo. Esta função poderá ser determinada pela função de transferência dos reguladores.

Quando a máquina motriz é uma máquina do tipo de motores a pistão a potência mecânica poderá ainda ser modulada por uma onda periódica, geralmente considerada senoidal de frequência definida pela pulsação da máquina motriz, da forma

$$P_m = P_{om} + P_{1m} \cos(\omega t + \phi) \qquad (2.3)$$

2.3.0 - *Potência Aceleradora*

Sendo

θ = Ângulo mecânico descrito pelo rotor da máquina em [rad.mec]

J = Momento de Inércia do conjunto girante (gerador - mais máquina motriz) em [Kg xm²]

ω_m = velocidade síncrona do rotor da máquina em [rad. mec/s]

T_a = Torque acelerador em [m.N]

P_a = Potência aceleradora em [W]

Temos

$$T_a = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (2.4)$$

e

$$P_a = \omega_m J \frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (2.5)$$

Por outro lado para geradores temos :

$$\theta = \omega_m t + \frac{\delta}{p} \qquad (2.6)$$

onde

δ = Ângulo de potência ou ângulo elétrico entre o campo girante do estator e o campo do rotor em [rad.el.]

p = nº de pares de polos

Vem então

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m + \frac{1}{p} \frac{d\delta}{dt}$$

e

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} \qquad (2.7)$$

Substituindo em (2.5) vem :

$$P_a = \frac{\omega_m J}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

Ou chamando

$$M = \frac{\omega_m J}{p} = \text{momentum angular}$$

Temos

$$P_a = M \frac{d^2\delta}{dt^2} \qquad (2,8)$$

Por outro lado definimos

$$H = \frac{G}{S} = \text{Constante de tempo de Inércia [S]}$$

onde

$$G = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \text{Energia cinética armazenada [Joules]}$$

S = Potência nominal da máquina [VA]

Temos então :

$$M = \frac{2HS}{p\omega_m} = \frac{2HS}{\omega_s} = \frac{2HS}{\pi f} \qquad (2.9)$$

onde

ω_s = velocidade síncrona em [rad.el/s]

f = frequência

Se usarmos valores pu

$$M = 2\ H \qquad (2.10)$$

Pode-se mostrar facilmente que :

$$H = \frac{0,231 \cdot \omega R^2 \cdot rpm^2 \cdot 10^{-6}}{KVA} \quad [s] \qquad (2.11)$$

onde

ωR^2 = Momento de Inércia em [lb.ft^2]

Existem tabelas e curvas com valores típicos de H estando ele compreendido entre 1 e 10 [s]. (Ver Elements - of Power Systems - Stevenson pag. 338 e 339)

No caso de 2 máquinas pode-se considerar uma delas como referência e tomar

$$H = \frac{H_1 \cdot H_2}{H_1 + H_2} \qquad (2.12)$$

Também no caso de equivalência de várias máquinas de potências S_1, S_2 ... e constantes H_1, H_2, ..., pode-se calcular a constante equivalente por

$$H = H_1 \frac{S_1}{S_T} + H_2 \frac{S_2}{S_T} + \ldots \qquad (2.13)$$

onde

$$S_T = S_1 + S_2 + \ldots$$

2.4.0 - *Potência Elétrica*

A potência elétrica pode ser dividida em 2 parcelas principais:

a) Potência Elétrica Assincrona ou Potência Amortecedora P_D

b) Potência Elétrica Transferida P_e.

2.4.1 - *Potência Elétrica Assíncrona ou Amortecedora*

Esta potência leva em consideração todos os tipos de amortecimentos elétricos existentes no sistema tais como : Potência desenvolvida nos barramentos amortecedores; potências de amortecimento introduzidas pelos reguladores de tensão, e pelas próprias cargas.

Ela é aproximadamente proporcional a velocidade relativa do campo do rotor e campo do estator e é assim da forma

$$P_D = K_d \frac{d\delta}{dt} \qquad (2.15)$$

onde

K_d = coeficiente de amortecimento

Para máquinas de polos salientes deve-se prever ou não a existência de amortecedores nos entre-polos e esta expressão deve ser modificado para :

$$P_D = K_d \, (1 + b \cos 2\delta) \, \frac{d\delta}{dt} \qquad (2.16)$$

2.4.2 - *Potência Elétrica Transferida*

É a potência elétrica que se transfere de um ponto a outro do sistema geralmente da máquina geradora para o sistema. Ela é devida a diferença angular das tensões entre os dois pontos de transferência.

Entre estes dois pontos de transferência podemos ter um sistema T ou π equivalentes. Consideremos por exemplo o sistema T equivalente mostrado na figura 2.1.

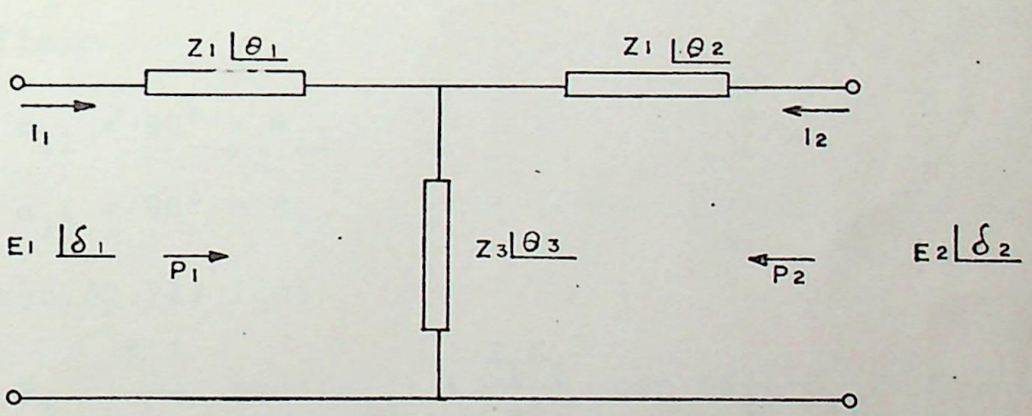


Fig. 2.1

Usando o princípio da superposição podemos facilmente mostrar que :

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_{11}} - \frac{\bar{E}_2}{Z_{12}} \qquad (2.17)$$

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3} \qquad (2.18)$$

$$\overline{Z}_{12} = \overline{Z}_1 + \overline{Z}_2 + \frac{\overline{Z}_1 \overline{Z}_2}{\overline{Z}_3} \qquad (2.19)$$

Considerando que

$$P = \overline{E}_1 \cdot I_1 \qquad (2.20)$$

Temos

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos(\theta_{11}) - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12}+\theta_{12}) \qquad (2.21)$$

onde

θ_{11} = ângulo da impedância Z_{11}

θ_{12} = ângulo da impedância Z_{12}

δ_{12} = ângulo entre as tensões E_1 e E_2 = $\delta_1 - \delta_2$

Podemos definir

$$\alpha_{11} = 90^0 - \theta_{11}$$

$$\alpha_{12} = 90^0 - \theta_{12}$$

e a expressão (2.21) fica

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \operatorname{sen}(\alpha_{11}) + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \operatorname{sen}(\delta_{12}-\delta_{12}) \qquad (2.22)$$

Z_{11} é chamado "Driving Point Impedence"

Z_{11} é chamado Impedância de Transferência

No caso de dois geradores interligados E_1 e E_2 são suas f.e.m. internas. Senão se considera a ação dos reguladores de tensão estes valores serão constantes. Caso estes reguladores devam ser levados em consideração os valores de E_1 e E_2 serão funções do tempo e o conhecimento destas funções, através da função de transferência dos reguladores permite levá-los em consideração pela simples representação destas funções nas

equações anteriores.

2.5.0 - *A Equação de Balanço*

Substituindo as várias expressões de potência deduzidas anteriormente na Equação de Balanço (2.2) temos :

$$M\frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} + K_d\frac{d\delta_{12}}{dt} + \frac{E_1^2}{Z_{11}}\operatorname{sen}\alpha_{11} + \frac{E_1E_2}{Z_{12}}\operatorname{sen}(\delta_{12}-\alpha_{12}) = P_m \qquad (2.23)$$

As condições de contorno serão estabelecidas , conforme o problema a ser resolvido.

Normalmente as condições de contorno devem ser os valores iniciais do Ângulo de Potência $\delta(0)$ e de sua derivada ou Velocidade Relativa do rotor $\delta'(0)$.

Conforme pode ser observado a equação de Balanço obtida é uma equação não linear que não tem solução em forma fechada.

Neste trabalho nos propomos a apresentar um método para solução numérica desta equação em computadores digitais, que apresente precisão melhor que o método clássico Passo-a Passo de Newton.

Apresentaremos então o método de Runge-Kutta - de 4ª ordem verificando pelos resultados obtidos a precisão do mesmo.

3.0.0 - *O MÉTODO DE RUNGE-KUTTA*

3.1.0 - *Introdução*

O Método de Runge-Kutta é um método geral para resolver um sistema de equações diferenciais de 1ª ordem.

Como uma equação diferencial de enegésima ordem pode ser transformada em um sistema de n equações de 1ª ordem este método serve também para resolver qualquer equação diferencial de enegésima ordem.

Em nosso caso particular estudaremos apenas a solução da equação diferencial de 2ª ordem que nos interessa.

3.2.0 - Sistema de 2 equações diferenciais de 1ª ordem

Seja o sistema de equações diferencias de 1ª ordem :

$$\frac{dy}{dt} = F(t, y, z) \qquad y(t_o) = y_o \tag{3.1}$$

$$\frac{dz}{dt} = G(t, y, z) \qquad z(t_o) = z_o \tag{3.2}$$

Seja h o incremento desejado na variável independente t

h = incremento de t

O método de Runge-Kutta de 4º ordem nos fornece as seguintes equações de recorrência.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \tag{3.3}$$

$$Z_{n+1} = Z_n + \frac{h}{6}(\ell_1 + 2\ell_2 + 2\ell_3 + \ell_4) \tag{3.4}$$

onde

$$\left.\begin{aligned} y_o &= y(t_o) \\ Z_o &= Z(t_o) \end{aligned}\right\} \text{ Condições iniciais} \tag{3.5}$$

$$\left.\begin{aligned}
K_1 &= F(t_n, y_n, Z_n) \\
\ell_1 &= G(t_n, y_n, Z_n) \\
K_2 &= F(t_n + \tfrac{1}{2}h, y_n + \tfrac{1}{2}h K_1, Z_n + \tfrac{1}{2}h \ell_1) \\
\ell_2 &= G(t_n + \tfrac{1}{2}h, y_n + \tfrac{1}{2}h K_1, Z_n + \tfrac{1}{2}h \ell_1) \\
K_3 &= F(t_n + \tfrac{1}{2}h, y_n + \tfrac{1}{2}h K_2, Z_n + \tfrac{1}{2}h \ell_2) \\
\ell_3 &= G(t_n + \tfrac{1}{2}h, y_n + \tfrac{1}{2}h K_2, Z_n + \tfrac{1}{2}h \ell_2) \\
K_4 &= F(t_n + h, y_n + hK_3, Z_n + h\ell_3) \\
\ell_4 &= G(t_n + h, y_n + hK_3, Z_n + h\ell_3)
\end{aligned}\right\} \tag{3.6}$$

3.3.0 - *Equação diferencial de 2ª ordem* -

Seja a equação diferencial de 2ª ordem :

$$\frac{d^2y}{dt^2} + F(x,y)\frac{dy}{dt} + G(x,y) = 0 \qquad (3.7)$$

Chamemos

$$\frac{dy}{dt} = Z \qquad (3.8)$$

Fica então

$$\frac{dZ}{dt} = -F(x, y)Z - G(x,y) \qquad (3.9)$$

Com as condições de contorno

$$y_o = y(t_o)$$

$$Z_o = y'(t_o) \qquad (3.10)$$

As equações acima representam um sistema de 2 equações diferenciais de 1ª ordem com suas condições de contorno para as quais pode ser aplicado o método descrito anterioremente.

3.4.0 - *Sub-Rotina de Integração RK4* -

Com a finalidade de resolver equações diferenciais de 2ª ordem ou sistemas de duas equações diferenciais de 1ª ordem, em computadores digitais foi desenvolvida a Sub-Rotina RK4, listada no final deste trabalho que obedece às seguintes condições de uso.

3.4.1 - *Chamada da Sub-Rotina RK4* -

CALL RK4 (FN1, FN2, K, N, H, XI, YI, VAL)

Onde :

FM1 e FM2 são duas funções que definem respectivamente as funções :

$$\frac{dy}{dt} = F(t, y, Z)$$

$$\frac{dZ}{dt} = G(t, y, Z)$$

Elas são definidas em 2 sub-programas funções que devem ser referidos no programa principal que chamou RK4.

A forma geral destes sub-programas deve ser :

```
FUNCTION FN1 (T, Y, Z)
FUNCTION FN2 (T, Y, Z)
```

No sub-programa deve aparecer

```
FN1 = F(T, Y, Z)
FN2 = G(T, Y, Z)
```

H = incremento desejado para t (fornecido pelo programa principal)

K = número de iterações para a obtenção de cada ponto da solução (Fornecido pelo programa principal)

N = número total de pontos que retornan ao programa principal, em VAL (fornecido pelo programa principal)

K*H = intervalo de tempo entre cada ponto retornado

K*H*N = Tempo total de integração

XI = Valor inicial de t = t_o (fornecido pelo programa principal)

YI(1) = valor inicial y = y_o = $y(t_o)$ (fornecido pelo programa-principal)

YI(2) = valor inicial de Z = Z_o = $Z(t_o)$ (fornecido pelo programa principal)

VAL = retorno dos N valores de y e de Z. Estes valores retorna em 2N valores de maneira que nos valores impares - (VAL(1), VAL(3), VAL(5), ...) retornam os valores de y e nos valores pares (VAL(2), VAL(4)...) retornam os valores de Z.

A separação no programa principal pode ser feita pelas declarações :

```
DØNI = 1,N
Y(I) = VAL (1,I)
n Z(I) = VAL (2,I)
```

As listagens da sub-rotina RK4 e das duas funções estão apresentadas nos exemplos no final deste trabalho.

4.0.0 - SUB-ROTINAS DE PLOTAGEM

Com o fim de visualizarmos melhor os resultados da integração das equações de balanço desenvolvemos duas sub-rotinas de Plotagem PLØT20 e PLØT30 cujas listagens estão apresentadas juntamente com os exemplos no final deste trabalho.

PLØT20 foi usada no programa para traçar o gráfico da curva de balanço $\delta = f(t)$ e PLØT30 foi usado para o traçado do plano de fase $\delta' = f(\delta)$.

5.0.0 - SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE BALANÇO

Para solução da equação de Balanço usaremos o Método de Runge-Kutta apresentado no capítulo 3.0.0 deste trabalho.

5.1.0 - Preparação da Equação

De acordo com o método de Runge-Kutta a equação diferencial de 2ª ordem deve ser transformada em duas de 1ª ordem. Assim a nossa equação fica :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{Ps}{M} - \frac{Kd}{M}\frac{d\delta}{dt} - \frac{E_1^2}{MZ_{11}}\,sen\alpha_{11} - \frac{E_1E_2}{MZ_{12}}\,sen(\delta-\alpha_{12}) \qquad (5.1)$$

Façamos

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega = F(t,\delta,\omega) \qquad (5.2)$$

temos então

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Ps}{M} - \frac{Kd}{M}\,\omega - \frac{E_1^2}{MZ_{11}}\,sen\alpha_{11} - \frac{E_1E_2}{MZ_{12}}\,sen(\delta-\alpha_{12}) = G(t,\delta,\omega) \qquad (5.3)$$

Estas duas equações serão apresentados em forma de função sub-programa ao programa principal que às entregará à

sub-rotina RK4.

5.2.0 - *Preparação do Programa Principal e Sub-Programas*

5.2.1 - *Nomenclatura Adotada*

T = Variável independente t

DELT = Ângulo de Potência δ

ØMEG = DDELT = dδ/dt = δ'

DØMEG = dω/dt = ω'

FUNCTIØN DDELT1 (T, DELT, ØMEG) = função representativa de dδ/dt = F(t,δ,ω) = função representativa de FN1 da sub-rotina RK4.

FUNCTIØN DØMEG1 (T, DELT, ØMEG) = função representativa de dω/dt = G(t,δ,ω) = função representativa de FN2 da sub-rotina RK4.

PS = Pm = Potência mecânica no eixo do gerador.
No caso de se levar em conta a ação dos reguladores de velocidade PS será uma função de T. Neste caso poderá ser substituido pela sua função no proprio sub-programa onde ele é usado ou poderá ser feito um sub-programa a parte.

DPS = Variação brusca da potência mecânica

M = M = Momentum angular da máquina - Deve ser declarado REAL no inicio dos programas onde aparece.

KD = Kd = Constante de amortecimento da máquina - Deve ser declarado REAL no inicio dos programas onde aparece.

E1 = E_1 = FEM induzida da fonte 1.
No caso de se levar em conta a ação dos reguladores de tensão poderá ser uma função de t, δ e ω.
Neste caso poderá ser substituida pela sua função no próprio sub-programa onde ela é usada.

E2 = E_2 = FEM induzida da fonte 2.
(idem, idem E_1)

Z1, Z2, Z3 = Impedâncias do sistema T

Z11 = Z_{11} = "Driviny Point Impedance" = impedancia vista pela máquina 1 quando a máquina 2 está em curto-circuito. Calculada pela expressão (2.18).

Z12 = Z_{12} = Impedância de transferencia da máquina 1 para a máquina 2. Calculada pela expressão (2.19).

ALFA11 = α_{11} = complemento do ângulo da impedância Z_{11}

ALFA12 = α_{12} = complemento do ângulo da impedância Z_{12}.

DELTO = δ_o = valor de δ no instante t_o

DDELTO= δ'_o = valor de δ' no instante t_o

DELTM = maior valor de δ para escala dos gráficos

DDELMP = maior valor positivo de δ' para escala do gráfico

DDELMN = maior valor negativo de δ' para escala do gráfico

NI = número de mudanças de condições do sistema mais 1

TI (I) = duração da condição I do sistema

5.2.2 - *Sub-Programas*

De acordo com as equações (5.2) e (5.3) fizemos os sub-programas :

FUNCTIØN DDELT1 (T, DELT, ØMEG)

e

FUNCTIØN DØMEG1 (T, DELT, ØMEG)

apresentados nas listagens no fim deste trabalho.

5.2.3 - *Programa Principal*

O programa principal, após a leitura dos parâmetros fixos do sistema inicia os cálculos da Curva de Balanço para cada condição do sistema da seguinte maneira :

a) Lê os dados particulares da condição;

b) Calcula as impedâncias de entrada e de transferência Z11 e Z12 da condição;

c) Calcula os ângulos ALFA11 e ALFA12;

d) Se NI=1 calcula as condições iniciais;

e) Calcula a nova carga se houver mudança da mesma;

f) Procede a integração da equação de balanço chamando a sub-rotina de integração RK4 que utiliza durante os sub-programas DDELT1 e DØMEG1;

g) Retira do retorno de RK4 os valores das variaveis desejadas T, DELT e DDELT;

h) Calcula as novas condições de controno para a nova condição e repete os cálculos até o final do tempo total determinado pela soma das durações de cada condição;

i) Neste ponto estão guardados nos conjuntos T(I), DELT(I) e DDELT(I) as funções $\delta(t)$ e $\delta'(\delta)$

j) Através da sub-rotina PLØT20 traça o gráfico de $\delta(t)$ e da sub-rotina PLØT30 o gráfico de $\delta'(\delta)$

6.0.0 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

6.1.0 - Exemplo 1 -

Seja um alternador ligado a um barramento infinito através de duas linhas de transmissão conforme indica a figura 6.1. Estudaremos neste exemplo o caso em que a potência mecânica sofre um aumento brusco de PS para PS + DPS

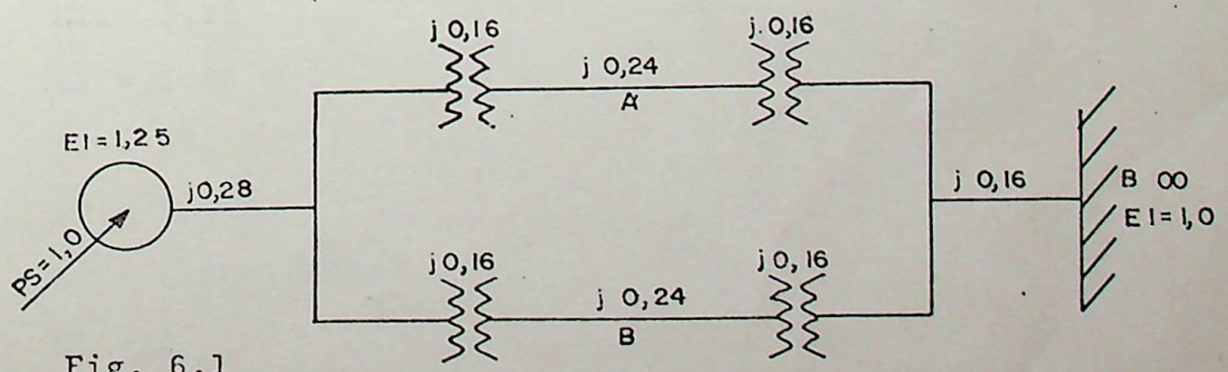


Fig. 6.1

f = 60 Hz

H = 3

$M = \frac{H}{2\Pi f} = \frac{3}{3,14 \times 60} = 0,0158$ pu

Colocando o sistema na forma de T equivalente temos (fig. 6.2).

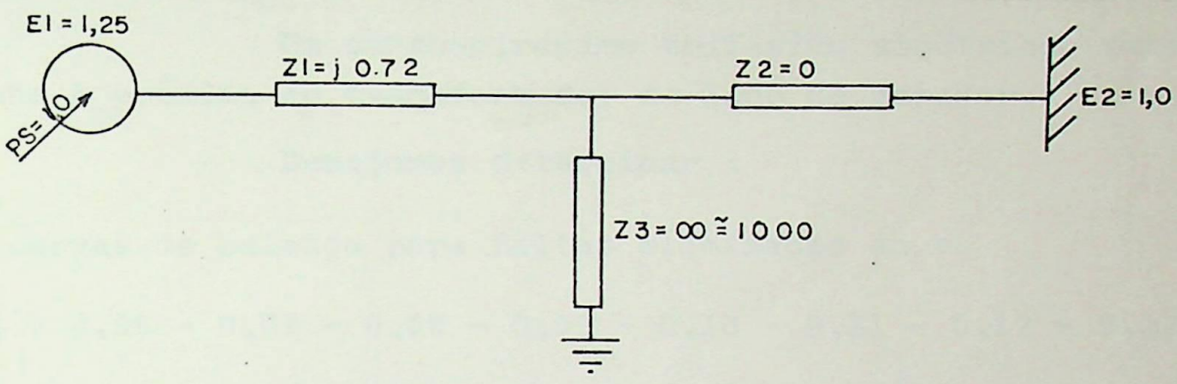


Fig. 6.2

Rodamos dois casos mudando o Constante de Amortecimento. Um resumo dos dados é apresentado a seguir :

M = 0,0158

KD = 0 - 0,02

PS = 1,0

DPS = 0.4

DELTM = 2.0

DDELMP = 2.0

DDELMN = 2.0

E1 = 1,25

E2 = 1.00

Z1 = (0, 0.72)

Z2 = (0, 0)

Z3 = (1000, 1000)

NI = 2

TI(1) = 0,0

TI(2) = 5,0 [s]

Os resultados estão apresentados como Exemplo 1 no final deste trabalho.

6.2.0 - *Exemplo 2* -

Consideremos o mesmo sistema da figura 6.1.

Um curto-circuito trifásico simétrico ocorre na linha B próximo ao transformador do lado do gerador.

Desejamos determinar :

A) As curvas de balanço para faltas eliminadas em :

t = 0,06 - 0,07 - 0,08 - 0,09 - 0,10 - 0,11 - 0,12 - 0,13

B) Observando os resultados do ítem A tomar intervalos menores na passagem de sistema estável para instável afim de determinar o tempo crítico de abertura dos disjuntores da linha.

Os dados fixos são os mesmos do exemplo 1.

H = 3

M = 0,0158

PS = 1,0

DPS = 0,0

f = 60 Hz

6.2.1 - *Determinação dos Parametros Antes da Falta - Condições Iniciais*

O circuito antes da falta é (fig. 6.3)

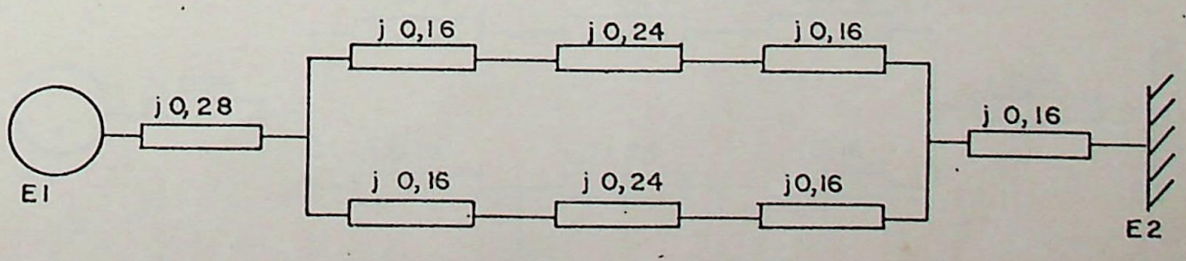


Fig. 6.3

que pode ser simplificado em (fig. 6.4).

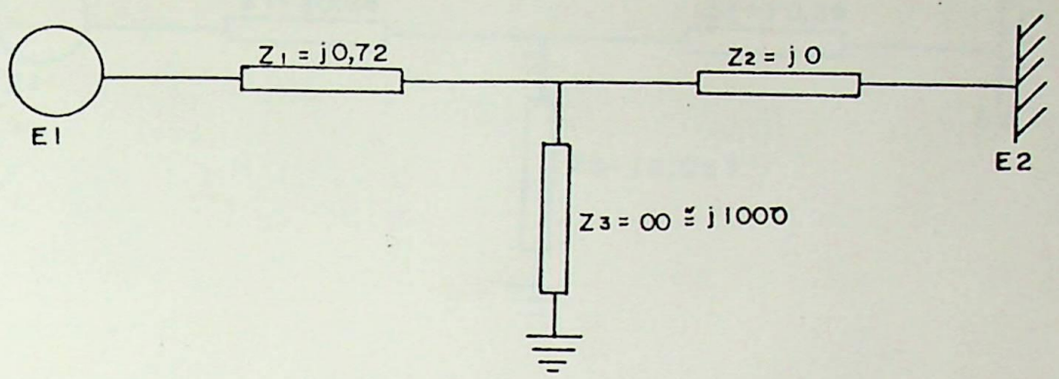


Fig. 6.4

Ou

E1 = 1,25

E2 = 1,00

Z1 = 0 + j0,72

Z2 = 0 + j0

Z3 = 0 + j1000 (infinito)

As condições iniciais são :

$\delta'(0) = 0$

$\delta(0) = \delta_o$ = calculado pelo programa

6.2.2 - *Parâmetros Durante a Falta*

Nesta condição o nosso circuito fica (fig.6.5)

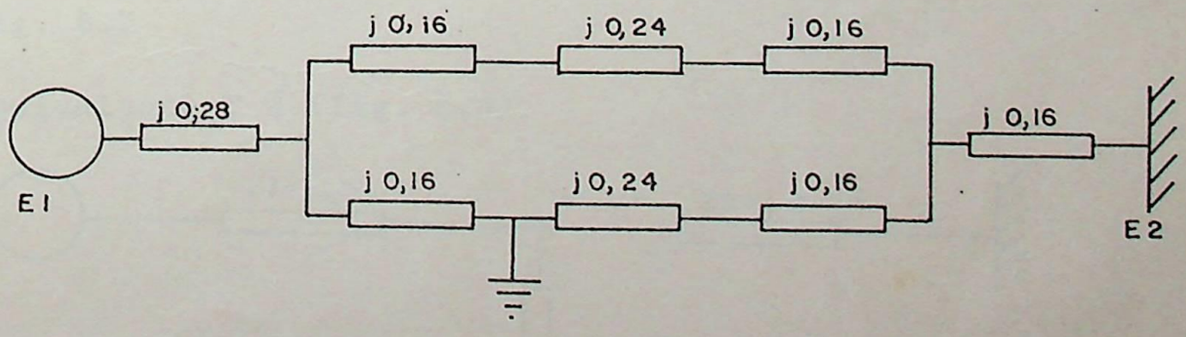


Fig. 6.5

Que pode ser facilmente transformado em seu equivalente T (fig. 6.6).

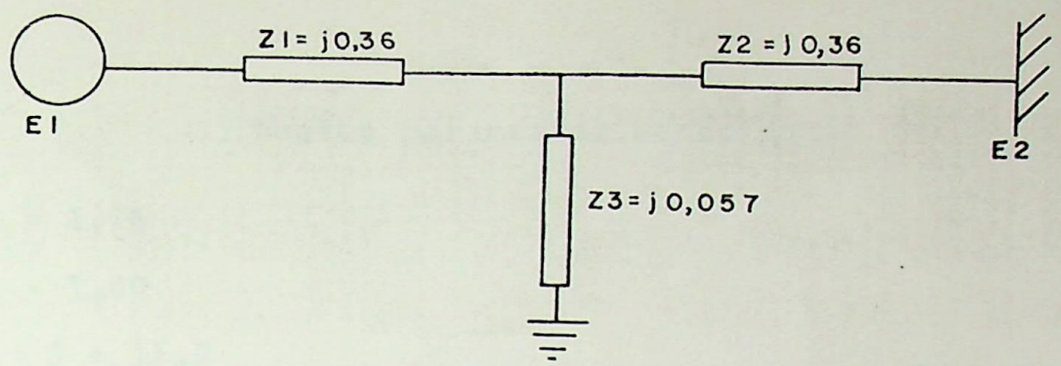


Fig. 6.6

Nossos parâmetros serão então :

E1 = 1.25

E2 = 1.00

Z1 = 0 + j0,36

Z2 = 0 + j0,36

Z3 = 0 + j0,057

6.2.3 - *Parâmetros Depois da Falta*

Nestas condições a linha B estará fora de serviço e nosso diagrama será (fig. 6.7)

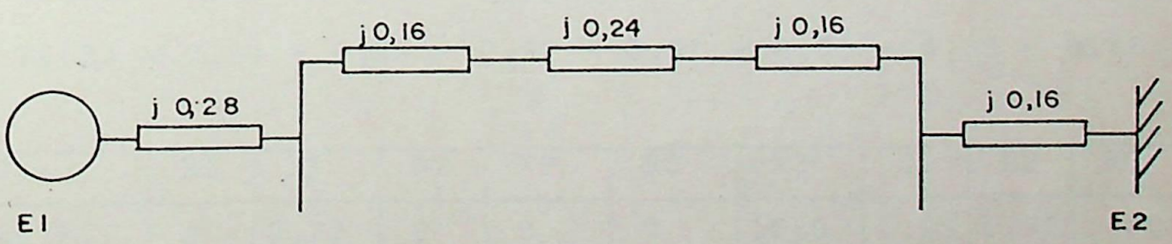


Fig. 6.7

cujo equivalente T é (fig. 6.8)

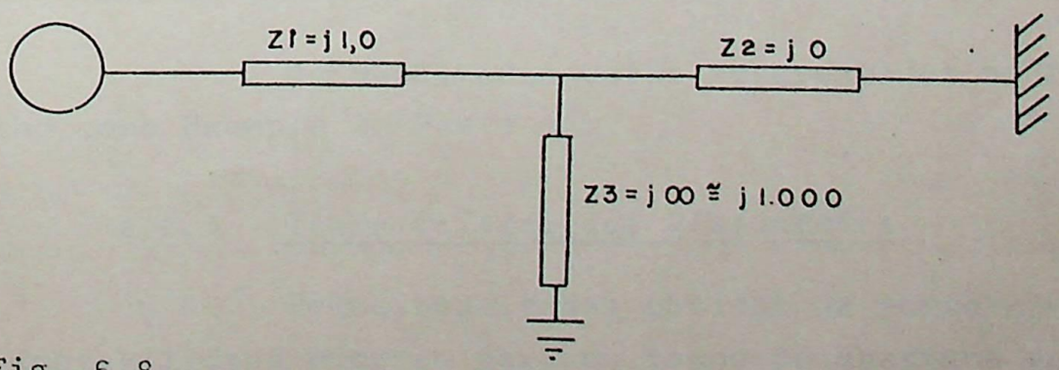


Fig. 6.8

Nossos parametros serão então

E1 = 1,25

E2 = 1,00

Z1 = 0 + j1,0

Z2 = 0 + j0

Z3 = 0 + j1000

6.2.4 - *Resumo dos Dados*

M = 0,0158

KD = 0,0

DELTM = 2.5 [rd] (estimado)

DDELMP = 5,0 [rd/s] (estimado)

DDELMN = 5,0 [rd/s] (estimado)

NI = 3 (2 condições + 1)

TI(1) = 0,00

TI(2) = 0,06 - 0,07 - 0,08 - 0,09 - 0,10 - 0,11 - 0,12 - 0,13

TI(3) = 0,94 - 0,93 - 0,92 - 0,91 - 0,90 - 0,89 - 0,88 - 0,87

COND.	R1	X1	R2	X2	R3	X3	E1	E2	PS	DPS
Antes F.	0	0,72	0	0	0	1000	1,25	1,00	1,00	0
Durante F.	0	0,36	0	0,36	0	0,057	1,25	1,00	1,00	0
Depois F.	0	1,00	0	0	0	1000	1,25	1,00	1,00	0

Os resultados estão apresentados no final deste trabalho como Exemplo 2 - Parte A

6.2.5 - *Tempo Crítico dos Disjuntores*

Pelos resultados obtidos na parte A verificamos que a instabilidade ocorreu para um tempo de abertura do disjuntor

compreendido entre 0,11 e 0,12 [s].

Neste intervalo rodamos o programa com intervalos de 0,002 em 0,002 [s], isto é, para valores de TI como seguem:

TI(1) = 0

TI(2) = 0,112 - 0,114 - 0,115 - 0,116 - 0,118

TI(3) = 0,888 0,886 0,885 - 0,884 - 0,882

Os resultados estão apresentados no final deste trabalho em Exemplo 2 Parte B.

Como podemos verificar o tempo crítico de abertura do disjuntor está em torno de 0,114 [s] pois com 0,115 [s] o sistema já é instável.

6.3.0 - Exemplo 3 -

A figura 6.9 representa um sistema de uma máquina ligada a um barramento infinito através de duas linhas de transmissão, transferindo 1 pu de potência com $\cos\psi=1$ nos terminais da máquina.

Deseja-se

A) Verificar se o sistema é estável ou não para os diversos tipos de falta (trifásica, L-L, L-G, L-L-G) sustentadas no centro de uma das linhas

B) Determinar o tempo crítico de abertura dos disjuntores da linha para uma falta L-L-G no centro da mesma

São dados :

KVA_{BASE} = 100.000 [KVA]

ωR^2 = 40.000,00 [lb x ft^2]

n = 180 rpm

f = 60 Hz

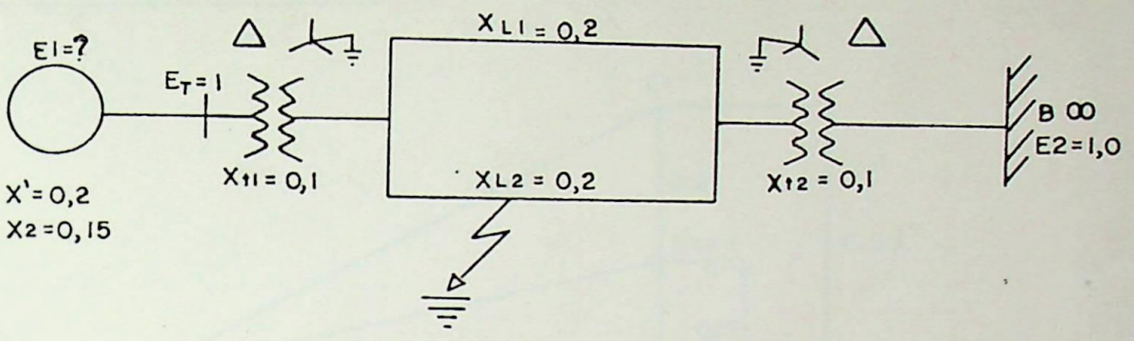


Fig. 6.9

6.3.1 - *Determinação das Constantes da Máquina* -

a) *Momentum Angular M*

$$H = \frac{0.231\ \omega R^2 . (rpm)^2 . 10^{-6}}{KVA_{BASE}} \qquad \left[\frac{K\omega}{KVA}\right] \quad [s]$$

$$M = \frac{H}{\pi f}$$

$$H = \frac{0,231 \ . \ 40.000,000 \ . \ 10^{-6} \ . \ (180)^2}{100.000} = 3,0 \quad |s|$$

$$M = \frac{3}{3,14 \ . \ 60} = 0,0158 \quad |s|$$

b) *Constante de Amortecimento KD*

KD = 0 (adotado s/amortecimento)

6.3.2 - *Potências e FEM* -

a) *Potencia Transferida*

PS = 1.0 (dado

b) *Variação de Carga*

DPS = 0 (não ha variação de carga)

c) *Força Eletromotriz - E1* -

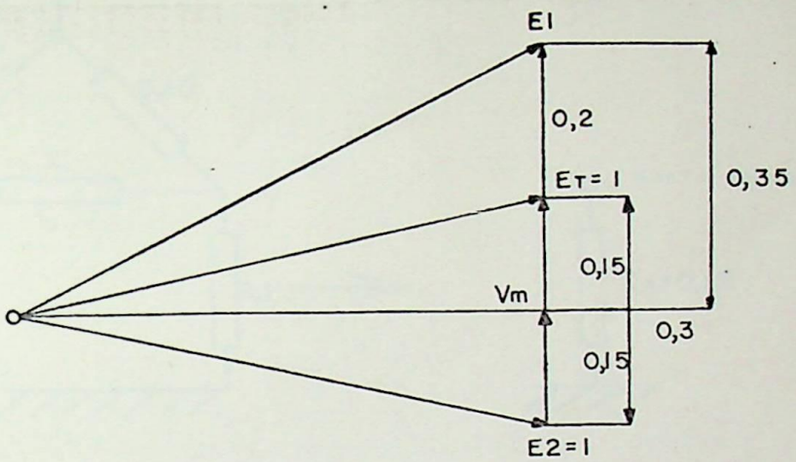


Fig. 6.10

$V_m^2 = 1^2 - \overline{0,15^2} = 0,9775$

$E1 = \sqrt{0,9775 + \overline{0,35^2}} = 1,05$

E1 = 1,05

E2 = 1,00

6.3.3 - *Reatâncias de Sequência Vistas da Falta*

a) *Sequência Negativa*

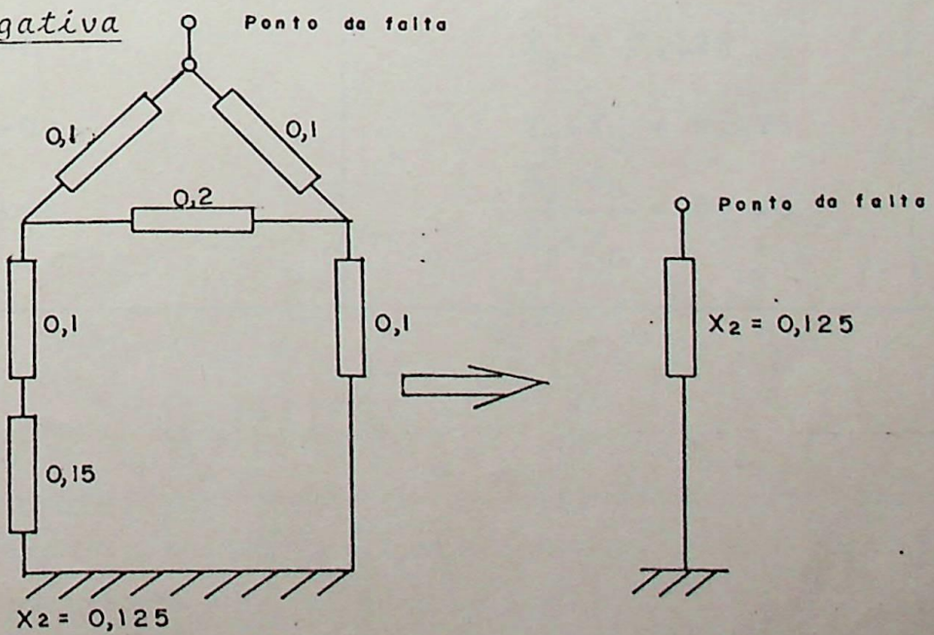


Fig. 6.11

b) *Sequência Zero*

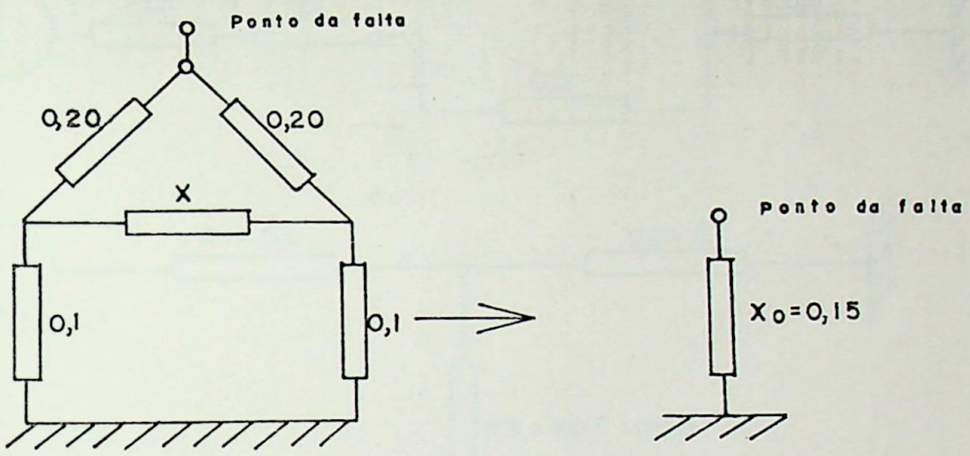


Fig. 6.12

X não interessa por causa do simetria (não passa corrente)

As reatâncias das linhas foram tomadas dobradas para considerar o efeito da reatância mutuadas linhas (adotado).

6.3.4 - Valores de X_f -

Tipo de Falta	X_f
3 ϕ	0
L-L	$X_2 = 0,125$
L-G	$X_2+X_0 = 0,275$
LL-G	$\frac{X_2 \cdot X_0}{X_2+X_0} = 0,068$

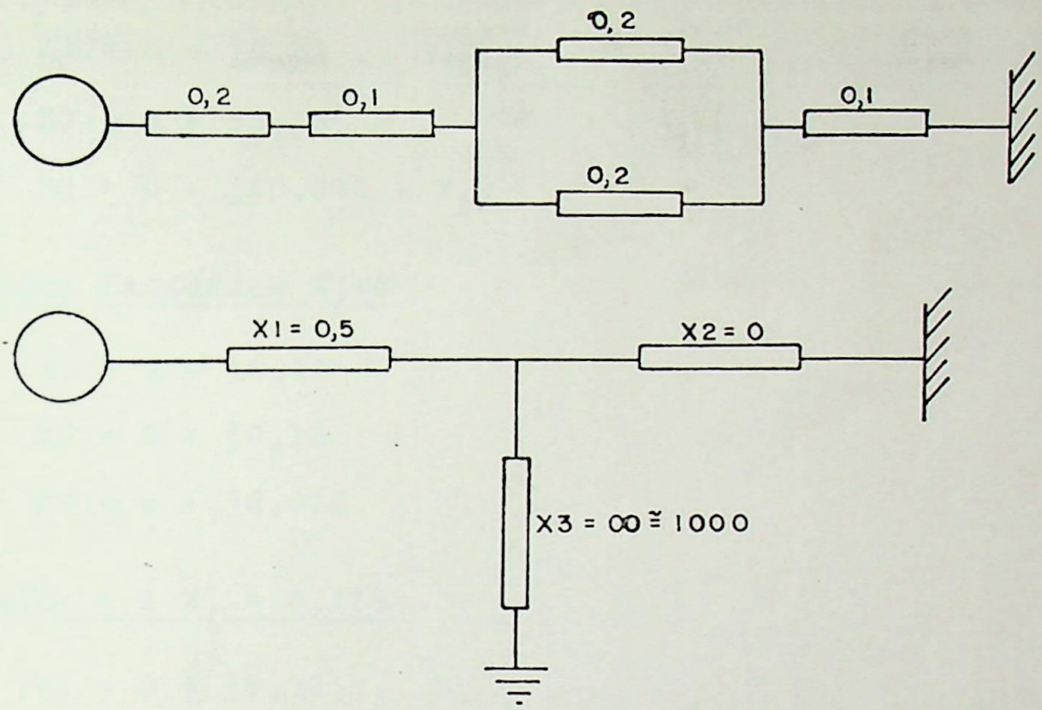


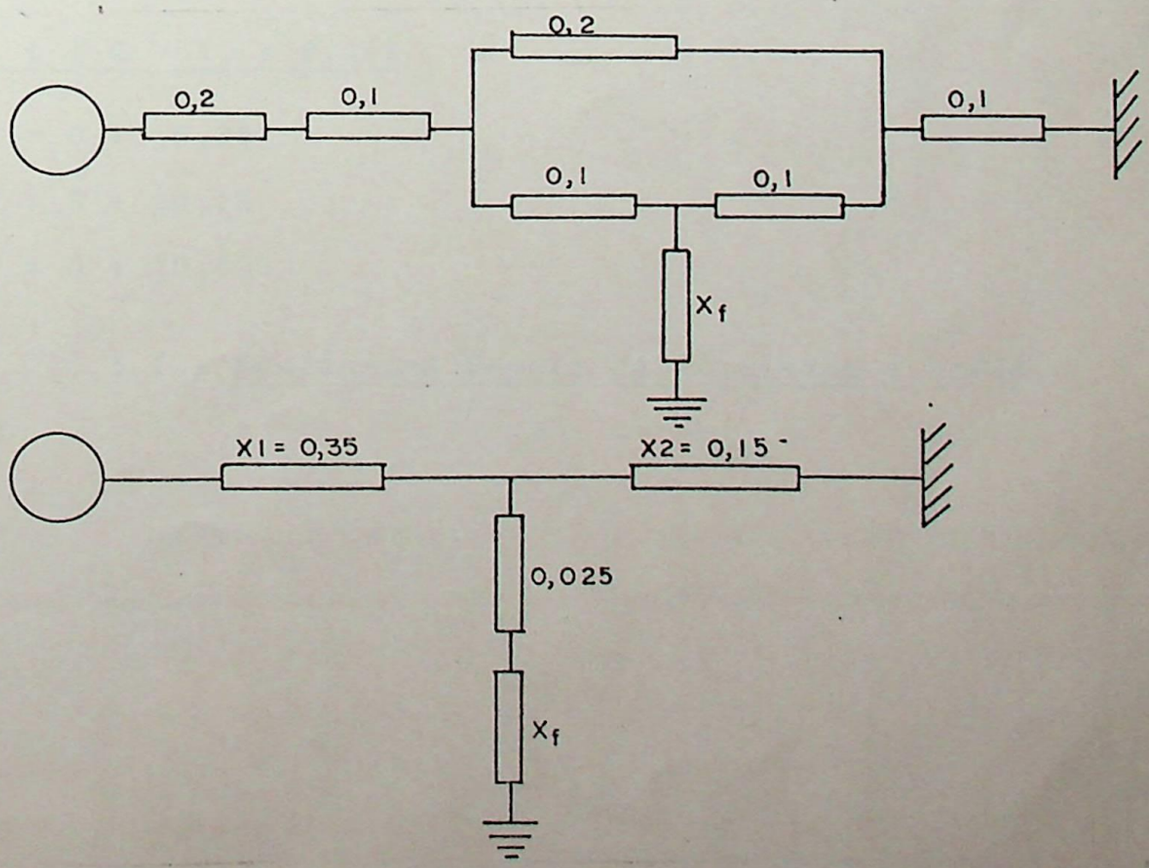
Fig. 6.13

Z1 = 0 + j0,5

Z2 = 0 + j0

Z3 = 0 + j1000

6.3.6 - *Reatâncias Durante a Falta*



$Z1 = 0 + j0,35$

$Z2 = 0 + j0,15$

$Z3 = 0 + j(0,025 + X_f)$

a) *Falta Trifásica* $X_f = 0$

$Z1 = 0 + j0,35$

$Z2 = 0 + j0,15$

$Z3 = 0 + j0,025$

b) *Falta L-L* $X_f = 0,125$

$Z1 = 0 + j0,35$

$Z2 = 0 + j0,15$

$Z3 = 0 + j0,15$

c) *Falta L-G* - $X_f = 0,275$

$Z1 = 0 + j0,35$

$Z2 = 0 + j0,15$

$Z3 = 0 + j0,30$

d) *Falta L-L-G* - $X_f = 0,068$

$Z1 = 0 + j0,35$

$Z2 = 0 + j0,15$

$Z3 = 0 + j0,093$

6.3.7 - Reatâncias Depois de Eliminada a Falta

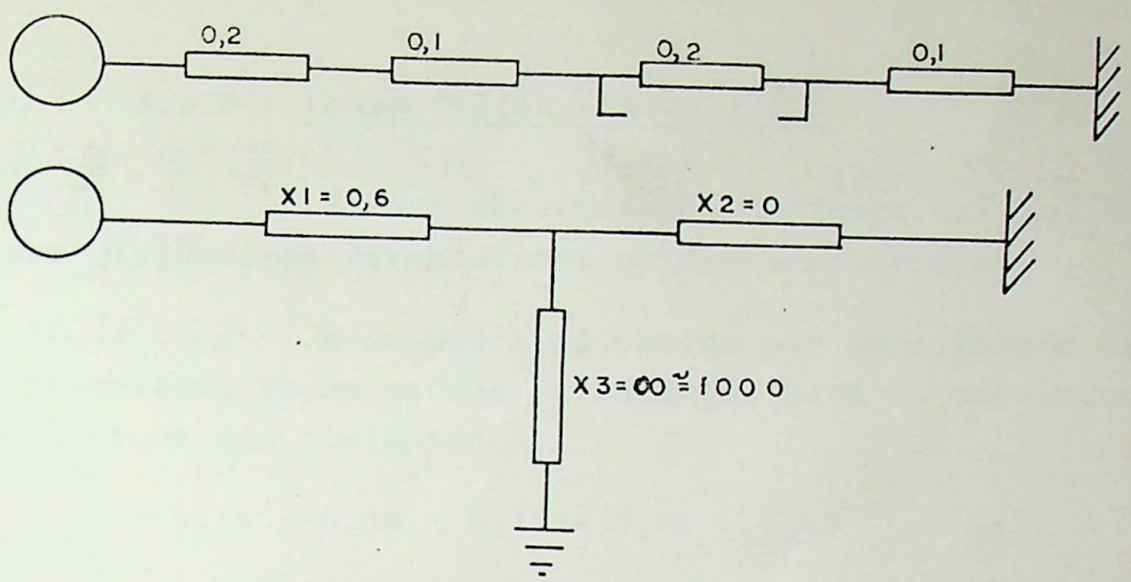


Fig. 6.14

Z1 = 0 + j0,6

Z2 = 0 + j0

Z3 = 0 + j1000

6.3.8 - *Falta Sustentada*

Com os dados anteriores e com

NI = 2

TI(1) = 0.0

TI(2) = 1,0 (infinito)

rodamos os 4 casos pedidos no item A para falta sustentada.

Os resultados estão apresentados no final deste trabalho em Exemplo 3- Parte A na ordem trifásico, LL, LG, LLG

Como podemos observar por estes resultados temos :

Falta Trifásica - Instável

Falta L-L - Estável

Falta L-G - Estável

Falta L-L-G - Instável

6.3.9 - Tempo Crítico-Falta L-L-G

Para a determinação do Tempo Crítico de abertura dos disjuntores foram usados os dados anteriores.

A solução foi obtida por aproximação determinando primeiramente as curvas de balanços para os seguintes tempos de abertura dos disjuntores.

0,30 - 0,32 - 0,34 - 0,36 - 0,38 - 0,40 [s]

Tendo sido verificado que houve instabilidade entre 0,38 e 0,40 [s] rodamos o programa com tempos de abertura.

0,385 - 0,390 - 0,395 [s]

Conforme podemos verificar pelos resultados apresentados no final deste trabalho em Exemplo 3 - Parte B o Tempo Crítico de abertura dos disjuntores para este caso está em torno de 0,395 [s]

7.0.0 - CONCLUSÕES -

Como pudemos verificar pelos exemplos de aplicação desenvolvidos o sistema de programação é bastante versátil para resolver os problemas de estabilidade para todos os sistemas que possam ser reduzidos a duas máquinas ligados por um T equivalente.

```
C         PROGRAMA - HM/TESE/02
C              MAQUINAS SINCRONAS DE POLOS LISOS
C              EXCITACOES CONSTANTES
C              EQUACAO DE BALANCO EM ATE 6 ETAPAS PODENDO EM CADA ETAPA
C              SEREM ALTERADAS CARGAS,TENSOES E IMPEDANCIAS DO SISTEMA
C              DE DUAS OU U'A MAQUINA E UM BARRAMENTO INFINITO

C         HELIO MOKARZEL - EFEI - 1972 - TESE DE MESTRADO

      DIMENSION YI(2),VAL(2,101),T(101),DELT(101),DDELT(101),TI(7)
      REAL KD,M
      COMPLEX Z1,Z2,Z3,Z11,Z12
      EXTERNAL DDELT1,DOMEG1
      COMMON T,DELT,DDELT,M,KD,PST,E1,E2,AZ11,AZ12,ALFA11,ALFA12
   10 READ(12,15) M,KD,DELTM,DDELMP,DDELMN
   15 FORMAT(8F10.4)
      IF(M.LT.1E-4) STOP 1
   20 READ(12,25) NI,(TI(I),I=1,NI)
   25 FORMAT(I10,7F10.4)
      IF(NI.EQ.0) STOP 2
      TTMAX= 0
      DO 26 I=1,NI
   26 TTMAX = TTMAX + TI(I)
      K = 1
      H = .01
      DT = K*H
      JJ = 0
      TFINAL = 0
      DO 100 I=1,NI
      N = (100.*TI(I)/TTMAX + .5)
      READ(12,28) Z1,Z2,Z3,E1,E2,PS,DPS
   28 FORMAT(6F10.4,4F5.3)

C         CALCULO DE Z11 E Z12

      AZ3 = CABS(Z3)
      IF(AZ3.LT.999.) GO TO 30
      Z11 = Z1 + Z2
      Z12 = Z11
      GO TO 50
   30 IF(AZ3.GT.1E-4) GO TO 40
      Z12 = (1.,1.)
      E2 = 0.
      GO TO 42
   40 Z12 = Z1 + Z2 + Z1*Z2/Z3
   42 Z11 = Z1 + Z2*Z3/(Z2+Z3)
   50 AZ11 = CABS(Z11)
      AZ12 = CABS(Z12)

C         CALCULO DE ALFA11 E ALFA12

      R11 = REAL(Z11)
      R12 = REAL(Z12)
      IF(AZ12.LT.1E-4) STOP
      IF(AZ11.GT.1E-4) GO TO 60
      AZ11 = 1.
      ALFA11 = 0.
      GO TO 62
   60 ALFA11 = 1.5707963267   - ARCOS(R11/AZ11)
   62 ALFA12 = 1.5707963267   - ARCOS(R12/AZ12)
```

```
C         CONDICOES INICIAIS  I=1

      IF(I.NE.1) GO TO 70
      XI = 0
      YI(1)=ALFA12+ARSIN(PS*AZ12/(E1*E2)-E1*AZ12*SIN(ALFA11)/(AZ11*E2))
      YI(2)= 0.
      WRITE(1,63) M,KD
   63 FORMAT(1H1/////////26X,'CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADO
     1S COM OS SEGUINTES DADOS:'/////1X,'CONSTANTES DA MAQUINA: M=',F7.4
     2,' KD=',F7.4/////1X,119(1H-)/1X,'|ETA|TEMPO|TEMPO|DURA |DELTA|DDEL
     3T| PS |DPS | E1 | E2 |    Z1     |    Z2     |    Z3     |
     4Z11    |    Z12    |'/1X,'|PA |INIC |FINAL|CAO  |INIC |INIC |    |
     5    |    |    | R1  | X1  | R2  | X2  | R3  | X3  | R11 | X11
     6| R12 | X12 |'/1X,119(1H-))
      WRITE(1,65) YI(1),YI(2),PS,DPS,E1,E2,Z1,Z2,Z3,Z11,Z12
   65 FORMAT(1X,'| CONDICOES INICIAIS  |',2(F5.2,'|'),4(F4.2,'|'),4(F5.2
     1,'|'),2(F7.2,'|'),4(F5.2,'|'))
      WRITE(1,67)
   67 FORMAT(1X,'|',3X,5('|',5X),4('|',4X),4('|',5X),2('|',7X),4('|',5X)
     1,'|')
      GO TO 100
   70 IETAPA = I-1
      TINIC = TFINAL
      TFINAL = TINIC + TI(I)
      WRITE(1,75)IETAPA,TINIC,TFINAL,TI(I),YI(1),YI(2),PS,DPS,E1,E2,Z1,Z
     12,Z3,Z11,Z12
   75 FORMAT(1X,'|',I2,' |',3(F5.3,'|'),2(F5.2,'|'),4(F4.2,'|'),4(F5.2,'
     1|'),2(F7.2,'|'),4(F5.2,'|'))
      WRITE(1,67)

C         VARIACAO DE CARGA

      PST= PS + DPS

C         INTEGRACAO DA EQUACAO DE BALANCO

      CALL RK4(DDELT1,DOMEG1,K,N,H,XI,YI,VAL)

C         CALCULO DE T,DELTA E DDELTA

      DO 80 L=1,N
      J = JJ + L
      T(J) = J*DT
      DELT(J) = VAL(1,L)
   80 DDELT(J) = VAL(2,L)

         NOVAS CONDICOES DE CONTORNO

      JJ = J
      XI = T(J)
      YI(1) = DELT(J)
      YI(2) = DDELT(J)
  100 CONTINUE
      WRITE(1,105)
  105 FORMAT(1X,119(1H-))

         TRACADO DO GRAFICO DE DELTA FUNCAO DO TEMPO- CURVA DE BALANCO

      TMAX = TTMAX*80/100
      WRITE(1,110) TMAX,DELTM
```

```
  110 FORMAT(1H1/1X,'CURVA DE BALANCO -GRAFICO DE DELTA = F(T) PARA TMA)
     1=',F5.2,' DELTAMAX=',F7.2)
      CALL PLOT20(TMAX,DELTM)

C          TRACADO DO GRAFICO DE DDELTA FUNCAO DE DELTA - PLANO DE FASE

      WRITE(1,120)
  120 FORMAT(1H1/11X,'PLANO DE FASE - DDELTA = F(DELTA)')
      CALL PLOT30(DELTM,DDELMP,DDELMN,100)
      GO TO 20
      END
```

```
      FUNCTION DDELT1(T,DELT,OMEG)

C          SUB-PROGRAMA FUNCAO DDELT1
C               FUNCAO DDELTA/DT  PARA PS,E1 E E2 CONSTANTES - NAO CONSI-
C               DERA A ACAO DOS REGULADORES DE VELOCIDADE E DE TENSAO

C          HELIO MOKARZEL - EFEI - 1972 - TESE DE MESTRADO

      DDELT1 = OMEG
      RETURN
      END
```

```
      FUNCTION DOMEG1(T,DELT,OMEG)

C          SUB-PROGRAMA FUNCAO DOMEG1
C               FUNCAO DOMEGA/DT PARA PS,E1 E E2 CONSTANTES - NAO CONSI-
C               DERA A ACAO DOS REGULADORES DE VELOCIDADE E DE TENSAO

C          HELIO MOKARZEL - EFEI - 1972 - TESE DE MESTRADO

      REAL M,KD
      COMMON F1(101),F2(101),F3(101),M,KD,PS,E1,E2,Z11,Z12,ALFA11,ALFA12
      DOMEG1 = PS/M - (KD/M)*OMEG - (E1**2/(M*Z11))*SIN(ALFA11) -(E1*E2/
     1(M*Z12))*SIN(DELT-ALFA12)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE RK4(FN1,FN2,K,N,H,XI,YI,VAL)

C         SUB-ROTINA RK4 - RUNGE KUTTA DE QUARTA ORDEM
C              INTEGRA UM SISTEMA DE DUAS EQUACOES DIFERENCIAIS DE
C              PRIMEIRA ORDEM
C         FN1 E FN2 = FUNCOES REPRESENTATIVAS DAS DUAS EQUACOES
C                     DIFERENCIAIS - DADAS EM SUB-PROGRAMAS
C         H   = INCREMENTO DA VARIAVEL INDEPENDENTE POR ITERACAO
C         K   = NUMERO DE ITERACOES PARA CADA PONTO DA SOLUCAO
C         N   = NUMERO TOTAL DE PONTOS DA SOLUCAO
C         XI  = VALOR INICIAL DA VARIAVEL INDEPENDENTE
C         YI  = VALORES INICIAIS DAS DUAS FUNCOES 1 E 2
C         VAL(IMPAR) = N VALORES SUCECIVOS DA FUNCAO 1
C         VAL(PAR)   = N VALORES SUCECIVOS DA FUNCAO 2
C         K*H INCREMENTO DA VARIAVEL INDEPEND. ENTRE CADA DOIS PONTOS
C         K*N*H = INTERVALO TOTAL DE INTEGRACAO DA VARIAVEL INDEPENDENTE

C         HELIO NOKARZEL - EFEI - 1972 - TESE DE MESTRADO - SR.AUXILIAR

      DIMENSIONYI(2) ,Y(2) ,S1(2) ,S2(2) ,S3(2) ,S4(2) ,VAL(1)
      H2 = H / 2.
      X = XI
      DO 5 I=1,2
    5 Y(I) = YI(I)
      DO 75 LL=1,N
      DO 70 JJ=1,K
      L = (LL - 1) * 2
      Y1 = Y(1)
      Y2 = Y(2)
      DO 20 I=1,2
      GOTO(10,15),I
   10 T = FN1(X,Y1,Y2)
      GOTO 20
   15 T = FN2(X,Y1,Y2)
   20 S1(I) = H * T
      XA = X + H2
      A1 = Y(1) + S1(1) / 2.
      A2 = Y(2) + S1(2) / 2.
      DO 35 I=1,2
      GOTO(25,30),I
   25 T = FN1(XA,A1,A2)
      GOTO 35
   30 T = FN2(XA,A1,A2)
   35 S2(I) = H * T
      A1 = Y(1) + S2(1) / 2.
      A2 = Y(2) + S2(2) / 2.
      DO 50 I=1,2
      GOTO(40,45),I
   40 T = FN1(XA,A1,A2)
      GOTO 50
   45 T = FN2(XA,A1,A2)
   50 S3(I) = H * T
      XA = X + H
      A1 = Y(1) + S3(1)
      A2 = Y(2) + S3(2)
      DO 65 I=1,2
      GOTO(60,55),I
      GOTO 65
   55 T = FN2(XA,A1,A2)
   60 T = FN1(XA,A1,A2)
```

```
65 S4(I) = H * T
   X = X + H
   DO 70 I=1,2
70 Y(I) = Y(I) + (S1(I) + 2. * S2(I) + 2. * S3(I) + S4(I)) / 6.
   DO 75 I=1,2
   II = I + L
75 VAL(II) = Y(I)
   RETURN
   END
```

```
      SUBROUTINE PLOT20(XMAX,YMAX)

C               SUB-ROTINA  PLOT20 - TRACA O GRAFICO  DE  Y/XMAX FUNCAO
C                                    DE  X/XMAX

C               H.MOKARZEL - EFEI - 10.10.1972

      INTEGER*2 ASTER,BARRA,ESPACO,INFRA,MENOS,PONTO,ULTRA
      INTEGER*2 COLUNA(101),A(10)
      COMMON X(101),Y(101)
      DATA A/1H1,1H2,1H3,1H4,1H5,1H6,1H7,1H8,1H9,1H0/,ASTER/1H*/,BARRA/1
     1H|/,ESPACO/1H /,INFRA/1H</,MENOS/1H-/,PONTO/1H./,ULTRA/1H>/
      WRITE(1,15)
   15 FORMAT(1HC/1X,'-1.0',7X,'0.8',7X,'0.6',7X,'0.4',7X,'0.2',8X,'0',8X
     1,'0.2',7X,'0.4',7X,'0.6',7X,'0.8',6X,'+1.0 Y/YMAX')
      I=1
      COLUNA(1) = BARRA
      DO 20 K=2,101
      IF(K-10*I-1)17,16,17
   16 COLUNA(K) = BARRA
      I=I+1
      GO TO 20
   17 COLUNA(K) = PONTO
   20 CONTINUE
      WRITE(1,25) COLUNA
   25 FORMAT(3X,101A1,5X,'X',7X,'Y')
      DO 30 K=1,101
   30 COLUNA(K) = ESPACO
      COLUNA(51) = PONTO
      N=1
      M=1
      XNORM = X(1)/XMAX
      YNORM = Y(1)/YMAX
      J = (80*XNORM + 0.5)
      K = (50*( YNORM + 1.) + 1.5)
      DO 110 L=1,80
      IF(L-8*M)70,40,70
   40 IF(M-10)60,50,60
   50 COLUNA(51) = MENOS
      COLUNA(52) = A(1)
      COLUNA(53) = PONTO
      COLUNA(54) = A(10)
      GO TO 70
   60 COLUNA(51) = MENOS
      COLUNA(52) = A(10)
      COLUNA(53) = PONTO
      COLUNA(54) = A(M)
      M=M+1
   70 IF(L.EQ.J) GO TO 90
   80 WRITE(1,85) COLUNA
   85 FORMAT(3X,101A1)
      GO TO 100
   90 IF(Y(N).GT.YMAX) GO TO 81
      IF(Y(N).LT.(YMAX*(-1))) GO TO 82
      COLUNA(K) = ASTER
      WRITE(1,95) COLUNA,X(N),Y(N)
      COLUNA(K) = ESPACO
      GO TO 93
   81 COLUNA(101) = ULTRA
      GO TO 91
```

```
 82 COLUNA(1) = INFRA
 91 WRITE(1,95) COLUNA,X(N),Y(N)
 95 FORMAT(3X,101A1,F7.3,X,F7.3)
 93 N=N+1
    XNORM = X(N)/XMAX
    YNORM = Y(N)/YMAX
    J = (80*XNORM + 0.5)
    K = (50*(YNORM +1.) + 1.5)
100 COLUNA(51) = PONTO
    COLUNA(1) =   ESPACO
    COLUNA(101) = ESPACO
    COLUNA(52) = ESPACO
    COLUNA(53) = ESPACO
110 COLUNA(54) = ESPACO
    WRITE(1,120)
120 FORMAT(50X,'X/XMAX')
    RETURN
    END
```

```
      SUBROUTINE PLOT30(XMAX,YMAXP,YMAXN,N)

C          SUB-ROTINA PLOT30    TRACA O GRAFICO  DE Y = F(X)
C                               X E Y RECEBIDOS PELA DECLARACAO COMMON
C                               XMAX = MAIOR VALOR ESTIMADO DE X (LIMITE )
C                               YMAXP= MAIOR VALOR ESTIMADO DE Y POSITIVO
C                               YMAXN= MAIOR VALOR ESIMADO DE Y NEGATIVO
C                               N = NUMERO TOTAL DE PONTOS  DADOS
C                               O EIXO X SERA FIXADO AUTOMATICAMENTE EM
C                                  POSICAO PROPORCIONAL A YMAXP E YMAXN

C          H.MOKARZEL -EFEI - TESE DE MESTRADO - SUB-ROTINA AUXILIAR-1972

      INTEGER*2 FILA(101),ASTER,PONTO,MENOS,ESPACO,ULTRA,INFRA
      INTEGER IX(101),IY(101)
      REAL X(101),Y(101),XMARCA(10)
      COMMON FR1(101),X,Y
      EQUIVALENCE(X,IX),(Y,IY)
      DATA ASTER/1H*/,PONTO/1H./,MENOS/1H-/,ESPACO/1H /,ULTRA/1H>/,INFRA
     1/1H</
      YMAXT = YMAXP + YMAXN
      DO 10  I=1,N
      IX(I) = (100.*X(I)/XMAX + 0.5)
   10 IY(I) = ( 80.*Y(I)/YMAXT +0.5)
      IYMAXP = (80.*YMAXP/YMAXT +0.5)
      WRITE(1,15)
   15 FORMAT(1H0,9X,'Y')
      DO 70  INT=1,82
      LIN = (IYMAXP+1)-INT
      DO 20 I=1,101
   20 FILA(I) = ESPACO
      FILA(1) = PONTO
      DO 30 I=1,N
      IF(IY(I).NE.LIN) GO TO 30
      IF(IX(I).GT.100) GO TO 26
      IF(IX(I).LT.0)   GO TO 27
      K= IX(I) + 1
      FILA(K) = ASTER
      GO TO 30
   26 FILA(101)= ULTRA
      GO TO 30
   27 FILA(1)  = INFRA
   30 CONTINUE
      ILIN = LIN/8
      RLIN = LIN/8.
      IF(ILIN.EQ.RLIN) GO TO 40
      IF(LIN.EQ.(-1)) GO TO 60
      WRITE(1,35) FILA
   35 FORMAT(10X,101A1)
      GO TO 70
   40 IF(LIN.EQ.0) GO TO 50
      VALOR = LIN*YMAXT/80.
      FILA(1) = MENOS
      WRITE(1,45) VALOR,FILA
   45 FORMAT(1X,F9.2,101A1)
      GO TO 70
   50 WRITE(1,35) FILA
      WRITE(1,55)
   55 FORMAT(1H+,8X,'0',1X,10(9('.'),'|'),1X,'X')
      GO TO 70
```

```
   60 DO 61 I=1,10
   61 XMARCA(I) = I*XMAX/10.
      WRITE(1,35) FILA
      WRITE(1,65) (XMARCA(I),I=1,10)
   65 FORMAT(1H+,16X,F5.1,9(5X,F5.1))
   70 CONTINUE
      RETURN
      END
,

HP         FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:  1526 ZELLEN OHNE COMMON


UP DDELT1 FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:    16 ZELLEN OHNE COMMON


UP DOMEG1 FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:    99 ZELLEN OHNE COMMON


UP RK4    FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   417 ZELLEN OHNE COMMON


UP PLOT20 FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   672 ZELLEN OHNE COMMON


UP PLOT30 FEHLERFREI
KERNSPEICHERBEDARF:   581 ZELLEN OHNE COMMON
```

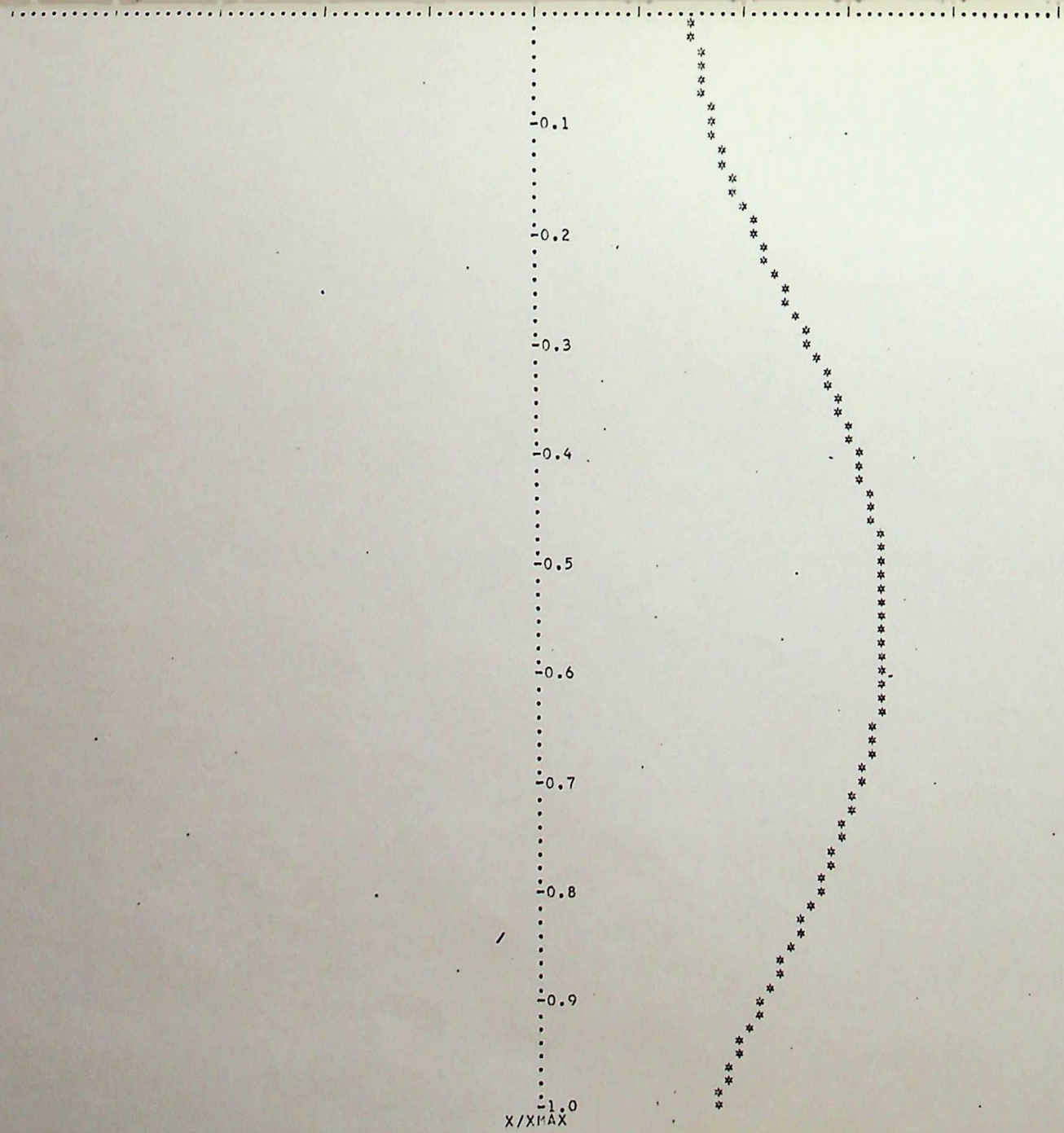
EXEMPLO 1

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

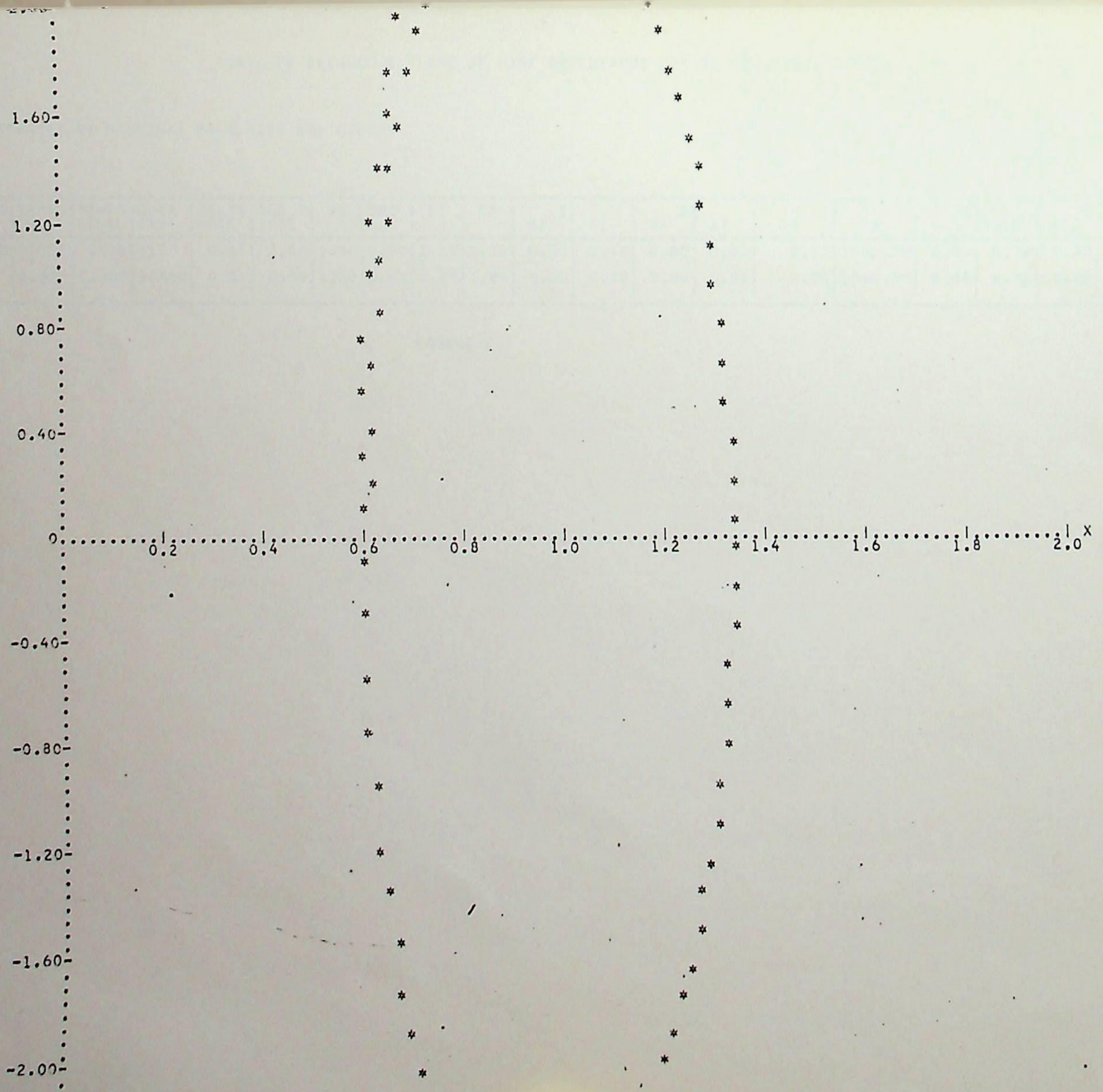
CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINALIZACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS			0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	1.000	1.000	0.61	0.00	1.00	0.40	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72

EXEMPLO 1



X	Y
0.010	0.615
0.020	0.618
0.030	0.624
0.040	0.631
0.050	0.641
0.060	0.652
0.070	0.666
0.080	0.681
0.090	0.697
0.100	0.715
0.110	0.735
0.120	0.756
0.130	0.778
0.140	0.801
0.150	0.825
0.160	0.849
0.170	0.874
0.180	0.900
0.190	0.926
0.200	0.952
0.210	0.977
0.220	1.003
0.230	1.029
0.240	1.053
0.250	1.078
0.260	1.102
0.270	1.125
0.280	1.147
0.290	1.168
0.300	1.189
0.310	1.208
0.320	1.226
0.330	1.243
0.340	1.258
0.350	1.273
0.360	1.286
0.370	1.297
0.380	1.307
0.390	1.316
0.400	1.323
0.410	1.329
0.420	1.333
0.430	1.336
0.440	1.337
0.450	1.337
0.460	1.335
0.470	1.332
0.480	1.327
0.490	1.321
0.500	1.313
0.510	1.303
0.520	1.293
0.530	1.280
0.540	1.267
0.550	1.252
0.560	1.235
0.570	1.218
0.580	1.199
0.590	1.179
0.600	1.157
0.610	1.135
0.620	1.112
0.630	1.088
0.640	1.063
0.650	1.038
0.660	1.012
0.670	0.985
0.680	0.959
0.690	0.932
0.700	0.905
0.710	0.878
0.720	0.852
0.730	0.826
0.740	0.800
0.750	0.776
0.760	0.752
0.770	0.729
0.780	0.708
0.790	0.688
0.800	0.670



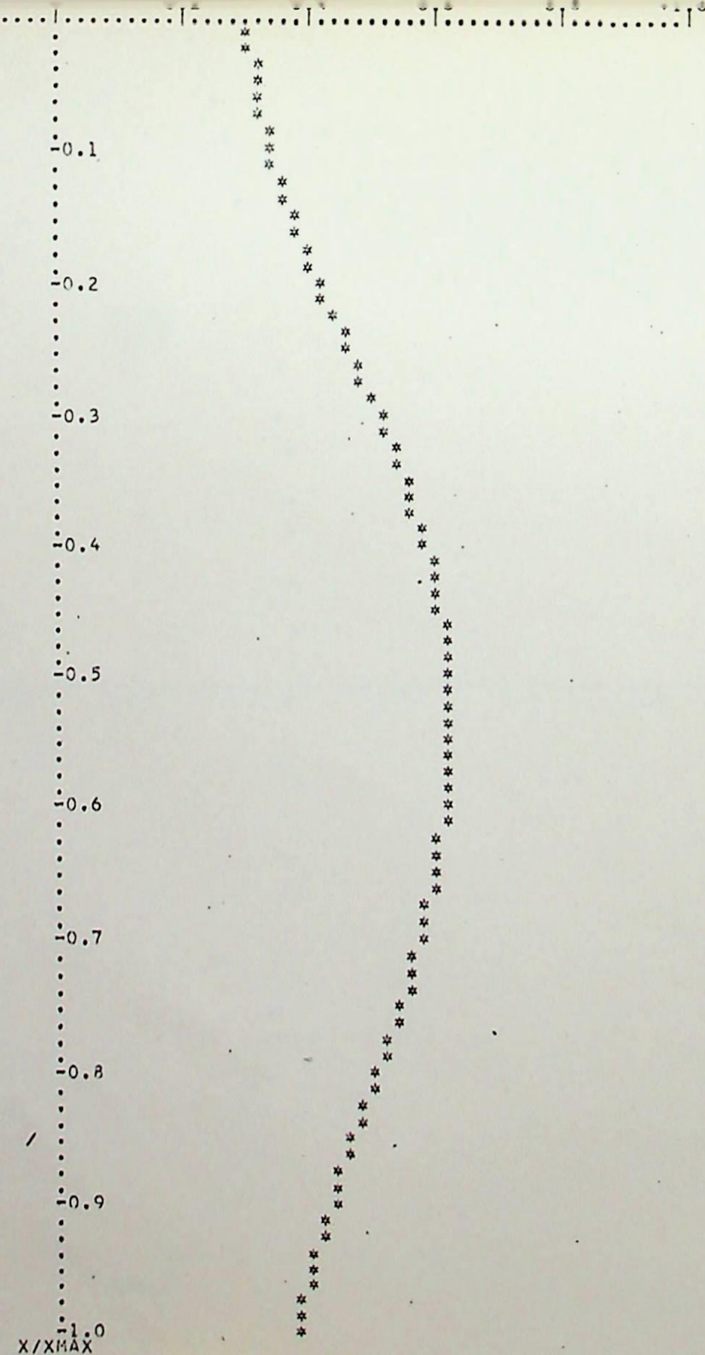
STOP 21

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

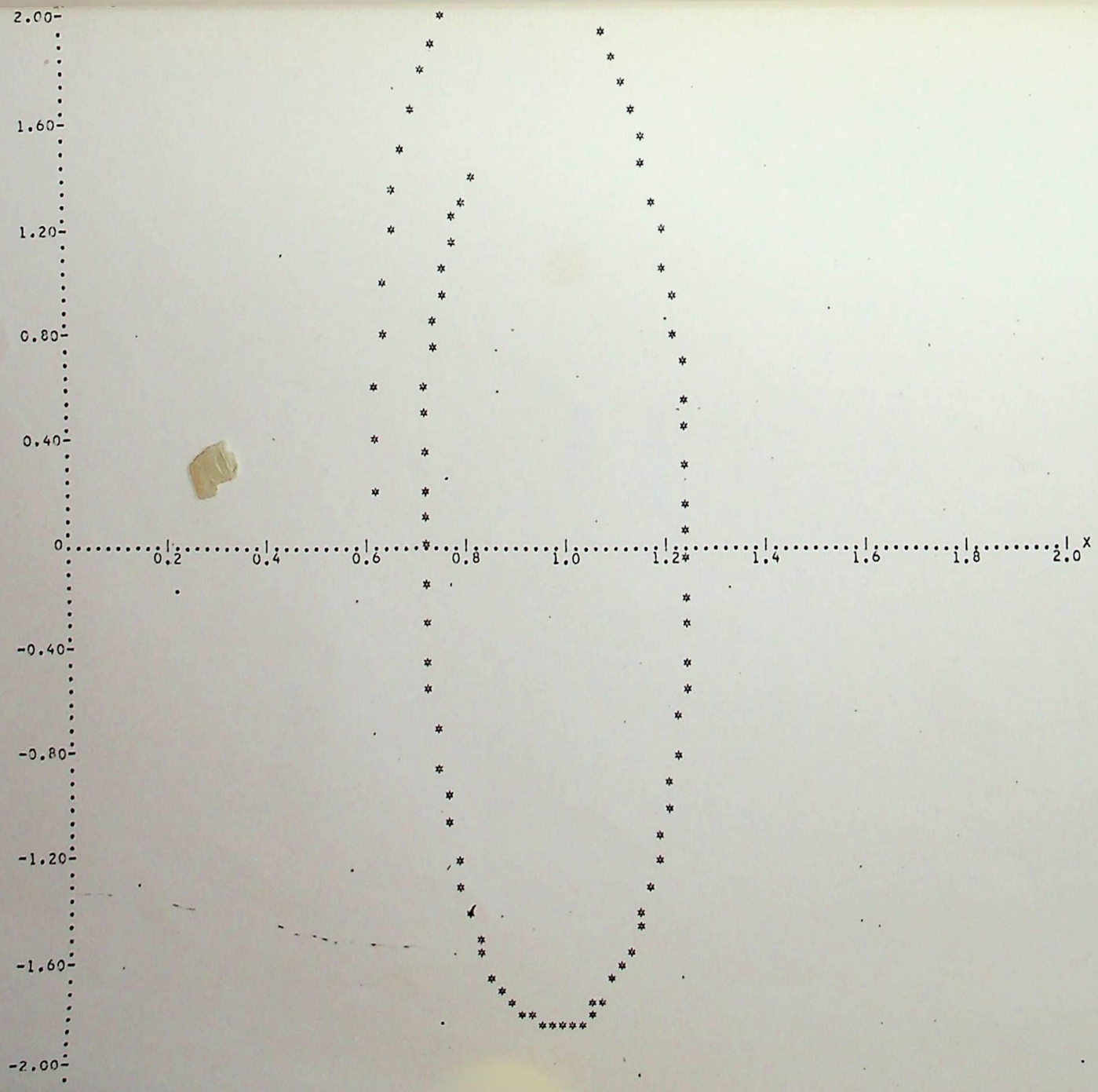
CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0200

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	1.000	1.000	0.61	0.00	1.00	0.40	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72

EXEMPLO 1



X	Y
0.010	0.615
0.020	0.618
0.030	0.624
0.040	0.631
0.050	0.640
0.060	0.651
0.070	0.664
0.080	0.679
0.090	0.695
0.100	0.712
0.110	0.730
0.120	0.750
0.130	0.771
0.140	0.792
0.150	0.814
0.160	0.837
0.170	0.860
0.180	0.883
0.190	0.907
0.200	0.930
0.210	0.953
0.220	0.976
0.230	0.998
0.240	1.020
0.250	1.042
0.260	1.062
0.270	1.082
0.280	1.101
0.290	1.119
0.300	1.136
0.310	1.152
0.320	1.167
0.330	1.181
0.340	1.193
0.350	1.204
0.360	1.214
0.370	1.223
0.380	1.230
0.390	1.236
0.400	1.241
0.410	1.245
0.420	1.247
0.430	1.248
0.440	1.247
0.450	1.245
0.460	1.242
0.470	1.238
0.480	1.233
0.490	1.226
0.500	1.218
0.510	1.209
0.520	1.199
0.530	1.188
0.540	1.176
0.550	1.163
0.560	1.149
0.570	1.134
0.580	1.118
0.590	1.102
0.600	1.085
0.610	1.067
0.620	1.049
0.630	1.031
0.640	1.012
0.650	0.993
0.660	0.974
0.670	0.955
0.680	0.936
0.690	0.917
0.700	0.899
0.710	0.881
0.720	0.863
0.730	0.846
0.740	0.830
0.750	0.814
0.760	0.799
0.770	0.785
0.780	0.773
0.790	0.761
0.800	0.750


2.00
1.60
1.20
0.80
0.40
0
-0.40
-0.80
-1.20
-1.60
-2.00
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
X
Y
STOP 2!

EXEMPLO 2

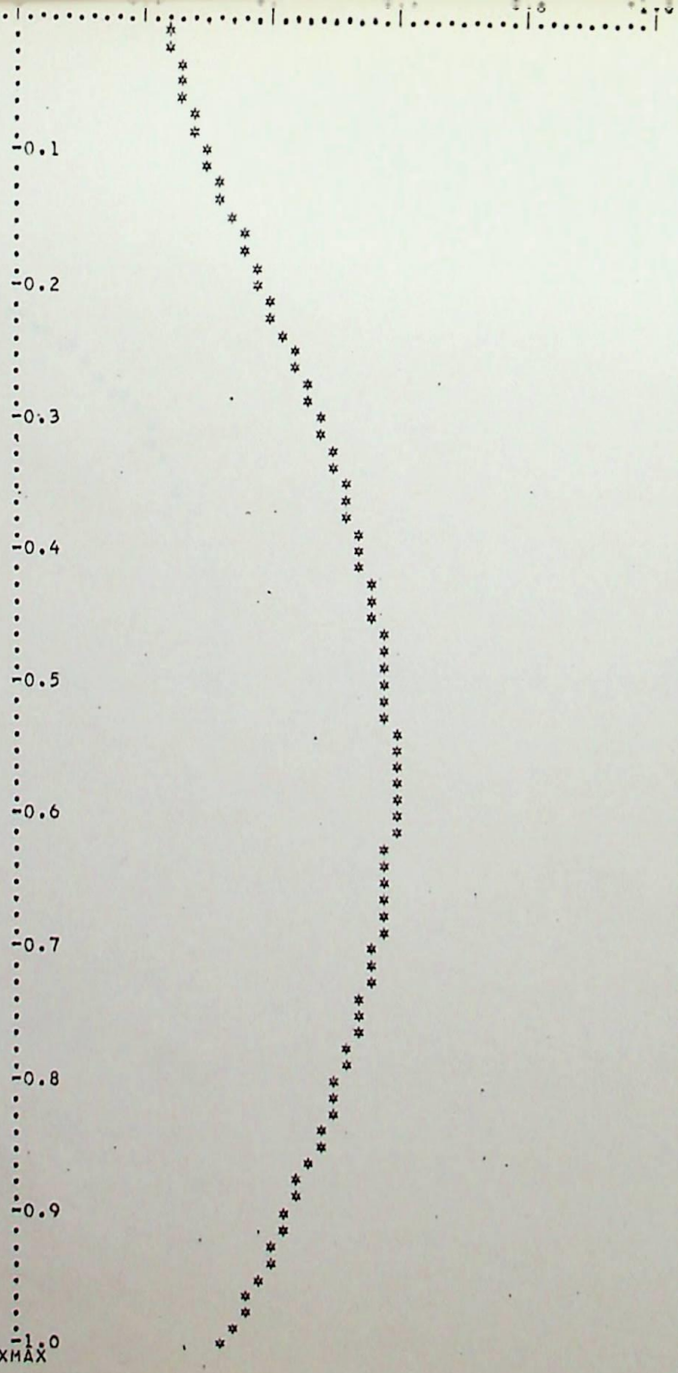
PARTE A

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

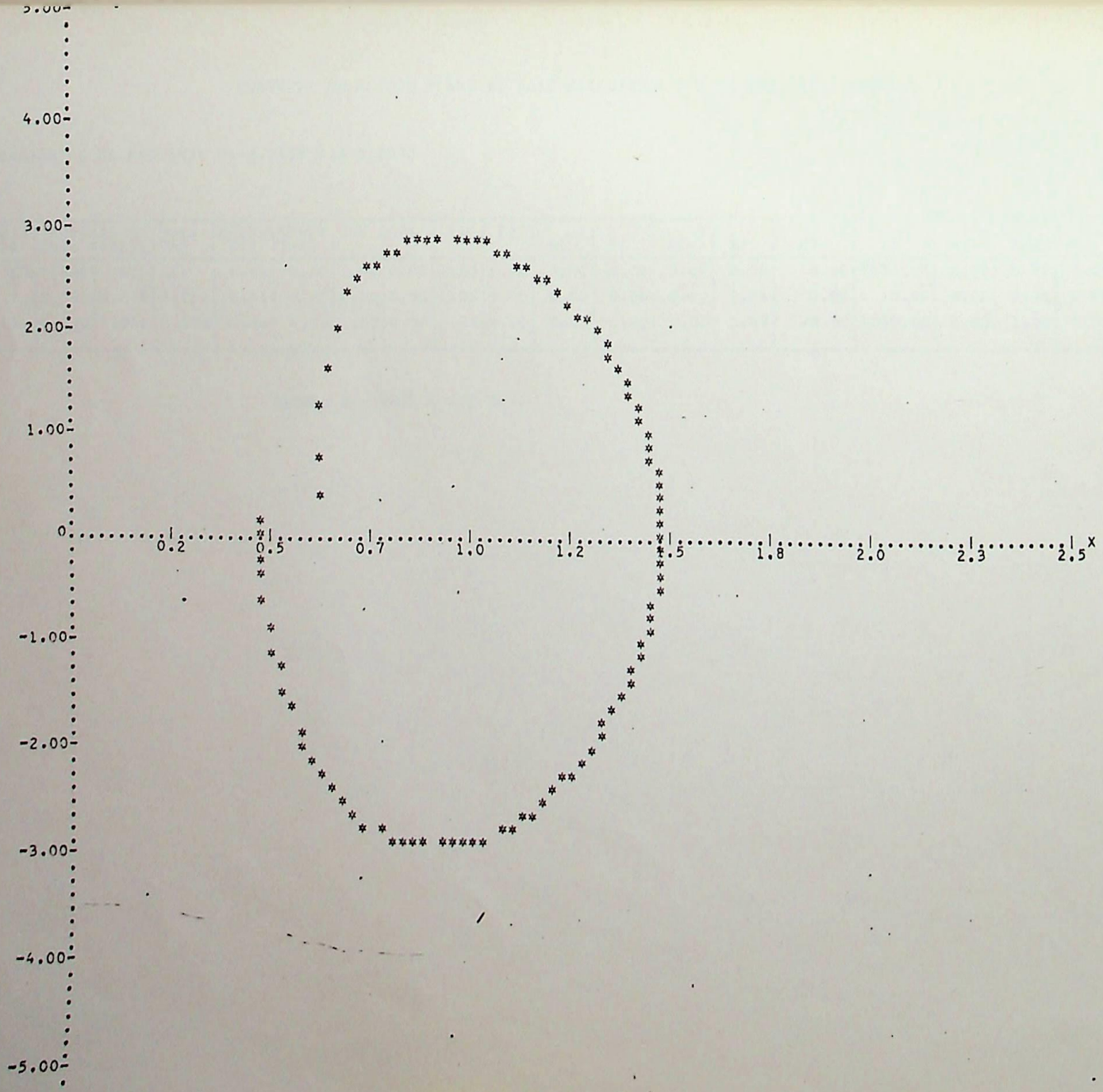
CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	0.060	0.060	0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.36	0.00	0.36	0.00	0.06	0.00	0.41	0.00	2.99
2	0.060	1.000	0.940	0.69	2.39	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	1.00	0.00	1.00

EXEMPLO 2 - PARTE A - TA = 0,06



X	Y
0.010	0.616
0.020	0.623
0.030	0.633
0.040	0.647
0.050	0.666
0.060	0.688
0.070	0.713
0.080	0.738
0.090	0.765
0.100	0.792
0.110	0.820
0.120	0.846
0.130	0.877
0.140	0.906
0.150	0.935
0.160	0.964
0.170	0.993
0.180	1.022
0.190	1.050
0.200	1.078
0.210	1.106
0.220	1.133
0.230	1.160
0.240	1.185
0.250	1.210
0.260	1.234
0.270	1.257
0.280	1.279
0.290	1.301
0.300	1.321
0.310	1.340
0.320	1.358
0.330	1.374
0.340	1.390
0.350	1.405
0.360	1.418
0.370	1.430
0.380	1.441
0.390	1.450
0.400	1.458
0.410	1.465
0.420	1.471
0.430	1.476
0.440	1.479
0.450	1.481
0.460	1.481
0.470	1.481
0.480	1.479
0.490	1.475
0.500	1.471
0.510	1.465
0.520	1.458
0.530	1.449
0.540	1.440
0.550	1.428
0.560	1.416
0.570	1.403
0.580	1.388
0.590	1.372
0.600	1.355
0.610	1.336
0.620	1.317
0.630	1.296
0.640	1.274
0.650	1.251
0.660	1.227
0.670	1.202
0.680	1.176
0.690	1.150
0.700	1.122
0.710	1.094
0.720	1.065
0.730	1.036
0.740	1.006
0.750	0.976
0.760	0.945
0.770	0.915
0.780	0.884
0.790	0.854
0.800	0.824

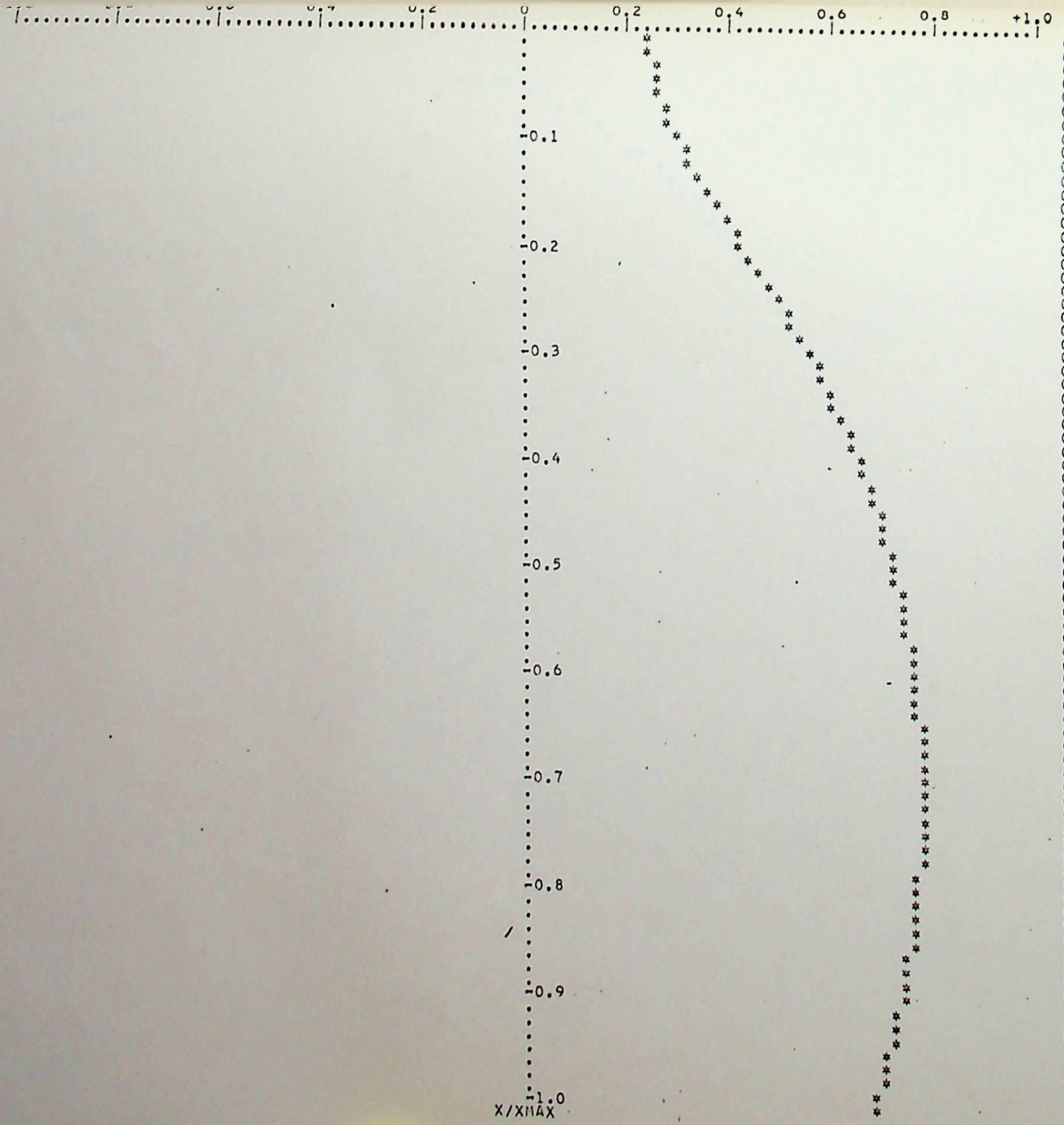

4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
-5.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

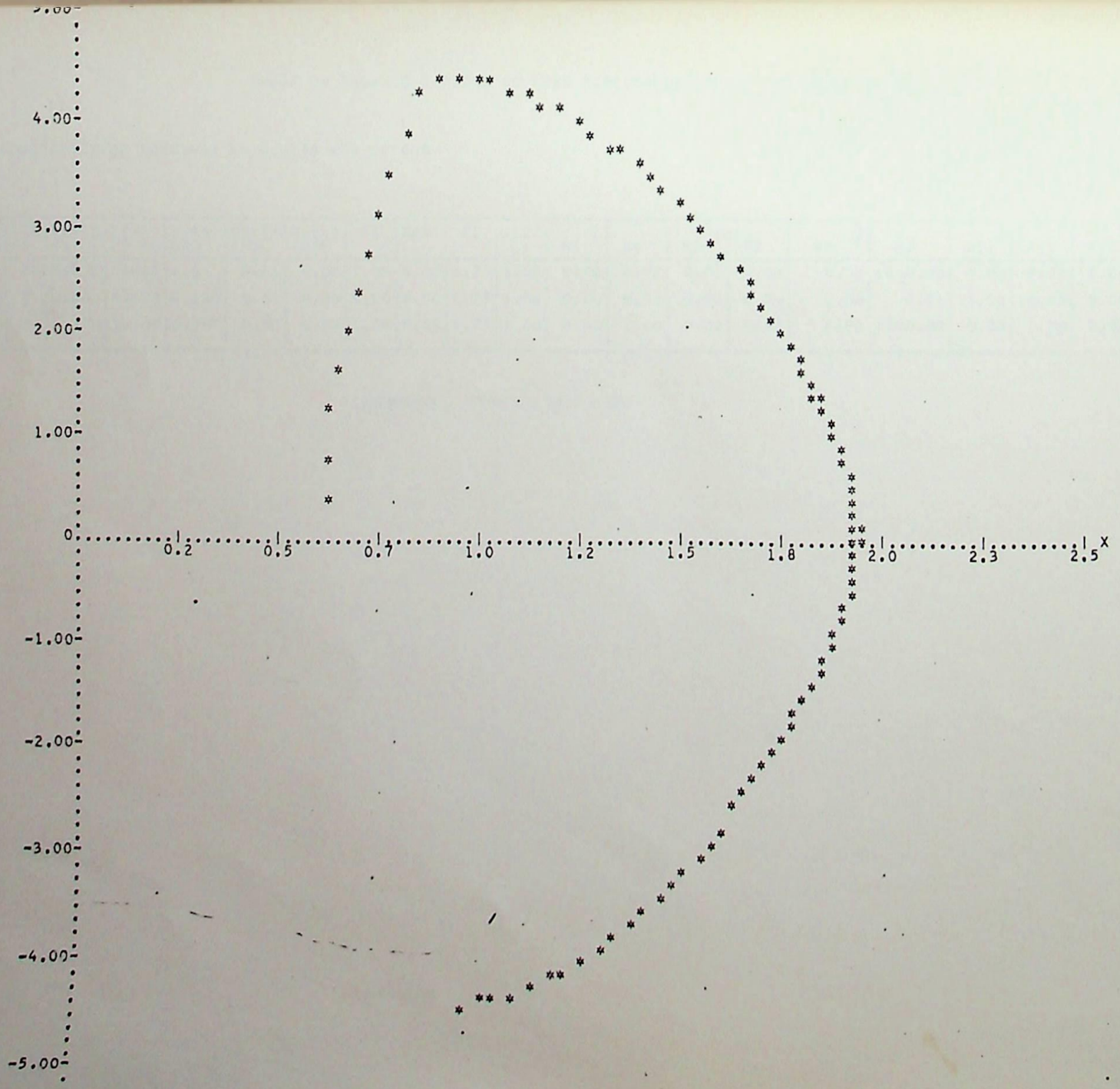
CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	0.110	0.110	0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.36	0.00	0.36	0.00	0.06	0.00	0.41	0.00	2.99
2	0.110	1.000	0.890	0.86	4.30	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	1.00	0.00	1.00

EXEMPLO 2 - PARTE A - TA= 0.11



X	Y
0.010	0.616
0.020	0.623
0.030	0.633
0.040	0.647
0.050	0.666
0.060	0.688
0.070	0.714
0.080	0.745
0.090	0.779
0.100	0.816
0.110	0.856
0.120	0.901
0.130	0.944
0.140	0.988
0.150	1.031
0.160	1.074
0.170	1.116
0.180	1.158
0.190	1.199
0.200	1.239
0.210	1.279
0.220	1.317
0.230	1.355
0.240	1.391
0.250	1.426
0.260	1.460
0.270	1.493
0.280	1.525
0.290	1.555
0.300	1.584
0.310	1.612
0.320	1.638
0.330	1.663
0.340	1.687
0.350	1.710
0.360	1.731
0.370	1.752
0.380	1.771
0.390	1.789
0.400	1.806
0.410	1.821
0.420	1.836
0.430	1.850
0.440	1.862
0.450	1.874
0.460	1.884
0.470	1.894
0.480	1.902
0.490	1.910
0.500	1.917
0.510	1.922
0.520	1.927
0.530	1.931
0.540	1.934
0.550	1.936
0.560	1.938
0.570	1.938
0.580	1.938
0.590	1.936
0.600	1.934
0.610	1.931
0.620	1.927
0.630	1.922
0.640	1.916
0.650	1.909
0.660	1.902
0.670	1.893
0.680	1.883
0.690	1.872
0.700	1.861
0.710	1.848
0.720	1.834
0.730	1.819
0.740	1.803
0.750	1.785
0.760	1.767
0.770	1.747
0.780	1.726
0.790	1.704
0.800	1.680


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
-5.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

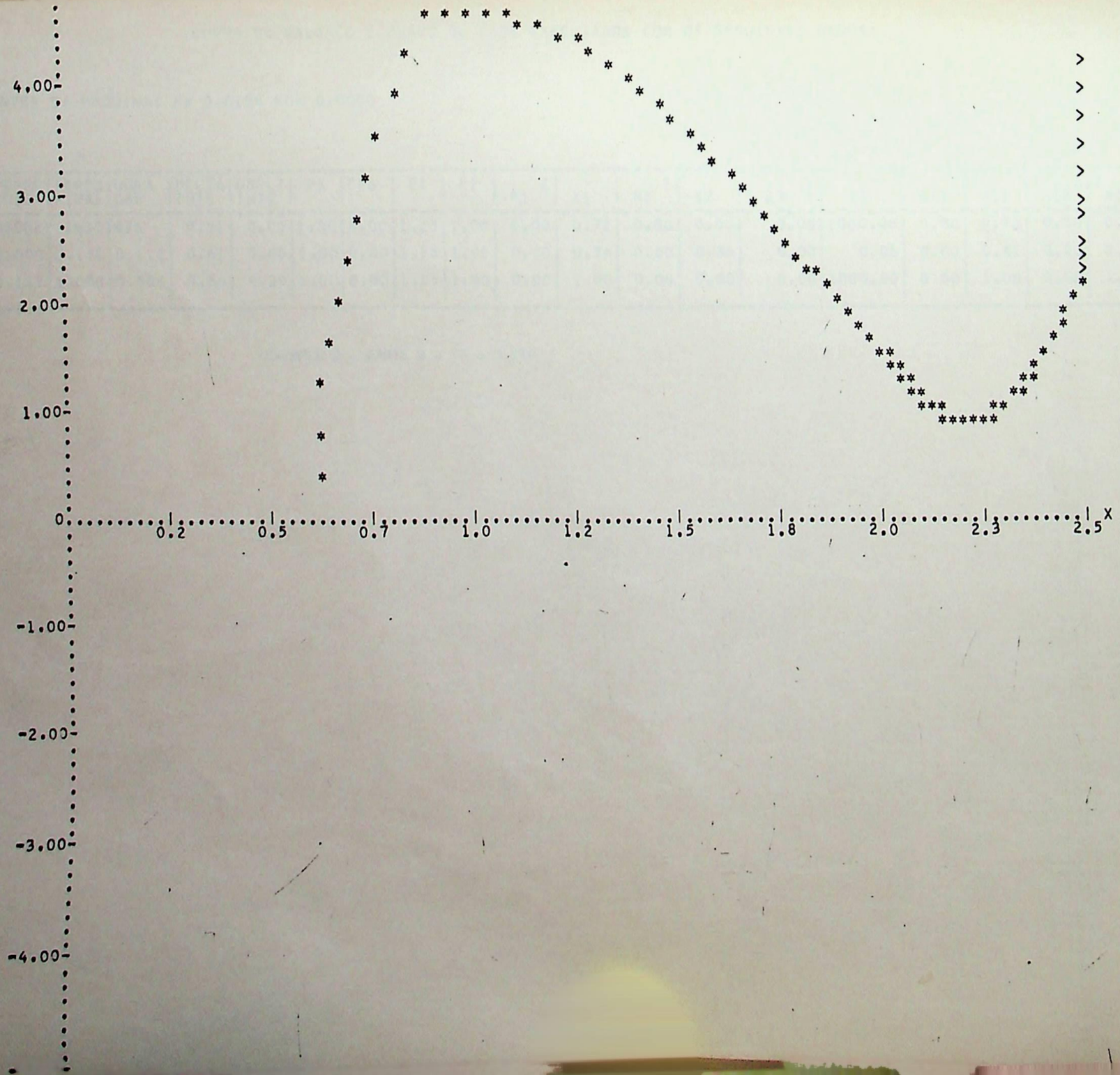
ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	0.120	0.120	0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.36	0.00	0.36	0.00	0.06	0.00	0.41	0.00	2.99
2	0.120	1.000	0.880	0.90	4.67	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	1.00	0.00	1.00

EXEMPLO 2 - PARTE A = TA = 0.12

0.010 0.616
0.020 0.623
0.030 0.633
0.040 0.647
0.050 0.666
0.060 0.688
0.070 0.714
0.080 0.745
0.090 0.779
0.100 0.816
0.110 0.858
0.120 0.903
0.130 0.950
0.140 0.996
0.150 1.043
0.160 1.089
0.170 1.135
0.180 1.180
0.190 1.224
0.200 1.267
0.210 1.310
0.220 1.351
0.230 1.392
0.240 1.431
0.250 1.469
0.260 1.506
0.270 1.542
0.280 1.576
0.290 1.609
0.300 1.641
0.310 1.671
0.320 1.701
0.330 1.729
0.340 1.756
0.350 1.781
0.360 1.806
0.370 1.830
0.380 1.852
0.390 1.874
0.400 1.894
0.410 1.914
0.420 1.932
0.430 1.950
0.440 1.967
0.450 1.983
0.460 1.998
0.470 2.013
0.480 2.027
0.490 2.041
0.500 2.053
0.510 2.066
0.520 2.078
0.530 2.089
0.540 2.100
0.550 2.110
0.560 2.120
0.570 2.130
0.580 2.140
0.590 2.149
0.600 2.158
0.610 2.167
0.620 2.175
0.630 2.184
0.640 2.192
0.650 2.201
0.660 2.209
0.670 2.217
0.680 2.225
0.690 2.234
0.700 2.242
0.710 2.251
0.720 2.260
0.730 2.269
0.740 2.278
0.750 2.287
0.760 2.297
0.770 2.3
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9

EXEMPLO 2

PARTE B


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

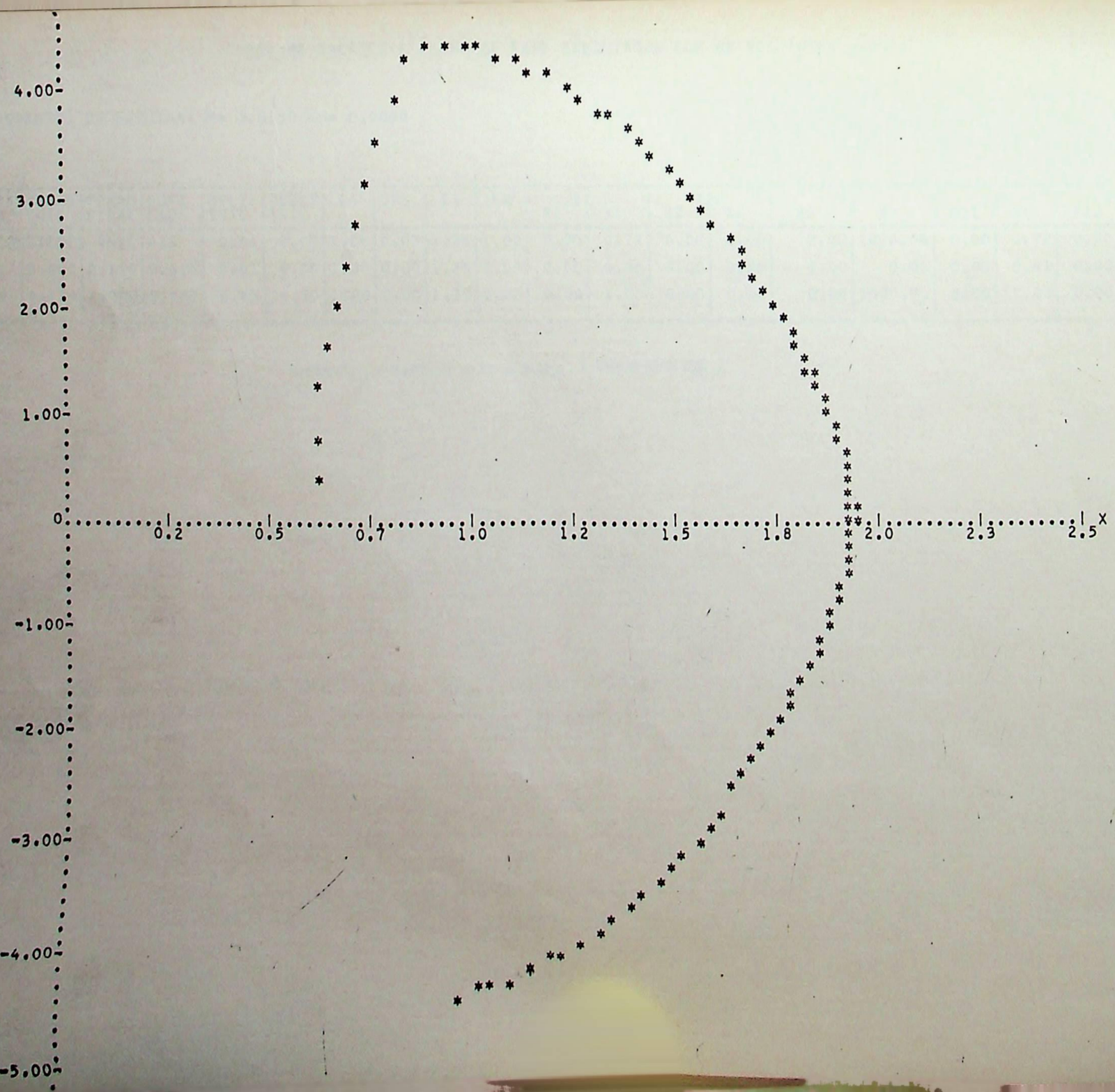
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	0.112	0.112	0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.36	0.00	0.36	0.00	0.06	0.00	0.41	0.00	2.99
2	0.112	1.000	0.888	0.86	4.30	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	1.00	0.00	1.00

EXEMPLO 2 - PARTE B - TA = 0.112

0.020 0.623
0.030 0.633
0.040 0.647
0.050 0.666
0.060 0.688
0.070 0.714
0.080 0.745
0.090 0.779
0.100 0.816
0.110 0.858
0.120 0.901
0.130 0.944
0.140 0.988
0.150 1.031
0.160 1.074
0.170 1.116
0.180 1.158
0.190 1.199
0.200 1.239
0.210 1.279
0.220 1.317
0.230 1.355
0.240 1.391
0.250 1.426
0.260 1.460
0.270 1.493
0.280 1.525
0.290 1.555
0.300 1.584
0.310 1.612
0.320 1.638
0.330 1.663
0.340 1.687
0.350 1.710
0.360 1.731
0.370 1.752
0.380 1.771
0.390 1.789
0.400 1.806
0.410 1.821
0.420 1.836
0.430 1.850
0.440 1.862
0.450 1.874
0.460 1.884
0.470 1.894
0.480 1.902
0.490 1.910
0.500 1.917
0.510 1.922
0.520 1.927
0.530 1.931
0.540 1.934
0.550 1.936
0.560 1.938
0.570 1.938
0.580 1.936
0.590 1.936
0.600 1.934
0.610 1.931
0.620 1.927
0.630 1.922
0.640 1.916
0.650 1.909
0.660 1.902
0.670 1.893
0.680 1.883
0.690 1.872
0.700 1.861
0.710 1.848
0.720 1.834
0.730 1.819
0.740 1.803
0.750 1.785
0.760 1.767
0.770 1.747
0.780 1.726
0.790 1.704
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9
-1.0


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
-5.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

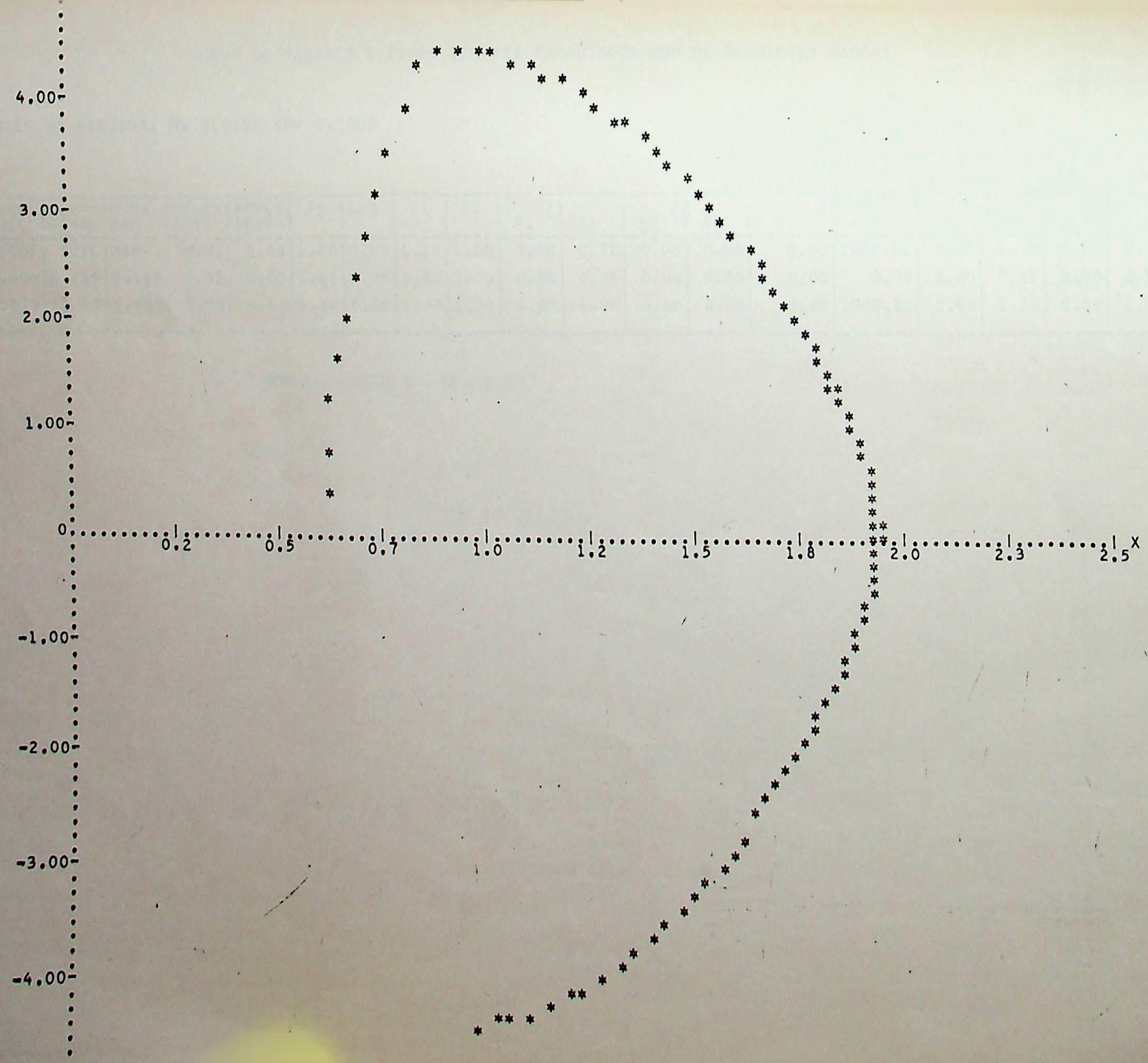
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	0.114	0.114	0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.36	0.00	0.36	0.00	0.06	0.00	0.41	0.00	2.99
2	0.114	1.000	0.886	0.86	4.30	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	1.00	0.00	1.00

EXEMPLO 2 - PARTE B - TA = 0.114 (TEMPO CRITICO)

0.623
0.633
0.647
0.666
0.688
0.714
0.745
0.779
0.816
0.858
0.901
0.944
0.988
1.031
1.074
1.116
1.156
1.199
1.239
1.279
1.317
1.355
1.391
1.426
1.460
1.493
1.525
1.555
1.584
1.612
1.638
1.663
1.687
1.710
1.731
1.752
1.771
1.789
1.806
1.821
1.836
1.850
1.862
1.874
1.884
1.894
1.902
1.910
1.917
1.922
1.927
1.931
1.934
1.936
1.938
1.938
1.936
1.934
1.931
1.927
1.922
1.916
1.909
1.902
1.893
1.883
1.872
1.861
1.848
1.834
1.819
1.803
1.785
1.765
0.020
0.030
0.040
0.050
0.060
0.070
0.080
0.090
0.100
0.110
0.120
0.130
0.140
0.150
0.160
0.170
0.180
0.190
0.200
0.210
0.220
0.230
0.240
0.250
0.260
0.270
0.280
0.290
0.300
0.310
0.320
0.330
0.340
0.350
0.360
0.370
0.380
0.390
0.400
0.410
0.420
0.430
0.440
0.450
0.460
0.470
0.480
0.490
0.500
0.510
0.520
0.530
0.540
0.550
0.560
0.570
0.580
0.590
0.600
0.610
0.620
0.630
0.640
0.650
0.660
0.670
0.680
0.690
0.700
0.710
0.720
0.730
0.740
0.750
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

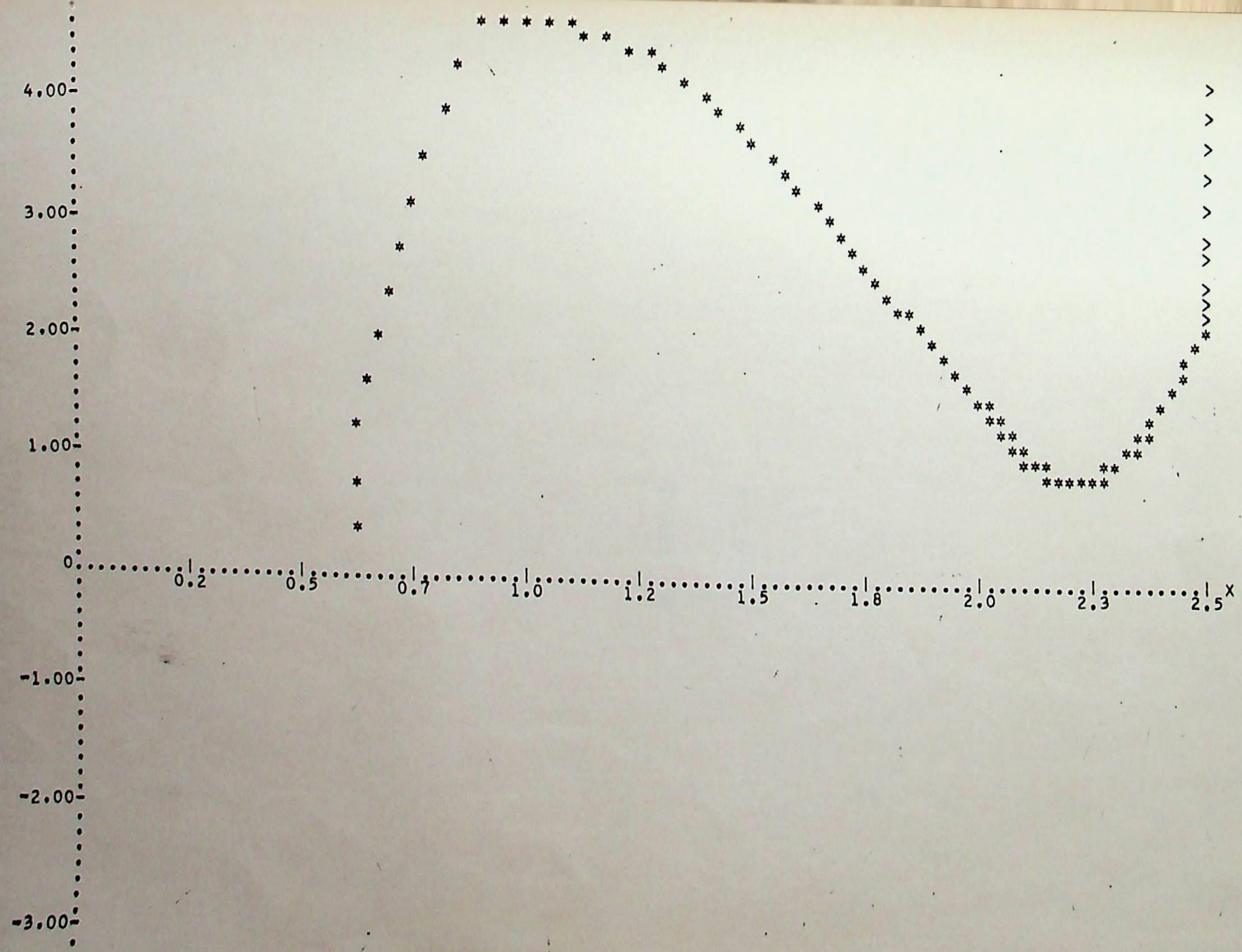
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.72	0.00	0.72
1	0.000	0.115	0.115	0.61	0.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	0.36	0.00	0.36	0.00	0.06	0.00	0.41	0.00	2.99
2	0.115	1.000	0.885	0.90	4.67	1.00	0.00	1.25	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	1.00	0.00	1.00

EXEMPLO 2 - PARTE B - TA = 0.115

0.020
0.030
0.040
0.050
0.060
0.070
0.080
0.090
0.100
0.110
0.120
0.130
0.140
0.150
0.160
0.170
0.180
0.190
0.200
0.210
0.220
0.230
0.240
0.250
0.260
0.270
0.280
0.290
0.300
0.310
0.320
0.330
0.340
0.350
0.360
0.370
0.380
0.390
0.400
0.410
0.420
0.430
0.440
0.450
0.460
0.470
0.480
0.490
0.500
0.510
0.520
0.530
0.540
0.550
0.560
0.570
0.580
0.590
0.600
0.610
0.620
0.630
0.640
0.650
0.660
0.670
0.680
0.690
0.700
0.710
0.720
0.730
0.623
0.632
0.647
0.666
0.688
0.714
0.745
0.779
0.816
0.858
0.903
0.950
0.996
1.043
1.089
1.135
1.180
1.224
1.267
1.310
1.351
1.392
1.431
1.469
1.506
1.542
1.576
1.609
1.641
1.671
1.701
1.729
1.756
1.781
1.806
1.830
1.852
1.874
1.894
1.914
1.932
1.950
1.967
1.983
1.998
2.013
2.027
2.041
2.053
2.066
2.078
2.089
2.100
2.110
2.120
2.130
2.140
2.149
2.158
2.167
2.175
2.184
2.192
2.201
2.209
2.217
2.225
2.234
2.242
2.251
2.260
2.269
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

EXEMPLO 3

PARTE A

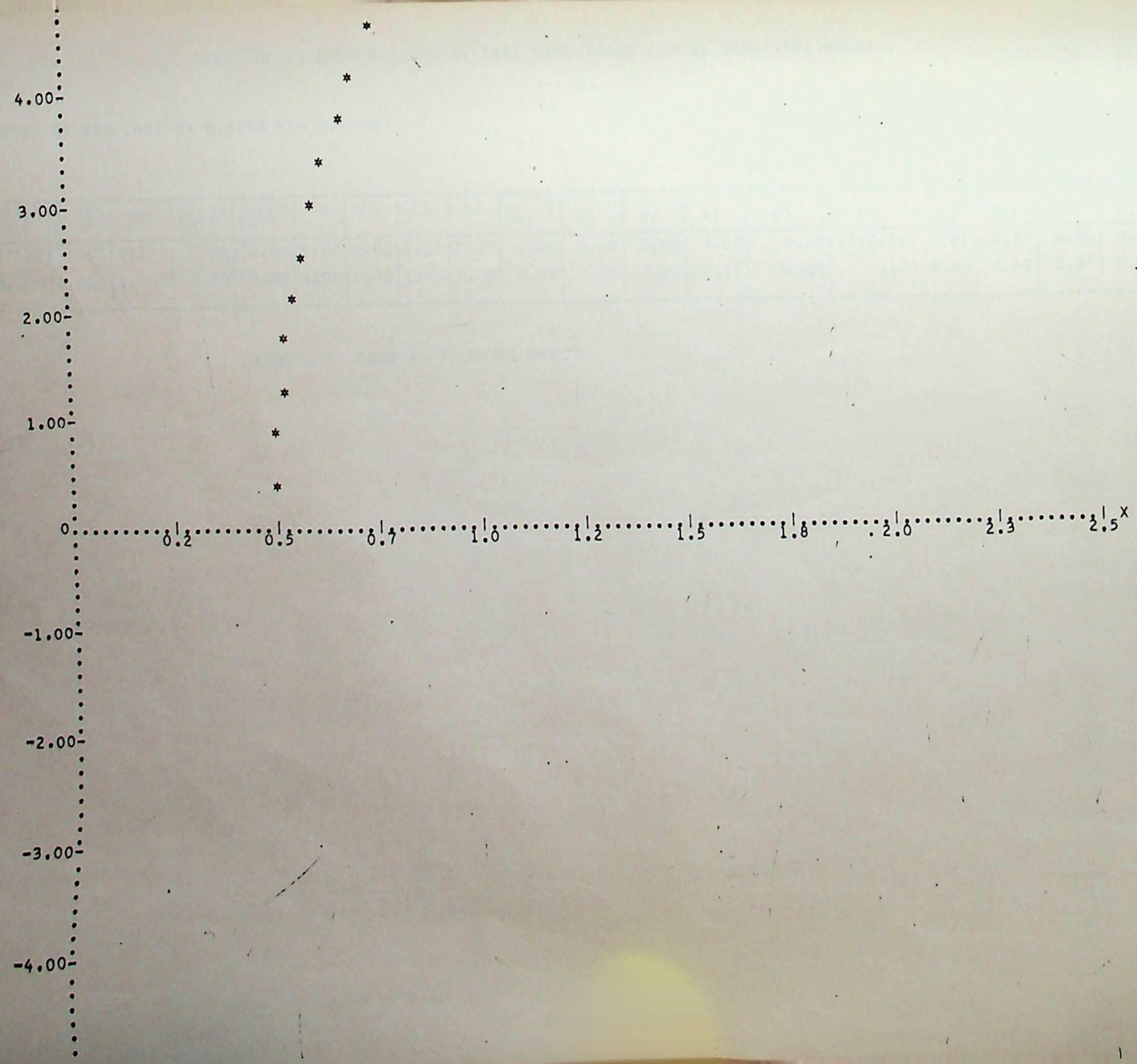
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	1.000	1.000	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.02	0.00	0.37	0.00	2.60

EXEMPLO 3 - PARTE A - FALTA TRIFÀSICA MANTIDA

```
0.506
0.517
0.532
0.552
0.575
0.603
0.635
0.671
0.711
0.755
0.803
0.855
0.911
0.970
1.033
1.099
1.169
1.242
1.319
1.399
1.482
1.569
1.659
1.752
1.849
1.949
2.052
2.159
2.270
2.384
2.503
2.626
2.753
2.885
3.022
3.164
3.311
3.465
3.625
3.791
3.964
4.144
4.332
4.527
4.730
4.941
5.159
5.385
5.618
5.858
6.105
6.358
6.616
6.879
7.147
7.419
7.695
7.974
8.257
8.544
8.835
9.131
9.432
9.735
10.051
10.371
10.699
11.034
11.378
11.729
12.087
12.453
12.825
13.201
13.583
13.969
14.358
14.752
```

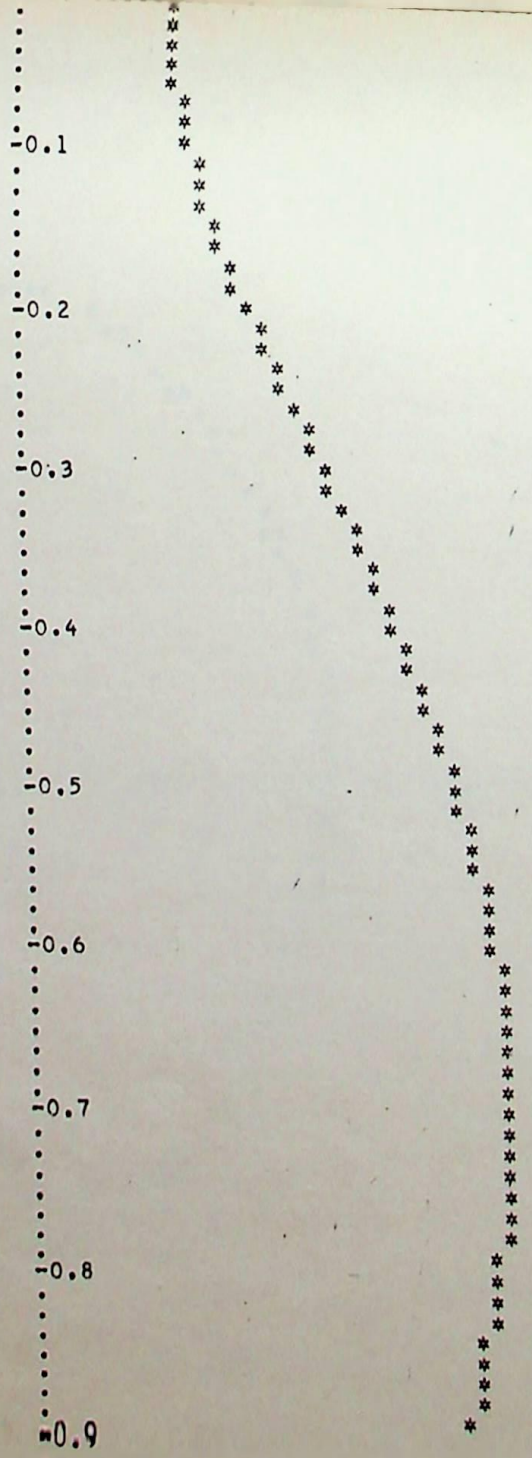

4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

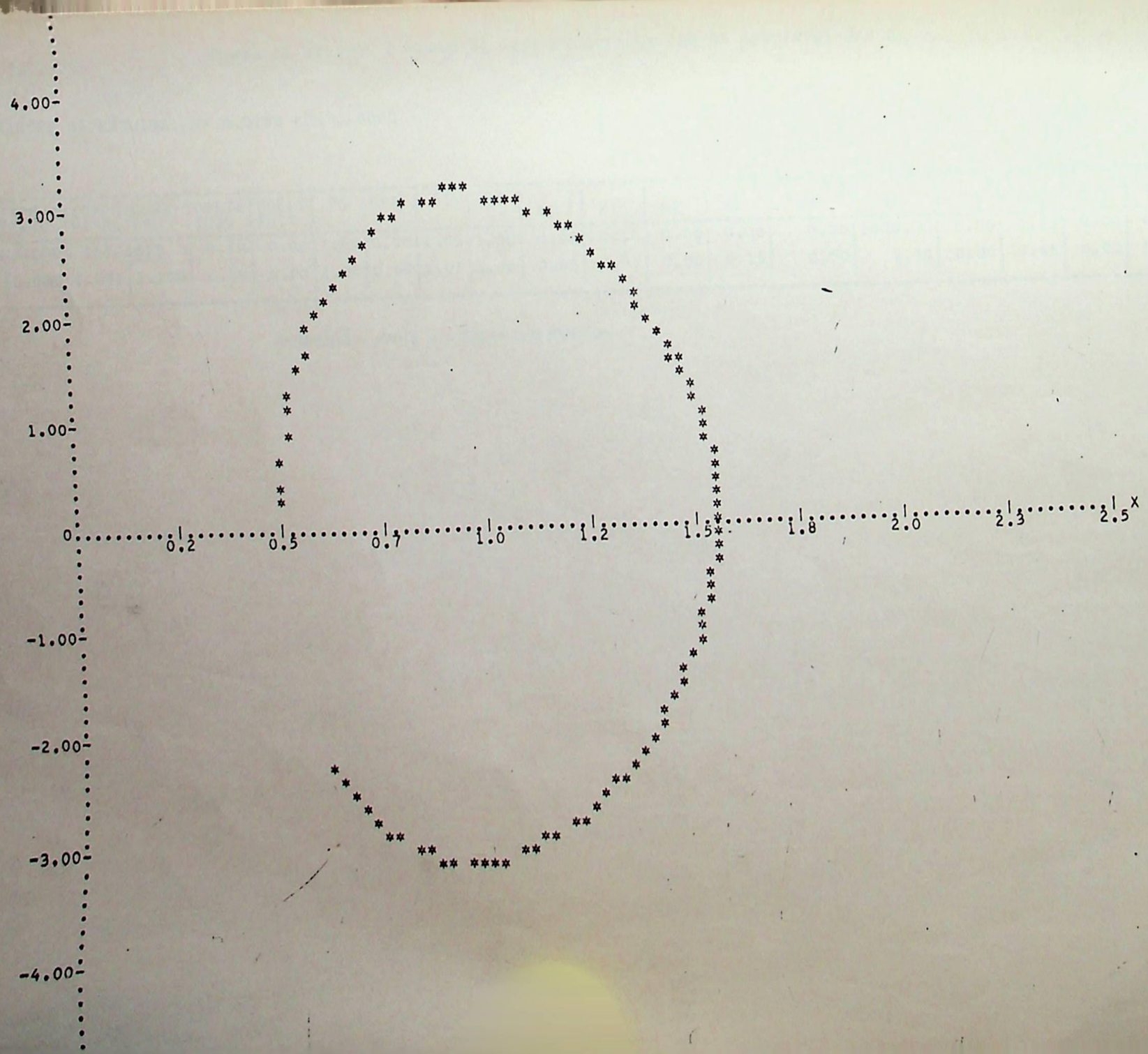
CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	1.000	1.000	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.15	0.00	0.42	0.00	0.85

EXEMPLO 3 - PARTE A - FALTA L-L MANTIDA



0.020	0.501
0.030	0.507
0.040	0.514
0.050	0.524
0.060	0.536
0.070	0.550
0.080	0.566
0.090	0.583
0.100	0.602
0.110	0.623
0.120	0.646
0.130	0.669
0.140	0.694
0.150	0.721
0.160	0.748
0.170	0.776
0.180	0.805
0.190	0.834
0.200	0.864
0.210	0.895
0.220	0.925
0.230	0.956
0.240	0.987
0.250	1.017
0.260	1.048
0.270	1.078
0.280	1.107
0.290	1.136
0.300	1.165
0.310	1.193
0.320	1.220
0.330	1.246
0.340	1.272
0.350	1.296
0.360	1.320
0.370	1.343
0.380	1.364
0.390	1.385
0.400	1.404
0.410	1.423
0.420	1.440
0.430	1.456
0.440	1.471
0.450	1.484
0.460	1.497
0.470	1.508
0.480	1.518
0.490	1.527
0.500	1.535
0.510	1.541
0.520	1.546
0.530	1.550
0.540	1.553
0.550	1.554
0.560	1.555
0.570	1.554
0.580	1.551
0.590	1.548
0.600	1.543
0.610	1.537
0.620	1.530
0.630	1.521
0.640	1.512
0.650	1.501
0.660	1.488
0.670	1.475
0.680	1.460
0.690	1.444
0.700	1.427
0.710	1.409


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

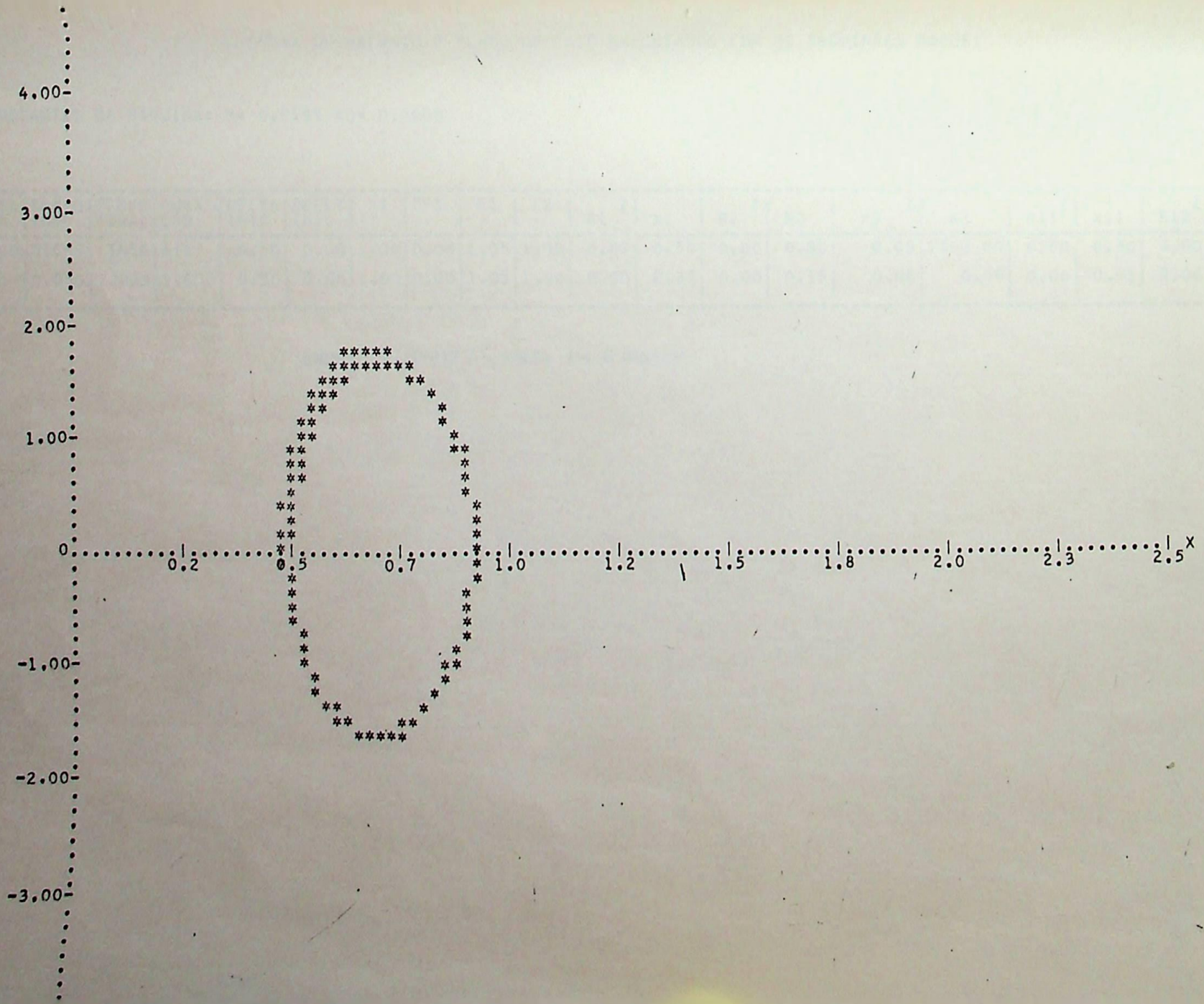
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

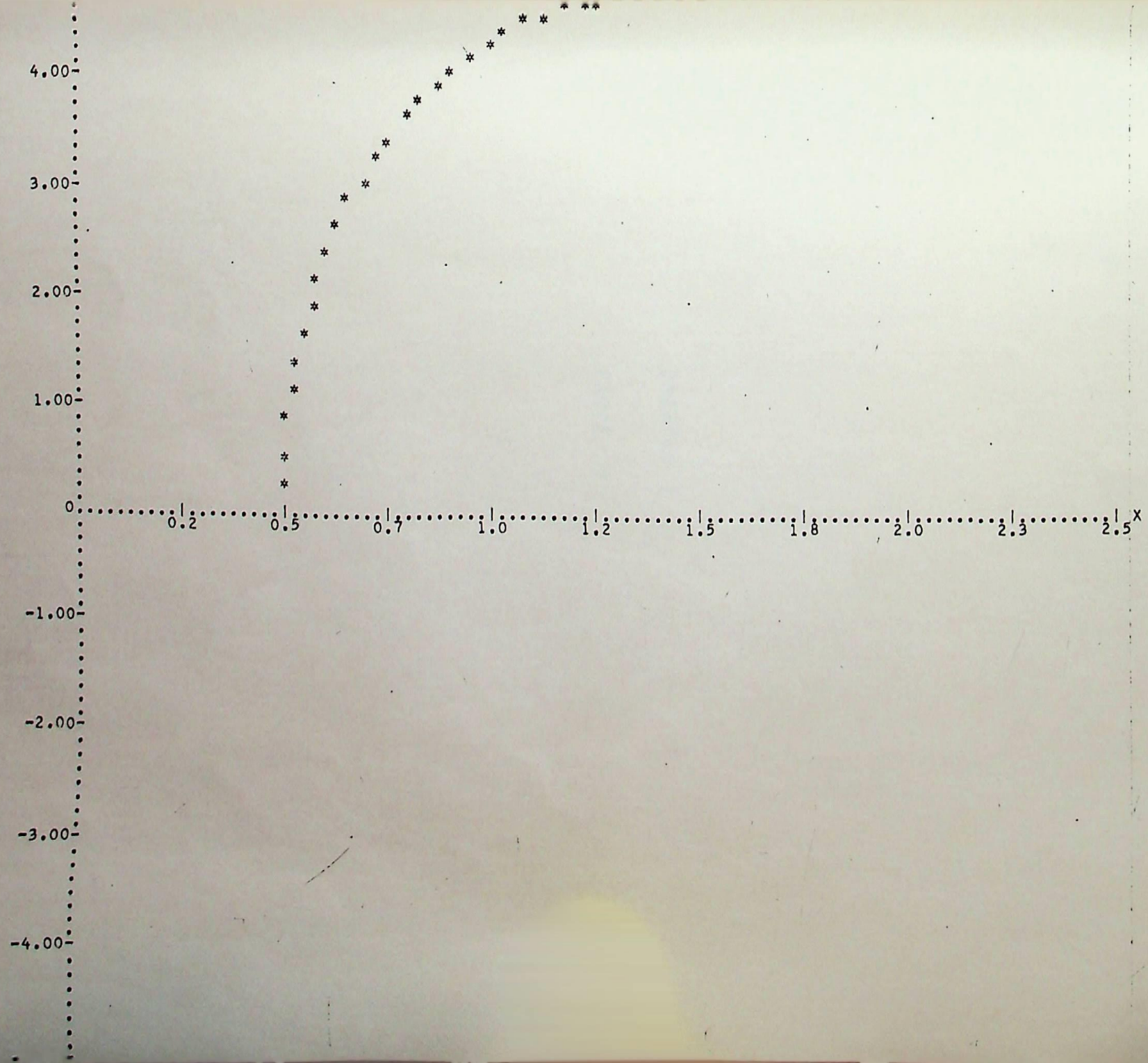
ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	1.000	1.000	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.30	0.00	0.45	0.00	0.67

EXEMPLO 3 - PARTE A - FALTA L-G MANTIDA

```
 0.020  0.499
 0.030  0.503
 0.040  0.508
 0.050  0.514
 0.060  0.521
 0.070  0.530
 0.080  0.540
 0.090  0.550
 0.100  0.562
 0.110  0.575
 0.120  0.589
 0.130  0.603
 0.140  0.618
 0.150  0.633
 0.160  0.649
 0.170  0.666
 0.180  0.682
 0.190  0.699
 0.200  0.716
 0.210  0.732
 0.220  0.749
 0.230  0.765
 0.240  0.781
 0.250  0.796
 0.260  0.811
 0.270  0.825
 0.280  0.838
 0.290  0.851
 0.300  0.862
 0.310  0.873
 0.320  0.883
 0.330  0.891
 0.340  0.899
 0.350  0.905
 0.360  0.911
 0.370  0.915
 0.380  0.918
 0.390  0.919
 0.400  0.920
 0.410  0.919
 0.420  0.917
 0.430  0.913
 0.440  0.909
 0.450  0.903
 0.460  0.896
 0.470  0.888
 0.480  0.879
 0.490  0.869
 0.500  0.857
 0.510  0.845
 0.520  0.832
 0.530  0.818
 0.540  0.803
 0.550  0.788
 0.560  0.772
 0.570  0.756
 0.580  0.739
 0.590  0.722
 0.600  0.705
 0.610  0.688
 0.620  0.670
 0.630  0.653
 0.640  0.637
 0.650  0.620
 0.660  0.604
 0.670  0.589
 0.680  0.574
 0.690  0.560
 0.700  0.547
 0.710  0.535
 0.720  0.524
 0.730  0.514
 0.740  0.506
```


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

EXEMPLO 3

PARTE B

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDIGOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	0.300	0.300	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.09	0.00	0.41	0.00	1.06
2	0.300	1.000	0.700	1.45	4.78	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.60	0.00	0.60

EXEMPLO 3 - PARTE B - FALTA L-L-G ELIMINADA EM 0.30 [s]

0.020 0.510
0.030 0.520
0.040 0.532
0.050 0.548
0.060 0.566
0.070 0.586
0.080 0.609
0.090 0.634
0.100 0.662
0.110 0.691
0.120 0.723
0.130 0.757
0.140 0.792
0.150 0.829
0.160 0.867
0.170 0.907
0.180 0.948
0.190 0.990
0.200 1.033
0.210 1.077
0.220 1.122
0.230 1.167
0.240 1.213
0.250 1.260
0.260 1.307
0.270 1.354
0.280 1.401
0.290 1.449
0.300 1.495
0.310 1.536
0.320 1.574
0.330 1.608
0.340 1.636
0.350 1.664
0.360 1.686
0.370 1.705
0.380 1.719
0.390 1.730
0.400 1.737
0.410 1.740
0.420 1.739
0.430 1.734
0.440 1.729
0.450 1.723
0.460 1.713
0.470 1.697
0.480 1.677
0.490 1.653
0.500 1.625
0.510 1.593
0.520 1.557
0.530 1.517
0.540 1.473
0.550 1.424
0.560 1.372
0.570 1.317
0.580 1.257
0.590 1.194
0.600 1.127
0.610 1.057
0.620 0.985
0.630 0.909
0.640 0.832
0.650 0.753
0.660 0.673
0.670 0.592
0.680 0.511
0.690 0.431
0.700 0.352
0.710 0.275
0.720 0.201
0.730 0.130
0.740 0.063
0.750 0.000
0.760 -0.057
0.770 -0.108
0.780 -0.154
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9

4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

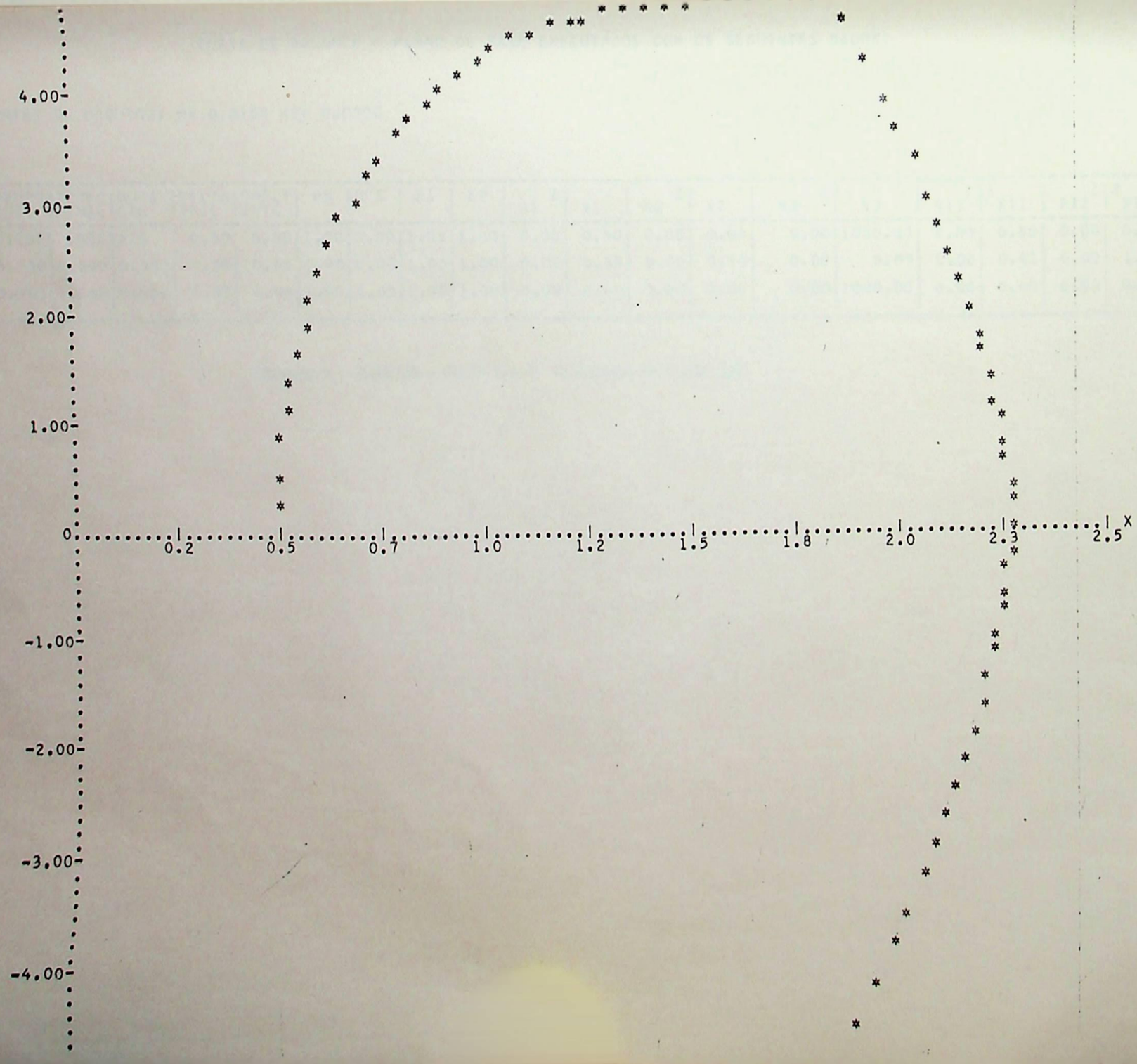
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	0.380	0.380	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.09	0.00	0.41	0.00	1.06
2	0.380	1.000	0.620	1.84	4.94	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.60	0.00	0.60

EXEMPLO 3 - PARTE B - FALTA L-L-G ELIMINADA EM 0.38 [s]

0.520
0.532
0.548
0.566
0.586
0.609
0.634
0.662
0.691
0.723
0.757
0.792
0.829
0.867
0.907
0.948
0.990
1.033
1.077
1.122
1.167
1.213
1.260
1.307
1.354
1.401
1.449
1.497
1.545
1.593
1.642
1.690
1.739
1.788
1.837
1.885
1.929
1.969
2.006
2.041
2.072
2.101
2.127
2.150
2.171
2.190
2.207
2.221
2.233
2.244
2.252
2.259
2.263
2.266
2.267
2.267
2.264
2.260
2.254
2.246
2.235
2.223
2.209
2.193
2.174
2.153
2.130
2.104
2.075
2.044
2.009
1.971
1.930
1.886
1.838
1.786
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

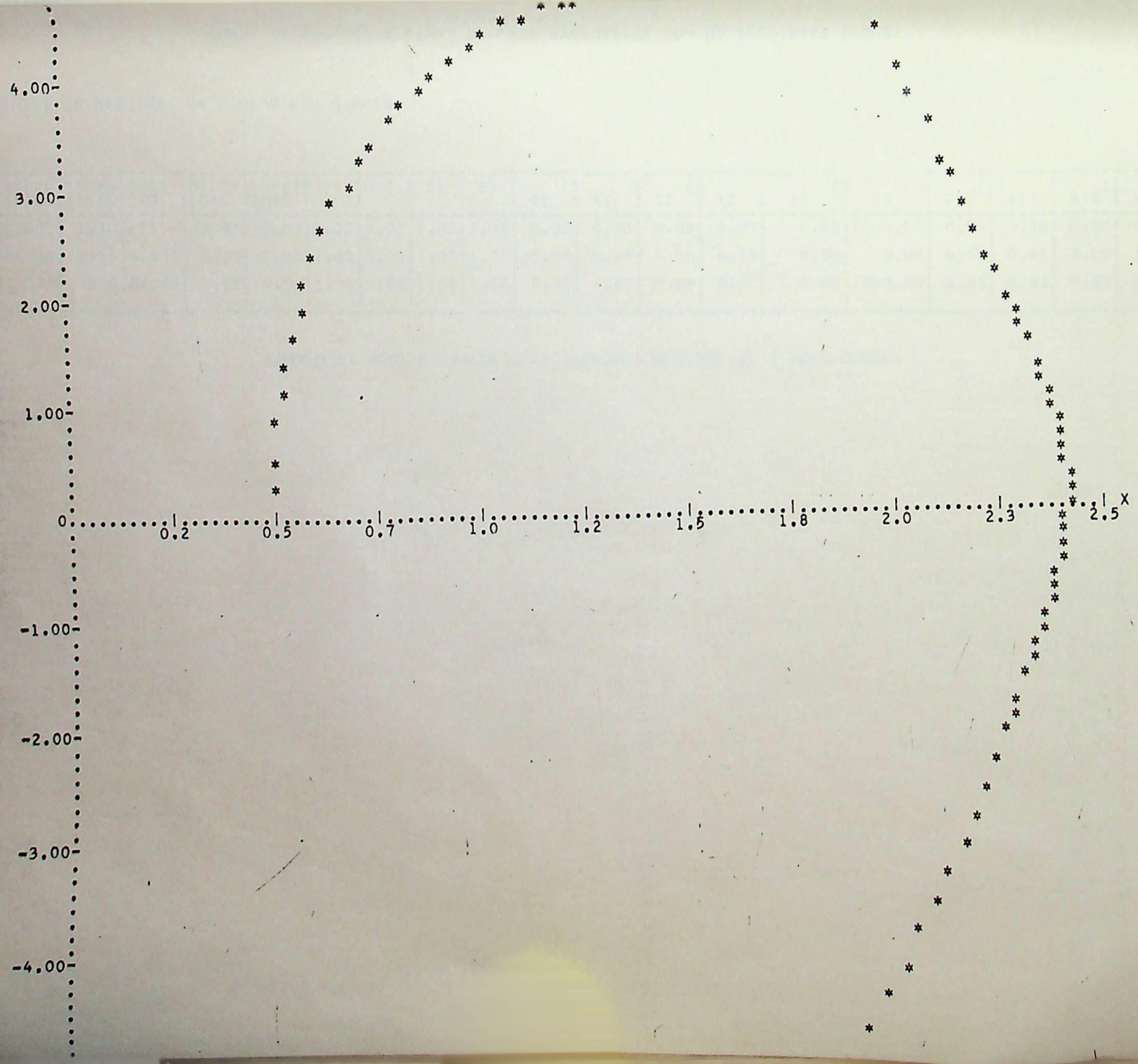
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	0.390	0.390	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.09	0.00	0.41	0.00	1.06
2	0.390	1.000	0.610	1.89	4.98	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.60	0.00	0.60

EXEMPLO 3 – PARTE B – FALTA L-L-G ELIMINADA EM 0.390 [s]

0.532
0.548
0.566
0.609
0.634
0.662
0.691
0.723
0.757
0.792
0.829
0.867
0.907
0.948
0.990
1.033
1.077
1.122
1.167
1.213
1.260
1.307
1.354
1.401
1.449
1.497
1.545
1.593
1.642
1.690
1.739
1.788
1.837
1.887
1.935
1.979
2.020
2.059
2.094
2.127
2.157
2.185
2.211
2.235
2.257
2.276
2.295
2.311
2.326
2.340
2.352
2.363
2.373
2.382
2.389
2.396
2.401
2.406
2.410
2.413
2.415
2.416
2.416
2.415
2.414
2.412
2.409
2.405
2.400
2.394
2.387
2.378
2.369
2.359
2.347
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9
-1.0


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

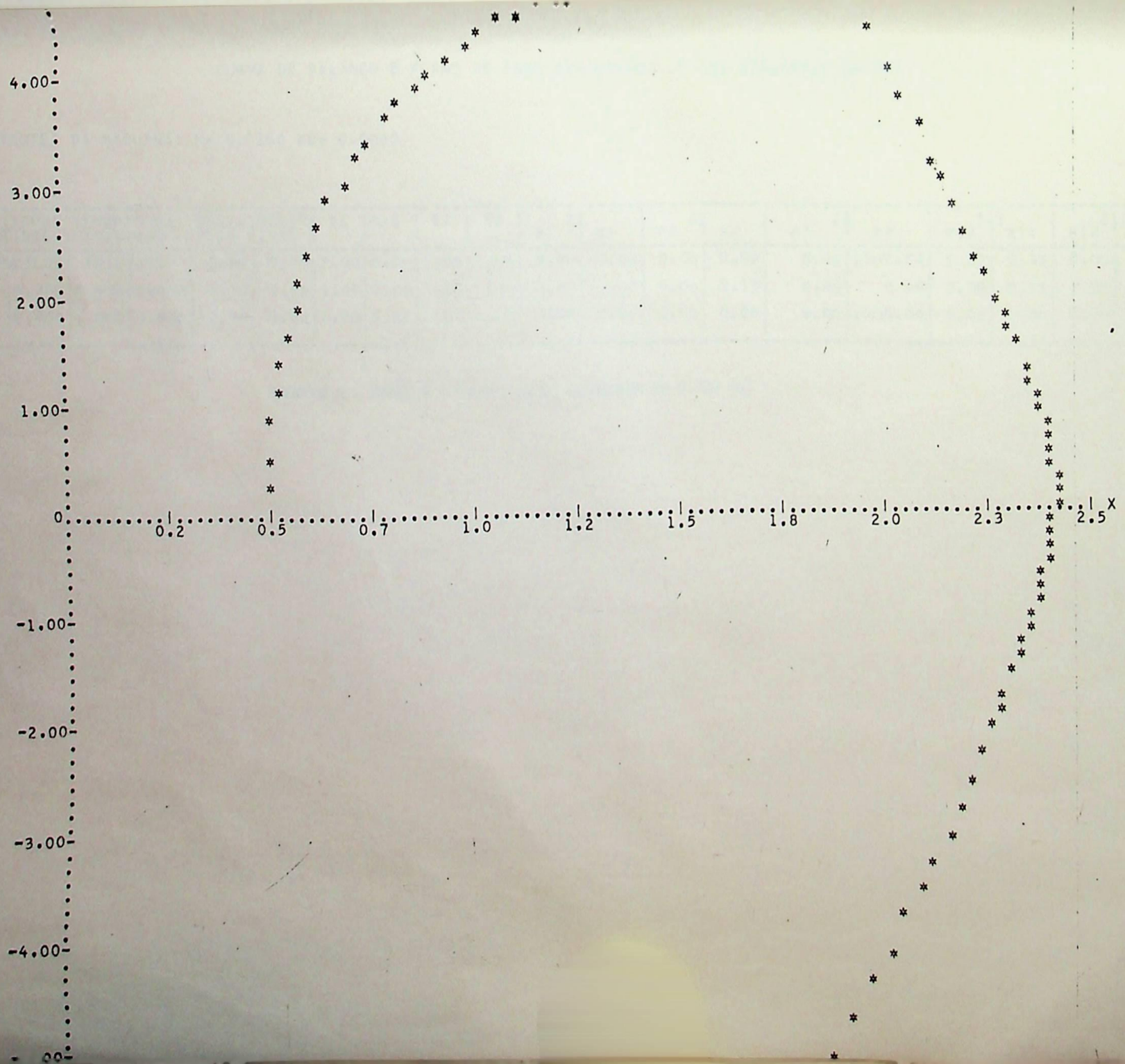
CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	0.395	0.395	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.09	0.00	0.41	0.00	1.06
2	0.395	1.000	0.605	1.89	4.98	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.60	0.00	0.60

EXEMPLO 3 - PARTE B - FALTA L-L-G ELIMINADA EM 0.395 [s] (TEMPO CRITICO)

0.030 0.510
0.040 0.520
0.050 0.532
0.060 0.548
0.070 0.566
0.080 0.586
0.090 0.609
0.100 0.634
0.110 0.662
0.120 0.691
0.130 0.723
0.140 0.757
0.150 0.792
0.160 0.829
0.170 0.867
0.180 0.907
0.190 0.948
0.200 0.990
0.210 1.033
0.220 1.077
0.230 1.122
0.240 1.167
0.250 1.213
0.260 1.260
0.270 1.307
0.280 1.354
0.290 1.401
0.300 1.449
0.310 1.497
0.320 1.545
0.330 1.593
0.340 1.642
0.350 1.690
0.360 1.739
0.370 1.788
0.380 1.837
0.390 1.887
0.400 1.935
0.410 1.979
0.420 2.020
0.430 2.059
0.440 2.094
0.450 2.127
0.460 2.157
0.470 2.185
0.480 2.211
0.490 2.235
0.500 2.257
0.510 2.276
0.520 2.295
0.530 2.311
0.540 2.326
0.550 2.340
0.560 2.352
0.570 2.363
0.580 2.373
0.590 2.382
0.600 2.389
0.610 2.396
0.620 2.401
0.630 2.406
0.640 2.410
0.650 2.413
0.660 2.415
0.670 2.416
0.680 2.416
0.690 2.415
0.700 2.414
0.710 2.412
0.720 2.409
0.730 2.405
0.740 2.400
0.750 2.394
0.760 2.387
0.770 2.378
0.780 2.369
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
-0.7
-0.8
-0.9

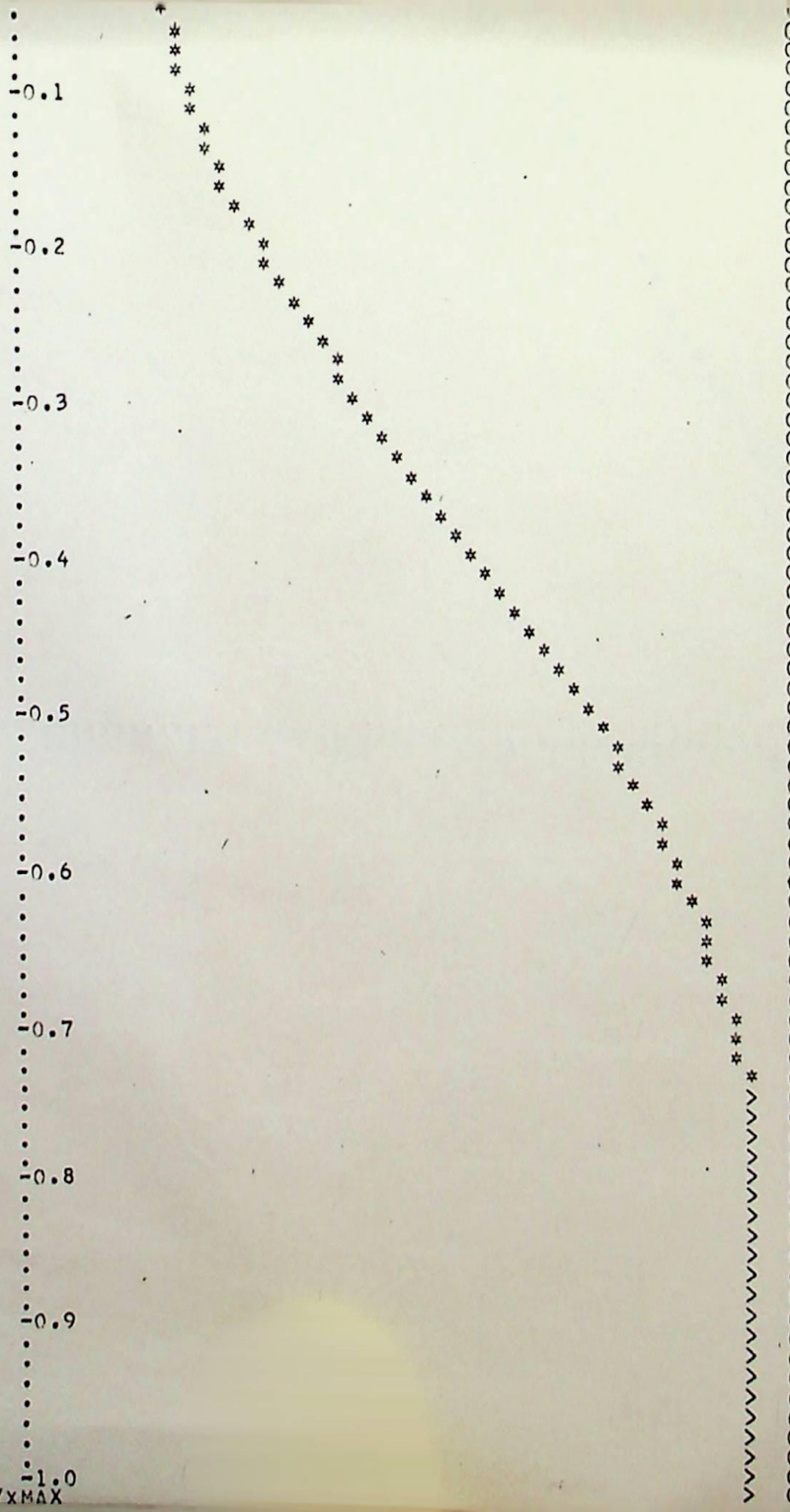

4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

CURVA DE BALANCO E PLANO DE FASE EXECUTADOS COM OS SEGUINTES DADOS:

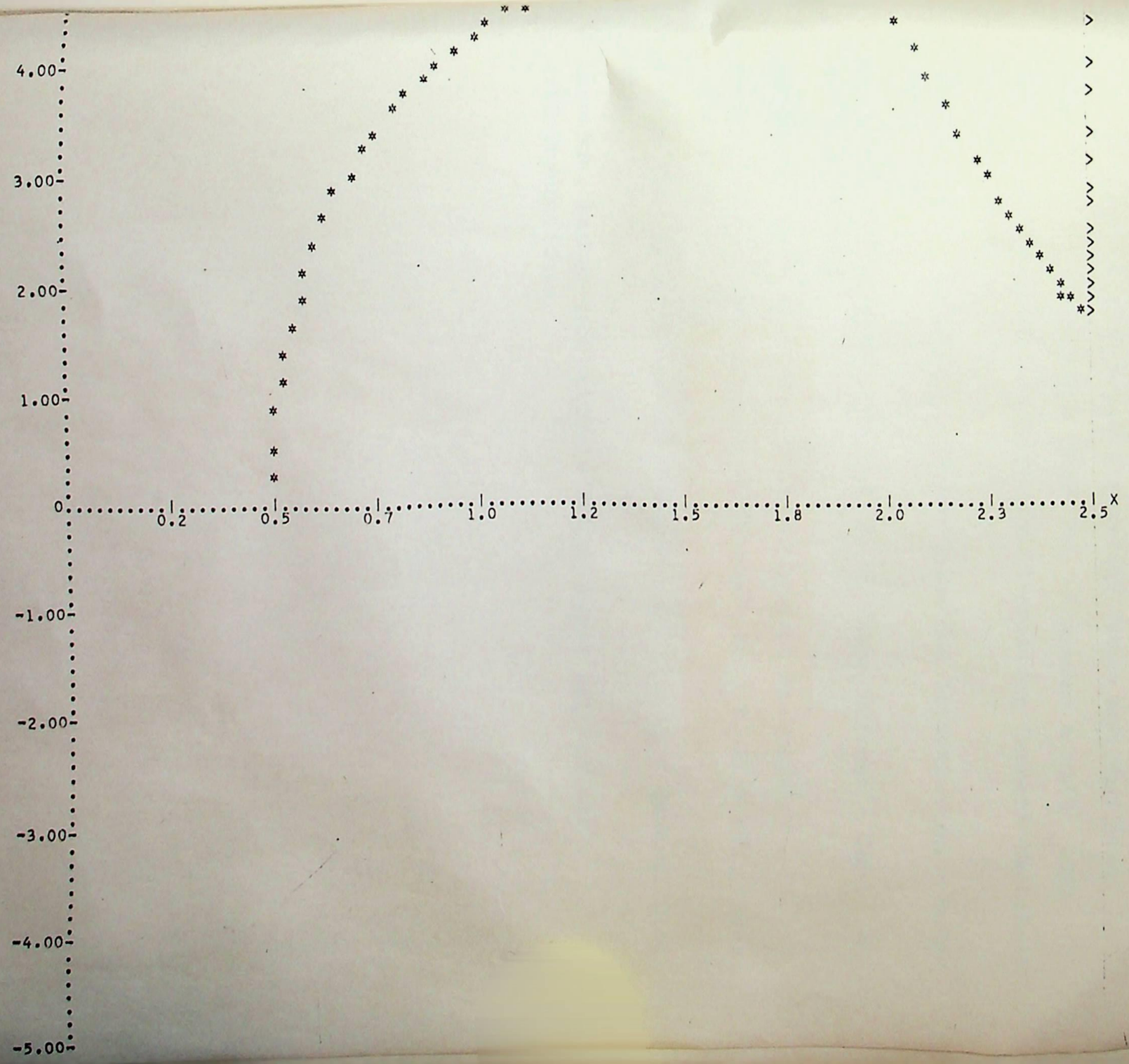
CONSTANTES DA MAQUINA: M= 0.0158 KD= 0.0000

ETAPA	TEMPO INIC	TEMPO FINAL	DURACAO	DELTA INIC	DDELT INIC	PS	DPS	E1	E2	Z1 R1	Z1 X1	Z2 R2	Z2 X2	Z3 R3	Z3 X3	Z11 R11	Z11 X11	Z12 R12	Z12 X12
CONDICOES INICIAIS				0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.50	0.00	0.50
1	0.000	0.400	0.400	0.50	0.00	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.35	0.00	0.15	0.00	0.09	0.00	0.41	0.00	1.06
2	0.400	1.000	0.600	1.94	5.02	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	1000.00	0.00	0.60	0.00	0.60

EXEMPLO 3 - PARTE B - FALTA L-L-G ELIMINADA EM 0.400 [s]



0.050	0.532
0.060	0.548
0.070	0.566
0.080	0.586
0.090	0.609
0.100	0.634
0.110	0.662
0.120	0.691
0.130	0.723
0.140	0.757
0.150	0.792
0.160	0.829
0.170	0.867
0.180	0.907
0.190	0.948
0.200	0.990
0.210	1.033
0.220	1.077
0.230	1.122
0.240	1.167
0.250	1.213
0.260	1.260
0.270	1.307
0.280	1.354
0.290	1.401
0.300	1.449
0.310	1.497
0.320	1.545
0.330	1.593
0.340	1.642
0.350	1.690
0.360	1.739
0.370	1.788
0.380	1.837
0.390	1.887
0.400	1.937
0.410	1.985
0.420	2.030
0.430	2.072
0.440	2.112
0.450	2.149
0.460	2.183
0.470	2.216
0.480	2.246
0.490	2.274
0.500	2.301
0.510	2.326
0.520	2.350
0.530	2.372
0.540	2.393
0.550	2.414
0.560	2.433
0.570	2.452
0.580	2.470
0.590	2.488
0.600	2.506
0.610	2.523
0.620	2.540
0.630	2.558
0.640	2.575
0.650	2.593
0.660	2.611
0.670	2.630
0.680	2.650
0.690	2.671
0.700	2.693
0.710	2.716
0.720	2.741
0.730	2.767
0.740	2.796
0.750	2.826
0.760	2.859
0.770	2.895
0.780	2.934
0.790	2.976
0.800	3.023


4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
-2.00
-3.00
-4.00
-5.00
0.2
0.5
0.7
1.0
1.2
1.5
1.8
2.0
2.3
2.5
X

BIBLIOGRAFIA

- Brosan e Hayden - "Advanced Electrical Power and Machines"
- Concordia, C. - "Syncronous Machines" - Chapmann e Hall, 1951
- Lyon, W.V - "Transient Analysis of Alternating Current Machinery" Chapmann & Hall, 1954
- Westinghouse - "Electrical Transmission and Distribution - Reference Book"
- Edith Clarke - "Circuit Analysis of AC Power Systems" - John Wiley & Sons, 1943
- Stevenson, W.D. - "Elements of Power Systems Analysis"
- Kimbark, E.W. - "Power System Stability" - Vol. I, II e III, Dover Publications, Inc.
- Crary, S.B. - "Power System Stability" - Vol. I e II - General Electric
- Carnahan, Luther and Wilkes - "Aplied Numerical Methods" - IEEE Transactions