TESE
479

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

PRÓ-DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"APLICAÇÃO DA TEORIA DO CONTROLE ÓTIMO VIA REALIMENTAÇÃO DE ESTADO AOS SISTEMAS DE REGULAÇÃO E CONTROLE DE INSTALAÇÕES HIDROELÉTRICAS UTILIZANDO AS TÉCNICAS DAS VARIÁVEIS DISCRETIZADAS".

LUIZ RENATO GOMES
da Divisão de Engenharia de Manutenção de Produção
CEMIG

ITAJUBÁ - JULHO/1987

CLASS. 519.71:621.311.21(043.2)
CUTT. G633a
TOMBO 479

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

25/8/07		
20/02/08		

Dedicado a minha esposa
Maria Aparecida

AGRADECIMENTOS

A CEMIG através do Departamento de Manutenção de Produção pelo apoio e incentivo. Aos professores Carlos Alberto Dias Coelho e Hélio Mokarzel pela orientação dada.

RESUMO

A proposição básica desta dissertação de mestrado está fundamentada na aplicação prática das técnicas do controle moderno sobre os sistemas de controle e regulação para grupos elétricos de potência, em especial os grupos hidrogeradores.

O processo de pesquisa encontra-se vinculado ao controle ótimo via realimentação de estado direcionado aos sistemas de regulação de um gerador síncrono no sentido de se conhecer a possibilidade de restauração da estabilidade do mesmo sob quaisquer condições operativas impostas.

O enfoque dado pelo trabalho relativo às técnicas de discretização deve ser encarado como opção visando futuras aplicações dentro da modelagem com tratamento discretizado. Para tal foram desenvolvidas subrotinas específicas que transformam um sistema contínuo no seu correspondente sistema discretizado.

O tratamento matemético envolvido utiliza sempre os conceitos e os procedimentos de variáveis de estado o que permite a análise de sistemas de ordem superior, graças a aplicação e o emprego das técnicas computacionais.

Dentro do exposto, visando solucionar o problema do controle ótimo, as conclusões tiradas pelo trabalho tiveram uma característica comparativa pois a utilização de um modelo dotado de parâmetros reais, levantados no campo, foi de extrema importância uma vez que sem este a definição da referência para o estudo seria duvidosa.

Outro fator preponderante foi a extensão da aplicação do tema à análise conjunta da atuação simultânea dos diversos grupos de regulação existentes numa instalação hodroelétrica.

ABSTRACT

The fundamental proposition of this dissertation work is based in the practical application of the modern control techniques about the control and regulation systems for electric power groups, espe - cially hydro-generators groups.

The process of study has good relation to optimum control by feedback of state variables to the regulation systems of a synchronous generator in a sense that has certain informations of stability restoration of the machine in any operative condition.

The purpose about the reasonable judgement techniques must be understood as option taking in consideration of future's applications in models with discrete-time treatment.

For it, were developed the specific subroutines that transform a continuos system in your discrete system.

The mathematic method in this work always makes good use of the concepts and the procedures of the space-state multivariable that permits the analysis of advanced systems and puts to good use of sup - ports of the computational techniques.

In this context, trying to find the optimum control law, the final answers given by the work had a comparative characteristics.

Then, the model utilization with real parameters gathers in the field was extremely important to clear the reference definition for this work.

Another substancial factor is the extension of the application theme for the global simultaneous response of various hydroelectric regu lations groups.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução às Técnicas do Controle Moderno 01

1.1 - Geral 01
1.2 - Conceitos Básicos de Variáveis de Estado 01
1.3 - Utilização dos Métodos de Liapunov na Análise da Estabilidade 05
1.3.1 - Equações Matriciais na Forma Quadrática 05
1.3.2 - Métodos de Liapunov 06
1.3.2.1 - Estabilidade Segundo Liapunov 06
1.3.2.2 - Segundo Método de Liapunov 07
1.4 - Controle por Realimentação de Estado e o Controle Ótimo 09

Capítulo 2 - Desenvolvimento do Modelo Discreto às Técnicas do Controle Moderno Aplicado ao Método da Realimentação de Estado 13

2.1 - Introdução 13
2.2 - Sistemas Contínuos e Discretos 13
2.3 - Método da Resposta ao Impulso 15
2.4 - Discretização de Variáveis de Estado 17
2.5 - Aplicação do Índice de Custo para o Controle Ótimo 18
2.6 - Procedimento Matemético para Obtenção das Matrizes Discretizadas A(t) e B(t) Via Computação Digital 22

Capítulo 3 - Definição dos Modelos Utilizados 28

3.1 - Introdução 28
3.2 - Modelo Típico Para Representação de u'a Máquina Síncrona Acoplada a um Barramento Infinito 29
3.3 - Estabelecimento das Condições Iniciais de Carregamento 39
3.4 - Representação em PU do Sistema Real a Ser Utilizado ... 46
3.5 - Representação do Sistema sob o Enfoque das Variáveis de Estado 49

Capítulo 4 - Estudos de Simulação - Conclusões 59

4.1 - Geral 59
4.2 - Apresentação do Programa Computacional 59
4.3 - Simulação Implementando Ajustes de Comissionamento 60
4.4 - Simulação Implementando o Sistema Desajustado 61
4.5 - Simulação Implementando o Controle Ótimo 61

4.6 - Conclusões 62
4.7 - Proposições Futuras 63
Apêndices 64
1. Subsídio Para Escolha da Matriz "Q" 65
2-A. Apresentação das Subrotinas Utilizadas 66
2-B. Resultado das Simulações Implementadas 104

Referências 193

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO ÀS TÉCNICAS DO CONTROLE MODERNO

1.1 GERAL

Como já se pode verificar na literatura de controle clássico , existem vários métodos para a análise da estabilidade geral em sistemas autocontrolados.

Alguns destes métodos,que serão utilizados dentro deste trabalho,são de conhecimento universal não necessitando de descrição, a não ser a nível de referências em rodapés.

Em termos de controle clássico, as limitações vêm em decorrência de restrições na própria aplicação do método aos sistemas práticos utilizados.

Em se tratando de um sistema de potência, os aspectos de controle,associados, esbarram na ordem crescente das equações diferenciais que regem tal sistema, além da definição do grau de precisão imposto aos modelos, muitas vezes típicos diagramas de literatura.

Atualmente, a utilização do conceito moderno de controle parece vir ao encalço dos problemas mencionados buscando solucionar, de maneira conjunta, todas as questões respeitando fielmente as restrições impostas pelo sistema.

A definição da estabilidade segundo "Liapunov", a utilização dos métodos computacionais aplicados ao aspecto matricial parecem garantir a aplicabilidade dos procedimentos mais modernos uma vez que estes vêm, aos poucos, adquirindo muitos adeptos, aliado ao fato do crescente desenvolvimento do campo computacional.

Quanto a análise clássica, os antigos e práticos critérios de estabilidade propostos por "Routh" e "Hurwitz" ainda são bastante utilizados. Pode-se provar que a utilização da aplicação das chamadas funções de "Liapunov" ao procedimento pelo método do gradiente fornece as mesmas condições que o algoritmo de "Routh", porém, evidentemente, expandindo o conceito a sistemas lineares de ordem elevada, além de sistemas lineares invariantes e aqueles variantes não lineares.

O que se pretende neste capítulo é introduzir uma base ao estudo do controle moderno e controles ótimo e sub-ótimo sob o prisma dos sistemas de regulação, tema principal do presente trabalho.

1.2 CONCEITOS BÁSICOS DE VARIÁVEIS DE ESTADO

Generalizando-se a definição de um vetor de estado pertencente a um conjunto "l", vem:

$$\dot{X}(t) = f(X,U,t) \qquad (1.1)$$

onde Π - Conjunto do espaço ao qual o vetor X pertence;
X - variável dependente correspondente ao estado;
U - variável dependente correspondente a excitação;
t - variável independente;

em forma matricial, vem:

$$\dot{X}(t) = f(X,U,t) \tag{1.2}$$

onde as variáveis agora são vetores coluna.

Na forma matricial linear padronizada, tem-se:

$$\dot{X} = AX + BU \tag{1.3}$$

E para a resposta de saída do sistema tem-se:

$$Y = CX + DU \tag{1.4}$$

As equações (1.3) e (1.4) são conhecidas universalmente como a forma padrão de uma planta linear de estado para sistemas invariantes.
A,B,C,D são matrizes de coeficientes constantes ou variantes. Geralmente:

$$\dot{X}(t) = A(t).X(t) + B(t).U(t) \tag{1.5.A}$$

e

$$Y(t) = C(t).X(t) + D(t).U(t) \tag{1.5.B}$$

Para aqueles sistemas não lineares, a aproximação é obtida utilizando-se a matriz Jacobiana, ou melhor:

$$\dot{X}(t) = J_X(t)\ X(t) + J_u(t)\ U(t) \tag{1.6}$$

onde:

$$Jx(t) = \begin{bmatrix} \partial f_1/\partial x_1 & \partial f_1/\partial x_2 & \cdots & \partial f_1/\partial x_n \\ \partial f_2/\partial x_1 & \partial f_2/\partial x_2 & \cdots & \partial f_2/\partial x_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \partial f_n/\partial x_1 & \partial f_n/\partial x_2 & \cdots & \partial f_n/\partial x_n \end{bmatrix}$$

$$Ju(t) = \begin{bmatrix} \partial f_1/\partial u_1 & \partial f_1/\partial u_2 & \cdots & \partial f_1/\partial u_n \\ \partial f_2/\partial u_1 & \partial f_2/\partial u_2 & \cdots & \partial f_2/\partial u_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \partial f_n/\partial u_1 & \partial f_n/\partial u_2 & \cdots & \partial f_n/\partial u_n \end{bmatrix}$$

Para uma planta qualquer descrita pelas equações (1.3) e (1.4) define-se como equação característica do sistema a seguinte equação matricial:

$$Q(\lambda) = |\lambda I - A| \tag{1.7}$$

Notar que a equação (1.7) é um determinante que fornece às raízes solução que são chamadas autovalores da matriz "A". A cada um destes autovalores encontra-se associado um autovetor, importantíssimos na construção da matriz modal, "M", inerente a transformação de rotação das coordenadas iniciais que diagonaliza a matriz "A" em u'a matriz formada pelos autovalores.(*)

Supondo-se a transformação anteriormente mencionada vem:

$$X = T\hat{X} \therefore \hat{X} = T^{-1} . X \qquad (1.8)$$

onde

"$\hat{X}$" é o vetor de estado transformado, e

"T" é a matriz de transformação de rotação.

Assim, levando-se o valor de "X" nas eqs. (1.3) e (1.4), vem:

$$\dot{\hat{X}} = T^{-1}AT\hat{X} + T^{-1}BU \qquad (1.9.A)$$

e

$$\hat{Y} = CT\hat{X} + DU \qquad (1.9.B)$$

Deste modo as novas matrizes de coeficientes serão:

$$\hat{A} = T^{-1}AT \qquad (1.10.A)$$

$$\hat{B} = T^{-1}B \qquad (1.10.B)$$

$$\hat{C} = CT \qquad (1.10.C)$$

$$\hat{D} = D \qquad (1.10.D)$$

Caso o sistema seja linear, mas variante, vem:

$$\hat{A} = T(t)^{-1}AT(t) - T(t)^{-1}T(t)$$

$$\hat{B} = T(t)^{-1}B$$

$$\hat{C} = CT(t)$$

$$\hat{D} = D \qquad \text{eqs. (1.11)}$$

Para as eqs. (1.10) e (1.11), valem as equações:

$$\dot{\hat{X}} = \hat{A}\hat{X} + \hat{B}\hat{U}$$

e

$$\hat{Y} = \hat{C}\hat{X} + \hat{D}\hat{U} \qquad \text{eqs. (1.12)}$$

Quando a matriz de transformação é constituída pelos autovetores oriundos da solução da equação (1.7) ela é denominada, particularmente, de matriz "modal", "M", tal que se "T=M", a matriz "$\hat{A}$" tem a forma de u'a matriz diagonal cujos elementos nada mais são que os autovalores resultantes da equação (1.7), já mencionada.

A aplicabilidade da utilização da pesquisa sobre os autovalores relativos ao sistema em análise, em termos qualitativos, permite averiguar a presença de partes reais positivas nos mesmos, responsáveis pela instabilidade vigente.

O grau de instabilidade poderá ser medido pela inspeção dos autovalores resultantes.

Existem dois importantes conceitos que garantem duas importantes propriedades verificadas nos sistemas e que vêm de encontro à teo

*Para autovalores repetidos utiliza-se a matriz "J" de Jordan.

ria do controle ótimo de maneira genérica: são os conceitos vinculados a "controlabilidade" e a "observabilidade" dos sistemas.
Pela "controlabilidade" garante-se, através da excitação "U(t)", a transferência de um determinado estado "X(to)" ao estado correspondente "X(t1)", num intervalo de tempo "$\Delta t=t1-to$", o que demonstra a influência das variáveis do vetor "U(t)" sobre todas as variáveis de estado "X(t)". Evidentemente que o intervalo de tempo é finito fazendo vigorar a exeqüibilidade do sistema em questão. Pela "observabilidade" conhece-se qual o vetor de estado "X(t)" a partir da simples inspeção de saída "Y(t)", o que garante a influência das variáveis de estado "X(t)" sobre todas as saídas "Y(t).

Seja a determinação da função peso para a equação (1.3).

$$\dot{X} = AX \quad c/\ U=0$$

ou

$(PI-A)X(P) = 0$ - "P" é a variável da Transformação de Laplace e "I" a matriz identidade.

A solução será: $X= Xo\ e^{At}$ (1.13)

(1.14)

Pelo teorema da convolução pode-se escrever:

$$X(t)= e^{A(t-to)}.\ X(to) + \int_{to}^{t} e^{A(t-\zeta)}.Bu(\zeta).d\zeta \qquad (1.15)$$

A utilização da equação (1.3) fornece, no domínio da transformada de Laplace:

$$P.X(P)-X(0)=A.X(P)+B.U(P) \qquad (1.16)$$

considerando-se as matrizes "A" e "B" formadas de coeficientes constantes.

A partir da equação (1.16), pode-se escrever, sendo I a matriz identidade,

$$X(P)=[PI-A]^{-1}.X(o)+[PI-A]^{-1}.B.U(P) \qquad (1.17)$$

A matriz $[PI-A]^{-1} = \phi(P)$ é conhecida como "matriz de transição" do sistema de estado regido pelas equações (1.3) e (1.4) e permite o conhecimento de um estado num tempo "t", determinado, a partir de um estado inicial, relativo a um tempo "to", conhecido.

Comparando as equações (1.17) e (1.13) e considerando também nulo o vetor excitação obtém-se, no domínio do tempo, que:

$$\phi(t)= e^{At} \qquad (1.18)$$

Aplicando-se o teorema de Mac Laurin na função exponencial, vem:

$$\phi(t)= I+At+\frac{(At)^2}{2!} + \frac{(At)^3}{3!} + ___ \qquad (1.19)$$

Deste modo, pode-se reescrever a equação (1.15) do seguinte modo:

$$X(t)=\phi(t-to)X(to)+\int_{to}^{t} \phi(t-\zeta).B.U(\zeta).d\zeta \qquad (1.20)$$

A partir da equação (1.20), obtém-se a saída:

$$Y(t)=C.\phi(t-to).X(to)+C\int_{to}^{t}\phi(t-\zeta).B.U(\zeta).d\zeta+D.U(t) \qquad (1.21)$$

No domínio da transformada de Laplace, a equação (1.21) ficará:

$$Y(P)=[C.\phi(P).B+D]U(P) \qquad (1.22)$$

$$\text{com } X(to)=0$$

Deste modo obtém-se a matriz de transferência do sistema

$$G(P)=[C.\phi(P).B+D] \qquad (1.23)$$

Notar que $\phi(P)=[PI-A]^{-1}$ (1.24)

1.3 UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE LIAPUNOV NA ANÁLISE DA ESTABILIDADE

O conceito de estabilidade aplicada a sistemas de controle tanto lineares quanto não lineares sempre esbarra na análise vinculada ao comportamento das chamadas trajetórias de estado que ditam a tendência de acomodação, ou não, de um determinado estado com relação a um outro estado.

Para uma ampliação maior do campo de aplicação deste conceito a verificação deve perfazer a combinação entre todos os estados de modo que não escape nenhum deles cuja tendência pudesse ser a de instabilidade.

Para a concretização do conceito certos requisitos básicos, com suas normas, deverão ser pré-estabelecidos uma vez que,numa idéia mais ampla, a necessidade de uma definição é primordial, fato comprovado pela conceituação da chamada "estabilidade segundo Liapunov" que permitiu a expansão da pesquisa da estabilidade de uma análise local para todo um espaço de estado pré-determinado.

No estudo do controle moderno basea -se, principalmente, em critérios desenvolvidos por Liapunov, direcionando-se a caminho das técnicas do controle ótimo com a minimização de determinados índices de desempenho escolhidos prontamente.

Serão abordados, então, um conjunto de tópicos visando o desenvolvimento paulatino dos conceitos, restringindo-se, na análise final, ao processo de otimizaçao através da realimentação de estado de elevada importância no estudo da estabilidade dos sistemas elétricos.

1.3.1 EQUAÇÕES MATRICIAIS NA FORMA QUADRÁTICA

Seja considerar dois vetores independentes. Define-se o produto escalar entre esses dois vetores como sendo a relação seguinte:

$$\text{vetor nº 1} = X^T=[X_1,X_2,X_3.....Xm] \quad (*)$$

$$\text{vetor nº 2} = Y^T=[Y_1,Y_2,Y_3.....Ym]$$

$$X.Y= X^TY = \sum_{i=1}^{m} XiYi \qquad (1.25)$$

---

*Pela indicação deve-se entender como matriz transposta. No caso o vetor é uma matriz coluna e quando transposta torna-se u'a matriz linha.

Geralmente na equação (1.25) costuma-se introduzir u'a métrica em forma de u'a matriz mxm, como segue:

$$Q = X^T M Y \tag{1.26}$$

Deste modo, a eq. (1.26) toma o seguinte aspecto:

$$Q = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} a_{ij} x_i y_j \tag{1.27}$$

Quando o vetor "Y" é igual ao vetor "X" tem-se um caso particular de relação que representa fisicamente energia, sendo também conhecida como forma quadrática invariante.

A equação (1.27) encerra também a importante definição da lei métrica para um determinado espaço, conhecida como norma, quando se toma $\sqrt{Q}$.

Para se trabalhar com um espaço qualquer faz-se necessário o estabelecimento de um padrão de medida para este espaço.

Existem várias proposições de normalização e entre estas destaca-se a conhecida "norma euclideana" que nada mais é que uma forma quadrática, ou seja, um produto escalar de um vetor por ele mesmo tendo, posteriormente, extraída a raíz quadrada do resultado final.

Desta conceituação, para um dado vetor "X", pela norma euclideana, obtém-se o seguinte método ou norma:

$$\|X\| = \sqrt{X^T I X} = \sqrt{X^T X} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} (x_i)^2} \tag{1.28}$$

Notar que para o caso da norma a matriz "M" é a matriz identidade "I", além de "Y=X", (*)

1.3.2 MÉTODOS DO LIAPUNOV

1.3.2.1 ESTABILIDADE SEGUNDO LIAPUNOV

Seja uma região "ε" do espaço de estado de modo que envolva um ponto de equilíbrio "Xo". Considere-se também uma região "Δ" dentro da região inicial "ε". Um sistema é dito estável se e somente se toda trajetória de estado iniciando-se dentro da região "Δ" não ultrapasse a região "ε", sendo seu limite caracterizado por uma oscilação constante de fronteira.

A garantia de que toda trajetória não compromete a estabilidade do sistema confirma a condição de "estabilidade global".

É evidente que existem sistemas que podem apresentar estabilidade local sem necessariamente apresentar estabilidade global, para isto basta utilizar-se da definição de estabilidade segundo Liapunov não considerando a estabilização por todas as trajetórias e sim por algumas delas relacionadas com a região próxima ao ponto em análise. Deste

---

*Oestabelecimento da norma permite a obtenção dos vetores unitários segundo a relação:

$$\hat{X}_i = \frac{X_i}{\|X\|}$$

modo define-se a condição de "estabilidade local".

A condição de "estabilidade assintótica" pode ser aplicada as definições anteriores resultando nas chamadas "estabilidade assintótica global" e "estabilidade assintótica local". Em ambos os casos sempre as trajetórias tendem para um ponto de equilíbrio único.
Pelo que foi exposto, pode-se notar o grau de confiabilidade elevado transferido pela condição da estabilização assintótica global.

1.3.2.2 SEGUNDO MÉTODO DE LIAPUNOV

Liapunov, em suas pesquisas, propôs, inicialmente, um método que analisava a condição de estabilidade próxima as vizinhanças de um determinado ponto de características singular. Além dele outros pesquisadores também o fizeram.
O problema era contornado pela utilização dos processos de linearização de um sistema não-linear na região de interesse. A este procedimento chamou-se "primeiro método de Liapunov". Mas foi o "segundo método de Liapunov" que realmente revelou os trabalhos aplicados do pesquisador.
A grande vantagem trazida pelo segundo método consiste no fato da não necessidade do conhecimento dos autovalores do sistema, situação exigida pelo primeiro método.
O procedimento do segundo método implica na escolha de u'a função escalar "V(X)" que antes é testada para fornecer todas as condições de estabilidade. Esta função deverá ser obtida por tentativa e deverá se apresentar sob a forma quadrática amarrando a interrelação entre as variáveis de estado.

Tomando-se a derivada de "V(X)" com relação ao tempo, vem:

$$\frac{dV(X)}{dt} = \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial V(X)}{\partial X_i} \frac{dX_i}{dt} = [\nabla V(X)]^T . \dot{X} \qquad (1.29)$$

Nota-se que a partir da definição da função "V(X)"; já em tempo de ser chamada "função de Liapunov" relativa a um determinado sistema; pode-se pesquisar o seu gradiente, indicador da existência de mínimos ou de máximos. Estes indicadores garantem a existência da estabilidade. Como a função "V(X)" é sempre escolhida definida positiva(*). ou no mínimo semi definida positiva, para que o sistema apresente estabilidade segundo Liapunov, a função "$\dot{V}(X)$" deverá ser definida negativa, ou no mínimo semi definida negativa.
Resumem-se em quatro, os teoremas que definem as condições de estabilidade de um sistema determinado. São eles:

---

*

Definida Positiva	Semi Definida Positiva	Definida Negativa	Semi Definida Negativa	Indefinida
$V(X)>0$ P/$X\neq 0$	$V(X)\geq 0$ P/$X\neq 0$	$V(X)<0$ P/$X\neq 0$	$V(X)\leq 0$ P/$X\neq 0$	Pode admitir
$V(X)=0$ P/$X=0$	$V(X)=0$ P/$X=0$	$V(X)=0$ P/$X=0$	$V(X)=0$ P/$X=0$	ambas as condições

$V(X)$ deverá ser contínua e possuir as primeiras derivadas parciais contínuas.

Teorema nº 1 - Estabilidade assintótica segundo Liapunov

$$V(X)>0 \quad P/\ X\neq 0 \tag{1.30.A}$$

$$V(0)=0 \tag{1.30.B}$$

$$\dot{V}(X)<0 \quad P/\ X\neq 0 \tag{1.30.C}$$

Com V(X) contínua e possuindo as primeiras derivadas parciais contínuas.

Teorema nº 2 - Estabilidade assintótica global segundo Liapunov

$$V(X)>0 \quad P/\ X\neq 0 \tag{1.31.A}$$

$$V(0)=0 \tag{1.31.B}$$

$$\dot{V}(X)<0 \quad P/\ X\neq 0 \tag{1.31.C}$$

$$V(X)\to\infty \quad P/\ \|X\| \to\infty \tag{1.31.D}$$

Com V(X) contínua e possuindo as primeiras derivadas parciais contínuas.

Teorema nº 3 - Instabilidade segundo Liapunov

$$V(X)\geqslant 0 \tag{1.32.A}$$

$$V(0)=0 \tag{1.32.B}$$

$$\dot{V}(X)>0 \tag{1.32.C}$$

Com V(X) contínua e possuindo as primeiras derivadas parciais contínuas.

Teorema nº 4 - Instabilidade segundo Cetaev

Seja uma região $R_1 \subset R$, onde R_1 é mínima, e:

$$V(X)\geqslant 0 \quad \text{em } R_1 \tag{1.33.A}$$

$$\dot{V}(X)>0 \quad \text{em } R_1 \tag{1.33.B}$$

$V(0)=0$ na fronteira de R_1 sendo a origem um ponto de fronteira de R_1.

Com V(X) contínua e possuindo as primeiras derivadas parciais contínuas.

Como já foi visto anteriormente, a função de Liapunov pode ser expressa pela relação seguinte:

$$V(X)= X^T M X \tag{1.33}$$

com $\dot{X} = AX$

Derivando-se a equação (1.33), vem:

$$\dot{V}(X)= \dot{X}^T MX+X^T M\dot{X}$$

com

$$\dot{V}(X)=(AX)^T MX+X^T M(AX)$$

$$=X^T A^T MX+X^T MAX$$

logo $$\dot{V}(X)= X^T [A^T M+MA] X \tag{1.34}$$

ou $$\dot{V}(X)= - X^T L X \tag{1.35}$$

Assim $$L=[A^T M+MA] \tag{1.36}$$

A utilização da equação (1.36) propicia a criação de um critério denominado de "método de Lur'e" que consiste no seguinte:

- conhece-se a matriz "A" da planta de estado do sistema;

- escolhe-se u'a matriz "L" definida ou, no mínimo, semi-definida positiva;

-determina-se os valores da matriz "M" que garantem para esta a condição de definição positiva.

1.4 CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO DE ESTADO E O CONTROLE ÓTIMO

No item precedente, pode-se analisar a aplicabilidade dos métodos verificativos da estabilidade segundo Liapunov. Viu-se, também, a facilidade da análise pela utilização das funções de Liapunov sobre o processo do gradiente da função.

A técnica do controle via realimentação de estado com a utilização do método de Liapunov incorrerá na definição do chamado controle ótimo ou controle de desempenho por índices quadráticos a serem vistos neste tópico.

O controle ótimo, idéia aplicada no estudo do controle moderno, baseia -se, incialmente, no controle dos chamados índices de desempenho do sistema.

Existem várias proposições de formulações para a definição do índice de desempenho. Neste capítulo será utilizado o índice representado pela equação seguinte:

$$I = \frac{1}{2}\int_0^t [X^T Q X + U^T Z U]\,dt \qquad (*) \qquad (1.37)$$

A técnica da realimentação de estado pode ser equacionada dentro da forma padrão das variáveis de estado, ou:

$$\dot{X} = AX + BU$$

pela realimentação tem-se:

$$U = -K_r . X \qquad (1.38)$$

$$\text{logo} \quad \dot{X} = [A - B.K_r]X \qquad (1.39)$$

Levando-se em conta o valor de "U", da equação (1.38), na equação (1.37), vem:

$$I = \int_0^t X^T [Q + K_r^T . Z . K_r] X \, dt \qquad (1.40)$$

Pode-se, facilmente, concluir que o índice de desempenho ditado pela eq. (1.37) agrupa três importantes restrições que são básicas na pesquisa para obtenção de u'a matriz de realimentação "K_r" que esteja estritamente ligada a condição de controle ótimo.

Assim, por partes, obtém-se que:

---

*Ver referência, Artigo [4].

- X^TQX : garante a lei de transferência de um determinado estado "X_i", a um novo estado "X_f", na condição mínima ponderável.

-U^TZU : do mesmo modo, definem-se as entradas de energia que garantem a transferência do estado de "X_i" para "X_f", segundo alusão anterior, através desta nova parcela matricial.

- Os intervalos de tempo sob os quais se processa a transferência de estado, "t_i" e "t_f", também ficam explícitos com o propósito condicionante.

A extrapolação da equação do índice, descrito pela equação (1.37), àquela resultada da aplicação da técnica do controle via realimentação de estado, equação (1.38), permitirá a determinação da matriz "K_r", de retroação sob as restrições impostas, a nível das variáveis de entrada, das variáveis de estado e do tempo de execução sobre os mesmos.

O problema agora, após a definição das restrições, será a determinação da matriz de realimentação "K_r", inerente ao processo do controle ótimo por intermédio da realimentação de estado, que obedeça uma certa condição de minimização entre as variáveis que se encontram em jogo.

Para tal, utiliza-se o chamado "princípio de Pontryagin" que prevê, inicialmente, a formação da matriz denominada de "hamiltoniano" segundo os princípios do "cálculo variacional".

Através destas considerações, pode-se obter três importantes relações matemáticas, implícitas, que resolvem o problema em estudo (*).

Segue-se a formação do hamiltoniano em estudo:

$$H = \frac{1}{2} X^TQX + \frac{1}{2} U^TZU + P^T[AX+BU] \tag{1.41}$$

Utilizando-se das equações de "Euler-Lagrange" (*), denominadas também de "equações canônicas", representadas a seguir, vem:

$$\frac{\partial H}{\partial P} = \frac{\partial P^T[AX+BU]}{\partial P} = AX + BU = \dot{X} \tag{1.42}$$

$$\frac{\partial H}{\partial X} = \frac{\partial\left[\frac{1}{2}X^TQX\right]}{\partial X} + \frac{\partial P^TAX}{\partial X} = QX + A^TP = -\dot{P} \tag{1.43}$$

$$\frac{\partial H}{\partial U} = \frac{\partial\left[\frac{1}{2}U^TZU\right]}{\partial U} + \frac{\partial P^TBU}{\partial U} = ZU + B^TP = 0 \tag{1.44}$$

Pelo estudo em que se procura a definição de um índice de desempenho mais realista possível, como aquele fornecido pela equação (1.37), a introdução dos critérios de Liapunov se faz necessário e sua implicação pode ser explicada como se segue:

Tem-se que: $I = \frac{1}{2}\int_o^t [X^TQX+U^TZU]dt = V(X)$ (1.45)

ou então, pela própria realimentação de estado que garante $U=-K_r X$ o

*Ver referência, Artigo [1].

que permitirá a utilização e o cumprimento da equação (1.45).

Deste modo, derivando a equação (1.45), precedente, obtém-se a função gradiente que possibilitará a procura de uma condição mínima.

Assim $$\dot{V}(X) = \frac{1}{2}[X^T QX + U^T ZU] \tag{1.46}$$

Pela aplicação do cálculo variacional com a introdução do próprio cômputo da variável de estado, com o vetor "X", tem-se:

$$F = \dot{V}(X) + P^T \dot{X} \tag{1.47}$$

Comparando a equação (1.47) com aquela descrita pela equação (1.41) observa-se que:

$$H = F$$

Retomando-se, novamente, o estudo sob o prisma das equações (1.42), (1.43) e (1.44), certas condições deverão ser obedecidas e entre estas uma primeira já poderá ser considerada, supondo-se o vetor das variáveis de excitação "U" e a condição de existência de um mínimo para a relação do hamiltoniano, equação (1.44).

$$\frac{\partial H}{\partial U} = 0 \tag{1.48}$$

e $$U = Z^{-1} B^T . P \tag{1.49}$$

Comumente, nas literaturas de controle, a utilização da matriz "P(t)" se faz do modo seguinte, onde:

$$P = K.X \tag{1.50}$$

onde "K" é u'a matriz na ordem do vetor "X", geralmente não variante.

Deste modo:

$$U = -Z^{-1} B^T [KX]$$

ou

$$U = \Gamma X \tag{1.51}$$

onde $\Gamma = -Z^{-1} B^T K$

Como a solução da equação (1.51) consiste na solução homogênea, a generalização, com a introdução das entradas externas, fornece:

$$U = r \pm \Gamma X$$

Considerando-se nulas as entradas externas e sendo utilizado a realimentação negativa, volta-se a equação (1.51).

Voltando-se a equação 1.50, e derivando-a, vem:

$$\dot{P} = K\dot{X} + \dot{K}X \tag{1.52}$$

Levando o valor de "$\dot{P}$" da equação (1.52) na equação (1.43), obtém-se:

$$K\dot{X} + \dot{K}X + QX + A^T P = 0$$

ou

$$K[AX+BU] + \dot{K}X + QX + A^T P = 0$$

$$\dot{K}X + KAX + KBU + QX + A^T P = 0 \tag{1.53}$$

Considerando que a matriz "K" seja invariante no tempo, $\dot{K}=0$, e também trazendo os vetores de "U", equação (1.51); e "P", equação (1.50), obtém se finalmente a "equação matricial de Riccati" que permite a obtenção da matriz de realimentação para o sistema, condicionado ao controle ótimo deste.

$$KA+A^TK+Q-KBZ^{-1}B^TK = 0 \qquad (1.54)$$

Caso $\dot{K}\neq 0$, vem:

$$\dot{K}+KA+A^TK+Q-KBZ^{-1}B^TK = 0 \qquad (1.55)$$

A solução da equação (1.55) deverá ser obtida por intermédio de recursos computacionais.

No próximo capítulo serão aplicados todos os conceitos vistos aqui com a extensão dos mesmos ao âmbito dos recursos vinculados à técnicas de discretização por processos iterativos de solução.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO DO MODELO DISCRETO ÀS TÉCNICAS DO CONTROLE MODERNO APLICADO AO MÉTODO DA REALIMENTAÇÃO DE ESTADO

2.1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia dentro do campo da computação digital as implementações relativas ao esboço e ao estudo dos sistemas autocontrolados penderam para as representações discretizadas fazendo emergir uma série de opções em termos de modelagem e de análise.
Como, naturalmente, o conhecimento do modelo contínuo parece ser o passo inicial para a concretização da idéia, a grande dificuldade, ou impecílho natural, fica amarrada na definição de métodos que possibilitem a transformação; processo que permitirá a criação do modelo discreto sobre o qual se assentarão as análises.
Tomando como base aquilo que foi descrito no capítulo 1, quando foram apresentados alguns aspectos básicos da teoria do controle moderno com ênfase para o controle ótimo pela realimentação de estado, a resolução da equação de Riccati a nível computacional passa a ser a solução para o problema da minimização de um determinado índice de performance.
Para se atingir os objetivos até aqui enumerados será desenvolvido uma teoria básica relativa as técnicas de discretização seguidas de soluções iterativas das quais sairá a solução para o problema enfocado.

2.2. SISTEMAS CONTÍNUOS E DISCRETOS

Seja a seguinte representação diagramática de um sistema linear, qualquer, onde se encontram representados os sinais de entrada e de saída; ver figura 2.1.

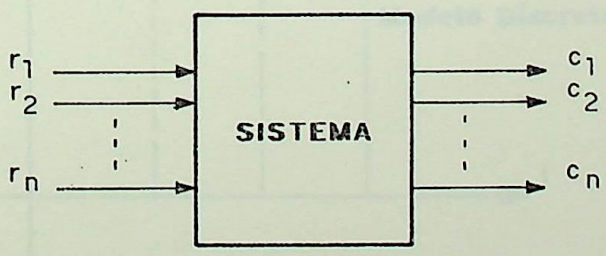


FIGURA 2.1

Na figura 2.1 tem-se:

entradas $r_1(t)$, $r_2(t)$,..., $r_n(t)$
saídas $c_1(t)$, $c_2(t)$,..., $c_m(t)$

O diagrama representado na figura 2.1 trata-se de um modelo contínuo na variável "t", que indica a variável independente tempo.
Esta variável "t" pode ser representada de maneira discretizada em incrementos controláveis por uma constante apropriada, ou seja, obter-se-ia uma nova representação para o tempo que seria "KT" para K=0,±1,±2,... onde "T" representa o tamanho do incremento.
A escolha do tamanho do incremento, nas operações de discretização, é de suma importância para o bom desempenho operativo do modelo.
Deste modo, obedecendo-se as devidas limitações, qualquer modelo contínuo poderá ser representado pelo seu modelo discreto desde que a faixa de resposta do mesmo demonstre plena confiabilidade e plena validade se comparada com aquela resultante de atuação sobre o modelo real.

As figuras seguintes trazem representadas duas funções, uma, representativa do modelo contínuo, e outra, representativa do modelo discreto.

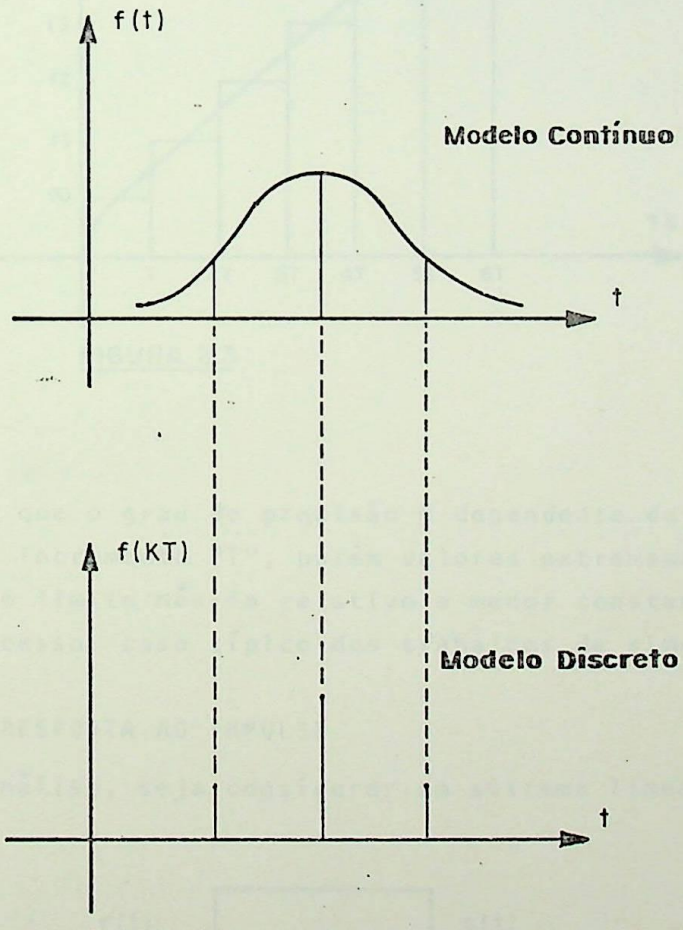


FIGURA 2.2

Supondo-se, no modelo descrito pela figura 2.1, que o sistema desenvolva um processo de integração. Assim, o resultado como resposta do sistema a uma entrada contínua será:

$$C(t) = \int_o^t r(\gamma).d\gamma \qquad (2.1)$$

Aplicando o processo de discretização à equação (2.1), tem-se:

para $t = KT$ c/ $K = 0, \pm 1, \pm 2., \ldots$ (2.2)

onde "T" é o incremento desejado,

obtém-se: $C(KT) = \int_o^{KT} r(\gamma).d\gamma \qquad (2.3)$

Colocando a equação (2.3) em termos de somatório, tem-se:

$$C(KT) = \sum_{n=0}^{K-1} T.r(nK) \qquad (2.4)$$

Como exemplo elucidante encontra-se representado, a seguir, o processo de discretização de uma função contínua.

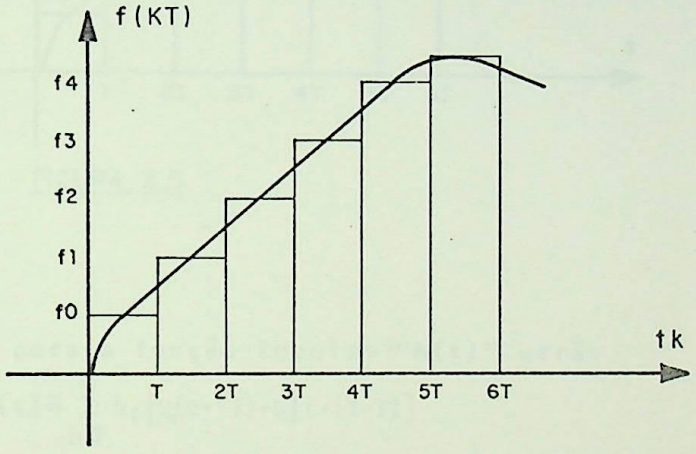


FIGURA 2.3

Convém lembrar que o grau de precisão é dependente da magnitude que se toma para o incremento "T", porém valores extremamente altos devem respeitar o limite máximo relativo a menor constante de tempo envolvida no processo: caso típico dos trabalhos de simulação.

2.3 MÉTODO DA RESPOSTA AO IMPULSO

Para a análise, seja considerar um sistema linear como na figura seguinte.

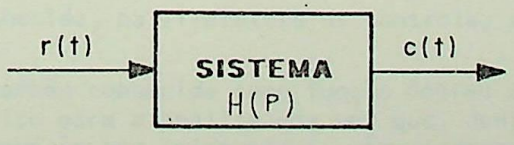


FIGURA 2.4

Considerando-se o modelo contínuo e a aplicação do processo da convolução, a resposta contínua de saída a uma excitação "r(t)" será:

$$C(t)=\int_o^t r(t-\gamma).h(\gamma).d\gamma \qquad (2.5)$$

onde $r(t-\gamma)$ representa o sinal de entrada, e

$h(\gamma)$ (*) representa a resposta do sistema ao impulso.

A resposta do sistema, enfocado, ao impulso "h(t)" pode ser representado como na figura seguinte:

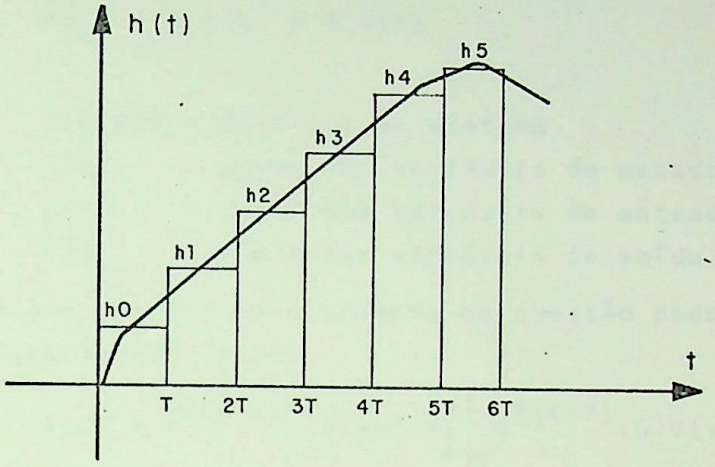


FIGURA 2.5

A aproximação para a função impulso "h(t)" será:

$$h(t)\cong \sum_{i=0}^{n} h_i\,[U_1(t-iT)-U_1(t-iT-T)] \qquad (2.6)$$

P/ $t\geq iT$

e

$$U_1(t)=\begin{cases}1 & P/\ t\geq 0\\ o & P/\ t<0\end{cases} \quad (**)$$

Substituindo-se a expressão de "h(t)", da equação (2.6), na expressão de "C(t)", da equação (2.5), vem:

$$C(t)=\int_o^t r(t-\gamma)\sum_{i=0}^{n} h_i\,[U_1(\gamma-iT)-U_1(\gamma-iT-T)]\,d\gamma$$

para $t = KT$

obtém-se

$$C(KT)=\int_o^{KT} r(KT-\gamma)\sum_{i=0}^{n} h_i\,[U_1(\gamma-iT)-U_1(\gamma-iT-T)]\,d\gamma \qquad (2.7)$$

---

*h(γ) é também conhecida, na literatura de controle, como função peso do sistema considerado.

** A função $U_1(t)$ é também conhecida como função degrau unitário representando aqui um aspecto prático para a análise uma vez que, dentro do rigor matemético, outros aspectos deverão ser salientados, não sendo estes importantes neste texto.

Como $[U_1(\gamma - iT) - U_1(\gamma - iT - T)] = 1$ p/ $iT \leq \gamma \leq (i+1)T$

$$C(KT) = \sum_{i=0}^{n} hi \cdot \int_{iT}^{iT+T} r(KT-\gamma)\, d\gamma \qquad (2.8)$$

2.4 DISCRETIZAÇÃO DE VARIÁVEIS DE ESTADO

Assim como foi visto anteriormente para outras funções, o processo de discretização também é válido para os modelos na forma canônica de variáveis de estado.

Seja o sistema contínuo, linear e de coeficientes constantes descrito pelas equações de estado seguintes:

$$\dot{X}(t) = F.X(t) + G.U(t) \qquad (2.9.A)$$

$$Y(t) = C.X(t) + D.U(t) \qquad (2.9.B)$$

onde:

F,G,C,D - matrizes do sistema
X(t) - vetor das variáveis de estado
U(t) - vetor das variáveis de entrada
Y(t) - vetor das variáveis de saída

As trajetórias geradas pelo sistema em questão podem ser dadas pela seguinte equação matricial:

$$X(t) = e^{F(t-to)}.X(to) + \int_{to}^{t} e^{F(t-\gamma)}.G.U(\gamma).d\gamma \qquad (2.10)$$

onde: e^{Ft} é a matriz de transição do sistema,
e
to é o tempo de partida.

Considerando a excitação "U(γ)" constante num intervalo de tempo onde

$$to \leq t \leq t1$$

tem-se que:

$$U(t) = U(KT) \qquad (2.11)$$

e

$$KT \leq t \leq (K+1)T$$

Assim pode-se concluir que:

$$to = KT \qquad (2.12.A)$$

$$t = (K+1)T \qquad (2.12.B)$$

$$\Delta t = T \qquad (2.12.C)$$

Através das equações (2.12) a equação (2.10) poderá ser reescrita como se - guinte:

$$X[(K+1)T] = e^{FT}.X(KT) + \int_{KT}^{(K+1)T} e^{F[(K+1)T-\gamma]}.G.U(\gamma).d\gamma \qquad (2.13)$$

Como o vetor das variáveis de entrada "U(γ)" depende apenas da iteração, pode-se representá-lo por "U(KT)" na condição discreta.
Deste modo a equação (2.13) ficará como seguinte:

$$X[(K+1)T] = e^{FT}.X(KT) + \{\int_{KT}^{(K+1)T} e^{F[(K+1)T-\gamma]}.G.d\gamma\}U(KT) \qquad (2.14)$$

A partir daqui deve-se introduzir uma nova mudança de variável como seguinte:

$$t = (K+1)T-\gamma \qquad (2.15.A)$$

$$(K+1)T = t+\gamma \qquad (2.15.B)$$

$$KT = t+\gamma-T \qquad (2.15.C)$$

Chamando de "I" a segunda parcela do segundo membro da equação (2.14) tem-se:

$$I = \int_{KT}^{(K+1)T} e^{F[(K+1)T-\gamma]}.G.d\gamma \qquad (2.16)$$

Através da mudança de variável expressa pelas equações (2.15) a equação (2.16) ficará como seguinte:

$$I = \int_{t+\gamma-T}^{t+\gamma} e^{Ft}.G.d\gamma = \int_{o}^{T} e^{F\gamma}.G.d\gamma$$

$$I = \int_{o}^{T} e^{F\gamma}.G.d\gamma \qquad (2.17)$$

Através da equação (2.17), a equação (2.14) poderá ser reescrita como seguinte:

$$X[(K+1)T] = e^{FT}.X(KT) + \{\int_{o}^{T} e^{F\gamma}.G.d\gamma\}U(KT) \qquad (2.18)$$

Finalmente a equação (2.18) poderá ser escrita de maneira sintética, ou seja:

$$X[(K+1)T] = A(T).X(KT) + B(T).U(KT) \qquad (2.19)$$

com

$$A(T) = e^{FT} \qquad (2.20)$$

$$B(T) = \{\int_{o}^{T} e^{F\gamma}.d\gamma\}.G \qquad (2.21)$$

Dentro do mesmo raciocínio, o processo de discretização poderá ser aplicado à equação (2.9.B) de maneira direta como seguinte:

$$Y(KT) = C.X(KT) + D.U(KT) \qquad (2.22)$$

Portanto, utilizando-se das técnicas da discretização apresentadas, foi possível transformar um sistema contínuo, regido pelas equações (2.9), em sua forma canônica, em um sistema discretizado regido pelas equações (2.19) e (2.22) também na forma canônica.
É importante salientar a não linearidade da transformação: preço pago às facilidades de manuseio com os métodos iterativos aplicados.

2.5 APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE CUSTO PARA O CONTROLE ÓTIMO

Como já foi recapitulado no capítulo precedente, a definição de

um índice de custo garantiu a obtenção de recursos com os quais o grau de desempenho operativo de um sistema autocontrolado pode ser mensurado.

"D'Azzo-Houpis" estudaram diferentes formas aplicadas para a definição do índice de custo a ser utilizado no processo de estudo do controle moderno. Como já se sabe, o enfoque do presente trabalho se dirige a utilização para a minimização de um determinado índice de custo relacionado com a implementação das conclusões do cálculo variacional.

Assim como foi apresentado no capítulo prévio também aqui será utilizado um índice de custo no qual estão embutidos os efeitos físicos descritos no item 1.4.

A definição do "hamiltoniano" para o estudo do controle ótimo aplicado a condição específica de realimentação de estado vem ligada com as técnicas do procedimento dos mínimos de "Pontryagin".

Segundo "Cadzow-Martins" a definição do "hamiltoniano" pode ser expressa pela seguinte relação já na forma discretizada:

$$H(K)=\frac{1}{2}X^T(K).Q.X(K)+\frac{1}{2}U^T(K).Z.U(K)+P^T(K+1).[A.X(K)+B.U(K)-X(K+1)] \quad (2.23)$$

Analisando a relação proposta para o hamiltoniano contínuo, equação (1.41), e aquela proposta para a hamiltoniano discretizado, equação (2.23), pode-se verificar a semelhança entre ambos.

Portanto o índice de performance será:

$$IP = \sum_{K=0}^{n} H(K) \quad (2.24)$$

Assim, através do processo de minimização do índice de performance ditado pela equação (2.24), implementa-se a otimização operativa para o sistema contínuo original, regido pelas equações (2.9), com a realimentação de estado segundo graus de penalização que deverão ser controlados através da escolha adequada das matrizes "Q" e "Z" (*).

As condições básicas a serem obedecidas para que se tenha garantido os objetivos de minimização do índice de performance, definido pela equação (2.24), podem ser descritas pelas seguintes formulações:

$$\frac{\partial H(K)}{\partial P} = 0 = A.X(K) + B.U(K) - X(K+1) \quad (2.24.A)$$

$$\frac{\partial H(K)}{\partial X} = P(K) = Q.X(K) + A^T.P(K+1) \quad (2.24.B)$$

$$\frac{\partial H(K)}{\partial U} = Z.U(K) + B^T.P(K+1) = 0 \quad (2.24.C)$$

$$P/\ K = 0,1,2,\ldots,n-1$$

Assim, pode-se escrever as seguintes relações:

---

*A implementação das técnicas de discretização também podem ser utilizadas diretamente quando se trabalha com a transformação "Z". No presente trabalho utiliza-se apenas os resultados voltando, posteriormente, ao domínio da transformação de Laplace e, daí, para o tempo.

$$P(K) = Q.X(K) + A^{T}.P(K+1) \qquad (2.25.A)$$

$$X(K+1) = A.X(K) + B.U(K) \qquad (2.25.B)$$

$$U(K) = -Z^{-1}.B^{T}.P(K+1) \qquad (2.25.C)$$

$$P/\ K = 0,1,2,\ldots,n-1$$

Substituindo-se o valor "U(K)", da equação (2.25.C), na equação (2.25.B) vem:

$$X(K+1) = A.X(K) - B.Z^{-1}.B^{T}.P(K+1) \qquad (2.26)$$

A relação entre o multiplicador de Lagrange "P" e o vetor de estado "X" pode ser descrito do seguinte modo:

$$P(K) = K(K).X(K) \qquad (2.27)$$

Igualando-se as equações (2.25.A) e (2.27), vem:

$$K(K).X(K) = Q.X(K) + A^{T}.P(K+1) \qquad (2.28)$$

Mas pela equação (2.27) obtém-se que:

$$P(K+1) = K(K+1).X(K+1) \qquad (2.29)$$

Substituindo-se o valor "P(K+1)", da equação (2.29), na equação (2.28), vem:

$$K(K).X(K) = Q.X(K) + A^{T}.K(K+1).X(K+1) \qquad (2.30)$$

e

$$X(K+1) = A.X(K) - B.Z^{-1}.B^{T}.K(K+1).X(K+1) \qquad (2.31)$$

Da equação (2.31) isola-se o vetor "X(K+1)", ou então:

$$X(K+1) = [I + B.Z^{-1}.B^{T}.K(K+1)]^{-1}.A.X(K) \qquad (2.32)$$

Levando-se o valor "X(K+1)", da equação (2.32), na equação (2.30), vem:

$$K(K).X(K) = Q.X(K) + A^{T}.K(K+1).[I+B.Z^{-1}B^{T}.K(K+1)]^{-1}.\ A.X(K)$$

Eliminando-se o vetor variável de estado "X(K)", finalmente, vem:

$$K(K) = Q + A^{T}.K(K+1).[I+B.Z^{-1}.B^{T}.K(K+1)]^{-1}.A \qquad (2.33)$$

A equação (2.33), conhecida como equação matricial de Riccati, consiste na relação iterativa para obtenção da matriz "K", conhecida como matriz de Riccati, que reúne os elementos básicos para obtenção da matriz de realimentação de estado visando a concretização do controle ótimo.

De posse da matriz "K", de Riccati, pode-se então implementar o procedimento matemático para determinação da matriz de realimentação de estado segundo critério seguinte.

Da equação (2.25.A) extrai-se o valor de "P(K+1)", senão veja:

$$P(K+1) = [A^{T}]^{-1}.[P(K)-Q.X(K)] \qquad (2.34)$$

Levando-se o valor de "P(K+1)", da equação (2.34), na equação (2.25.C), vem:

$$U(K) = -Z^{-1}.B^{T}.[A^{T}]^{-1}.[P(K)-Q.X(K)] \qquad (2.35)$$

Levando-se o valor de "P(K)", da equação (2.27), na equação (2.35), vem:

$$U(K) = -Z^{-1}.B^{T}.[A^{T}]^{-1}.[K(K)-Q].X(K) \qquad (2.36)$$

Assim, a equação (2.36) reúne, a partir da determinação da matriz "K" de Riccati, os elementos que garantem o controle ótimo via realimentação de estado.

A matriz que define a lei da realimentação será representada como sendo "Γ", ou melhor:

$$U(K) = \Gamma(K).X(K) \qquad (2.37)$$

e

$$\Gamma(K) = -Z^{-1}.B^{T}.[A^{T}]^{-1}.[K(K)-Q] \qquad (2.38)$$

A matriz "Γ(K)", como foi mencionado previamente, dita a lei do controle ótimo via realimentação de estado para o sistema discretizado regido pelas equações (2.19) e (2.22), porém a conversão ao sistema contínuo não sofre alteração. Assim, dentro da condição real, quando os aspectos contínuos são os fatos palpáveis, pode-se definir a matriz de realimentação de estado Γ(t) como sendo:

$$\Gamma(t) = -Z^{-1}.B^{T}.[A^{T}]^{-1}.[K(K)-Q] \qquad (2.39)$$

O procedimento iterativo, utilizado para a computação digital da matriz "K" de Riccati , terá seu sucesso garantido quando se partir de condições iniciais favoráveis. Portanto, o cálculo computacional, dependendo da escolha inicial da matriz "K(K+1)", pode ocasionar problemas ou de "underflow" ou mesmo de "overflow" (*) para o sistema de processamento.

A escolha das matrizes de penalização também interferem decididamente no bom desempenho computacional. Assim a escolha das matrizes "Q" e "Z" são de extrema importância.

Geralmente estas matrizes são escolhidas na forma diagonal unitária, ou seja:

$$Q = \text{diag}\{1\} \qquad (2.40)$$

e

$$Z = \text{diag}\{1\} \qquad (2.41)$$

Apesar da forma diagonal unitária ser a básica, na maioria dos casos esta condição não satisfaz as exigências de estabilidade do sistema, uma vez que para cada escolha da matriz "Q", por exemplo, sendo "Z" fixa, seriam encontradas distintas matrizes "K", tantas quantas as implementações realizadas.

Existem vários critérios que permitem contornar o problema, mas o que mais se mostra viável seria o da experiência que mostraria uma boa estimação para definição das condições iniciais.

Para se saber se a direção tomada coincide com aquela que conduzirá

---

*Normalmente, como o processo é iterativo, corre-se o perigo de se deparar com matrizes sigulares ou com números bem pequenos ou bem grandes o que não permitiria a execução das operações normais.

à solução do problema o melhor critério, e também o mais seguro, seria a monitoração dos autovalores relativos a matriz "F", ou matriz da planta do modelo contínuo, equação(2.9.A).
Evidentemente que, para um sistema prático, pelas faixas operativas, e mesmo pelos ajustes de campo, muitas vezes, sem ter se submetido a qualquer processo de otimização, o aparecimento de algum autovalor com parte real positiva, apesar de confirmado, não tiraria a aparente estabilidade vigente devido a erros de modelagem.
Deste modo, a verificação deste condicionante é imperativa e deve ser encarada como condição indispensável e mínima na predominância da estabilidade do modelo em discussão.
A condição inicial, considerando-se o modelo original e contínuo sem aplicação dos procedimentos do controle ótimo, forneceria a seguinte equação característica:

$$|F-\lambda.I| = 0 \qquad (2.42)$$

Após a utilização dos procedimentos propostos para a obtenção do controle ótimo via realimentação de estado, pelas representações anteriores, ter-se-ia:

$$|F'-\lambda I| = 0 \qquad (2.43)$$

onde $F'=F-B.\Gamma$

Em todos os casos é condição básica de estabilidade se ter, para o conjunto de autovalores $\{\lambda_i\}$, $i= 1,2,\ldots,n$, sendo "n" o grau do polinômio característico:

$$\text{Real}\ \{\lambda_i\}<0 \text{P/}\ i=1,2,3,\ldots,n \qquad (2.44)$$

A aplicação do critério da sensibilidade ditada pela variação da matriz "Q" com relação ao valor da parte real do autovalor predominante também seria uma sugestão para a implementação desta matriz "Q".
Mesmo a escolha da matriz "K" inicial deve ser tal que se consiga uma realimentação cuja matriz force o sistema a apresentar todos os autovalores com parte real negativa.

Para o trabalho em questão, a subrotina "RICCATI" resolve a equação matricial(2.33) e computa os valores da matriz de realimentação de estado "$\Gamma(t)$", ver apêndice 2-A.
A subrotina "EIGVAL" resolve a equação característica, para u'a matriz qualquer e computa os autovalores desta matriz; ver apêndice 2-A.

2.6 PROCEDIMENTO MATEMÁTICO PARA OBTENÇÃO DAS MATRIZES DISCRETIZADAS A(T) E B(T) VIA COMPUTAÇÃO DIGITAL

Como já foi demonstrado nos tópicos precedentes, graças a um manuseio algébrico, o processo de discretização das matrizes "F" e"G", do modelo da planta (*), contínuo, se mostrou possível.

---

*Reportar as equações(2.9).

As fórmulas recursivas ditadas pelas equações (2.19) e (2.22) garantem a transformação desejada que, de forma funcional, pode ser resumida como seguinte:

Modelo Contínuo	Modelo Discretizado
F	$A(T) = e^{FT}$
G	$B(T) = \{\int_0^T e^{FY}.dY\}.G$

Apesar de tudo, em termos computacionais, estas fórmulas não apresentam significação para cálculo numérico ou iterativo, pois ainda pertencem ao campo da matemática contínua. Existem, na literatura comum do cálculo numérico, uma grande variedade de métodos para solução de problemas semelhantes aos que se antevêm acima do caso presente, porém foram escolhidos dois procedimentos que exploram recursos ligados a expansão em série.

O primeiro procedimento é conhecido como "método de Liou". Aqui a matriz "A" é expressa por intermédio de uma série infinita segundo o desenvolvimento em série de Mac Laurin.

Assim pode-se escrever:

$$A = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{F^i T^i}{i!} \tag{2.45}$$

Caso o truncamento da série descrita pela equação (2.45) ocorra em i = L tem-se:

$$A = \sum_{i=0}^{L} \frac{F^i T^i}{i!} + R \tag{2.46}$$

onde R é o erro de truncamento.

Igualando as duas equações (2.45) e (2.46) tem-se que:

$$R = \sum_{i=L+1}^{\infty} \frac{F^i T^i}{i!} \tag{2.47}$$

A definição dos limites do erro de truncamento é representado pela seguinte relação, tomando-se um valor para o parâmetro d:

$$[r_{hj}] \leq 10^{-d}.[m_{hj}] \quad c/\ h = 1,2,3,\ldots,n \quad j = 1,2,3,\ldots,n \tag{2.48}$$

sendo

r_{hj} os elementos da matriz $R = \sum_{i=L+1}^{\infty} \frac{F^i T^i}{i!}$

e

m_{hj} os elementos da matriz $M = \sum_{i=0}^{L} \frac{F^i T^i}{i!}$ (2.49)

Para uma boa receptividade é necessário que se obedeça, pelo menos, a seguinte relação:

$$[r_{hj}] = R \quad c/\ h = 1,2,3,\ldots,n \quad j = 1,2,3,\ldots,n \tag{2.50}$$

Considerando agora a definição de "relação de convergência", que foi

extraída da literatura inerente ao estudo das séries matemáticas, pode-se escrever para a série expressa pela equação 2.45, truncada em i=L, que:

$$\delta = \frac{\left|\frac{F^{L+2}\ T^{L+2}}{(L+2)!}\right|}{\left|\frac{F^{L+1}\ T^{L+1}}{(L+1)!}\right|} \qquad (2.51)$$

ou melhor

$$\delta = \frac{\left|\frac{F^{L+2}}{F^{L+1}}\ T\right|}{\left|L+2\right|} \qquad (2.52)$$

A equação (2.52) foi resultado da aplicação do conceito de "relação de convergência" para uma série qualquer. Este conceito determina que para uma série qualquer, do tipo $\sum_{K=0}^{\infty} Z_k$, numa condição bem generalizada, a relação entre dois termos consecutivos, para um valor bem elevado de "K", sendo inferior a um valor "N", com N<1, determinará a convergência da mesma, caso contrário, quando N>1, ficará determinada a divergência da série; ou melhor:

$$\delta = \lim_{K\to\infty} \left|\frac{Z_{k+1}}{Z_k}\right| \qquad (2.53)$$

. para haver convergência $\delta<N$

. haverá divergência se $\delta>N$

Na equação (2.52), para a definição da relação matricial $|F^{L+2}/F^{L+1}|$ torna-se necessário lançar mão do conceito de métrica da matriz "F" também conhecida como norma da matriz "F" e definida como:

$$\|F\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} f_{ij}^2} \quad (*) \qquad (2.54)$$

onde "f_{ij}" é o elemento "i", "j" da matriz "F".

A partir do conceito de norma, segundo o exposto, a equação (2.52) anterior ficará como seguinte:

$$\delta = \frac{T}{L+2}\ \frac{\|F^{L+2}\|}{\|F^{L+1}\|} \qquad (2.55)$$

Prova-se, matematicamente, que u'a matriz qualquer obedece a seguinte relação da norma euclideana:

$$\|F^i\| \leq \|F\|^i \qquad (2.56)$$

Com isto a equação (2.55) tomará o seguinte aspecto:

$$\delta \leq \frac{T}{L+2}\ \frac{\|F\|^{L+2}}{\|F\|^{L+1}}$$

---

*Existem várias definições de norma, porém aqui utilizou-se o conceito da norma euclideana.

ou

$$\delta = \frac{T}{L+2} \|F\| \tag{2.57}$$

Assim, pela equação (2.50) pode-se escrever que:

$$[r_{hj}] = \sum_{i=L+1}^{\infty} \frac{F^i T^i}{i!} \tag{2.58}$$

Utilizando-se o conceito de norma euclideana para a matriz "F", vem:

$$[r_{hj}] \leq \sum_{i=L+1}^{\infty} \frac{\|F\|^i T^i}{i!} \tag{2.59}$$

Desenvolvendo-se a equação (2.59) vem:

$$[r_{hj}] \leq \frac{\|F\|^{L+1} . T^{L+1}}{(L+1)!} + \frac{\|F\|^{L+2} . T^{L+2}}{(L+2)!} + \frac{\|F\|^{L+3} T^{L+3}}{(L+3)!} + \ldots$$

ou melhor

$$[r_{hj}] \leq \frac{\|F\|^{L+1} T^{L+1}}{(L+1)!} \left(1 + \frac{\|F\| . T}{L+2} + \frac{\|F\|^2 . T^2}{(L+2)(L+3)} + \ldots\right) \tag{2.60}$$

Considerano o máximo valor para "δ", na equação (2.57), tem-se:

$$\delta = \frac{T}{L+2} \|F\| \tag{2.61}$$

Na pior das hipóteses pode-se considerar as seguintes aproximações sem perda da precisão:

$$\delta^2 = \frac{\|F\|^2 . T^2}{(L+2)(L+3)}$$

$$\delta^3 = \frac{\|F\|^3 . T^3}{(L+2)(L+3)(L+4)}$$

Em resumo, a equação (2.60) ficaria do seguinte modo:

$$[r_{hj}] \leq \frac{\|F\|^{L+1} . T^{L+1}}{(L+1)!} (1+\delta+\delta^2+\delta^3+\ldots) \tag{2.62}$$

Mas

$$\frac{1}{1-\delta} \cong 1 + \delta + \delta^2 + \delta^3 + \ldots \text{ para } -1<\delta<1 \tag{2.63}$$

Deste modo, finalmente, pode-se reescrever a equação (2.62) do seguinte modo:

$$[r_{hj}] \leq \frac{\|F\|^{L+1} . T^{L+1}}{(L+1)!} \frac{1}{1-\delta} \quad \begin{matrix} c/\ h = 1,2,3,\ldots n \\ j = 1,2,3,\ldots n \end{matrix} \tag{2.64}$$

Assim, o procedimento para a obtenção numérica da matriz "A(T)" pode ser resumido num algoritmo composto dos seguintes passos:

1 - Escolher os valores para "L" e para "d"; equação 2.48.
2 - Calcular os elementos da matriz "M" .
3 - Determinar o valor de "δ"; equação (2.57).
4 - Encontrar o limite máximo para os valores dos elementos da

matriz "R"; equação (2.64).

5 - Calcular os elementos da matriz "R", agora pela equação (2.48).

6 - Comparar todos elementos encontrados para a matriz "R", do passo número 5, com aqueles encontrados no passo número 4, nesta ordem.

7 - Sendo estes valores
- maiores: deve-se ir para o passo 8.
- menores: deve-se incrementar "L" e voltar ao passo número 2.

8 - Determinar os elementos da matriz "A"; equação (2.46).

Com este algoritmo consegue-se encontrar a matriz "A(T)" discretizada. Para a obtenção da matriz "B(T)" deve-se, primeiramente, resolver a integração da equação (2.21) que fornece a relação analítica para esta matriz.

Assim, procedendo-se a resolução proposta, vem:

$$B(T) = \{\int_0^T e^{FY}.dY\}.G = [e^{FT}-I].F^{-1}.G$$

$$B(T) = [e^{FT}-I].F^{-1}.G \qquad (2.65)$$

onde I é a matriz identidade.

Utilizando-se o desenvolvimento em série de Mac Laurin, segundo os mesmos princípios vistos para o cálculo da matriz "A(T)", anterior, vem:

$$B(T) = [\sum_{i=0}^{\infty} \frac{F^i T^i}{i!} - I].F^{-1}.G = T.\sum_{i=0}^{\infty} \frac{F^{i-1}.T^{i-1}}{i!} G - F^{-1}.G =$$

$$= T.F^{-1}.T^{-1}.G - F^{-1}.G + T.\sum_{i=1}^{\infty} \frac{F^{i-1}.T^{i-1}}{i!}.G =$$

$$= T.\sum_{i=1}^{\infty} \frac{F^{i-1}.T^{i-1}}{i!}.G$$

Procedendo-se a uma mudança de variável onde:

$$j = i-1 ,$$

para $i=1 \therefore j = 0$.

Assim a equação de "B(T)" tomará o seguinte aspecto:

$$B(T) = T.\sum_{j=0}^{\infty} \frac{F^j.T^j}{(j+1)!}.G \qquad (2.66)$$

Voltando-se a variável "i", original, vem:

$$B(T) = T.\sum_{i=0}^{\infty} \frac{F^i.T^i}{(i+1)!}.G \qquad (2.67)$$

A partir deste ponto deve-se, então, truncar a série em i=L e seguir os mesmos procedimentos utilizados na obtenção da matriz "A(T)".

O segundo procedimento é conhecido como "método de Hoppe". Tam

bém aqui se utiliza os recursos do desenvolvimento em série, porém promovendo o truncamento em um ponto onde o erro possa ser considerado desprezível.

Assim, pela equação (2.49), vem:

$$M = I+F.T.\left[I+\frac{F.T}{2}\left(I+\frac{F.T}{3}\left\{I+\frac{F.T}{4}+\ldots+\frac{F.T}{L-1}\left(I+\frac{F.T}{L}\right)\right\}\right)\right] \qquad (2.68)$$

Logo para a matriz "A(T)", obtém-se:

$$A(T)= I+ F.T\left[I+\frac{F.T}{2}\left(I+\frac{F.T}{3}\left\{I+\frac{F.T}{4}+\ldots+\frac{F.T}{L-1}\left(I+\frac{F.T}{L}\right)\right\}\right)\right] \qquad (2.69)$$

De modo similar, pode-se escrever para a matriz "B(T)", através da utilização da equação (2.67), que:

$$B(T)= T.\left[I+\frac{F.T}{2}\left(I+\frac{F.T}{3}\left\{I+\frac{F.T}{4}+\ldots+\frac{F.T}{L-1}\left(I+\frac{F.T}{L}\right)\right\}\right)\right] \qquad (2.70)$$

As equações (2.69) e (2.70) foram desenvolvidas buscando-se facilitar a implementação computacional.

A subrotina "MATDIS" computa as matrizes "A(T)" e "B(T)"; ver apêndice 2.A.

CAPÍTULO 3

DEFINIÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS

3.1 INTRODUÇÃO

A aplicação dos estudos abrangidos pelo presente trabalho vem de encontro ao fato da pesquisa, veiculada ao sistema elétrico de potência, introduzir sobre os sistemas de controle e de regulação as devidas modificações, ou mesmo adaptações, dependendo daquilo que melhor convier, resultado da própria investigação até aqui realizada.
Evidentemente que, para o bom andamento desta investigação, a definição do modelo para a representação do sistema parece como um fato patente e mais, o detalhamento básico e a precisão dos parâmetros são fatores que garantirão a confiabilidade da representação deste modelo.
Dentro deste espírito, a opção pela utilização de um modelo real se mostrou, até certo ponto, indispensável, enquanto que os levantamentos reais de parâmetros para os diferentes sistemas garantirão a precisão deste modelo.
Os modelos representativos dos sistemas de regulação de velocidade e de potência, de regulação de tensão e de estabilização (*) são, teoricamente, genéricos assim como os demais sistemas físicos caracterizados por máquinas síncronas, linhas de transmissão, banco de capacitores e cargas acopladas.
A finalidade da criação deste modelo genérico tem por objetivo permitir outros tipos de pesquisas além daquelas que compõem este trabalho de dissertação.
As representações de modelos, por mais complexos que sejam, serão sempre possíveis dentro das limitações e das implicações já definidas.
A escolha pela representação de uma instalação hidráulica geradora contra uma barra infinita deve-se ao fato dos resultados obtidos serem bastante representativos daquilo que ocorre, na realidade, no interior desta estação sem maiores preocupações com o sistema externo que poderia ser tema de futuros estudos para representações multimáquinas, fora do escopo deste trabalho.
Como o enfoque escolhido para o presente tema visa a boa caracterização da situação instalação, mesmo sendo um modelo simplificado, muitas informações básicas poderão ser extraídas a partir da definição do sistema que garantirá a manutenção da barra infinita, ou sejam,os

---

*Conhecido como sistema de sinais estabilizantes, sinais adicionais ou power system stabilizer, PSS, este sistema vem acoplado ao sistema de regulação de tensão e busca corrigir o baixo amortecimento introduzido no sistema de controle.

equivalentes das interligações e o local da consideração da barra final são flexíveis.

Nos itens seguintes serão apresentados os modelos com seus equacionamentos básicos.

3.2 MODELO TÍPICO PARA REPRESENTAÇÃO DE U'A MÁQUINA SÍNCRONA ACOPLADA A UM BARRAMENTO INFINITO

Este modelo se caracteriza pelas simplificações relativas às considerações gerais inerentes ao modelo completo apresentado por "Anderson & Fouad" resultantes da aplicação das técnicas das trans - formações de Park (*).

Este modelo apresenta as seguintes características:

. desconsideração dos efeitos transformadores para o modelo de máquina síncrona de eixos direto e em quadratura, de Park;

. desconsideração dos enrolamentos amortecedores da máquina síncrona;

. desconsideração da resistência do enrolamento do estator;

. consideração da condição equilibrada nas transformações de Park;

. consideração dos efeitos da saturação;

. consideração de admitâncias shunt na barra terminal do gerador.

A figura 3.1 representa o esquema simplificado de u'a máquina síncrona acoplada a um barramento infinito considerando-se a presença de uma admitância shunt.

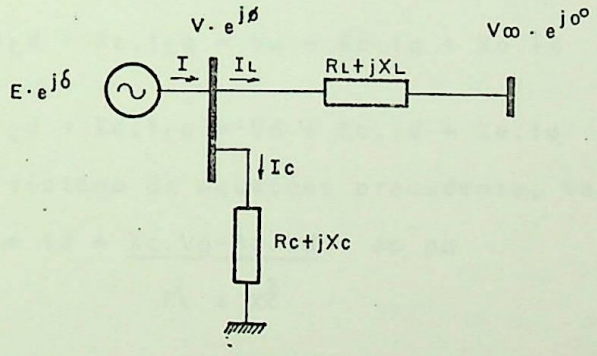


FIGURA 3.1

Na figura 3.1 tem-se:

δ - ângulo da f.e.m. da máquina síncrona;
$Z_L = R_L + jX_L$ - impedância equivalente das LTs em paralelo;
$Z_c = R_c + jX_c$ - impedância equivalente shunt total em paralelo.

Considerando a tensão para o barramento infinito como sendo trifási-

*Ver referência, Livro [1].

ca, equilibrada, de amplitude máxima "V∞" e com um ângulo fasorial "α" em relação a um referencial qualquer, tem-se, para as tensões nas fases do barramento, pela transformação de Park (*), que:

$$v_\infty = \sqrt{3}.\ V_\infty \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\delta-\alpha) \\ \cos(\delta-\alpha) \end{bmatrix} \quad \text{em pu} \qquad (3.1)$$

Com relação aos eixos "d" e "q", segundo as transformações de Park, as tensões no barramento de saída da máquina são dadas pelas seguintes equações, (**) valores eficazes:

$$Vd = -V_\infty.\sin(\delta-\alpha) + R_L.I_Ld + X_L.I_Lq \qquad (3.2.A)$$

e

$$Vq = V_\infty.\cos(\delta-\alpha) + R_L.I_Lq - X_L.I_Ld \qquad (3.2.B)$$

Para a impedância shunt pode-se equacionar o seguinte:

$$Vq + j.Vd = Zc.Ic$$

ou $$Vq + j.Vd = (I-I_L).Rc + j.(I-I_L).Xc$$

ou ainda

$$Vq + j.Vd = (Iq - I_Lq).Rc + j(Id - I_Ld).Rc + j.(Iq - I_Lq).Xc - (Id - I_Ld).Xc \qquad (3.3)$$

Separando-se as partes real e imaginária da equação (3.3), vem:

$$Vq = (Iq-I_Lq).Rc - (Id-I_Ld).Xc \qquad (3.4.A)$$

e

$$Vd = (Id-I_Ld).Rc + (Iq-I_Lq).Xc \qquad (3.4.B)$$

Separando-se, conveniente, as equações (3.4.A) e (3.4.B), vem:

$$Xc.I_Ld - Rc.I_Lq = Vq - Rc\ Iq + Xc.Id \qquad (3.5.A)$$

e

$$Rc.I_Ld + Xc.I_Lq = -Vd + Rc.Id + Xc.Iq \qquad (3.5.B)$$

Resolvendo-se o sistema de equações precedente, vem:

$$I_Ld = Id + \frac{Xc.Vq - Rc.Vd}{Rc^2 + Xc^2} \quad \text{em pu} \qquad (3.6.A)$$

e

$$I_Lq = Iq - \frac{Rc.Vq + Xc.Vd}{Rc^2 + Xc^2} \quad \text{em pu} \qquad (3.6.B)$$

Levando-se os valores de "I_Ld" e "I_Lq", das equações (3.6), nas equa -

---

*A transformação aqui utilizada não se trata da transformação original apresentada por Park, mas sim a transformação modificada de Park, apresentada por "Anderson & Fouad", que mantém invariante a potência. Ver referência Anderson & Fouad.

**Notar que para a LT XLd = XLq = X_L uma vez que estes parâmetros independem da posição dos eixos na transformação de Park.

ções (3.2), vem:

$$Vd = -V_\infty . \sin(\delta-\alpha) + R_L\left(Id + \frac{Xc.Vq - Rc.Vd}{R_c^2 + X_c^2}\right) + X_L.\left(Iq - \frac{Rc.Vq + Xc.Vd}{R_c^2 + X_c^2}\right)$$

e

$$Vq = V_\infty . \cos(\delta-\alpha) + R_L.\left(Iq - \frac{Rc.Vq + Xc.Vd}{R_c^2 + X_c^2}\right) - X_L\left(Id + \frac{Xc.Vq - Rc.Vd}{R_c^2 + X_c^2}\right)$$

Separando-se de modo conveniente, vem:

$$Vd\left(1 + \frac{R_L.Rc + X_L.Xc}{R_c^2 + X_c^2}\right) + Vq\left(\frac{Rc.X_L - R_L.Xc}{R_c^2 + X_c^2}\right) = -V_\infty . \sin(\delta-\alpha) + R_L.Id + X_L.Iq$$

e

$$Vd\left(\frac{R_L.Xc - Rc.X_L}{R_c^2 + X_c^2}\right) + Vq\left(1 + \frac{R_L.Rc + X_L.Xc}{R_c^2 + X_c^2}\right) = V_\infty . \cos(\delta-\alpha) + R_L.Iq - X_L.Id$$

ou melhor:

$$Vd.\lambda_1 - Vq.\lambda_2 = -V_\infty . \sin(\delta-\alpha) + R_L.Id + X_L.Iq \qquad (3.7.A)$$

e

$$Vd.\lambda_2 + Vq.\lambda_1 = V_\infty . \cos(\delta-\alpha) + R_L.Iq - X_L.Id \qquad (3.7.B)$$

onde: $\lambda_1 = 1 + \frac{R_L.Rc + X_L.Xc}{R_c^2 + X_c^2}$,

$$\lambda_2 = \frac{R_L.Xc - Rc.X_L}{R_c^2 + X_c^2}$$

Considerando-se as equações que enxergam da barra terminal para dentro da máquina, desprezando-se os enrolamentos amortecedores, segundo a transformação de Park, vem:

$$Vd = -r.Id - Xq.Iq \quad \text{em pu} \qquad (3.8.A)$$

e

$$Vq = -r.Iq + Xd.Id + LAD.I_F \quad \text{em pu} \qquad (3.8.B)$$

onde "r" é a resistência do estator, e

"LAD" é a indutância mútua entre rotor e estator e em pu XAD=LAD.

Substituindo-se os valores de "Vd" e "Vq", das equações (3.8), nas equações (3.7), e agrupando, convenientemente, as parcelas, vem:

$$\lambda_2.E = V_\infty . \sin(\delta-\alpha) - (R_L + \lambda_1.r + \lambda_2.Xd)Id - (X_L + \lambda_1.Xq - \lambda_2.r)Iq \qquad (3.9.A)$$

e

$$\lambda_1.E = V_\infty . \cos(\delta-\alpha) - (X_L + \lambda_1.Xd - \lambda_2.r)Id + (R_L + \lambda_1.r + \lambda_2.Xq)Iq \qquad (3.9.B)$$

onde

$$\overset{\Delta}{E} = LAD.I_F \quad \text{em pu} \qquad (3.9.C)$$

Considerando-se, nas equações anteriores, os termos diferenciados(*) seguintes, vem:

$$E = \Delta E + E0 \quad \text{em pu} \qquad (3.10.A)$$

$$Id = \Delta Id + Id0 \quad \text{em pu} \qquad (3.10.B)$$

$$Iq = \Delta Iq + Iq0 \quad \text{em pu} \qquad (3.10.C)$$

---

*Não confundir o termo "diferencial" com o termo derivativo; o primeiro representa um desvio sobre um valor fixo, o segundo está associado a função derivada.

$$\delta = \Delta\delta + \delta 0 \qquad \text{em rad} \quad (**) \qquad (3.10.D)$$

Substituindo-se as equações (3.10) nas equações (3.9), vem:

$$\lambda_2(\Delta E+E0) = V_\infty.\sin(\Delta\delta+\delta-\alpha) - (R_L+\lambda_1.r+\lambda_2 Xd)(\Delta Id+Id0) - (X_L+\lambda_1 Xq-\lambda_2 r)(\Delta Iq+Iq0) \qquad (3.11.A)$$

e

$$\lambda_1(\Delta E+E0) = V_\infty.\cos(\Delta\delta+\delta0-\alpha) - (X_L+\lambda_1.Xd-\lambda_2 r)(\Delta Id+Id0) - (R_L+\lambda_1 r+\lambda_2 Xq)(\Delta Iq+Iq0) \qquad (3.11.B)$$

Utilizando-se das seguintes identidades, válidas para pequenas variações do ângulo "δ" , vem:

$$\sin[(\delta0-\alpha) + \Delta\delta] = \sin(\delta0-\alpha) + \cos(\delta0-\alpha).\Delta\delta$$
$$\cos[(\delta0-\alpha) + \Delta\delta] = \cos(\delta0-\alpha) - \sin(\delta0-\alpha).\Delta\delta$$

As equações (3.11) se transformam em:

$$\lambda_2.\Delta E = V_\infty.\cos(\delta0-\alpha).\Delta\delta - (R_L+\lambda_1 r+\lambda_2.Xd)\Delta Id - (X_L+\lambda_1 Xq-\lambda_2 r)\Delta Iq \qquad (3.12.A)$$

e

$$\lambda_1.\Delta E = -V_\infty.\sin(\delta0-\alpha).\Delta\delta - (X_L+\lambda_1 Xd-\lambda_2 r)\Delta Id + (R_L+\lambda_1 r+\lambda_2 Xq)\Delta Iq \qquad (3.12.B)$$

Utilizando-se da identidade seguinte, vem:

$$\Delta E = \Delta Eq - (Xd - X'd).\Delta Id \qquad \text{em pu} \qquad (3.13)$$

Substituindo-se o valor "ΔE", da equação (3.13), nas equações (3.12), vem:

$$(R_L+\lambda_1.r+\lambda_2.X'd).\Delta Id + (X_L+\lambda_1.Xq-\lambda_2.r)\Delta Iq = V_\infty.\cos(\delta0-\alpha).\Delta\delta - \lambda_2.\Delta Eq \qquad (3.14.A)$$

e

$$(X_L+\lambda_1.X'd-\lambda_2.r)\Delta Id - (R_L+\lambda_1.r+\lambda_2 Xq)\Delta Iq = -V_\infty.\sin(\delta0-\alpha).\Delta\delta - \lambda_1.\Delta Eq \qquad (3.14.B)$$

Simbolicamente, fazendo-se

$$\Delta = -(R_L+\lambda_1.r+\lambda_2.X'd)(R_L+\lambda_1.r+\lambda_2.Xq) - (X_L+\lambda_1 X'd-\lambda_2 r)(X_L+\lambda_1.Xq-\lambda_2.r)$$

tem-se:

$$\Delta = -[(R_L^2+X_L^2) + (\lambda_1^2+\lambda_2^2)(r^2+X'd.Xq) + (X'd+Xq)(\lambda_1 X_L+\lambda_2 R_L) + 2r(\lambda_1 R_L+\lambda_2 X_L)] \qquad (3.15)$$

A solução do sistema formado pelas equações (3.12), desprezando-se a resistência do estator, será:

$$\Delta Id = \frac{[\lambda_1 X_L+\lambda_2 R_L+(\lambda_1^2-\lambda_2^2)Xq]}{\Delta}\Delta Eq - \frac{[(R_L+\lambda_2 Xq)\cos(\delta0-\alpha) - (X_L+\lambda_1 Xq)\sin(\delta0-\alpha)]}{\Delta}V_\infty.\Delta\delta \quad \text{em pu} \qquad (3.16.A)$$

e

$$\Delta Iq = \frac{(\lambda_2 X_L-\lambda_1 R_L)}{\Delta}\Delta Eq - \frac{[(R_L+\lambda_2 X'd)\sin(\delta0-\alpha)+(X_L+\lambda_1.X'd)\cos(\delta0-\alpha)]}{\Delta}V_\infty.\Delta\delta \text{ em pu} \qquad (3.16.B)$$

Nas equações (3.16), "Δ" é dado pela equação (3.15).

Dos modelos na forma canônica de variáveis de estado, ver "Anderson & Fouad", capítulo 6, pág. 222, extrai-se a relação básica para a variável de estado "ΔEq", ou fluxo de excitação, como vem indicado a seguir:

$$(1+T'd0.P)\Delta Eq = \Delta E_{FD} + (Xd - X'd).\Delta Id - \Delta E_S \qquad \text{em pu} \qquad (3.17)$$

onde "T'd0" é a constante de tempo transitória da máquina síncrona a circuito do estator aberto;

"ΔE_{FD}" é a tensão de saída do regulador de tensão;

**Em todas as deduções seguintes deve-se entender que o ângulo de potência encontra-se dado em radianos.

"ΔE_S" é o efeito da saturação provocado no circuito de excitação;
"P" é o operador de Laplace.

Trazendo na equação (3.17), o valor ΔId, da equação (3.16.A), vem:

$$(1+T'd0.P)\Delta Eq = \Delta E_{FD} + (Xd-X'd)\left[\frac{\lambda_2 R_L+\lambda_1 X_L+(\lambda_1^2+\lambda_2^2)Xq}{\Delta}\right]\Delta Eq -$$

$$-(Xd-X'd)\left[\frac{(R_L+\lambda_2 Xq).\cos(\delta 0-\alpha)-(X_L+\lambda_1.Xq).\sin(\delta 0-\alpha)}{\Delta}\right]V_\infty.\Delta\delta-\Delta E_S \quad (3.18)$$

ou resumidamente:

$$T'd0.P.\Delta Eq = \Delta E_{FD} - \frac{1}{K_3}\Delta Eq - K_4.\Delta\delta - \Delta E_S$$

ou melhor:

$$\Delta Eq = \frac{K_3}{1+K_3.T'd0.P}(\Delta E_{FD}-\Delta E_S) - \frac{K_3.K_4}{1+K_3.T'd0.P}\Delta\delta \quad (3.19)$$

Na equação (3.19) tem-se:

$$\frac{1}{K_3} = 1 - \frac{(Xd-X'd)\left[\lambda_1 X_L+\lambda_2 R_L+(\lambda_1^2+\lambda_2^2)Xq\right]}{\Delta} \quad (3.20)$$

e

$$K_4 = \frac{(Xd-X'd)\left[(R_L+\lambda_2 Xq).\cos(\delta 0-\alpha)-(X_L+\lambda_1 Xq).\sin(\delta 0-\alpha)\right]V_\infty}{\Delta} \quad (3.21)$$

Notar que os parâmetros "K_3" e "K_4" dependem das condições de carregamento do sistema e possuem caracterização física bem definida, ou seja:

K_3- representa o fator de impedância de carga, e
K_4- representa o efeito desmagnetizante devido a carga.

Matematicamente chega-se a:

$$K_3 = \left.\frac{\partial Eq}{\partial E_{FD}}\right|_{\delta=\delta 0} \quad \text{em Pu/pu} \quad (3.22)$$

e

$$K_4 = -\frac{1}{K_3}\left.\frac{\partial Eq}{\partial \delta}\right|_{E_{FD}=E_{FD0}} \quad \text{em pu/rad} \quad (3.23)$$

Para a determinação do efeito da saturação "ΔE_S" deve-se utilizar a fórmula recursiva seguinte, segundo critério proposto por "Anderson & Fouad", Apêndice D, pág. 431, onde:

$$S_E \triangleq A_S.e^{B_S.E_{FD}} \quad (3.24)$$

onde "S_E" é a redução de tensão pelo efeito da saturação, e
"A_S, B_S" são constantes a determi r com base na curva de saturação.

Em termos diferenciais e em pu pode-se escrever:

$$\frac{S_E-S_{E0}}{S_{E0}} = A_S\left[\frac{e^{B_S.E_{FD}}-e^{B_S.E_{FD0}}}{A_S.e^{B_S.E_{FD0}}}\right]$$

Ou melhor

$$\Delta E_S = - [1 - e^{BS.\Delta E_{FD}}] \qquad (3.25)$$

onde "E_{FD0}" é a tensão de saída do regulador de tensão correspondente a 1.0 pu de tensão terminal da máquina principal.

Deve-se agora procurar o equacionamento do torque através da utilização da equação seguinte, que exprime o relacionamento do torque eletromagnético considerando-se os efeitos transitórios:

$$Te = E'd.Id+E'q.Iq+(X'd-X'q)Id.Iq \qquad (3.26)$$

Utilizando-se do conceito de variável diferencial, aludido anteriormente, a equação precedente fica:

$$\Delta Te+Te_D=(\Delta E'd+E'd0)(\Delta Id+Id0)+(\Delta E'q+E'q0)(\Delta Iq+Iq0)+(X'd-X'q)(\Delta Id+Id0)(\Delta Iq+Iq0)$$

Deve-se considerar que os termos em "Ed" são mínimos para os pequenos distúrbios aqui verificados, além do fato de se desprezar as parcelas de segunda ordem ao se linearizar o modelo, fatos que permitem escrever:

$$\Delta Te= \Delta E'q.Iq0+E'q0.\Delta Iq+(X'd-X'q)[Iq0.\Delta Id+Id0.\Delta Iq]$$

ou melhor:

$$\Delta Te=\Delta E'q.Iq0+(X'd-X'q)Iq0.\Delta Id+[E'q0+(X'd-X'q)Id0]\Delta Iq \text{ em pu} \qquad (3.27)$$

A figura seguinte esclarece melhor a equação precedente:

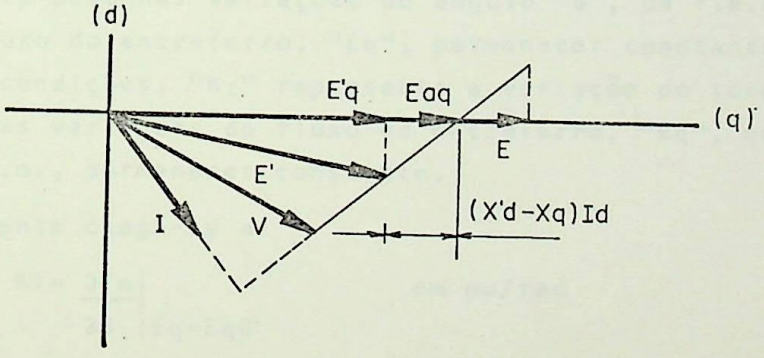


FIGURA 3.2

Da figura 3.2 pode-se extrair a seguinte relação:

$$Eaq= E'q + (X'd-Xq).Id \ (*) \quad \text{em pu} \qquad (3.28)$$

Considerando-se, por aproximação, que:

$$E'q \cong E' = Eq \qquad (3.29)$$

Pode-se escrever, para a condição nominal operativa da máquina, que:

$$Eaq0 = Eq0 + (X'd-Xq).Id0 \quad \text{em pu} \qquad (3.30)$$

---

*Notar que nos hidrogeradores, máquinas síncronas de polos salientes, X'q=Xq por não existir enrolamento de campo de eixo em quadratura.

Assim a equação (3.27) fica:

$$\Delta Te = Iq0.\Delta Eq + (X'd - Xq)\,Iq0.\Delta Id + Eaq0.\Delta Iq \qquad (3.31)$$

Trazendo-se na equação (3.31) os valores "ΔId" e "ΔIq", das equações (3.16), vem:

$$\Delta Te = \{Iq0 + \left[\frac{(\lambda_1 X_L + \lambda_2 R_L) + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) Xq}{\Delta}\right](X'd - Xq)\,Iq0 + \frac{(\lambda_2 X_L - \lambda_1 R_L)}{\Delta} Eaq0\}\Delta Eq +$$

$$+ \frac{1}{\Delta}\{[(X'd - Xq)(\lambda_1 . Xq + X_L)\,Iq0 - (\lambda_2 X'd + R_L)\,Eaq0].\sin(\delta 0 - \alpha) - [(X'd - Xq)(\lambda_2 Xq + R_L)\,Iq0 +$$

$$+ (\lambda_1 X'd + X_L)\,Eaq0].\cos(\delta 0 - \alpha)\}V_\infty \Delta\delta \qquad \text{em pu} \qquad (3.32)$$

De forma compacta, a equação (3.32) fica:

$$\Delta Te = K_1.\Delta\delta + K_2.\Delta Eq \qquad \text{em pu} \qquad (3.33)$$

Na equação (3.33) tem-se:

$$K_1 = \frac{1}{\Delta}\{[(X'd - Xq)(\lambda_1 Xq + X_L)\,Iq0 - (\lambda_2 . X'd + R_L)\,Eaq0].\sin(\delta 0 - \alpha) -$$

$$- [(X'd - Xq)(\lambda_2 Xq + R_L)\,Iq0 + (\lambda_1 X'd + X_L)\,Eaq0]\cos(\delta 0 - \alpha)V_\infty \qquad (3.34)$$

e

$$K_2 = Iq0 + \frac{1}{\Delta}\{[(\lambda_1 X_L + \lambda_2 R_L) + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) Xq](X'd - Xq)\,Iq0 + (\lambda_2 X_L - \lambda_1 R_L)\,Eaq0\} \qquad (3.35)$$

Assim como para os parâmetros "K_3" e "K_4", também aqui, os parâmetros "K_1" e "K_2" dependem das condições de carregamento do sistema e possuem caracterização física.

O parâmetro "K_1" representa a variação do torque elétrico da máquina síncrona para pequenas variações do ângulo "δ", da f.e.m. da máquina, quando o fluxo do entreferro, "Eq", permanecer constante.

Nas mesmas condições, "K_2" representa a variação do torque elétrico para pequenas variações do fluxo do entreferro, "Eq", quando o ângulo "δ", da f.e.m., permanecer constante.

Matematicamente chega-se a:

$$K_1 = \left.\frac{\partial Te}{\partial\delta}\right|_{Eq=Eq0} \qquad \text{em pu/rad} \qquad (3.36)$$

e

$$K_2 = \left.\frac{\partial Te}{\partial Eq}\right|_{\delta=\delta 0} \qquad \text{em pu/pu} \qquad (3.37)$$

Outra importante observação se refere ao efeito sincronizante característica do parâmetro "K_1", de extrema importância nas análises de estabilidade quando de ajustes do ganho de canal direto de reguladores de tensão.

Para a tensão de saída na barra terminal, ou tensão terminal do gerador síncrono, segue-se o desenvolvimento.

Notar que se a referência escolhida coincidir com o eixo gerado pela tensão terminal o ângulo "α" é nulo e o ângulo de potência seria o próprio ângulo "δ" contra o barramento infinito.

Para o modelo de máquina síncrona, utilizando-se a transformação de Park, pode-se escrever para as tensões de saída da máquina síncrona de eixos "d" e "q", deprezando-se a resistência do estator e considerando-se seus valores eficazes, que:

$$Vd = -Xq.Iq \quad \text{em pu} \tag{3.38.A}$$

e

$$Vq = Xd.Id + LAD.I_F \quad \text{em pu} \tag{3.38.B}$$

onde I_F é a corrente de campo.

Repetindo-se a equação anterior (3.9.C), vem:

$$E \triangleq LAD.I_F \quad \text{em pu}$$

Analisando-se, a equação (3.9.C) via figura 3.3 vem:

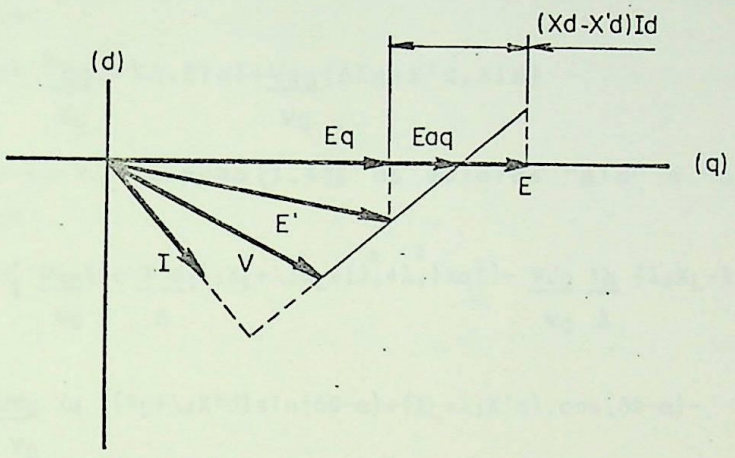


FIGURA 3.3

Da figura 3.3 extrai-se a equação seguinte:

$$Eq = E + (Xd - X'd).Id \tag{3.39}$$

Logo $$E = Eq - (Xd-X'd).Id = LAD.I_F \quad \text{em pu} \tag{3.40}$$

Assim, substituindo-se o valor de "E", da equação (3.40), na equação (3.38.B), vem:

$$Vq = Xd.Id + Eq - (Xd-X'd).Id \tag{3.41}$$

Utilizando-se, novamente, do conceito de variável diferencial, aludido anteriormente, as equações (3.38.A) e (3.41), ficam:

$$\Delta Vd = - Xq.\Delta Iq \quad \text{em pu} \tag{3.42.A}$$

e

$$\Delta Vq = \Delta Eq + X'd.\Delta Id \quad \text{em pu} \tag{3.42.B}$$

A tensão terminal "V" é dada pela equação seguinte:

$$V^2 = Vd^2 + Vq^2 \quad \text{em pu} \tag{3.43}$$

Utilizando-se o conceito de variável diferencial, vem:

$$(\Delta V+V_0)^2 = (\Delta V+Vd_0)^2 + (\Delta Vq+Vq_0)^2 \qquad (3.44)$$

Desenvolvendo-se a equação (3.44):

$$\Delta V^2 + V_0^2 + 2v_0.\Delta V = \Delta Vd^2 + Vd_0^2 + 2Vd_0\ \Delta Vd + \Delta Vq^2 + Vq_0^2 + 2Vq_0\ \Delta Vq \qquad (3.45)$$

Simplificando-se a equação (3.45), vem:

$$\Delta V^2 + 2V_0\ \Delta V = \Delta Vd^2 + 2Vd_0\ \Delta Vd + \Delta V_q^2 + 2Vq_0\ \Delta Vq \qquad (3.46)$$

Desprezando-se os termos de segunda ordem, vem:

$$V_0.\Delta V = Vd_0.\Delta Vd + Vq_0.\Delta Vq$$

e

$$\Delta V = \frac{Vd_0}{V_0}\ \Delta Vd + \frac{Vq_0}{V_0}\ \Delta Vq \qquad (3.47)$$

Trazendo-se na equação (3.47) os valores de "ΔVd" e "ΔVq", das equações (3.42), vem:

$$\Delta V= \frac{Vd_0}{V_0}(-Xq.\Delta Iq)+\frac{Vq_0}{V_0}(\Delta Eq+X'd.\Delta Id) \qquad (3.48)$$

Trazendo-se na equação (3.48), os valores "ΔId" e "ΔIq", das equações (3.16), vem:

$$\Delta V=\left\| \frac{Vq_0}{V_0}\left\{1+\frac{X'd}{\Delta}\left[\lambda_1 X_L+\lambda_2 R_L+(\lambda_1^2+\lambda_2^2)Xq\right]\right\}-\frac{Vd_0}{V_0}\frac{Xq}{\Delta}\ (\lambda_2 X_L-\lambda_1 R_L)\right\|\Delta Eq\ +$$

$$+\frac{V_\infty}{\Delta}\left\{\frac{Vd_0}{V_0}\ Xq\ [(R_L+\lambda_2 X'd)\sin(\delta 0-\alpha)+(X_L+\lambda_1 X'd).\cos(\delta 0-\alpha)-\right.$$

$$\left.-\frac{Vq_0}{V_0}\ X'd\{(R_L+\lambda_2 Xq).\cos(\delta 0-\alpha)-(X_L+\lambda_1 Xq).\sin(\delta 0-\alpha)]\right\}.\Delta\delta \qquad \text{em pu} \qquad (3.49)$$

Resumidamente reescreve-se a equação (3.49) como:

$$\Delta V = K_5.\Delta\delta + K_6.\Delta Eq \qquad \text{em pu} \qquad (3.50)$$

Na equação (3.50) tem-se:

$$K_5= \frac{V_\infty}{\Delta}\left\{\frac{Vd_0}{V_0}\ Xq\left[(R_L+\lambda_2 X'd).\sin(\delta 0-\alpha)+(X_L+\lambda_1 X'd).\cos(\delta 0-\alpha)\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{Vq_0}{V_0}\ X'd\left[(R_L+\lambda_2 Xq).\cos(\delta 0-\alpha)-(X_L+\lambda_1 Xq).\sin(\delta 0-\alpha)\right]\right\} \qquad (3.51)$$

e

$$K_6= \frac{Vq_0}{V_0}\left\{1+\frac{X'd}{\Delta}\left[\lambda_1 X_L+\lambda_2 R_L+(\lambda_1^2+\lambda_2^2)Xq\right]\right\}-\frac{Vd_0}{V_0}\frac{Xq}{\Delta}\ (\lambda_2 X_L-\lambda_1 R_L) \qquad (3.52)$$

Também aqui, os parâmetros "K_5" e "K_6" dependem das condições de carregamento do sistema e possuem caracterização física.

O parâmetro "K_5" representa a variação da tensão terminal da máquina com relação a pequenas variações do ângulo "δ", da f.e.m. da máquina, quando o fluxo enlaçado através do entreferro, "Eq", for mantido cons

tante.

O parâmetro "K_6" representa a variação da tensão terminal com relação a pequenas variações do fluxo "Eq", do entreferro, quando o ângulo "δ", da f.e.m., for mantido constante.

Matematicamente chega-se a:

$$K_5 = \left.\frac{\partial V}{\partial \delta}\right|_{Eq=Eq_0} \quad \text{em pu/rad} \tag{3.53}$$

e

$$K_6 = \left.\frac{\partial V}{\partial Eq}\right|_{\delta=\delta 0} \quad \text{em pu/pu} \tag{3.54}$$

As equações (3.16), (3.19), (3.25), (3.33), (3.50) representam as equações básicas para a modelagem da parte elétrica da máquina síncrona.

Para a complementação do modelo, que é conhecido universalmente em qualquer literatura do ramo, serão introduzidas oa parâmetros "K_7", "K_8", "K_9" e "K_{10}" como seguinte.

Das equações (3.16) tem-se, reescrevendo-as resumidamente, que:

$$\Delta Id = K_7.\Delta\delta + K_8.\Delta Eq \tag{3.55.A}$$

e

$$\Delta Iq = K_9.\Delta\delta + K_{10}\Delta Eq \tag{3.55.B}$$

Nas equações (3.55) tem-se:

$$K_7 = -\frac{[(R_L+\lambda_2 Xq).\cos(\delta 0-\alpha)-(X_L+\lambda_1.Xq)\sin(\delta 0-\alpha)]V_\infty}{\Delta} \tag{3.55}$$

$$K_8 = \frac{\lambda_1 X_L+\lambda_2 R_L+(\lambda_1^2-\lambda_2^2)Xq}{\Delta} \tag{3.57}$$

$$K_9 = -\frac{[(R_L+\lambda_2 X'd).\sin(\delta 0-\alpha)+(X_L+\lambda_1 X'd)\cos(\delta 0-\alpha)]V_\infty}{\Delta} \tag{3.58}$$

e

$$K_{10} = \frac{\lambda_2 X_L - \lambda_1 R_L}{\Delta} \tag{3.59}$$

Os parâmetros "K_7", "K_8", "K_9" e "K_{10}" dependem, também, das condições de carregamento do sistema e possuem caracterização física.

O parâmetro "K_7" representa a variação da corrente de eixo direto da máquina, "Id", para pequenas variações do ângulo "δ", da f.e.m., quando o fluxo "Eq", no entreferro, permanecer constante.

O parâmetro "K_8" representa a variação da corrente de eixo direto da máquina, "Id", para pequenas variações do fluxo "Eq", no entreferro, quando o ângulo "δ", de f.e.m. permanecer constante.

O parâmetro "K_9" representa a variação da corrente de eixo em quadratura da máquina, "Iq", para pequenas variações do ângulo "δ", do f.e.m., quando o fluxo "Eq", no entreferro, permanecer constante.

O parâmetro "K_{10}" representa a variação da corrente de eixo em quadratura da máquina, "Iq", para pequenas variações do fluxo "Eq", no entreferro, quando o ângulo "δ", da f.e.m., permanecer constante.

Matematicamente chega-se a:

$$K_7 = \left.\frac{\partial Id}{\partial \delta}\right|_{Eq=Eq_0} \quad \text{em pu/rad} \tag{3.60}$$

$$K_8 = \left.\frac{\partial Id}{\partial Eq}\right|_{\delta=\delta_0} \quad \text{em pu/pu} \tag{3.61}$$

$$K_9 = \left.\frac{\partial Iq}{\partial \delta}\right|_{Eq=Eq_0} \quad \text{em pu/rad} \tag{3.62}$$

$$K_{10} = \left.\frac{\partial Iq}{\partial Eq}\right|_{\delta=\delta_0} \quad \text{em pu/pu} \tag{3.63}$$

De posse das definições dos parâmetros pode-se construir o diagrama no domínio da frequência complexa, como na figura seguinte, onde não foram representados os sistemas de controles de velocidade, de potência ativa, de tensão, de potência reativa, de estabilização, de abertura das palhetas da turbina e o sistema mecânico hidráulico da parte de tomada d'água e tubulação. Ver figura 3.4.
Tais sistemas deverão ser modelados, adequadamente, mais à frente, quando se formará todo o sistema da instalção geradora.

3.3 ESTABELECIMENTO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DE CARREGAMENTO

No subitem precedente foi desenvolvido um modelo para a representação de um sistema composto por u'a máquina acoplada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão, com a particularidade especial da consideração da impedância shunt, que será desprezada neste capítulo, uma vez que tal implementação visará abrir a possibilidade a futuras pesquisas voltadas para o controle da potência reativa quando se utiliza da compensação shunt para tal finalidade.
A utilização do modelo, previamente aludido, vem associada a necessidade da definição das condições iniciais do sistema quando certas grandezas têm de ser conhecidas a fim de se garantir a identificação dos parâmetros de "interface".(*)
Para efeito de análise voltada ao comportamento máquina-sistema, sob condições normais de funcionamento, a idéia central seria possibilitar a elaboração de um programa computacional através do qual as condições de contorno pudessem ser obtidas, diretamente, considerando-se as definições da barra de geração e barra infinita.
Não obstante, a conclusão desta proposição permitirá a elaboração do conjunto sistemático operativo quando virá a aplicação dos estudos e técnicas do ajuste via controle moderno que sem o apoio básico deste subitem torna-se impraticável.
Em termos de desenvolvimento, os caminhos a seguir serão dois, em ní-

*Parâmetros Ki: i = 1,2,3,...,10.

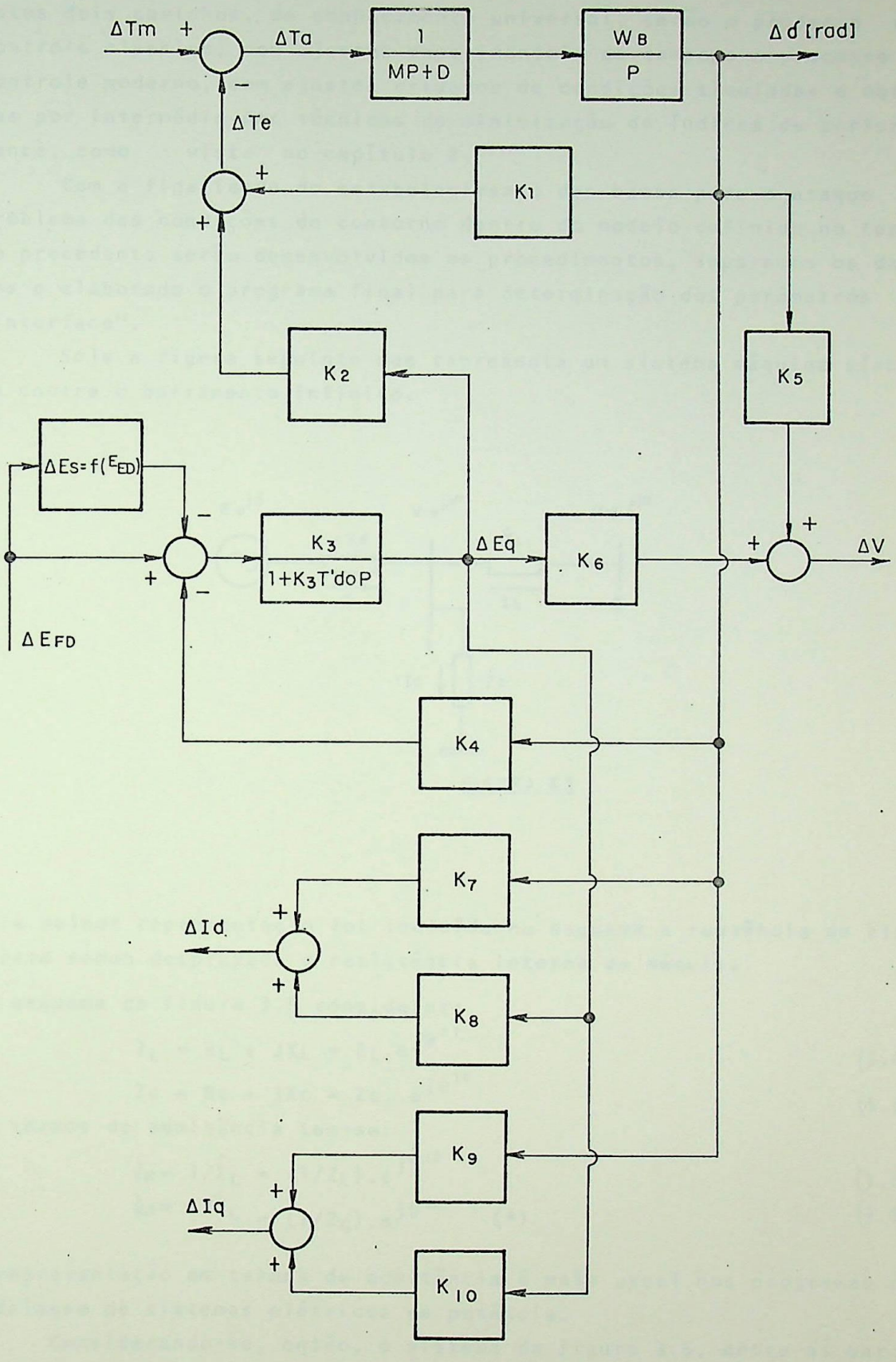

ΔTm
+
ΔTa
1
MP+D
WB
P
Δδ [rad]
−
ΔTe
+
+
K1
K2
K5
ΔEs=f(EED)
−
+
−
K3
1+K3T'doP
ΔEq
K6
+
+
ΔV
ΔEFD
K4
K7
ΔId
+
+
K8
K9
ΔIq
+
+
K10

FIGURA 3.4

vel comparativo, uma vez que este parece o método mais rápido e prático para obtenção de conclusões imediatas.

Estes dois caminhos, de conhecimento universal, serão o processo via controle clássico, com ajustes experimentais de campo, e o processo via controle moderno, com ajustes oriundos de condições simuladas e obtidas por intermédio das técnicas de minimização de índices de performance, como visto no capítulo 2.

Com a finalidade do estabelecimento das bases para o ataque ao problema das condições de contorno dentro do modelo definido no tópico precedente serão desenvolvidos os procedimentos, separados os dados e elaborado o programa final para determinação dos parâmetros de "interface".

Seja a figura seguinte que representa um sistema máquina síncrona contra o barramento infinito.

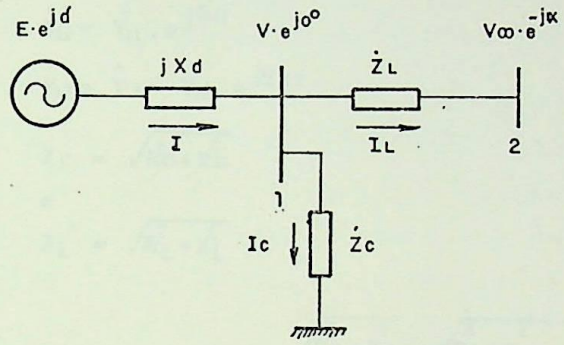


FIGURA 3.5

Para melhor representação foi incluída no esquema a reatância de eixo direto sendo desprezada a resistência interna da máquina.

No esquema da figura 3.5 considerar:

$$Z_L = R_L + jX_L = Z_L.e^{j\psi 12} \qquad (3.64)$$

$$Zc = Rc + jXc = Zc.\ e^{j\psi 10} \qquad (3.65)$$

Em termos de admitância tem-se:

$$\dot{y}_{12} = 1/\dot{Z}_L = (1/Z_L).e^{j\theta 12} \qquad (3.66)$$

$$\dot{y}_{10} = 1/\dot{Z}_C = (1/Z_C).e^{j\theta 10} \quad (*) \qquad (3.67)$$

A representação em termos de admitância é mais usual nos programas de modelagem de sistemas elétricos de potência.

Considerando-se, então, o sistema da figura 3.5, entre as barras "1" e "2", pela figura seguinte, vem:

---

*A notação "." sobre a grandeza identifica grandeza vetorial.

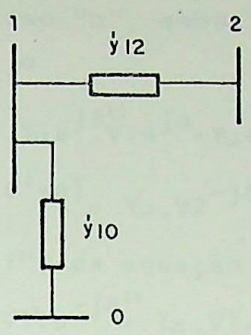


FIGURA 3.6

Para a barra 1 $\quad \dot{Y}_{11} = \dot{y}_{10} + \dot{y}_{12} = Y_{11} \cdot e^{j\theta_{11}}$

Para a barra 2 $\quad \dot{Y}_{12} = -\dot{y}_{12} = Y_{12} \cdot e^{j\theta_{12}}$

Logo

$$\dot{Y}_{11} = Y_{11} \cdot e^{j\theta_{11}} \tag{3.68.A}$$

$$\dot{Y}_{12} = \dot{Y}_{21} = Y_{12}\ e^{j\theta_{12}} \tag{3.68.B}$$

$$Z_c = \sqrt{R_c^2 + X_c^2} \tag{3.69.A}$$

e

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \tag{3.69.B}$$

Mas

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_L} = \frac{Z_c + Z_L}{Z_c \cdot Z_L} = \frac{\sqrt{R_c^2 + X_c^2} + \sqrt{R_L^2 + X_L^2}}{\sqrt{(R_c^2 + X_c^2)(R_L^2 + X_L^2)}} \tag{3.70.A}$$

e

$$Y_{12} = \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}} \tag{3.70.B}$$

Deste modo

$$\dot{Y}_{11} = \frac{\sqrt{R_c^2 + X_c^2} + \sqrt{R_L^2 + X_L^2}}{\sqrt{(R_c^2 + X_c^2)(R_L^2 + X_L^2)}} \cdot e^{j\theta_{11}} \tag{3.71.A}$$

e

$$\dot{Y}_{12} = \frac{1}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}} \cdot e^{j\theta_{12}} \tag{3.71.B}$$

Para a determinação das equações das potências ativa e reativa transmitidas, tem-se:

$$P_1 = Re\left[\dot{V}_1 \cdot \dot{I}_1^*\right] \tag{3.72}$$

onde "V_1" é a tensão na barra 1

e "I_1" é a corrente que flui da barra 1

Considerando-se, agora, o ângulo do barramento infinito como nulo e o ângulo da barra "1" como "α", ambos para a tensão, vem:

$$\dot{V}1 = V1.e^{j\alpha} \tag{3.73}$$

$$\dot{I}1 = \dot{Y}_{11}.\dot{V}1 + \dot{Y}_{12}\dot{V}2 = Y_{11}e^{j\theta^{11}}V1e^{j\alpha} + Y_{12}e^{j\theta^{12}}V2e^{j0^0}$$

e

$$\dot{I}1^{*} = Y_{11}.V1\ e^{-j(\theta^{11}+\alpha)} + Y_{12}.V2^{-j\theta^{12}} \tag{3.74}$$

Levando o valor de "$\dot{I}1$", da equação (3.74), na equação (3.72), obtém-se:

$$P1 = \mathbb{R}e\left[Y_{11}.V1^2.e^{-j\theta^{11}} + Y_{12}.V1.V2.e^{j(\alpha-\theta^{12})}\right]$$

Logo

$$P1 = Y_{11}.V1^2.\cos\theta^{11} + Y_{12}.V1.V2\cos(\alpha-\theta^{12}) \tag{3.75}$$

Deste modo obtém-se a expressão para a potência ativa transmida pela barra "1" em função do ângulo "α".

Analogamente, pode-se obter, também, a expressão para a potência reativa.

$$Q1 = \mathbb{I}m\left|\dot{V}1.\dot{I}1^{*}\right| \tag{3.76}$$

Pelos mesmos procedimentos anteriormente utilizados no cômputo da potência ativa obtém-se:

$$Q1 = -Y_{11}.V1^2\sin\theta_{11} + Y_{12}.V1.V2.\sin(\alpha-\theta^{12}) \tag{3.77}$$

Como a barra "1" é uma barra de geração, a tensão "$\dot{V}1$" deverá ser conhecida em função dos controles de fluxo de carga do sistema.

Para completar a determinação das condições de contorno resta a definição do fluxo "E" como função do carregamento.

Seja a figura seguinte:

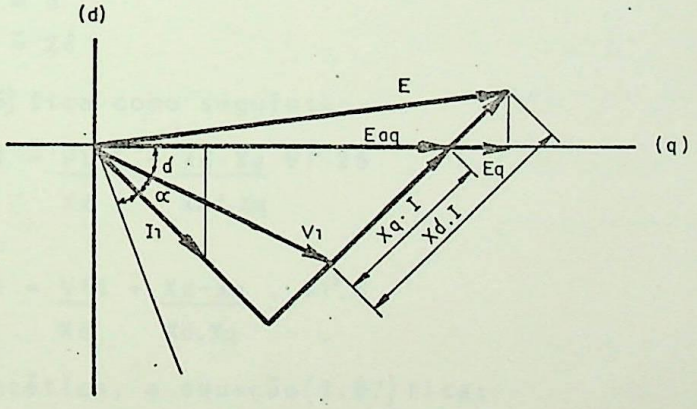


FIGURA 3.7

Na figura 3.7 tira-se que:

$$E = V1 + j\ Xd.I1 \tag{3.78}$$

$$Vd = V1.\sin\delta \tag{3.79.A}$$

$$Vq = V1.\cos\delta \tag{3.79.B}$$

A corrente "I_1" já foi determinada anteriormente e pode ser escrita da seguinte forma:

$$I1 = Y_{11}.V1.e^{j(\alpha+\theta^{11})} + Y_{12}\ V2\ e^{j\theta^{12}} \qquad (3.80)$$

Deconpondo-se a corrente "I1" segundo os eixos "d" e "q", considera - dos até aqui, vem:

$$I_1 = Y_{11}.V1\ [\cos(\alpha+\theta^{11})+j\ \sin(\alpha+\theta^{11})] + Y_{12}.V2(\cos\theta^{12}+j\sin\theta^{12}) \qquad (3.81)$$

Lembrando que $I1 = Iq + jId$ (3.82)

tem-se $Iq = Y_{11}.V1.\cos(\alpha+\theta^{11}) + Y_{12}.V2.\cos\theta^{12}$ (3.83.A)

e

$Id = Y_{11}.V1.\sin(\alpha+\theta^{11}) + Y_{12}.V2.\sin\theta^{12}$ (3.83.B)

Assim

$Eq = Vq + Xd.Id$ (3.84.A)

e

$Ed = Vd + Xd.Iq$ (3.84.B)

ou melhor

$Eq = V1.\cos\delta + Xd.Id$ (3.85.A)

e

$Ed = V1.\sin\delta + Xd.Iq$ (3.85.B)

A solução das equações (3.85) depende do valor do ângulo "δ" que até então é uma incógnita.

$$P1 = \frac{E.V1}{Xd}.\sin\delta + \frac{Xd-Xq}{2XdXq}.V1^2.\sin2\delta \quad (*) \qquad (3.86)$$

Aproximando-se as grandezas para

$E \cong 1,0$

$\sin\delta \cong \delta$

$\sin2\delta \cong 2\delta$

a equação (3.86) fica como seguinte:

$$P1 \cong \frac{V1}{Xd}\ \delta. + \frac{Xd-Xq}{2Xd.Xq}\ V1^2\ 2\delta$$

ou

$$P1 = \frac{V1\delta}{Xd} + \frac{Xd-Xq}{Xd.Xq}.\ V1^2.\delta \qquad (3.87)$$

De maneira sintética, a equação (3.87) fica:

$P1 = [C1+C2]\delta$

onde $C1 = \frac{V1}{Xd}$ (3.88.A)

e

$C2 = \frac{Xd-Xq}{Xd.Xq}\ V1^2$ (3.88.B)

---

*Equação de transferência de potência para u'a máquina síncrona de polos salientes.

Assim tem-se para o ângulo "δ":

$$\delta = \frac{P1}{C1+C2} \tag{3.89}$$

Com a determinação do ângulo "δ", através da equação (3.89), pode-se determinar os valores de "Eq" e "Ed", pelas equações (3.85) e, finalmente, obter-se o valor para o fluxo "E", via equação seguinte:

$$E = \sqrt{Ed^2 + Eq^2} \tag{3.90}$$

Através dos procedimentos anteriores, pode-se criar um algoritmo recursivo para o cálculo iterativo das condições de contorno da barra de geração, barra "1" na figura 3.5, com a definição do ângulo "δ", da f.e.m. da máquina, e da própria tensão "E" relativa ao fluxo no entreferro.

1. Considerar, na figura 3.5, a tensão na barra infinita, barra "2", como referência; assim a tensão na barra "1" será:

$$\dot{V}1 = V1.e^{j\alpha}$$

e a f.e.m. da máquina será:

$$\dot{E} = E.e^{j\gamma}$$

Logo $\delta = \gamma - \alpha$ (3.91)

2. Fornecer os seguintes dados:

- R_L, X_L e $\dot{y}_{12}$
- Rc, Xc e $\dot{y}_{10}$
- $V1.e^{j\alpha}$
- $V2.e^{j0^0}$
- Xd, Xq

3. Calcular as admitâncias "$\dot{Y}_{11}$" e "$\dot{Y}_{12}$" através das equações (3.71).

4. Determinar a potência ativa "P1" através da equação (3.75).

5. Determinar os coeficientes "C1" e "C2" através das equações (3.88).

6. Determinar o ângulo "δ".

7. Determinar as correntes "Id" e "Iq" através das equações (3.83).

8. Determinar as tensões "Vd" e "Vq" através das equações (3.79).

9. Determinar as tensões "Ed" e "Eq" através das equações (3.85).

10. Determinar o f.e.m. "E" através da equação (3.90).

No caso de refinamento, deve-se recalcular o ângulo "δ", no item 5, com o novo valor de "C1" para o novo valor de "E" obtido no item 10. Deve-se repetir este ciclo até que se consiga a convergência tanto de "E" quanto de "δ".

Com a definição dos parâmetros de "interface", para o sistema elétrico, resta apenas a definição do sistema que caracteriza, fisicamente, a instalação em si.

No subitem seguinte serão apresentados os dados da instalação de modo

que se possa associá-los àqueles do sistema elétrico para composição do modelo geral a ser utilizado neste trabalho.

3.4 REPRESENTAÇÃO EM PU DO SISTEMA REAL A SER UTILIZADO

Uma das características básicas do presente trabalho será sempre a extensão, bem como sua aplicação, a modelos reais conhecidos. No capítulo seguinte será apresentado um modelo computacional genérico que poderá ser aplicado a qualquer instalação desde que suas características, além dos dados principais, estejam devidamente normalizados.

Neste tópico presente, serão fornecidos todos os dados relativos a uma grande instalação, aqui representada pela unidade de Produção de Emborcação, cujos parâmetros e características foram levantados em campo, de modo que possam definir os dados de entrada para o programa computacional a ser descrito no próximo capítulo, já referenciado.

A base adotada será a seguinte:

- Potência Base = 284 [MW]
- Tensão Base = 16,5/500 BT/AT [KV]
- Curso de Servomotor Base = 308 [mm]
- Rotação Mecânica Base = 14,5 [Rad/S]
- FreqUência Base = 60 [Hz]
- Aceleração da Gravidade = 9,81 [m/S^2]
- Tensão Base de Campo = 235 [V]

1. Dados Gerais da Instalação de Emborcação

Localização	:Rio Paranaíba-Araguari-MG
Nº de Máquinas	: quatro
Ano de Entrada em Operação	: 1983

2. Dados Nominais da Instalação

Barragem e Tubulação Adutora	
Comprimento Total da Tubulação	: 360 m
Diâmetro Médio da Tubulação	: 7,5 m
Velocidade d'Água	: 5,84 m/s
Constante de Inércia d'Água	: Tw=1,55 s
Queda Útil	: 138,5 m
Turbina	
Potência	303 MW
Rotação	138,5 RPM
Vazão	239,5 m3/s
Gerador	
Potência Aparente	284 MVA
Tensão Terminal	16,5 KV
COSΨ	0,95
FreqUência	60 HZ

Reatância de Eixo Direto	XD= 0,8064 Ω
Reatância de Eixo em Quadratura	XQ= 0,5989 Ω
Reatância Transitória de Eixo Direto	XLD= 0,2777 Ω
Constante de Tempo Transitória a Circuito Aberto	TLDO= 7 s
Transformador Elevador	
Potência Aparente	290 MVA
Reatância	0,1089 Ω
Linha de Transmissão para Jaguara	
Resistência	0,0049 Ω
Reatância	0,0740 Ω
Linha de Transmissão para Itumbiara	
Resistência	0,0035 Ω
Reatância	0,05281 Ω
Conjunto Mecânico Girante	
Momento de Inércia	14.083 t.m^2
Constante de Inércia	H=M/2= 5,215 s
Regulador de Velocidade	
Constante de Proporcionalidade	K= 5,00 pu/pu
Constante Relativa a Queda Permanente	KO= 0,25 pu/pu
Fator de Proporcionalidade	KP1= 0,40 pu/pu
Const. de Tempo da Queda Transitória em off-line	TN1= 5,20 s
Const. de Tempo da Queda Transitória em on-line	TN1= 0,43 s
Queda Permanente	R=0,01056 HZ/MW
Queda Transitória	r=0,10560 HZ/MW
Regulador de Potência	
Fator de Proporcionalidade	KP2= 0,2 pu/pu
Const.de Tempo da Queda Transitória	TN2= 1,1 s
Queda Permanente	R= 0,01056 HZ/MW
Queda Transitória	r= 1,0560 HZ/MW
Regulador de Abertura	
Fator de Proporcionalidade	KLP = 4,1 pu/pu
Const. de Tempo do Atvador Eletro-hidráulico	TL = 0,7 s
Const. de Tempo de Retardo da Realimentação	TR = 100 ms
Const. de Tempo do Servomotor Principal	Ty = 0,20 s
Velocidade Máxima do Servomotor Principal	VMÁX = 36 mm/s
Velocidade Mínima do Servomotor Principal	VMÍN =-48 mm/s
Curso Máximo do Servomotor Principal	YMAX = 324 mm
Curso Mínimo do Servomotor Principal	YMIN = 0 mm
Banda Morta do Regulador	± 0,048 HZ
Abertura em vazio	yO = 25 mm
Regulador de Tensão	
Fator de Proporcionalidade	KA = 14,9 pu/pu
Const. de Tempo de Integração	TA = 0,19 s

Tensão Máxima de Comando	VRMAX = 611 V
Tensão Mínima de Comando	VRMIN = 0,00
Constante 1 do Limitador Tensão/Freqüência	KU = 1,00 pu/pu
Constante 2 do Limitador Tensão/Freqüência	K8 = 4,20 pu/pu
Const. de Tempo do Limitador Tensão/Freqüência	T8 = 0,35 s
Constante de Proporcionalidade do Circuito de Estabilização	KAR = 1,00 pu/pu
Const. de Tempo do Circuito de Estabilização	TAR = 0,50 s
Tensão Máxima de Comando Referente a 1,1 pu de Tensão Terminal.	UMAX = 282 V
Tensão de Excitação de Teto em regime Permanente	EFOMAX = 258,5 V
Estabilizador	
Const.de Tempo do Filtro Residual	T1 = 9,60 s
Const.de Tempo do Dispositivo de Atraso	T2 = 0,03 s
Const.de Tempo do Dispositivo de Avanço	T3 = 0,19 s
Const. de Tempo Associada	T4 = 0,12 s
Const.de Tempo do Limitador de Variação da Potência Ativa	T5 = 4,10 s
Const. Máxima de Saída do Estabilizador	VEMÁX =-0,628 V
Const. Mínima de Saída do Estabilizador	VEMIN = +0,648 V
Carga	
Coeficiente de Amortecimento da Carga	D = 4,733 MW/HZ

GRANDEZAS REFERIDAS À BASE PREVIAMENTE DEFINIDA

Turbina	
Potência	1,067 pu
Gerador	
Potência Aparente	1,00 pu
Tensão Terminal	1,00 pu
Reatância do Eixo Direto	XD = 0,8412 pu
Reatância de Eixo em Quadratura	XQ = 0,6248 pu
Reatância Transitória de Eixo Direto	XLD = 0,2897 pu
Transformador Elevador	
Potância Aparente	1,021 pu
Reatância	0,1136 pu
Linha de Transmissão para Jaguara	
Resistência	0,0051 pu
Reatância	0,077 pu
Linha de Trnasmissão para Itumbiara	
Resistência	0,0037 pu
Reatância	0,055 pu
Regulador de Velocidade	
Queda Permanente [R = KO/K]	R = 0,05 pu

Queda Transitória [r = 1/(K.KP1)]	r = 0,50 pu
Regulador de Potência	
Queda Permanente [R = KK2]	R = 0,05 pu
Queda Transitória [r = 1/KP2]	r = 5,0 pu
Regulador de Abertura	
Velocidade Máxima do Servomotor Principal	VMÁX = 0,117 pu/s
Velocidade Mínima do Servomotor Principal	VMIN = -0,159 pu/s
Curso Máximo do Servomotor Principal	YMÁX = 1,052 pu
Curso Mínimo do Servomotor Principal	YMIN = 0
Banda Morta do Regulador	± 0.0008 pu
Abertura em Vazio	Y_0 = 0,08 pu
Regulador de Tensão	
Tensão Máxima de Comando	VRMÁX = 2,60 pu
Tensão Mínima de Comando	VRMIN = 0
Tensão Máxima de Comando Referente a 1,1 pu de Tensão Terminal	VMÁX = 1,2 pu
Tensão de Excitação de Teto em Regime Permanente	EFDMAX = 1,1 pu
Estabilizador (*)	
Sinal Máximo de Saída do Estabilizador	VEMÁX = 0,115 pu
Sinal Mínimo de Saída do Estabilizador	VEMÍN = 0,119 pu
Carga	
Coeficiente de Amortecimento de Carga	D = 0,5 pu/pu

A figura seguinte estampa o sistema típico de uma grande instalação onde foram representados todos os parâmetros descritos neste capítulo. Tal representação é genérica podendo ser adaptada a qualquer instalação desde que seus limites sejam respeitados. A grande instalação, como mencionado previamente, se refere a unidade de produção de Emborcação, da CEMIG. Ver figura 3.8.

3.5 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA SOB O ENFOQUE DAS VARIÁVEIS DE ESTADO

O modelo contínuo representado na figura 3.8 foi o adotado para a realização dos estudos de controle ótimo, razão do presente trabalho; e seu modelo analógico, considerando-se as realimentações de estado U(1)v, U(1)p, U(2), e U(3), pode ser visto na figura 3.9. Para a representação do modelo contínuo sob a forma canônica das variáveis de estado (**), vide equações (1.3) e (1.4), deve-se lançar mão do diagrama estampado na figura 3.9.
Seguem-se os procedimentos algébricos para obtenção das equações de estado.

---

*Para o sistema que controla a saída do PSS tem-se:
5,43 [V] = 284 [MW]
** Forma linear padronizada do modelo contínuo.

. Regulador de Velocidade

$$\dot{S}(1)= -\frac{KP1.K0}{TN1} S(1) + \left[\frac{K.KP1-K.K0.KP1^2}{TN1}\right].C.S(6) - \left[\frac{K.KP1-K.K0.KP1^2}{TN1}\right] U(1) \quad (3.92)$$

. Regulador de Potência

$$\dot{S}(1)=\left[\frac{KP2.D.C}{TN2} + \frac{KP2.KK2}{TN2}\right] S(6) + \frac{KP2.K1.C}{TN2} S(7) + \frac{KP2.K2.C}{TN2} S(12) - \frac{KP2}{TN2} U(1) \quad (3.93)$$

$$\dot{S}(2)= -\frac{1}{TR} S(2) + \frac{1}{TR} S(3) \quad (3.94)$$

. Regulador de Velocidade

$$\dot{S}(3)=-\frac{KLP}{TL} S(1) - \frac{KLP}{TL} S(2) - \frac{K.KLP.KP1.C}{TL} S(6) + \frac{K.KLP.KP1}{TL} U(1) \quad (3.95)$$

. Regulador de Potência

$$\dot{S}(3)= -\frac{KLP}{TL} S(1) - \frac{KLP}{TL} S(2) - \frac{KLP.KP2}{TL} (D.C+KK2) S(6) -$$

$$- \frac{K1.KLP.KP2.L}{TL} S(7) - \frac{K2.KLP.KP2.C}{TL} S(12) + \frac{KLP.KP2}{TL} U(1) \quad (3.96)$$

$$\dot{S}(4)= \frac{1}{TY} S(3) - \frac{1}{TY} S(4) \quad (3.97)$$

$$\dot{S}(5)= \frac{6}{Tw} S(4) - \frac{2}{Tw} S(5) \quad (3.98)$$

$$\dot{S}(6)= -\frac{2}{M} S(4) + \frac{1}{M} S(5) - \frac{D}{M} S(6) - \frac{K1}{M} S(7) - \frac{K2}{M} S(12) \quad (3.99)$$

$$\dot{S}(7)= WB.\ S(6) \quad (3.100)$$

$$\dot{S}(8)= \frac{D}{T1} S(6) + \frac{K1}{T1} S(7) - \frac{1}{T1} S(8) + \frac{K2}{T1} S(12) - \frac{1}{T1} U(2) \quad (3.101)$$

$$\dot{S}(9)= \frac{D}{T2} S(6) + \frac{K1}{T2} S(7) - \frac{1}{T2} S(8) - \frac{1}{T2} S(9) + \frac{K2}{T2} S(12) - \frac{1}{T2} U(2) \quad (3.102)$$

$$\dot{S}(10)= \frac{T_4-T_3}{T_4^2} S(9) - \frac{1}{T4} S(10) \quad (3.103)$$

$$\dot{S}(11)= \frac{KA.K5}{TA} S(7) - \frac{KA.T_3.S(9)}{TA.T4} - \frac{KA}{TA} S(10) + \frac{KA.K6}{TA} S(12) -$$

$$- \frac{KA}{TA} U(3) \quad (3.104)$$

$$\dot{S}(12)= -\frac{KA.K5+K4}{TLDO} S(7) + \frac{KA.T3}{T_4.TLDO} S(9) + \frac{KA}{TLDO} S(10) - \frac{1}{TLDO} S(11) -$$

$$- \frac{1+KA.K3.k6}{K_3.TLDO} S(12) + \frac{KA}{TLDO} U(3) \quad (3.105)$$

A partir das equações precedentes pode-se definir as matrizes "F" e "B" da forma canônica de variáveis de estado para as três modalidades

vinculadas a condição operativa do sistema enfocado.

. primeira condição - sistema operando a vazio

F =

S(1)	S(2)	S(3)	S(4)	S(5)	S(6)
$-\frac{KP1 - K\Theta}{TN1}$					$\frac{K \cdot KP1 - K \cdot K\Theta \cdot KP1^2}{TN1} C$
	$-\frac{1}{TR}$	$\frac{1}{TR}$			
$-\frac{KLP}{TL}$	$-\frac{KLP}{TL}$				$-\frac{K \cdot KP1 - KLP \cdot C}{TL}$
		$\frac{1}{Ty}$	$-\frac{1}{Ty}$		
			$\frac{6}{TW}$	$-\frac{2}{TW}$	
			$-\frac{2}{M}$	$\frac{1}{M}$	$-\frac{D}{M}$

G =

U(1)
$-\frac{K \cdot KP1 - K \cdot KO \cdot KP1^2}{TN1}$
$\frac{K \cdot KLP \cdot KP1}{TL}$

. segunda condição - sistema operando em rede interligada com regulação de velocidade

$$F=$$

S(1)	S(2)	S(3)	S(4)	S(5)	S(6)	S(7)	S(8)	S(9)	S(10)	S(11)	S(12)
$-\frac{KP1 \cdot K\theta}{TN1}$					$\frac{K \cdot KP1 - K \cdot K\theta \cdot KP1^2 \cdot C}{TN1}$						
	$-\frac{1}{TR}$	$\frac{1}{TR}$									
$-\frac{KLP}{TL}$	$-\frac{KLP}{TL}$				$-\frac{K \cdot KP1 \cdot KLP \cdot C}{TL}$						
		$\frac{1}{Ty}$	$-\frac{1}{Ty}$								
			$\frac{6}{TW}$	$-\frac{2}{TW}$							
			$-\frac{2}{M}$	$\frac{1}{M}$	$-\frac{D}{M}$	$-\frac{K1}{M}$					$-\frac{K2}{M}$
					W_B						
					$\frac{D}{T1}$	$\frac{K1}{T1}$	$-\frac{1}{T1}$				$\frac{K2}{T1}$
					$\frac{D}{T2}$	$\frac{K1}{T2}$	$-\frac{1}{T2}$	$-\frac{1}{T2}$			$\frac{K2}{T1}$
								$\frac{T4-T3}{T^2_4}$	$-\frac{1}{T4}$		
						$\frac{KA \cdot K5}{TA}$		$-\frac{KA \cdot T3}{TA \cdot T4}$	$-\frac{KA}{TA}$		$\frac{K4 \cdot T6}{T4}$
						$-\frac{K4+KA \cdot K5}{TLDO}$		$\frac{KA \cdot T3}{T4 \cdot TLDO}$	$\frac{KA}{TLDO}$	$-\frac{1}{TLDO}$	$-\frac{1+KA \cdot K3 \cdot K6}{K3 \cdot TLDO}$

$G =$

U(1)	U(2)	U(3)
$-\frac{K \cdot KP1 - K \cdot KO \cdot KP_1^2}{TN1}$		
$\frac{K \cdot KLP \cdot KP1}{TL}$		
	$-\frac{1}{T1}$	
	$-\frac{1}{T2}$	
		$-\frac{KA}{TA}$
		$\frac{KA}{TLDO}$

. terceira condição - sistema operando em rede interligada com regulação de potência.

$$F =$$

S(1)	S(2)	S(3)	S(4)	S(5)	S(6)	S(7)	S(8)	S(9)	S(10)	S(11)	S(12)
					$\frac{KP2 \cdot D \cdot C + KP2 \cdot KK2}{TN2}$	$\frac{KP2 \cdot K1 \cdot C}{TN2}$					$\frac{KP2 \cdot K2 \cdot C}{TN2}$
	$-\frac{1}{TR}$	$\frac{1}{TR}$									
$-\frac{KLP}{TL}$	$-\frac{KLP}{TL}$				$-\frac{KLP \cdot KP2}{TL} \Phi C + KK2$	$-\frac{K1 \cdot KLP \cdot KP2 \cdot C}{TL}$					$-\frac{K2 \cdot KLP \cdot KP2 \cdot C}{TL}$
		$\frac{1}{Ty}$	$-\frac{1}{Ty}$								
			$\frac{6}{TW}$	$-\frac{2}{TW}$							
			$-\frac{2}{M}$	$\frac{1}{M}$	$-\frac{D}{M}$	$-\frac{K1}{M}$					$-\frac{K2}{M}$
					W_B						
					$\frac{D}{T1}$	$\frac{K1}{T1}$	$-\frac{1}{T1}$				$\frac{K2}{T1}$
					$\frac{D}{T2}$	$\frac{K1}{T2}$	$-\frac{1}{T2}$	$-\frac{1}{T2}$			$\frac{K2}{T2}$
								$\frac{T4 - T3}{T^2 4}$	$-\frac{1}{T4}$		
						$\frac{KA \cdot K5}{TA}$		$\frac{KA \cdot T3}{TA \cdot T4}$	$-\frac{KA}{TA}$		$\frac{KA \cdot K6}{TA}$
						$-\frac{K4 + KA \cdot K5}{TLDO}$		$\frac{KA \cdot T3}{T4 \cdot TLDO}$	$-\frac{KA}{TLDO}$	$-\frac{1}{TLDO}$	$-\frac{1 + KA \cdot K3 \cdot K6}{K3 \cdot TLDO}$

$$G = \begin{array}{|c|c|c|} \hline U(1) & U(2) & U(3) \\ \hline -\frac{KP2}{TN2} & & \\ \hline & & \\ \hline \frac{KLP \cdot KP2}{TL} & & \\ \hline & & \\ \hline & & \\ \hline & & \\ \hline & & \\ \hline & & \\ \hline & -\frac{1}{T1} & \\ \hline & -\frac{1}{T2} & \\ \hline & & \\ \hline & & -\frac{KA}{TA} \\ \hline & & \frac{KA}{TLDO} \\ \hline \end{array}$$

A discriminação das variáveis de estado utilizadas no modelo é:

S(1) . variável de controle integrador do regulador de velocidade, ou potência;

S(2) . variável de controle integrador da realimentação do regulador de abertura;

S(3) . curso da bobina de imersão ou atuador eletrônico hidráulico;

S(4) . curso do servomotor principal;

S(5) . variável relativa ao modelo da tubulação e conduto forçado;

S(6) . velocidade de rotação da máquina síncrona;

S(7) . ângulo de potência da máquina síncrona;

S(8) . variável relativa ao filtro residual passa alta do estabilizador;

S(9) . variável relativa ao circuito "wash-out" do estabilizador;

S(10) . variável relativa ao circuito de atraso-avanço do estabilizador;

S(11) . saída do regulador de tensão;

S(12) . fluxo de excitação da máquina síncrona;

Pelos diagramas estampados nas figuras 3.8 e 3.9 as variáveis de estado acima relacionadas representam grandezas diferenciais em pu (*).

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

*Não confundir grandeza diferencial com grandeza derivativa: a primeira vem relacionada com a diferença entre uma grandeza e seu valor base, enquanto a segunda vem relacionada com a função derivada.

ÍNDICE DE VARIÁVEIS UTILIZADAS NO CAPÍTULO 3

E . força eletromotriz gerada pela máquina síncrona
δ . ângulo de transferência de potência
V . tensão terminal da máquina síncrona em valor eficaz
V_∞ . tensão na barra infinita em valor eficaz
I . corrente total liberada pela máquina síncrona em valor eficaz
I_L . parcela da corrente referente a linha de transmissão
Ic . parcela da corrente referente ao shunt
Z_L . impedância equivalente das LT^s em paralelo
Zc . impedância equivalente shunt total em paralelo
v_∞ . tensão na barra infinita em valor instantâneo
Vd . tensão terminal da máquina de eixo direto em valor eficaz
Vq . tensão terminal da máquina de eixo em quadratura em valor eficaz
I_Ld. corrente na linha de eixo direto em valor eficaz
I_Lq. corrente na linha de eixo quadratura em valor eficaz
Id . corrente total liberada pela máquina de eixo direto em valor eficaz
Iq . corrente total liberada pela máquina de eixo em quadratura em valor eficaz
Rc . resistência equivalente do shunt total em paralelo
Xc . reatância equivalente do shunt total em paralelo
R_L . resistência equivalente das LT^s em paralelo
X_L . reatância equivalente das LT^s em paralelo
r . resistência do estator da máquina síncrona
LAD. indutância mútua entre rotor e estator
I_F . corrente de campo em valor eficaz
T'd0. constante de tempo transitório da máquina síncrona a circuito aberto
E_{FD}. tensão de campo em valor eficaz
E_S . tensão relativa ao efeito de saturação no circuito da excitatriz em valor eficaz
Xd . reatância da máquina síncrona de eixo direto
Xq . reatância da máquina síncrona de eixo em quadratura
X'd. reatância transitória da máquina síncrona de eixo direto
X'q. reatância transitória da máquina síncrona de eixo em quadratura
Eq . força eletromotriz de eixo em quadratura
Eaq. tensão relativa ao fluxo de eixo em quadratura em valor eficaz
E' . tensão relativa ao fluxo total no entreferro, transitório, em valor eficaz
E'q. tensão relativa ao fluxo em quadratura, no entreferro, transitório, em valor eficaz.
E'd. tensão relativa ao fluxo direto, no entreferro, transitório, em valor eficaz
Te . torque eletromagnético transferido pela máquina síncrona
Tm.. torque mecânico transferido pela turbina
Eaqo. tensão Eaq inicial

Eqo . tensão Eq inicial
Ido . corrente Id inicial
Iqo . corrente Iq inicial
δo . ângulo δ inicial
Vdo . tensão Vd inicial
Vqo . tensão Vq inicial
Vo . tensão V inicial
$\dot{y}$. admitância, valor fasorial físico
$\dot{Y}$. admitância, valor fasorial de barra
P . potência ativa
Q . potência reativa
W . freqüência de rotação
Ta . torque acelerante
Θ . argumento do fasor admitância
α . ângulo entre a tensão no barramento infinito e um referencial qualquer
ϕ . ângulo entre a tensão de saída da máquina e a tensão no barramento infinito

CAPÍTULO 4

ESTUDOS DE SIMULAÇÃO - CONCLUSÕES

4.1 GERAL

No capítulo precedente foram desenvolvidos os modelos principais que permitiram a construção do sistema elétrico sobre o qual serão dirigidas as análises nas quais este trabalho se fundamenta.
Para tal foi elaborado um programa computacional, bastante flexível, que permite se analisar o comportamento do sistema sob várias condições tanto de ajustes quanto de operação. Como foi menção do capítulo anterior vale lembrar que os dados aqui utilizados se referem ao sistema elétrico relativo a instalação da Usina e SE de Emborcação com os valores levantados em campo.
Neste capítulo serão apresentadas as curvas do modelo normal reajustado em campo via resposta no tempo, bem como aquelas curvas relativas ao comportamento do sistema regulador desajustado.
Em seguida os modelos desajustados serão submetidos ao ajuste via controle ótimo por realimentação de estado sob o enfoque das variáveis discretizadas quando o conteúdo do programa será testado. Todas as curvas serão obtidas via subrotina "IMPRE" de impressão no tempo enquanto o programa será apresentado no tópico seguinte.

4.2 APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para que a idéia inicial proposta por este trabalho viesse a se tornar realidade a elaboração de um programa computacional tornou-se imprescindível de execução uma vez que o ataque manual do problema em questão seria praticamente impossível de ser realizado.
De modo a permitir exploração em outras áreas apenas o programa principal é específico de uma instalação de geração hidráulica enquanto as principais aplicações vêm desenvolvidas em subrotinas de dimensões flexíveis facilmente implementáveis.
Para o presente caso o programa principal chama as subrotinas seguintes:

- PAMO que determina os parâmetros K1, K2, K3, K4, K5 e K6 do modelo;
- MATDIS que discretiza as matrizes "F" e "G" da equação na forma canônica de variáveis de estado;
- EIGVAL que determina os autovalores de u'a matriz genérica;
- RICATI que resolve a equação matricial de Riccati;
- REC que auxilia na escolha da matriz "Q" de penalização;
- IMPRE que plota os gráficos desejados;

. PINV auxiliar a subrotina MINV;

. MINV que promove a inversão de matrizes;

. MULTIQ que multiplica matrizes;

. HSBG que forma a matriz triangular;

. ANG que determina o argumento de um número complexo.

No programa principal encontram-se definidos os parâmetros e as variáveis utilizadas bem como a identificação de cada uma destas com o campo a ser preenchido. Para evitar perda de significação e também por uma questão de padronização as grandezas envolvidas no modelo encontram-se normalizadas.
O programa principal permite se escolher entre os modos operativos de u'a máquina em vazio, de máquina excitada mas em vazio, de máquina interligada com regulação de velocidade e de máquina interligada com regulação de potência ativa.
Permite também analisar o sistema na própria condição presente ou então submetido ao processo do controle ótimo via realimentação de estado. Em ambas as situações são monitorados os autovalores do sistema sob enfoque.
Nos tópicos seguintes serão simulados os casos relativos aos dois modos operativos mais comuns, notadamente a operação em vazio e a operação em rede interligada com regulação de potência. Em cada situação serão analisados casos onde se implementarão ajustes resultados de ensaios de comissionamento, além de prover o sistema com parâmetros desajustados para a aplicação do processo de reajuste que o presente trabalho se propõe. Todas as subrotinas mencionadas encontram-se no Apêndice 2A.

4.3 SIMULAÇÃO IMPLEMENTANDO AJUSTES DE COMISSIONAMENTO

Nesta etapa de simulação foram considerados os mesmos ajustes para o sistema de Emborcação apresentados no capítulo precedente. Com estes pode-se verificar o comportamento operativo do sistema frente a uma ação de desequilíbrio caracterizado pela entrada, ou saída, de 10% da carga ativa alimentada. O comportamento máquina contra a barra infinita representa bem o desempenho a ser verificado.
As simulações números "01" e "02" mostram o comportamento do sistema em foco com os ajustes datados de época de comissionamento.
A primeira simulação retrata o comportamento apenas do regulador de velocidade para a máquina operando em vazio. Esta simulação considera o desequilíbrio no somatório de potência. Os resultados foram comparados com as curvas obtidas em campo e se mostraram bastante fieis.
A segunda simulação já mostra o comportamento de todo o sistema contra a barra infinita na condição de operação em rede interligada. É bastante interessante notar o comportamento de um sistema que possui

um grupo regulador de potência distinto dos até aqui conhecidos reguladores de velocidade. Existem atualmente sistemas que implementam dois tipos de ajustes para o circuito que introduz o efeito da queda transitória só que a regulação ainda é realizada via velocidade nas condições de operação em vazio e operação em rede interligada. Em outros grupos mais modernos surge a opção na transdução, em velocidade ou em potência.

No modelo atual a proposição consiste em separar a regulação de velocidade da regulação de potência que garante um grau maior de qualidade nas operações em rede interligada.

Observar o rápido restabelecimento do sistema frente uma entrada de 10% de carga.

4.4 SIMULAÇÃO IMPLEMENTANDO O SISTEMA DESAJUSTADO

Nesta etapa de simulação alterou-se o valor da constante de tempo da queda transitória tanto do regulador de velocidade quanto do regulador de potência e repetiu-se as mesmas simulações verificadas no subitem 4.3, precedente. Os resultados podem ser analisados através das simulações números "03" e "04". Notar o grau de sensibilidade da constante de tempo alterada. O comportamento do regulador de velocidade em operação em vazio é bastante oscilatório enquanto para o regulador de potência, em rede interligada, o ajuste implementado fez com que o sistema perdesse a estabilidade.

Alteração realizada na constante de tempo da queda transitória:

SISTEMA	AJUSTE COMISSIONAM.	AJUSTE IMPLEM.
REG.DE VELOCIDADE:	5,2 s	2,0 s
REG.DE POTÊNCIA :	1,1 s	0,3 s

4.5 SIMULAÇÃO IMPLEMENTANDO O CONTROLE ÓTIMO

Constatada a instabilização dos sistemas submetidos às simulações precedentes números "03" e "04" aplicou-se o processo de estabilização via controle ótimo por realimentação de estado.

Para tal se fez necessário a boa escolha das matrizes "Z" e "Q" que definirão o índice de desempenho capaz de promover o grau de medição para o comportamento do sistema em foco.

Na realidade a escolha da matriz "Z", como u'a matriz diagonal unitária, é suficiente, porém a escolha da matriz "Q" além de difícil é imperativa. Durante os estudos de pesquisa constatou-se que para o sistema elétrico de potência a velocidade, o ângulo de potência e o fluxo no entreferro são as variáveis de estado mais influentes na formação da matriz "Q" devendo ser básicas na implementação de outros valores. Estas conclusões foram obtidas através de muitas simulações.

A simulação número 05 executa a aplicação do programa estabilizando o sistema que antes era excessivamente oscilante. No resultado pode-se obter a matriz de realimentação de estado.

Do mesmo modo, através da simulação número 06, para a operação com todos os sistemas de controle presentes obteve-se, também, a estabilização.

Como alternativa tentou-se procurar outra matriz "Q" para a condição de operação em vazio, semelhante a simulação número 05, e os resultados se apresentaram melhores. Ver simulação número 07, seguindo a análise via autovalores.

4.6 CONCLUSÕES

Como finalidade primordial a implementação simples de um trabalho voltado para a exploração das técnicas do controle ótimo sob a condição da realimentação de estado mostrou que, muito antes de se resolver o problema, a definição de critérios e a utilização das técnicas específicas são fatos inquestionáveis do processo.

A opção pela exploração das técnicas de discretização das variáveis bem como todo o complexo matemático envolvido não fugiu da característica típica que o assunto detém.

Neste trabalho foram duas as finalidades que se buscou atingir. Primeiramente se tentaria dominar, basicamente, o assunto para que, numa segunda fase se pudesse implementar uma série de simulações verificativas da qualidade do programa computacional desenvolvido.

Notadamente aos aspectos descritos as limitações de tempo de computação não foram fatos desprezíveis.

Pode-se observar o grande número de iterações a que o problema deveria ser submetido. Havia casos em que a iteração atingia cem mil vezes sem que se chegasse a matriz de Riccati estabilizada. Outro ponto negativo vem associado ao fato de que para cada matriz "Q" escolhida para a definição do índice de desempenho existe u'a matriz "K" de Riccati, solução, que não estabiliza o modelo utilizado.

Apesar de todas as dificuldades expostas o que se pode concluir foi a sensibilidade que certas variáveis de estado apresentam sobre outras relativamente a matriz "Q". Esta sensibilidade pode ser definida como o efeito que a implementação da matriz "Q" tem sobre a parte real dos autovalores do sistema elétrico de potência aqui analisado.

Em termos práticos a aplicação do trabalho tanto a nível de projeto quanto a nível de otimização parece garantida. A utilização de transdutores parece também bastante viável uma vez que para todas as variáveis exploradas a exeqUibilidade foi confirmada, exceto aquela relativa ao modelo do conduto forçado, variável S(5).

Como observação final vale lembrar que não se preocupou, durante as simulações, em se procurar a matriz "Q" ideal para o índice de desempenho estipulado por não ser esta a meta do presente trabalho, mas sim apresentar a possibilidade de se atingir tal condição.

Deste modo, em relação as últimas simulações, pode-se relacioná-las com os termos controle subótimo.

Em outros textos ou mesmo em outros processos para a determinação da matriz de Riccati a definição do índice de desempenho se dificulta na

implementação da matriz "Q". Em muitos casos, para pequenos sistemas certos processos são válidos, mas quando a ordem das equações crescem a deficiência dos mesmos é notória.

O que se conseguiu por este trabalho, dentro do campo da engenharia dos sistemas elétricos de potência, foi procurar observar o procedimento envolvido e estabelecer certos critérios que pudessem facilitar, ou mesmo minimizar, o problema da escolha da matriz "Q" até aqui referenciada. Para o programa muito antes da escolha da mencionada matriz é fundamental a estimação da matriz "K" inicial. A proposição de literatura que determina para a solução iterativa da equação matricial de Riccati estimar u'a matriz diagonal unitária de partida também não surtiu o efeito desejado. Neste caso esbarrou-se na ordem das matrizes envolvidas.

Apesar do recurso aqui proposto de se implementar a matriz "Q" pela monitoração dos autovalores o método mais prático ainda consiste em se estimar de maneira razoável a matriz "K" de partida e por meio desta procurar a matriz "Q" que define o índice de desempenho. No programa desenvolvido a subrotina "REC" executa este procedimento. (*)

4.7 PROPOSIÇÕES FUTURAS

Com base no que foi desenvolvido dentro dos limites aos quais este trabalho se restringiu pode-se propor futuros temas que permitiriam a continuidade do mesmo. Ordena-se, como seguinte, os principais assuntos:

. implementar alternações nos pontos de realimentação de estado. Estudar a influência de cada um deles isoladamente e interrelacionados;

. pesquisar os efeitos introduzidos nas partes reais dos autovalores do sistema quando se implementa a matriz "Q" do índice de desempenho adotado neste trabalho;

. estender o conceito de discretização de variáveis, abordado neste trabalho, ao campo da transformada "Z";

. elaboração de um projeto básico utilizando as técnicas aqui apresentadas nos programas de modernização e melhoria de pequenas instalações, uma vez que a atual política vem incentivando a ativação e mesmo a res-restauração de pequenas centrais, fato este que facilitaria o trabalho devido a disponibilidade da liberação da instalação para ensaios;

.. implementar outras técnicas de resolução do problema como por exemplo: cálculo manual para pequenos sistemas e utilização dos processos propostos por Yao-nan Yu, referência Livro [4], todos no campo da matemática contínua.

---

*A análise proposta vem desenvolvida no apêndice 1.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

SUBSÍDIO PARA A ESCOLHA DA MATRIZ "Q" PARA O ÍNDICE DE DESEMPENHO NA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO MATRICIAL DE RICCATI

Reportando-se ao capítulo 2, equação 2.33, pode-se escrever que:

$$K(K) = Q + A^T.K(K+1)\left[I + B.Z^{-1}.B^T.K(K+1)\right]^{-1}.A$$

A equação matricial acima representa a equação de Riccati sobre a qual foram trabalhados os procedimentos e os métodos analisados até aqui. No capítulo 2, todos os desenvolvimentos bem como a origem e a determinação de cada matriz podem ser facilmente obtidos.

A proposição consiste na consideração de que o processo iterativo já se encontra na fase estabilizada.

Sendo assim tem-se:

$$K(K) = K(K+1) = K$$

Deste modo a equação anterior permite escrever que:

$$Q = K - A^T.K.\left[I + B.Z^{-1}.B^T.K\right]^{-1}.A$$

Com a estimação da matriz "K" de Riccati chega-se a matriz "Q" que vem associada a esta.

Com este recurso evita-se o grande número de iterações necessário para se atingir a matriz "K" a partir da matriz "Q".

APÊNDICE 2-A

APRESENTAÇÃO DAS SUBROTINAS UTILIZADAS

```
                C                                                                       EFE11120
                C                                                                       EFE11130
                C                                                                       EFE11140
                C                                                                       EFE11150
0001                    SUBROUTINE FAMC(RL,XL,RC,XC,VO,ALFO,VINF,Y10,Y12,TET10,TET12,   EFE11160
                       *                    XD,XQ,XLD,K1,K2,K3,K4,K5,K6,PE,EO)          EFE11170
                C                                                                       EFE11180
                C                                                                       EFE11190
                C                                                                       EFE11200
                C     PROPOSICAO    ESTA SUBROTINA VISA O LEVANTAMENTO DOS PARAMETROS    EFE11210
                C                   K1,K2,...,K6 , DO MODELO DESENVOLVIDO NO TRABALHO   EFE11220
                C                   DE DISSERTACAO DE MESTRADO , DESTE AUTOR ,NO ITEM   EFE11230
                C                   3.25 , DENOMINADO DE MODELO TIPICO PARA REPRESEN-   EFE11240
                C                   TACAO DE UMA MAQUINA SINCRONA ACOPLADA  A UM BAR-   EFE11250
                C                   RAMENTO INFINITO .                                  EFE11260
                C                                                                       EFE11270
                C                                                                       EFE11280
                C                                                                       EFE11290
                C     DEFINICAO DOS PARAMETROS                                          EFE11300
                C                                                                       EFE11310
                C     K1,K2,...,K6   PARAMETROS RELATIVOS AO MODELO ALUDIDO ACIMA .     EFE11320
                C     TLDO      CONSTANTE DE TEMPO TRANSITORIA DE EIXO DIRETO A CIRCUI- EFE11330
                C               TO ABERTO .                                             EFE11340
                C     XD        REATACIA DE EIXO DIRETO .                               EFE11350
                C     XQ        REATANCIA DE EIXO EM QUADRATURA .                       EFE11360
                C     XLD       REATANCIA TRANSITORIA DE EIXO DIRETO .                  EFE11370
                C     XLQ       REATANCIA TRANSITORIA DE EIXO EM QUADRATURA .           EFE11380
                C     RL        RESISTENCIA DA LINHA DE TANSMISSAO .                    EFE11390
                C     XL        REATANCIA DA LINHA DE TRANSMISSAO .                     EFE11400
                C     RC        RESISTENCIA DA COMPESACAO SHUNT .                       EFE11410
                C     XC        REATANCIA DA COMPENSACAO SHUNT .                        EFE11420
                C     LB1       LAMBIDA 1 .                                             EFE11430
                C     LB2       LAMBIDA 2.                                              EFE11440
                C     EAGO      FLUXO INICIAL .                                         EFE11450
                C     IDO       CORRENTE DA MAQUINA DE EIXO DIRETO INICIAL .            EFE11460
                C     IQO       CORRENTE DA MAQUINA DE EIXO EM QUADRATURA INICIAL .     EFE11470
                C     VO        TENSAO TERMINAL INICIAL .                               EFE11480
                C     ALFO      ANGULO DA TENSAO TERMINAL INICIAL .                     EFE11490
                C     EO        FEM DA MAQUINA .                                        EFE11500
                C     DELO      ANGULO INICIAL ENTRE A FEM E A TENSAO TERMINAL .        EFE11510
                C     VINF      TENSAO DA BARRA INFINITA .                              EFE11520
                C     PE        POTENCIA ELETRICA DA MAQUINA .                          EFE11530
                C     VDO       TENSAO TERMINAL DE EIXO DIRETO INICIAL .                EFE11540
                C     VQO       TENSAO TERMINAL DE EIXO EM QUADRATURA INICIAL .         EFE11550
                C     EDO       FEM DE EIXO DIRETO .                                    EFE11560
                C     EQO       FEM DE EIXO EM QUADRATUTA .                             EFE11570
                C     DELCI     ANGULO APROXIMADO ENTRE A FEM E A TENSAO TERMINAL .      EFE11580
                C     TET10     ANGULO DA ADMITANCIA ENTRE A BARRA E ATERRA , FISICO .   EFE11590
```

```
C     TET12    ANGULO DA ADMITANCIA ENTRE BARRAS , FISICA .                EFE11600
C     C1       COEFICIENTE .                                               EFE11610
C     C2       COEFICIENTE .                                               EFE11620
C     Y10      ADMITANCIA SHUNT , FISICA .                                 EFE11630
C     Y12      ADMITANCIA ENTRE BARRAS , FISICA .                          EFE11640
C     YY11     ADMITANCIA PROPIA DA BARRA TERMINAL .                       EFE11650
C     YY12     ADMITANCIA MUTUA DA BARRA TERMINAL .                        EFE11660
C     TETA11   ANGULO DA ADMITANCIA PROPIA .                               EFE11670
C     TETA12   ANGULO DA ADMITANCIA ENTRE BARRAS .                         EFE11680
C                                                                          EFE11690
C                                                                          EFE11700
C                                                                          EFE11710
C     DECLARACAO DAS VARIAVEIS                                             EFE11720
C                                                                          EFE11730
0002        IMPLICIT LOGICAL (A-Z)                                         EFE11740
C                                                                          EFE11750
0003        INTEGER I                                                      EFE11760
C                                                                          EFE11770
0004        REAL K1,K2,K3,K4,K5,K6,XD,XQ,XLD,XLQ,Y10,Y12,YY11,YY12         EFE11780
0005        REAL LB1,LB2,DDEL,FACC,IDO,ICC,EQ,EDC,EQC,VDC,VCO              EFE11790
0006        REAL VC,ALFC,DELO,DELCI,VINF,TET10,TET12,PE                    EFE11800
0007        REAL SIN,COS,SQRT,ATAN,ABS,AB,BB,CB,DB,DIF                     EFE11810
0008        REAL TETA11,TETA12,TETA                                        EFE11820
0009        REAL RC,XC,R1,XL,C1,C2,LIM                                     EFE11830
C                                                                          EFE11840
C     ESCOLHA O LIMITE DE PRECISAO                                         EFE11850
C                                                                          EFE11860
0010        LIM = 0.01                                                     EFE11870
C                                                                          EFE11880
C     EXECUCAO DA SUBROTINA                                                EFE11890
C                                                                          EFE11900
0011        LB1  = 1.0 + (RL*RC + XL*XC)/(RC**2 + XC**2)                   EFE11910
0012        LB2  = (RL*XC - RC*XL)/(RC**2 + XC**2)                         EFE11920
0013        DDEL =- ((RL**2 + XL**2) + (XLD+XQ)*(LB1*XL + LB2*RL) +        EFE11930
           *        (LB1**2 + LB2**2)*XLD*XQ)                              EFE11940
C                                                                          EFE11950
C                                                                          EFE11960
C     EXECUCAO DO PROGRAMA                                                 EFE11970
C                                                                          EFE11980
0014        AB =  Y10*COS(TET10) + Y12*COS(TET12)                          EFE11990
0015        BB =  Y10*SIN(TET10) + Y12*SIN(TET12)                          EFE12000
0016        CB = -Y12*COS(TET12)                                           EFE12010
0017        DB = -Y12*SIN(TET12)                                           EFE12020
C                                                                          EFE12030
0018        YY11 = SQRT (AB**2 + BB**2)                                    EFE12040
0019        YY12 = SQRT (CB**2 + DB**2)                                    EFE12050
C                                                                          EFE12060
C     CHAMADA DA SUBROTINA  ANG                                            EFE12070
```

```
                C                                                                       EFE12080
0020            CALL ANG (AB,BB,TETA)                                                   EFE12090
                C                                                                       EFE12100
0021            TETA11 = TETA                                                           EFE12110
               'C                                                                       EFE12120
               'C                                                                       EFE12130
0022            CALL ANG (CB,DB,TETA)                                                   EFE12140
                C                                                                       EFE12150
0023            TETA12 = TETA                                                           EFE12160
                C                                                                       EFE12170
0024            C1    = EC*VC/XC                                                        EFE12180
0025            C2.   = ((XC-XO)/(XD*XC))*(VC**2)                                       EFE12190
0026            IDO   = YY11*VO*SIN(ALFO + TETA11) + YY12*VINF*SIN(TETA12)              EFE12200
0027            IQC   = YY11*VO*COS(ALFO + TETA11) + YY12*VINF*COS(TETA12)              EFE12210
                C                                                                       EFE12220
0028            DELCI = C.C1                                                            EFE12230
0029            DELC  = PE/(C1 + C2)                                                    EFE12240
                C                                                                       EFE12250
0030            DO 020 I = 1,500                                                        EFE12260
0031                    VCC   = - VC*SIN(DELC)                                          EFE12300
0032                    VCC   =   VC*COS(DELC)                                          EFE12310
0033                    ECC   =   VCC + XD*IQC                                          EFE12320
0034                    ECC   =   VCC - XD*IDO                                          EFE12330
0035                    EC    =   SQRT(ECO**2 + EQO**2)                                 EFE12340
0036                    DIF   =   ABS(DELC - DELCI)
0037                    IF (DIF .LE. LIM) GO TO 021
0038                  DELCI =   DELC
0039                    C1    =   EC*VO/XD                                              EFE12350
0040                    DELC  =   PE/(C1 + C2)                                          EFE12360
0041          020 CONTINUE                                                              EFE12370
                C                                                                       EFE12380
0042          021 CONTINUE                                                              EFE12390
                C                                                                       EFE12400
0043            EACC = EC + (XD - XC)*ICO                                               EFE12410
                C                                                                       EFE12420
                C       DETERMINACAO DOS PARAMETROS K1,K2,...,K6                        EFE12430
                C                                                                       EFE12440
0044            K1 = (1.C/DDEL)*(((XLD-XC)*(LB1*XO + XL)*ICO - (LB2*XLD + RL)*          EFE12450
               *       EACO)*(SIN(DELC - ALFO)) - ((XLC-XC)*(LB2*XC + RL)*ICO +         EFE12460
               *       (LB1*XLD +XL)*EACC)*COS(DELO-ALFO))*VINF                         EFE12470
                C                                                                       EFE12480
0045            K2 = IOC + (1.C/DDEL)*(((LB1*XL + LB2*RL) + (LB1**2 + LB2**2)*          EFE12490
               *      XC)*(XLD-XC)*ICO + (LB2*XL - LB1*RL)*EACO)                       EFE12500
                C                                                                       EFE12510
0046            K3 = 1.C/(1.C - (XD-XLD)*(LB1*XL + LB2*RL + (LB2**2 + LB1**2)*          EFE12520
               *      XC)/DDEL)                                                        EFE12530
                C                                                                       EFE12540
0047            K4 =  ((XD-XLD)*((RL + LB2*XC)*(COS(DELO - ALFO)) - (XL + LB1*          EFE12550
```

```
                *       XC)*(SIN(DELO - ALFC)))*VINF)/DDEL                                      EFE12560
                C                                                                               EFE12570
0048                    K5 = (VINF/DDEL)*((VCO/1.0)*XC*((RL + LB2*XLD)*SIN(DELO - ALFO) +       EFE12580
                *       (XL + LB1*XLD)*COS(DELO - ALFO)) - (VCO/1.0)*XLD*((RL +                 EFE12590
                *       LB2*XC)*COS(DELO - ALFC) - (XL + LB1*XC)*SIN(DELO - ALFO)))             EFE12600
                C                                                                               EFE12610
0049                    K6 = (VCC/1.C)*(1.0 + (XLD/DDEL)*(LB1*XL + LB2*RL + (LB1**2 +           EFE12620
                *       LB2**2)*XC)) - (VCO/1.0)*(XO/DDEL)*(LB2*XL - LB1*RL)                    EFE12630
                C                                                                               EFE12640
                C       IMPRESSAO DOS PARAMETROS
                C
                C       WRITE (6,950)
                C 950   FORMAT(1H1//23X,'******* DADOS DO SISTEMA ELETRICO *******'///)
                C
                C       WRITE (6,951)
                C 951   FORMAT(18X,'K1',8X,'K2',9X,'K3',7X,'K4',9X,'K5',8X,'K6')
                C
                C       WRITE (6,949)
                C 949   FORMAT(15X,6(E8.4,2X))
                C
0050                    RETURN                                                                  EFE12650
0051                    END                                                                     EFE12660
```

```
                C                                                                       EFE16050
                C                                                                       EFE16060
                C                                                                       EFE16070
0001                    SUBROUTINE MATDIS (AF,BG,A,B,N,L,TT)                            EFE16080
                C                                                                       EFE16090
                C                                                                       EFE16100
                C                                                                       EFE16110
                C       PROPOSICAO   ESTA SUBROTINA TEM POR FINALIDADE TRANSFORMAR AS   /EFE16120
                C                    MATRIZES 'AF' E 'BG' , DA PLANTA DO MODELO CONTINUO ,EFE16130
                C                    NAS MATRIZES 'A' E 'B' , DO MODELO DISCRETIZADO ,  /EFE16140
                C                    USANDO , PARA TAL , O PROCESSO DESCRITO NO CAPITULO EFE16150
                C                    '6' DA DISSERTACAO DE MESTRADO DE 'GOMES,L.R.       EFE16160
                C                                                                       EFE16170
                C                                                                       EFE16180
                C                                                                       EFE16190
                C                                                                       EFE16200
                C       DEFINICAO DOS ARGUMENTOS                                        EFE16210
                C                                                                       EFE16220
                C       AF(N,N)      MATRIZ PRINCIPAL DO MODELO CONTINUO.               EFE16230
                C       BG(N,L)      MATRIZ DE EXCITACAO DO MODELO CONTINUO.            EFE16240
                C        A(N,N)      MATRIZ PRINCIPAL DO MODELO DISCRETIZADO .          EFE16250
                C        B(N,L)      MATRIZ DE EXCITACAO DO MODELO DISCRETIZADO .       EFE16260
                C            TT      INCREMENTO DO TEMPO DISCRETIZADO PARA A ENTRADA .  EFE16270
                C                                                                       EFE16280
                C                                                                       EFE16290
                C                                                                       EFE16300
                C       DECLARACAO DAS VARIAVEIS                                        EFE16310
                C                                                                       EFE16320
0002                    REAL AF(14,14),BG(14,14),A(14,14),B(14,14)                      EFE16330
0003                    REAL INTEGA(14,14),ST(14,14)                                    EFE16340
                C                                                                       EFE16350
0004                    INTEGER POWER                                                   EFE16360
                C                                                                       EFE16370
                C                                                                       EFE16380
                C       EXECUCAO DO PROGRAMA                                            EFE16390
                C                                                                       EFE16400
0005                    NORM = C.C                                                      EFE16410
                C                                                                       EFE16420
0006                    DO 001 I = 1,N                                                  EFE16430
0007                            DO 002 J = 1,N                                          EFE16440
0008                                    ST(I,J) = TT*AF(I,J)                            EFE16450
0009                                    A(I,J) = ST(I,J)                                EFE16460
0010                      002           CONTINUE                                        EFE16470
0011                    001 CONTINUE                                                    EFE16480
                C                                                                       EFE16490
                C                                                                       EFE16500
0012                    POWER = 100                                                     EFE16510
                C                                                                       EFE16520
```

```
0013                  DO 007 I = 2,POWER                                                EFE16530
0014                     FPOWR = POWER - I + 2                                          EFE16540
0015                     DO 005 J = 1,N                                                 EFE16550
0016                        DO 003 K = 1,N                                              EFE16560
0017                           INTEGA(J,K) = A(J,K)/FPOWR                               EFE16570
0018                003    CONTINUE                                                    EFE16580
0019                        INTEGA(J,J) = INTEGA(J,J) + 1.0                            EFE16590
0020                005    CONTINUE                                                    EFE16600
0021                     CALL MULTIC (ST,INTEGA,A,N,N,N)                               EFE16610
0022                007 CONTINUE                                                       EFE16620
                    C                                                                  EFE16630
                    C                                                                  EFE16640
0023                  DO 009 J = 1,N                                                   EFE16650
0024                     A(J,J) = A(J,J) + 1.0                                         EFE16660
0025                     DO 008 K = 1,N                                                EFE16670
0026                        INTEGA(J,K) = TI*INTEGA(J,K)                               EFE16680
0027                008    CONTINUE                                                    EFE16690
0028                009 CONTINUE                                                       EFE16700
                    C                                                                  EFE16710
0029                  CALL MULTIC (INTEGA,PG,B,N,N,L)                                  EFE16720
                    C                                                                  EFE16730
                    C                                                                  EFE16740
                    C     IMPRESSAO DAS MATRIZES DISCRETIZADAS                         EFE16750
                    C                                                                  EFE16760
0030                  WRITE (6,017)                                                    EFE16770
0031                017 FORMAT(1H1////45X,'***** MATRIZ A DISCRETIZADA *****'/////)   EFE16780
                    C                                                                  EFE16790
0032                  DO 018 I = 1,N                                                   EFE16800
0033                     WRITE (6,020) (A(I,J),J = 1,N)                                EFE16810
0034                020    FORMAT(3X,(12(E8.2,1X)))                                    EFE16820
0035                018 CONTINUE                                                       EFE16830
                    C                                                                  EFE16840
                    C                                                                  EFE16850
0036                  WRITE (6,019)                                                    EFE16860
0037                019 FORMAT(1H1////45X,'***** MATRIZ B DISCRETIZADA *****'/////)   EFE16870
                    C                                                                  EFE16880
0038                  DO 018 I = 1,N                                                   EFE16890
0039                     WRITE (6,021) (B(I,J),J = 1,L)                                EFE16900
0040                021    FORMAT(3X,(4(E8.2,1X)))                                     EFE16910
0041                018 CONTINUE                                                       EFE16920
                    C                                                                  EFE16930
                    C                                                                  EFE16940
0042                  RETURN                                                           EFE16950
0043                  END                                                              EFE16960
```

```
C
C
C
C     SUBROUTINE EIGVAL
C
C     PURPOSE
C        COMPUTE THE EIGENVALUES OF A REAL ALMOST TRIANGULAR MATRIX
C
C     USAGE
C        CALL EIGVAL (M,A,RR,RI,IANA,IA)
C
C     DESCRIPTION OF THE PARAMETERS
C     M          ORDER OF THE MATRIX
C     A          THE INPUT MATRIX M BY M
C     RR         VECTOR CONTAINING THE REAL PARTS OF THE EIGENVALUES
C                ON RETURN
C     RI         VECTOR CONTAINING THE IMAGINARY PARTS OF THE EIGEN-
C                VALUES ON RETURN
C     IANA       VECTOR WHOSE DIMENSION MUST BE GREATER THAN OR EQUAL
C                TO M,CONTAINING ON RETURN INDICATIONS ABOUT THE WAY
C                THE EIGENVALUES APPEARED (SEE MATH. DESCRIPTION)
C     IA         SIZE OF THE FIRST DIMENSION ASSIGNED TO THE ARRAY A
C                IN THE CALLING PROGRAM WHEN THE MATRIX IS IN DOUBLE
C                SUBSCRIPTED DATA STORAGE MODE.
C                IA=M WHEN THE MATRIX IS IN SSP VECTOR STORAGE MODE.
C
C     REMARKS
C     THE ORIGINAL MATRIX IS DESTROYED
C     THE DIMENSION OF RR AND RI MUST BE GREATER OR EQUAL TO M
C
C     SUBROUTINES AND FUNCTION SUBPROGRAMS REQUIRED   NONE
C
C     METHOD
C     QR DOUBLE INTERATION
C
C     REFERENCES
C     J.G.F. FRANCIS - THE QR TRANSFORMATION ---THE COMPUTER
C     JOURNAL, VOL. 4, NO. 3, OCTOBER 1961, VOL. 4, NO. 4, JANUARY
C     1962. J.H. WILKINSON - THE ALGEBRAIC EIGENVALUE PROBLEM -
C     CLARENDON PRESS , OXFORD, 1965.
C
C
C
0001        SUBROUTINE EIGVAL (M,A,RR,RI,IANA,IA)
0002        DIMENSION A(196),RR(14),RI(14),PRR(215),PRI(215),IANA(214)
0003        INTEGER P,P1,Q
C
0004        E7=1.0E-8
```

```
0005                E6=1.0E-6
0006                E10=1.0E-10
0007                DELTA=0.5
0008                MAXIT=30
                C
                C     INITIALIZATION
                C
0009                N=M
0010             20 N1=N-1
0011                IN=N1*IA
0012                NN=IN+N
0013                IF(N1) 30,1300,20
0014             30 NP=N+1
                C
                C     ITERATION COUNTER
                C
0015                IT=0
                C
                C     ROOTS OF THE 2ND ORDER MAIN SUBMATRIX AT THE PREVIOUS
                C     ITERATION
                C
0016                DO 40 I=1,2
0017                PRR(I)=0.0
0018             40 PRI(I)=0.0
                C
                C     LAST TWO SUBDIAGONAL ELEMENTS AT THE PREVIOUS ITERATION
                C
0019                PAN=0.0
0020                PAN1=0.0
                C
                C     ORIGIN SHIFT
                C
0021                R=0.0
0022                S=0.0
                C
                C     ROOTS OF THE LOWER MAIN 2 BY 2 SUBMATRIX
                C
0023                N2=N1-1
0024                IN1=IN-IA
0025                NN1=IN1+N1
0026                N1N=IN+N1
0027                N1N1=IN1+N1
0028             60 T=A(N1N1)-A(NN)
0029                U=T*T
0030                V=4.0*A(N1N)*A(NN1)
0031                IF(ABS(V)-U*E7) 100,100,65
0032             65 T=U+V
0033                IF(ABS(T)-AMAX1(U,ABS(V))*E6) 67,67,68
```

```
0034            67 T=0.0
0035            68 U=(A(N1N1)+A(NN))/2.0
0036               V=SQRT(ABS(T))/2.0
0037               IF(T) 140,70,70
0038            70 IF(U) 80,75,75
0039            75 RR(N1)=U+V
0040               RR(N)=U-V
0041               GO TO 130
0042            80 RR(N1)=U-V
0043               RR(N)=U+V
0044               GO TO 130
0045           100 IF(T) 120,110,110
0046           110 RR(N1)=A(N1N1)
0047               RR(N)=A(NN)
0048               GO TO 130
0049           120 RR(N1)=A(NN)
0050               RR(N)=A(N1N1)
0051           130 RI(N)=0.0
0052               RI(N1)=0.0
0053               GO TO 160
0054           140 RR(N1)=U
0055               RR(N)=U
0056               RI(N1)=V
0057               RI(N)=-V
0058           160 IF(N2) 1280,1280,180
                C
                C     TESTS OF CONVERGENCE
                C
0059           180 N1N2=N1N1-IA
0060               RMOD=RR(N1)*RR(N1)+RI(N1)*RI(N1)
0061               EPS=E10*SQRT(RMOD)
0062               IF(ABS(A(N1N2))-EPS) 1280,1280,240
0063           240 IF(ABS(A(NN1))-E10*ABS(A(NN))) 1300,1300,250
0064           250 IF(ABS(PAN1-A(N1N2))-ABS(A(N1N2))*E6) 1240,1240,260
0065           260 IF(ABS(PAN-A(NN1))-ABS(A(NN1))*E6) 1240,1240,300
0066           300 IF(IT-MAXIT) 320,1240,1240
                C
                C     COMPUTE THE SHIFT
                C
0067           320 J=1
0068               DO 360 I=1,2
0069               K=NP-I
0070               IF(ABS(RR(K)-PRR(I))+ABS(RI(K)-PRI(I))-DELTA*(ABS(RR(K))
                  1    +ABS(RI(K)))) 340,360,360
0071           340 J=J+I
0072           360 CONTINUE
0073               GO TO (440,460,460,480),J
0074           440 R=0.0
```

```
                      S=0.0
                      GO TO 500
                  460 J=N+2-J
                      R=RR(J)*RR(J)
                      S=RR(J)+RR(J)
                      GO TO 500
                  480 R=RR(N)*RR(N1)-RI(N)*RI(N1)
                      S=RR(N)+RR(N1)
                C
                C     SAVE THE LAST TWO SUBDIAGONAL TERMS AND THE ROOTS OF THE
                C     SUBMATRIX BEFORE ITERATION
                C
                  500 PAN=A(NN1)
                      PAN1=A(N1N2)
                      DO 520 I=1,2
                      K=NP-I
                      PRR(I)=RR(K)
                  520 PRI(I)=RI(K)
                C
                C     SEARCH FOR A PARTITION OF THE MATRIX DEFINED BY P AND Q
                C
                      P=N2
                      IPI=N1N2
                      DO 580 J=2,N2
                      IPI=IPI-IA-1
                      IF(ABS(A(IPI))-EPS) 600,600,530
                  530 IPIP=IPI+IA
                      IPIP2=IPIP+IA
                      D=A(IPIP)*(A(IPIP)-S)+A(IPIP2)*A(IPIP+1)+R
                      IF(D) 540,560,540
                  540 IF(ABS(A(IPI)*A(IPIP+1))*(ABS(A(IPIP)+A(IPIP2+1)-S)+ABS(A(IPIP2+2)
                     1 ))-ABS(D)*EPS) 620,620,560
                  560 P=N1-J
                  580 CONTINUE
                  600 Q=P
                      GO TO 630
                  620 P1=P-1
                      Q=P
                      DO 660 I=1,P1
                      IPI=IPI-IA-1
                      IF(ABS(A(IPI))-EPS) 680,680,660
                  660 Q=Q-1
                C
                C     QR DOUBLE ITERATION
                C
                  680 II=(P-1)*IA+P
                      DO 1220 I=P,N1
                      III=II-IA
```

```
0112                    IIP=II+IA
0113                    IF(I-P) 720,700,720
0114                700 IPI=II+1
0115                    IPIP=IIP+1
                    C
                    C   INITIALIZATION OF THE TRANSFORMATION
                    C
0116                    G1=A(II)*(A(II)-S)+A(IIP)*A(IPI)+R
0117                    G2=A(IPI)*(A(IPIP)+A(II)-S)
0118                    G3=A(IPI)*A(IPIP+1)
0119                    A(IPI+1)=0.0
0120                    GO TO 780
0121                720 G1=A(III)
0122                    G2=A(III+1)
0123                    IF(I-N2) 740,740,760
0124                740 G3=A(III+2)
0125                    GO TO 780
0126                760 G3=0.0
0127                780 CAP=SQRT(G1*G1+G2*G2+G3*G3)
0128                    IF(CAP) 800,860,800
0129                800 IF(G1) 820,840,840
0130                820 CAP=-CAP
0131                840 T=G1+CAP
0132                    PSI1=G2/T
0133                    PSI2=G3/T
0134                    ALPHA=2.0/(1.0+PSI1*PSI1+PSI2*PSI2)
0135                    GO TO 880
0136                860 ALPHA=2.0
0137                    PSI1=0.0
0138                    PSI2=0.0
0139                880 IF(I-O) 900,960,900
0140                900 IF(I-P) 920,940,920
0141                920 A(III)=-CAP
0142                    GO TO 960
0143                940 A(III)=-A(III)
                    C
                    C   ROW OPERATION
                    C
0144                960 IJ=II
0145                    DO 1040 J=I,N
0146                    T=PSI1*A(IJ+1)
0147                    IF(I-N1) 980,1000,1000
0148                980 IP2J=IJ+2
0149                    T=T+PSI2*A(IP2J)
0150               1000 ETA=ALPHA*(T+A(IJ))
0151                    A(IJ)=A(IJ)-ETA
0152                    A(IJ+1)=A(IJ+1)-PSI1*ETA
0153                    IF(I-N1) 1020,1040,1040
```

```
0154          1020 A(IP2J)=A(IP2J)-PSI2*ETA
0155          1040 IJ=IJ+IA
                   C
                   C     COLUMN OPERATION
                   C
0156                    IF(I-N1) 1080,1060,1060
0157          1060 K=N
0158                    GO TO 1100
0159          1080 K=I+2
0160          1100 IP=IIP-I
0161                    DO 1180 J=Q,K
0162                    JIP=IP+J
0163                    JI=JIP-IA
0164                    T=PSI1*A(JIP)
0165                    IF(I-N1) 1120,1140,1140
0166          1120 JIP2=JIP+IA
0167                    T=T+PSI2*A(JIP2)
0168          1140 ETA=ALPHA*(T+A(JI))
0169                    A(JI)=A(JI)-ETA
0170                    A(JIP)=A(JIP)-ETA*PSI1
0171                    IF(I-N1) 1160,1180,1180
0172          1160 A(JIP2)=A(JIP2)-ETA*PSI2
0173          1180 CONTINUE
0174                    IF(I-N2) 1200,1220,1220
0175          1200 JI=II+3
0176                    JIP=JI+IA
0177                    JIP2=JIP+IA
0178                    ETA=ALPHA*PSI2*A(JIP2)
0179                    A(JI)=-ETA
0180                    A(JIP)=-ETA*PSI1
0181                    A(JIP2)=A(JIP2)-ETA*PSI2
0182          1220 II=IIP+1
0183                    IT=IT+1
0184                    GO TO 60
                   C
                   C     END OF ITERATION
                   C
0185          1240 IF(ABS(A(NN1))-ABS(A(N1N2))) 1300,1280,1280
                   C
                   C     TWO EIGENVALUES HAVE BEEN FOUND
                   C
0186          1280 IANA(N)=0
0187                    IANA(N1)=2
0188                    N=N2
0189                    IF(N2) 1400,1400,20
                   C
                   C     ONE EIGENVALUE HAS BEEN FOUND
                   C
```

```
0190          1300 RR(N)=A(NN)
0191               RI(N)=0.0
0192               IANA(N)=1
0193               IF(N1) 1400,1400,1320
0194          1320 N=N1
0195               GO TO 20
                C
                C      EXIT WITH THE EIGENVALUES
                C
0196          1400 CONTINUE
                C
                C
0197               WRITE(6,347)
0198           347 FORMAT(1H1,2X,'*  OS AUTOVALORES DO SISTEMA SAO *'//)
                C
0199               DO 468 I=1,M
0200                    WRITE(6,3001) RR(I),RI(I)
                C
0201          3001 FORMAT(2X,'REAL=',2X,E9.2,4X,'IMAGINARIO=',2X,E9.2/)
0202           468 CONTINUE
0203               RETURN
0204               END
```

```
      C                                                                      EFE16970
      C                                                                      EFE16980
      C                                                                      EFE16990
      C                                                                      EFE16980
      C                                                                      EFE16990
0001        SUBROUTINE  RICATI (A,B,S,Q,R,U6,N,L,KF,AF,BG,U4)                EFE17000
      C                                                                      EFE17010
      C                                                                      EFE17020
      C     PROPOSICAO    ESTA SUBROTINA RESOLVE A EQUCAC MATRICIAL DE RICCATIEFE17030
      C                   PERMITINDO A OBTENCAO DA MATRIZ DE REALIMENTACAO  DEEFE17040
      C                   ESTADO .                                           EFE17050
      C                                                                      EFE17060
      C                                                                      EFE17070
      C     DEFINICAO DOS ARGUMENTOS
      C
      C     A(N,N)      MATRIZ A DO MODELO DISCRETIZADO.
      C     B(N,L)      MATRIZ B DE ENTRADA DO MODELO DISCRETIZADO.
      C     S(N,N)      MATRIZ INICIAL ESTIMADA PARA A MATRIZ DE RICCATI.
      C     Q(N,N)      MATRIZ Q ESTIMADA DO INDICE DE DESEMPENHO.
      C     R(N,N)      MATRIZ R ESTIMADA DO INDICE DE DESEMPENHO.
      C     U6(N,N)     MATRIZ RESULTANTE DO PRODUTO DA MATRIZ B PELA MATRIZ
      C                 DE REALIMENTACAO DE ESTADO.
      C     AF(N,N)     MATRIZ A DO MODELO CONTINUO.
      C     BG(N,L)     MATRIZ B DE ENTRADA DO MODELO CONTINUO.
      C     U4(L,N)     MATRIZ DE REALIMENTACAO DE ESTADO.
      C
      C
      C
      C
      C     DIMENSIONAMENTO DAS VARIAVEIS
      C
      C                                                                      EFE17080
0002        DIMENSION A(14,14),B(14,14),R(14,14),RI(14,14),BT(14,14)         EFE17090
0003        DIMENSION S(14,14),SUM(14,14),ATT(14,14),P(14,14),AT(14,14)      EFE17100
0004        DIMENSION F2(14,14),FN(14,14),HH(14,14),F2(14,14),H3(14,14)      EFE17110
0005        DIMENSION H4(14,14),U1(14,14),U2(14,14),U3(14,14),U4(14,14)      EFE17120
0006        DIMENSION U6(14,14),H5(14,14),Q(14,14),BG(14,14),AF(14,14)       EFE17130
      C                                                                      EFE17140
      C                                                                      EFE17150
      C                                                                      EFE17160
      C     MATRIZ  R INVERSA                                                EFE17170
      C                                                                      EFE17180
0007        DO 006 I = 1,L                                                   EFE17190
0008              DO 006 J = 1,L                                             EFE17200
0009                    SUM(I,J) = R(I,J)                                    EFE17210
0010    006 CONTINUE                                                         EFE17220
      C                                                                      EFE17230
      C                                                                      EFE17240
```

```
                C     CHAMADA DA SUBROTINA  PINV                                        EFE17250
                C                                                                       EFE17260
0011                  CALL PINV (L,SUM)                                                 EFE17270
                C                                                                       EFE17280
0012                  DO 007 I = 1,L                                                    EFE17290
0013                        DO 007 J = 1,L                                              EFE17300
0014                              RI(I,J) = SUM(I,J)                                    EFE17310
0015            007 CONTINUE                                                          EFE17320
                C                                                                       EFE17330
                C                                                                       EFE17340
                C     MATRIZES  'A' TRANSPOSTA  E  'A' TRANSPOSTA E INVERSA             EFE17350
                C                                                                       EFE17360
0016                  DO 008 I = 1,N                                                    EFE17370
0017                        DO 008 J = 1,N                                              EFE17380
0018                              AT(I,J)  = A(J,I)                                     EFE17390
0019                              SUM(I,J) = AT(I,J)                                    EFE17400
0020            008 CONTINUE                                                          EFE17410
                C                                                                       EFE17420
                C     CHAMADA DA SUBROTINA  PINV                                        
                C                                                                       
0021                  CALL PINV (N,SUM)                                                 EFE17430
                C                                                                       EFE17440
0022                  DO 009 I = 1,N                                                    EFE17450
0023                        DO 009 J = 1,N                                              EFE17460
0024                              ATT(I,J) = SUM(I,J)                                   EFE17470
0025            009 CONTINUE                                                          EFE17480
                C                                                                       EFE17490
                C                                                                       EFE17500
                C     MATRIZ  B TRANSPOSTA                                              EFE17510
                C                                                                       EFE17520
0026                  DO 020 I = 1,N                                                    EFE17530
0027                        DO 020 J = 1,L                                              EFE17540
0028                              BT(J,I) = B(I,J)                                      EFE17550
0029            020 CONTINUE                                                          EFE17560
                C                                                                       EFE17570
                C                                                                       EFE17600
                C     MATRIZ  HN = B*RI*BT                                              EFE17610
                C                                                                       EFE17620
                C     CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC                                      EFE17630
                C                                                                       EFE17640
0030                  CALL MULTIC (RI,BT,HZ,L,L,N)                                      EFE17650
0031                  CALL MULTIC (B,HZ,HN,N,L,N)                                       EFE17660
                C                                                                       EFE17670
                C                                                                       EFE17680
                C     MATRIZ DE RICCATI P(I,J)                                          EFE17690
                C                                                                       EFE17700
0032                  K = KF + 1                                                        EFE17710
                C                                                                       EFE17720
```

```
0033                DO 021 I = 1,N                                          EFE17720
0034                    DO 021 J = 1,N                                      EFE17740
0035                        P(I,J) = S(I,J)                                 EFE17750
0036          021 CONTINUE                                                  EFE17760
              C                                                             EFE17770
0037          102 CONTINUE                                                  
              C                                                             EFE17790
0038                DO 100 I = 1,N                                          EFE17800
0039                    DO 100 J = 1,N                                      EFE17810
0040                        HH(I,J) = P(I,J)                                EFE17820
0041          100 CONTINUE                                                  EFE17830
              C                                                             EFE17840
              C                                                             EFE17850
              C     MATRIZ  H2 = B*RI*BT*P                                  EFE17860
              C                                                             EFE17870
              C     CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC                            EFE17880
              C                                                             EFE17890
0042                CALL MULTIC (HH,HH,H2,N,N,N)                            EFE17900
              C                                                             EFE17910
0043                DO 022 I = 1,N                                          EFE17920
0044                    H2(I,I) = H2(I,I) + 1.0                             EFE17930
0045                    DO 022 J = 1,N                                      EFE17940
0046                        SUM(I,J) = H2(I,J)                              EFE17950
0047          022 CONTINUE                                                  EFE17960
              C                                                             EFE17970
              C                                                             EFE17980
              C     CHAMADA DA SUBRCTINA  PINV                              EFE17990
              C                                                             EFE18000
0048                CALL PINV (N,SUM)                                       EFE18010
              C                                                             EFE18020
              C                                                             EFE18030
              C     CHAMADA DA SUBRCTINA  MULTIC                            EFE18040
              C                                                             EFE18050
0049                CALL MULTIC (SUM,A,H3,N,N,N)                            EFE18060
0050                CALL MULTIC (HH,H3,H4,N,N,N)                            EFE18070
0051                CALL MULTIC (AT,H4,H5,N,N,N)                            EFE18080
              C                                                             EFE18090
0052                K = K - 1                                               EFE18100
              C                                                             EFE18110
0053                DO 101 I = 1,N                                          EFE18120
0054                    DO 101 J = 1,N                                      EFE18130
0055                        P(I,J) = Q(I,J) + H5(I,J)                       EFE18140
0056          101 CONTINUE                                                  EFE18150
              C                                                             EFE18160
0057                IF (K .NE. 1) GO TO 102                                 EFE18170
              C                                                             EFE18180
              C                                                             EFE18190
              C     SAIDA DA MATRIZ  K  DE RICCATI                          EFE18200
```

```
                C                                                                EFE18210
0058                 WRITE (6,913)                                               EFE18220
0059              913 FORMAT (1H1/////45X,'***  MATRIZ K DE RICCATI ***'/////)    EFE18230
                C                                                                EFE18240
0060                 WRITE (6,941) KF
0061              941 FORMAT(5X,'ITERACAO KF = ',I6////)
                C
0062                 K = KF + 1                                                  EFE18250
                C                                                                EFE18260
0063                      DO 900 J = 1,N                                         EFE18280
0064                           WRITE (6,902) (P(J,JJ),JJ = 1,N)                  EFE18320
0065              902          FORMAT (3X,(12(E8.2,1X)))                         EFE18330
0066              900          CONTINUE                                          EFE18340
                C
                C                                                                EFE18350
                C                                                                EFE18400
                C                                                                EFE18420
                C     MATRIZ  U1 = BT*ATT                                        EFE18430
                C                                                                EFE18440
                C     CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC                               EFE18450
                C                                                                EFE18460
0067                 CALL MULTIC (BT,ATT,U1,L,N,N)                               EFE18470
                C                                                                EFE18480
                C                                                                EFE18490
                C     MATRIZ  U2 = RI*U1                                         EFE18500
                C                                                                EFE18510
0068                 CALL MULTIC (RI,U1,U2,L,L,N)                                EFE18520
                C                                                                EFE18530
                C                                                                EFE18620
0069                 DO 201 I = 1,N                                              EFE18630
0070                      DO 201 J = 1,N                                         EFE18640
0071                           U3(I,J) = P(I,J) - C(I,J)                         EFE18650
0072              201 CONTINUE                                                   EFE18660
                C                                                                EFE18670
                C
                C     SAIDA DA MATRIZ H DE REALIMENTACAO
                C                                                                EFE18680
                C     MATRIZ  U4 = U2*U3                                         EFE18690
                C                                                                EFE18700
                C     CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC                               EFE18710
                C                                                                EFE18720
0073                 CALL MULTIC (U2,U3,U4,L,N,N)                                EFE18730
                C                                                                EFE18740
                C                                                                EFE18750
                C     MATRIZ UE = EG*U4                                          EFE18760
                C                                                                EFE18770
                C     CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC
                C
```

```
0074                  CALL MULTIC (BG,U4,L6,N,L,N)
                    C
0075                  WRITE(6,311)                                                    EFE18780
0076                311 FORMAT (1H1//////45X,'*** MATRIZ H DE REALIMENTACAO ***'/////)  EFE18790
                    C                                                               EFE18800
0077                  DO 120 I = 1,L                                                  EFE18810
0078                                  WRITE (6,333) (U4(I,J),J =1,N)                  EFE18840
0079                333               FORMAT(3X,(12(E8.2,1X)))                        EFE18850
                    C                                                               EFE18860
0080                120 CONTINUE                                                    EFE18870
                    C                                                               EFE18880
                    C                                                               EFE18890
                    C                                                               EFE18900
                    C     IMPRESSAO DA MATRIZ  Q  DE ENTRADA                        EFE18910
                    C                                                               EFE18920
0081                  WRITE(6,942)                                                  EFE18930
0082                942 FORMAT(1H1//////45X,'******* MATRIZ Q DE ENTRADA *******'/////)  EFE18940
                    C                                                               EFE18950
0083                  DO 943 I = 1,N                                                EFE18960
0084                            WRITE(6,944) (Q(I,J),J=1,N)                         EFE18970
0085                944         FORMAT(3X,(12(E8.2,1X)))                          EFE18980
0086                943 CONTINUE                                                    EFE18990
                    C                                                               EFE19000
0087                  WRITE(6,513)                                                  EFE19010
0088                513 FORMAT(1H1//////45X,'******* MATRIZ S DE ENTRADA *******'/////)  EFE19020
                    C                                                               EFE19030
0089                  DO 514 I = 1,N                                                EFE19040
0090                            WRITE(6,515) (S(I,J),J=1,N)                         EFE19050
0091                515         FORMAT(3X,(12(E8.2,1X)))                          EFE19060
0092                514 CONTINUE                                                    EFE19070
                    C                                                               EFE19080
                    C                                                               EFE06890
                    C
                    C     IMPRESSAO DA MATRIZ A DO MODELO CONTINUO
                    C
0093                  WRITE (6,630)
0094                630 FORMAT(1H1//////45X,'******* MATRIZ A CONTINUA ********'/////)
                    C
0095                  DO 631 I = 1,N
0096                            WRITE (6,632) (AF(I,J),J =1,N)
0097                632         FORMAT(3X,(12(E8.2,1X)))
0098                631 CONTINUE
                    C
                    C                                                               EFE07200
                    C     IMPRESSAO DA MATRIZ B DE EXCITACAO
                    C
0099                  WRITE (6,620)
0100                620 FORMAT(1H1//////45X,'******* MATRIZ B CONTINUA  ********'/////)
```

```
                C
0101                DO 621 I = 1,N
0102                   WRITE (6,622) (PG(I,J),J = 1,L)
0103          622      FORMAT(3X,(12(E8.2,1X)))
0104          621 CONTINUE
                C
                C
0105                RETURN                                                  EFE19090
0106                END                                                     EFE19100
```

```
                C                                                                       EFE19110
                C                                                                       EFE16990
                C
                C
                C
                C
                C
0001                    SUBROUTINE REC (A,B,K,N,L,H6)
                C
                C
                C       PROPOSICAO    ESTA SUBROTINA E AUXILIAR PARA A BOA ESCOLHA    DA
                C                     MATRIZ Q DE PENALIZACAO.
                C
                C
                C
                C       DEFINICAO DOS ARGUMENTOS
                C
                C       A(N,N)     MATRIZ A DO MODELO DISCRETIZADO.
                C       B(N,L)     MATRIZ B DE ENTRADA DO MODELO DISCRETIZADO.
                C       K(N,N)     MATRIZ ESTIMADA PARA A MATRIZ DE RICCATI.
                C       H6(N,N)    MATRIZ Q DO INDICE DE DESEMPENHO.
                C
                C
                C
                C
                C       DECLARACAO DAS VARIAVEIS
                C
                C
0002                    REAL A(14,14),B(14,14),K(14,14),Q(14,14),Z(14,14)
0003                    REAL ZI(14,14),BT(14,14),HZ(14,14),HN(14,14),AT(14,14)
0004                    REAL F2(14,14),H3(14,14),H4(14,14),H5(14,14),H6(14,14)
0005                    REAL SUM(14,14)
                C
                C
                C
                C
                C
                C       MATRIZ Z
                C
0006                    DO 1CC I = 1,L
0007                            DO 10C J = 1,L
0008                                    Z(I,J) = 0.0
0009              100 CONTINUE
                C
0010                    DO 1C1 I = 1,L
0011                            Z(I,I) = 1.0
0012              1C1 CONTINUE
                C
                C
```

```
                C
                C       MATRIZ  Z INVERSA                                                    EFE17170
                C                                                                           EFE17180
0013                    DO 006 I = 1,L                                                      EFE17190
0014                            DO 006 J = 1,L                                              EFE17200
0015                                    SUM(I,J) = Z(I,J)                                   EFE17210
0016              006 CONTINUE                                                              EFE17220
                C                                                                           EFE17230
                C                                                                           EFE17240
                C       CHAMADA DA SUBROTINA  PINV                                          EFE17250
                C                                                                           EFE17260
0017                    CALL PINV (L,SUM)                                                   EFE17270
                C                                                                           EFE17280
0018                    DO 007 I = 1,L                                                      EFE17290
0019                            DO 007 J = 1,L                                              EFE17300
0020                                    ZI(I,J) = SUM(I,J)                                  EFE17310
0021              007 CONTINUE                                                              EFE17320
                C                                                                           EFE17330
                C                                                                           EFE17340
                C       MATRIZES  'A' TRANSPOSTA                                            EFE17350
                C                                                                           EFE17360
0022                    DO 008 I = 1,N                                                      EFE17370
0023                            DO 008 J = 1,N                                              EFE17380
0024                                    AT(I,J)  = A(J,I)                                   EFE17390
0025              008 CONTINUE                                                              EFE17410
                C                                                                           EFE17420
                C                                                                           EFE17490
                C                                                                           EFE17500
                C       MATRIZ  B TRANSPOSTA                                                EFE17510
                C                                                                           EFE17520
0026                    DO 020 I = 1,N                                                      EFE17530
0027                            DO 020 J = 1,L                                              EFE17540
0028                                    BT(J,I) = B(I,J)                                    EFE17550
0029              020 CONTINUE                                                              EFE17560
                C                                                                           EFE17570
                C                                                                           EFE17600
                C       MATRIZ  HN = B*ZI*BT                                                EFE17610
                C                                                                           EFE17620
                C       CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC                                        EFE17630
                C                                                                           EFE17640
0030                    CALL MULTIC (ZI,BT,HZ,L,L,N)                                        EFE17650
0031                    CALL MULTIC (B,HZ,HN,N,L,N)                                         EFE17660
                C                                                                           EFE17670
                C                                                                           EFE17680
                C                                                                           EFE17850
                C       MATRIZ  H2 = B*ZI*BT*P                                              EFE17860
                C                                                                           EFE17870
                C       CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC                                        EFE17880
```

```
                C                                                                EFE17890
0032                 CALL MULTIC (HN,K,H2,N,N,N)                                 EFE17900
                C                                                                EFE17910
0033                 DO 022 I = 1,N                                              EFE17920
0034                      H2(I,I) = H2(I,I) + 1.0                                EFE17930
0035                      DO 022 J = 1,N                                         EFE17940
0036                           SUM(I,J) = H2(I,J)                                EFE17950
0037            022 CONTINUE                                                     EFE17960
                C                                                                EFE17970
                C                                                                EFE17980
                C    CHAMADA DA SUBROTINA  PINV                                  EFE17990
                C                                                                EFE18000
0038                 CALL PINV (N,SUM)                                           EFE18010
                C                                                                EFE18020
                C                                                                EFE18030
                C    CHAMADA DA SUBROTINA  MULTIC                                EFE18040
                C                                                                EFE18050
0039                 CALL MULTIC (SUM,A,H3,N,N,N)                                EFE18060
0040                 CALL MULTIC (K,H3,H4,N,N,N)                                 EFE18070
0041                 CALL MULTIC (AT,H4,H5,N,N,N)                                EFE18080
                C
                C
                C    DETERMINACAO DA MATRIZ C
                C
0042                 DO 023 I = 1,N
0043                      DO 023 J = 1,N
0044                           H6(I,J) = K(I,J) - H5(I,J)
0045            023 CONTINUE
                C
                C
                C
                C
0046                 RETURN
0047                 END
```

```
                C                                                                       EFE21250
                C                                                                       EFE21260
                C                                                                       EFE21270
                C                                                                       EFE21280
0001                    SUBROUTINE IMPRE(NPONTO,NFUNC,TEMPO,F,SIGNIF,CODIGO)            EFE21290
                C                                                                       EFE21300
                C
                C       DEFINICAO DOS ARGUMENTOS
                C
                C       NPONTO              NUMERO DE PONTOS A SEREM PLOTADOS.
                C       NFUNC               NUMERO DE FUNCOES A SEREM PLOTADAS SIMULTAN..
                C       TEMPO               VARIAVEL TEMPO DA FUNCAO A SER PLOTADA.
                C       F(NPONTO,NFUNC)     VARIAVEL DA FUNCAO A SER PLOTADA.
                C       SIGNIF(3,NFUNC)     CARACTER AUXILIAR NA PLOTAGEM DAS CURVAS.
                C       CODIGO              PARA CONTROLE DA SAIDA DE IMPRESSAO.
                C
0002                    INTEGER BRANCO,COLUNA,CODIGO,COMUM,SIMBOL,TRACO                 EFE21310
                C                                                                       EFE21320
0003                    DIMENSION AJUSTE(3),AUX(5),BRANCO(2),COLUNA(5),DELTAY(5),DIV(5), EFE21330
                *             DOY(5,11),ESCALA(3),FMAX(5),FMIN(5),FRACT(5),INDICE(5),   EFE21340
                *          LINHA(101),NEXP(5),P(5),PP(5),SFRACT(5),SIMBOL(5),TRACO(2)   EFE21350
0004                    DIMENSION TEMPO(1000),F(10000,5),SIGNIF(3,5)                    EFE21360
                C                                                                       EFE21370
0005                    DATA BRANCO/1H ,1H /,COMUM/1HO/,SIMBOL/1H*,1H2,1H3,1H4,1HO/     EFE21380
0006                    DATA TRACO/1H+,1H+/                                             EFE21390
0007                    DATA AJUSTE/1.5,101.5,51.5/,ESCALA/100.,100.,50.0/              EFE21400
0008                    DATA SFRACT/1.,2.5,5.,7.5,10./                                  EFE21410
                C                                                                       EFE21420
0009                    DO 5 NF = 1,NFUNC                                               EFE21430
0010                          AUX(NF) = 0                                               EFE21440
0011                          FMAX(NF) = F(1,NF)                                        EFE21450
0012                          FMIN(NF) = FMAX(NF)                                       EFE21460
0013                          DO 4 I = 1,NPONTO                                         EFE21470
0014                                IF (F(I,NF)-FMAX(NF)) 2,2,1                       EFE21480
0015                1               FMAX(NF) = F(I,NF)                                EFE21490
0016                2               IF(F(I,NF)-FMIN(NF)) 3,4,4                        EFE21500
0017                3               FMIN(NF) = F(I,NF)                                EFE21510
                C                   CONTINUE                                          EFE21520
                C                   CONTINUE                                          EFE21530
0018                4         CONTINUE                                                EFE21540
0019                          IF (ABS(FMAX(NF))-ABS(FMIN(NF))) 6,5,5                    EFE21550
0020                5         DIV(NF) = ABS(FMAX(NF))                                 EFE21560
0021                          GO TO 7                                                   EFE21570
0022                6         DIV(NF) = ABS(FMIN(NF))                                 EFE21580
0023                7         IF(DIV(NF) .EQ. 0.0) DIV(NF) = 1.0                      EFE21590
0024                          NEXP(NF) = IFIX(ALOG10 (DIV(NF)))                       EFE21600
```

```
0025                          IF(DIV(NF) .LT. 1.0) NEXP(NF) = NEXP(NF) - 1                EFE21610
0026                          PP(NF) = 10.0**(NEXP(NF))                                   EFE21620
0027                          P(NF) = 10.0**(-NEXP(NF))                                   EFE21630
0028                          FRACT(NF) = DIV(NF)*P(NF)                                   EFE21640
0029                          DO 8 I = 1,5                                                EFE21650
0030                                  DIV(NF) = SFRACT(I)                                 EFE21660
0031                                  IF (DIV(NF) -  FRACT(NF)) 8,9,9                     EFE21670
0032                    8             CONTINUE                                            EFE21680
0033                    9 CONTINUE                                                        EFE21690
0034                      IF (CODIGO .EQ. 0) GO TO 39                                     EFE21700
0035                      WRITE(6,1000) ((SIGNIF(I,NF), I=1,3), NF=1,NFUNC)               EFE21710
0036                      DO 10 K =1,NPONTO,100                                           EFE21720
0037                          WRITE(6,1010) TEMPO(K),(F(K,NF), NF=1,NFUNC)                EFE21730
0038                   10 CONTINUE                                                        EFE21740
0039                   39 DO 17 NF = 1,NFUNC                                              EFE21750
0040                          IF (FMIN(NF)) 11,12,12                                      EFE21760
0041                   11     IF (FMAX(NF)) 13,13,14                                      EFE21770
0042                   12     INDICE(NF) = 1                                              EFE21780
0043                          DDY(NF,1) = 0.0                                             EFE21790
0044                          DELTAY(NF) = DIV(NF)/10.0                                   EFE21800
0045                          GO TO 15                                                    EFE21810
0046                   13     INDICE(NF) = 2                                              EFE21820
0047                          DDY(NF,1) = -DIV(NF)                                        EFE21830
0048                          DELTAY(NF) = DIV(NF)/10.0                                   EFE21840
0049                          DIV(NF) = -DIV(NF)                                          EFE21850
0050                          GO TO 15                                                    EFE21860
0051                   14     INDICE(NF) = 3                                              EFE21870
0052                          DDY(NF,1) = -DIV(NF)                                        EFE21880
0053                          DELTAY(NF) = DIV(NF)/5.0                                    EFE21890
0054                   15     DO 16 I = 2,11                                              EFE21900
0055                                  DDY(NF,I) = DDY(NF,I-1)+ DELTAY(NF)                 EFE21910
0056                   16     CONTINUE                                                    EFE21920
0057                   17 CONTINUE                                                        EFE21930
0058                      WRITE(6,1080)                                                   EFE21940
0059                 1080 FORMAT(1H1///5X,'FUNCAO NUMERO',4X,'SIGNIFICADO',1X,'SIMBOLO',  EFE21950
                     *       7X,'MAXIMO',9X,'MINIMO',7X,'FATOR DE ESCALA',5X,           EFE21960
                     *       'FINAL DE ESCALA'/)                                        EFE21970
0060                      DO 80 NF = 1,NFUNC                                              EFE21980
0061                      WRITE(6,1020) (NF,(SIGNIF(I,NF), I=1,2),  FMAX(NF),FMIN(NF),    EFE21990
                     *                PP(NF), DIV(NF))                                   EFE22000
0062                   80 CONTINUE                                                        EFE22010
0063                      NFUNC1 = NFUNC - 1                                              EFE22020
0064                      DO 20 I = 1,NFUNC1                                              EFE22030
0065                          IF (AUX(I)) 20,18,18                                        EFE22040
0066                   18     I1 = I+1                                                    EFE22050
0067                          DO 20 IA = I1,NFUNC                                         EFE22060
0068                                  IF (DIV(I) - DIV(IA)) 20,19,20                      EFE22070
0069                   19             IF (INDICE(I) - INDICE(IA)) 20,38,20               EFE22080
```

```
0070                38                      AUX(IA) = -1                                    EFE22090
0071                20              CONTINUE                                                EFE22100
0072                                DO 24 NF = 1,NFUNC                                      EFE22110
0073                                        IF (AUX(NF)) 24,21,21                           EFE22120
0074                21                      IF (NF - 1) 22,22,23                            EFE22130
0075                22                      WRITE(6,1030) (DCY(NF,I), I=1,11)               EFE22140
0076                                        GO TO 24                                        EFE22150
0077                23                      WRITE(6,1040) (DCY(NF,I), I=1,11)               EFE22160
0078                24              CONTINUE                                                EFE22170
0079                   NSAIDA = 0                                                           EFE22180
0080                   DO 37 J = 1,NPONTO,100                                               EFE22190
0081                            IF (J - NSAIDA) 26,26,25                                    EFE22200
0082                25          NA = 2                                                      EFE22210
0083                            NSAIDA = NSAIDA+100                                         EFE22220
0084                            GO TO 27                                                    EFE22230
0085                26          NA = 1                                                      EFE22240
0086                27          DO 29  L = 1,100,10                                         EFE22250
0087                                    DO 28 LA = 1,9                                      EFE22260
0088                                        LINHA(L + LA) = BRANCO(NA)                      EFE22270
0089                28                  CONTINUE                                            EFE22280
0090                                    LINHA(L) = TRACO(NA)                                EFE22290
0091                29          CONTINUE                                                    EFE22300
0092                            LINHA(101) = TRACO(NA)                                      EFE22310
0093                            DO 30 NF = 1,NFUNC                                          EFE22320
0094                                    IAUX = INDICE(NF)                                   EFE22330
0095                   COLUNA(NF)=IFIX((F(J,NF)/ABS(DIV(NF)))*ESCALA(IAUX)*P(NF)+           EFE22340
                     *          AJUSTE(IAUX))                                              EFE22350
0096                                    LINHA(COLUNA(NF)) = SIMBOL(NF)                      EFE22360
0097                30          CONTINUE                                                    EFE22370
0098                            DO 34 I = 1,NFUNC1                                          EFE22380
0099                                    IF(COLUNA(I)) 34,32,32                              EFE22390
0100                32                  I1 = I + 1                                          EFE22400
0101                                    DO 34 IA = I1,NFUNC                                 EFE22410
0102                                        IF (COLUNA(I) - COLUNA(IA)) 34,33,34            EFE22420
0103                33                          COLUNA(IA) = -1                             EFE22430
0104                                        LINHA(COLUNA(I)) = COMUM                        EFE22440
0105                34                  CONTINUE                                            EFE22450
0106                            GO TO (35,36), NA                                           EFE22460
0107                35          WRITE(6,1050) LINHA                                         EFE22470
0108                            GO TO 37                                                    EFE22480
0109                36          WRITE(6,1060) TEMPO(J), LINHA                               EFE22490
0110                37 CONTINUE                                                             EFE22500
0111                   RETURN                                                               EFE22510
0112             1000 FORMAT(///41X,'VALORES DAS FUNCOES EM FUNCAO DO TEMPO'///             EFE22520
                   *       8X,'TEMPO',8X,5(6X,3A4,2X)//)                                  EFE22530
0113             1010 FORMAT(6F20.5)                                                        EFE22540
0114             1020 FORMAT(//(11X,I1,11X,3A4,10X,E10.2,5X,E10.2,5X,E10.2,13X,E10.2))     EFE22550
0115             1030 FORMAT(/////4X,11F10.2/2X,11(9X,'.'))                                 EFE22560
```

```
0116          1040 FORMAT(1X,'+',10(9('-'),'+')/2X,11(9X,'.')/4X,11F10.2/2X,11(9X,  EFF22570
                  *       '.'))                                                      EFE22580
0117          1050 FORMAT(1X,10(1A1))                                                EFE22590
0118          1060 FORMAT(1X,1F9.2,'-',10(1A1))                                      EFE22600
0119               END                                                               EFE22610
```

```
                C
                C                                                                EFE19110
                C                                                                EFE19120
                C                                                                EFE19130
                C                                                                EFE19140
0001                    SUBROUTINE PINV (NNN,SUM)                                EFE19150
                C                                                                EFE19160
                C                                                                EFE19170
                C       PROPOSICAO     ESTA SUBROTINA E AUXILIAR NA OBTENCAO DA MATRIZ IN -EFE19180
                C                      VERSA PELA SUBROTINA 'MINV'.              EFE19190
                C                                                                EFE19200
                C
                C
                C       DEFINICAO DOS ARGUMENTOS
                C
                C       SUM(NNN,NNN)   MATRIZ DE ENTRADA A SER INVERTIDA.
                C
                C
                C       DIMENSIONAMENTO DAS VARIAVEIS
                C
                C                                                                EFE19210
0002                    DIMENSION LL(14),MM(14),SUM(14,14),SSUM(196)             EFE19220
                C                                                                EFE19230
                C                                                                EFE19240
0003                    M  = NNN                                                 EFE19250
0004                    D  = 0.0                                                 EFE19260
0005                    NN = 1                                                   EFE19270
                C                                                                EFE19280
0006                    DO 005 I = 1,M                                           EFE19290
0007                       DO 005 J = 1,M                                        EFE19300
0008                          SSUM(NN) = SUM(I,J)                                EFE19310
0009                          NN = NN + 1                                        EFE19320
0010                  005 CONTINUE                                               EFE19330
                C                                                                EFE19340
                C                                                                EFE19350
                C       CHAMADA DA SUBROTINA  MINV                               EFE19360
                C                                                                EFE19370
0011                    CALL MINV (SSUM,M,D,LL,MM)                               EFE19380
                C                                                                EFE19390
0012                    NN = 1                                                   EFE19400
                C                                                                EFE19410
0013                    DO 006 I = 1,M                                           EFE19420
0014                       DO 006 J = 1,M                                        EFE19430
0015                          SUM(I,J) = SSUM(NN)                                EFE19440
0016                          NN = NN + 1                                        EFE19450
0017                  006 CONTINUE                                               EFE19460
                C                                                                EFE19470
0018                    RETURN                                                   EFE19480
0019                    END                                                      EFE19490
```

```
                C                                                                       EFE19980
                C       THE DOUBLE PRECISION VERSION OF THIS SUBROUTINE MUST ALSO       EFE19990
                C       CONTAIN DOUBLE PRECISION FORTRAN FUNCTIONS.  ABS IN STATEMENT   EFE20000
                C       10 MUST BE CHANGED TO DABS.                                     EFE20010
                C                                                                       EFE20020
                C*******************************************************************
                C       DEFINICAO DO LIMITE PARA SE EVITAR OVERFLOW
                C*******************************************************************
                C                                                                       EFE20030
0003                    LIMI = 0.0001
                C
                C*******************************************************************
                C       SEARCH FOR LARGEST ELEMENT                                      EFE20040
                C                                                                       EFE20050
0004                    D=1.0                                                           EFE20060
0005                    NK=-N                                                           EFE20070
0006                    DO 80 K=1,N                                                     EFE20080
0007                    NK=NK+N                                                         EFE20090
0008                    LL(K)=K                                                         EFE20100
0009                    MM(K)=K                                                         EFE20110
0010                    KK=NK+K                                                         EFE20120
0011                    BIGA=AAA(KK)                                                    EFE20130
0012                    DO 20 J=K,N                                                     EFE20140
0013                    IZ=N*(J-1)                                                      EFE20150
0014                    DO 20 I=K,N                                                     EFE20160
0015                    IJ=IZ+I                                                         EFE20170
0016                10  IF( ABS(BIGA)- ABS(AAA(IJ))) 15,20,20                          EFE20180
0017                15  BIGA=AAA(IJ)                                                   EFE20190
0018                    LL(K)=I                                                         EFE20200
0019                    MM(K)=J                                                         EFE20210
0020                20  CONTINUE                                                       EFE20220
                C                                                                       EFE20230
                C       INTERCHANGE ROWS                                                EFE20240
                C                                                                       EFE20250
0021                    J=LL(K)                                                         EFE20260
0022                    IF(J-K) 35,35,25                                                EFE20270
0023                25  KI=K-N                                                         EFE20280
0024                    DO 30 I=1,N                                                     EFE20290
0025                    KI=KI+N                                                         EFE20300
0026                    HOLD=-AAA(KI)                                                   EFE20310
0027                    JI=KI-K+J                                                       EFE20320
0028                    AAA(KI)=AAA(JI)                                                 EFE20330
0029                30  AAA(JI) =HOLD                                                  EFE20340
                C                                                                       EFE20350
                C       INTERCHANGE COLUMNS                                             EFE20360
                C                                                                       EFE20370
0030                35  I=MM(K)                                                        EFE20380
0031                    IF(I-K) 45,45,38                                                EFE20390
```

```
0032                  38 JP=N*(I-1)                                                  EFE20400
0033                     DO 40 J=1,N                                                 EFE20410
0034                     JK=NK+J                                                     EFE20420
0035                     JI=JP+J                                                     EFE20430
0036                     HOLD=-AAA(JK)                                               EFE20440
0037                     AAA(JK)=AAA(JI)                                             EFE20450
0038                  40 AAA(JI) =HOLD                                               EFE20460
                   C                                                                 EFE20470
                   C        DIVIDE COLUMN BY MINUS PIVOT (VALUE OF PIVOT ELEMENT IS  EFE20480
                   C        CONTAINED IN BIGA)                                       EFE20490
                   C*************************************************              EFE20500
                   C
0039                  45 IF(BIGA) 48,46,48                                           EFE20510
                   C
0040                  46 D=C.C                                                       EFE20520
                   C                                                                 EFE20560
0041                     RETURN                                                      EFE20570
                   C
                   C  45 CONTINUE
                   C
0042                  48 CONTINUE
                   C
                   C     IF ((ABS(BIGA)) .LE. LIMI) BIGA = 0.CCOI
                   C
                   C*************************************************
0043                     DO 55 I=1,N
0044                     IF(I-K) 50,55,50                                            EFE20580
0045                  50 IK=NK+I                                                     EFE20590
0046                     AAA(IK)=AAA(IK)/(-BIGA)                                     EFE20600
0047                  55 CONTINUE                                                    EFE20610
                   C                                                                 EFE20620
                   C        REDUCE MATRIX                                            EFE20630
                   C                                                                 EFE20640
0048                     DO 65 I=1,N                                                 EFE20650
0049                     IK=NK+I                                                     EFE20660
0050                     HOLD=AAA(IK)                                                EFE20670
0051                     IJ=I-N                                                      EFE20680
0052                     DO 65 J=1,N                                                 EFE20690
0053                     IJ=IJ+N                                                     EFE20700
0054                     IF(I-K) 60,65,60                                            EFE20710
0055                  60 IF(J-K) 62,65,62                                            EFE20720
0056                  62 KJ=IJ-I+K                                                   EFE20730
0057                     AAA(IJ)=HOLD*AAA(KJ)+AAA(IJ)                                EFE20740
0058                  65 CONTINUE                                                    EFE20750
                   C                                                                 EFE20760
                   C        DIVIDE ROW BY PIVOT                                      EFE20770
                   C                                                                 EFE20780
0059                     KJ=K-N                                                      EFE20790
                                                                                     EFE20800
```

```
0060                  DO 75 J=1,N                                          EFE20810
0061                  KJ=KJ+N                                              EFE20820
0062                  IF(J-K) 70,75,70                                     EFE20830
0063               70 AAA(KJ)=AAA(KJ)/BIGA                                 EFE20840
0064               75 CONTINUE                                             EFE20850
                   C                                                      EFE20860
                   C     PRODUCT OF PIVOTS                                EFE20870
                   C                                                      EFE20880
0065                  D=D*BIGA                                             EFE20890
                   C                                                      EFE20900
                   C     REPLACE PIVOT BY RECIPROCAL                      EFE20910
                   C                                                      EFE20920
0066                  AAA(KK)=1.0/BIGA                                     EFE20930
0067               80 CONTINUE                                             EFE20940
                   C                                                      EFE20950
                   C     FINAL ROW AND COLUMN INTERCHANGE                 EFE20960
                   C                                                      EFE20970
0068                  K=N                                                  EFE20980
0069              100 K=(K-1)                                              EFE20990
0070                  IF(K) 150,150,105                                    EFE21000
0071              105 I=LL(K)                                              EFE21010
0072                  IF(I-K) 120,120,108                                  EFE21020
0073              108 JQ=N*(K-1)                                           EFE21030
0074                  JR=N*(I-1)                                           EFE21040
0075                  DO 110 J=1,N                                         EFE21050
0076                  JK=JQ+J                                              EFE21060
0077                  HOLD=AAA(JK)                                         EFE21070
0078                  JI=JR+J                                              EFE21080
0079                  AAA(JK)=-AAA(JI)                                     EFE21090
0080              110 AAA(JI) =HOLD                                        EFE21100
0081              120 J=MM(K)                                              EFE21110
0082                  IF(J-K) 100,100,125                                  EFE21120
0083              125 KI=K-N                                               EFE21130
0084                  DO 130 I=1,N                                         EFE21140
0085                  KI=KI+N                                              EFE21150
0086                  HOLD=AAA(KI)                                         EFE21160
0087                  JI=KI-K+J                                            EFE21170
0088                  AAA(KI)=-AAA(JI)                                     EFE21180
0089              130 AAA(JI)=HOLD                                         EFE21190
0090                  GO TO 100                                            EFE21200
0091              150 RETURN                                               EFE21210
0092                  END                                                  EFE21220
```

* IBM Application Program, System 360 Scientific Subroutine Package Programmer's Manual

```
C                                                                       EFE19500
C                                                                       EFE19510
C                                                                       EFE19520
C                                                                       EFE19530
0001        SUBROUTINE MINV (AAA,N,D,LL,MM)                             EFE19540
C                                                                       EFE19550
C                                                                       EFE19560
C                                                                       EFE19570
C       SUBROUTINE MINV                                                 EFE19580
C                                                                       EFE19590
C       PURPOSE                                                         EFE19600
C          INVERT A A MATRIX                                            EFE19610
C                                                                       EFE19620
C       USAGE                                                           EFE19630
C          CALL MINV (AAA,N,D,LL,MM)                                    EFE19640
C                                                                       EFE19650
C       DESCRIPTION OF PARAMETERS                                       EFE19660
C          AAA - INPUT MATRIX, DESTROYED IN COMPUTATION AND REPLACED BY EFE19670
C                RESULTANT INVERSE.                                     EFE19680
C          N   - ORDER OF MATRIX A                                      EFE19690
C          D   - RESULTANT DETERMINANT                                  EFE19700
C          LL  - WORK VECTOR OF LENGTH N                                EFE19710
C          MM  - WORK VECTOR OF LENGTH N                                EFE19720
C                                                                       EFE19730
C       REMARKS                                                         EFE19740
C          MATRIX AAA MUST BE A GENERAL MATRIX                          EFE19750
C                                                                       EFE19760
C       SUBROUTINES AND FUNCTION SUBPROGRAMS REQUIRED                   EFE19770
C          NONE                                                         EFE19780
C                                                                       EFE19790
C       METHOD                                                          EFE19800
C          THE STANDARD GAUSS-JORDAN METHOD IS USED. THE DETERMINANT    EFE19810
C          IS ALSO CALCULATED. A DETERMINANT OF ZERO INDICATES THAT     EFE19820
C          THE MATRIX IS SINGULAR.                                      EFE19830
C                                                                       EFE19840
C                                                                       EFE19850
0002        DIMENSION AAA(196),LL(14),MM(14)                            EFE19860
C                                                                       EFE19870
C                                                                       EFE19880
C       IF A DOUBLE PRECISION VERSION OF THIS ROUTINE IS DESIRED, THE   EFE19890
C       C IN COLUMN 1 SHOULD BE REMOVED FROM THE DOUBLE PRECISION       EFE19900
C       STATEMENT WHICH FOLLOWS.                                        EFE19910
C                                                                       EFE19920
C  DOUBLE PRECISION AAA,D,BIGA,HOLD                                     EFE19930
C                                                                       EFE19940
C       THE C MUST ALSO BE REMOVED FROM DOUBLE PRECISION STATEMENTS     EFE19950
C       APPEARING IN OTHER ROUTINES USED IN CONJUNCTION WITH THIS       EFE19960
C       ROUTINE.                                                        EFE19970
```

```
                C                                                                       EFE19950
                C       THE DOUBLE PRECISION VERSION OF THIS SUBROUTINE MUST ALSO       EFE19960
                C       CONTAIN DOUBLE PRECISION FORTRAN FUNCTIONS.  ABS IN STATEMENT   EFE20000
                C       20 MUST BE CHANGED TO DABS.                                     EFE20010
                C                                                                       EFE20020
                C*******************************************************************
                C       SINGULAR OR ILL-LIMITED DATA SET - POSSIBLE OVERFLOW
                C*******************************************************************
                C
0003                    LIM1 = 0.0001                                                   EFE20030
                C
                C*******************************************************************
                C       SEARCH FOR LARGEST ELEMENT                                      EFE20040
                C                                                                       EFE20050
0004                    D=1.0                                                           EFE20060
0005                    NK=-N                                                           EFE20070
0006                    DO 80 K=1,N                                                     EFE20080
0007                    NK=NK+N                                                         EFE20090
0008                    LL(K)=K                                                         EFE20100
0009                    MM(K)=K                                                         EFE20110
0010                    KK=NK+K                                                         EFE20120
0011                    BIGA=AAA(KK)                                                    EFE20130
0012                    DO 30 J=K,N                                                     EFE20140
0013                    IZ=N*(J-1)                                                      EFE20150
0014                    DO 30 I=K,N                                                     EFE20160
0015                    IJ=IZ+I                                                         EFE20170
0016                10 IF( ABS(BIGA)- ABS(AAA(IJ))) 15,20,20                            EFE20180
0017                15 BIGA=AAA(IJ)                                                     EFE20190
0018                    LL(K)=I                                                         EFE20200
0019                    MM(K)=J                                                         EFE20210
0020                20 CONTINUE                                                         EFE20220
                C                                                                       EFE20230
                C       INTERCHANGE ROWS                                                EFE20240
                C                                                                       EFE20250
0021                    J=LL(K)                                                         EFE20260
0022                    IF(J-K) 35,35,25                                                EFE20270
0023                25 KI=K-N                                                           EFE20280
0024                    DO 30 I=1,N                                                     EFE20290
0025                    KI=KI+N                                                         EFE20300
0026                    HOLD=-AAA(KI)                                                   EFE20310
0027                    JI=KI-K+J                                                       EFE20320
0028                    AAA(KI)=AAA(JI)                                                 EFE20330
0029                30 AAA(JI) =HOLD                                                    EFE20340
                C                                                                       EFE20350
                C       INTERCHANGE COLUMNS                                             EFE20360
                C                                                                       EFE20370
0030                35 I=MM(K)                                                          EFE20380
0031                    IF(I-K) 45,45,38                                                EFE20390
```

```
0038          38 JP=N*(I-1)                                              EFE20400
0039             DO 40 J=1,N                                             EFE20410
0040             JK=NK+J                                                 EFE20420
0041             JI=JP+J                                                 EFE20430
0042             HOLD=-AAA(JK)                                           EFE20440
0043             AAA(JK)=AAA(JI)                                         EFE20450
0044          40 AAA(JI) =HOLD                                           EFE20460
               C                                                         EFE20470
               C        DIVIDE COLUMN BY MINUS PIVOT (VALUE OF PIVOT ELEMENT IS  EFE20480
               C        CONTAINED IN BIGA)                               EFE20490
               C*************************************************       EFE20500
               C
0045          45 IF(BIGA) 48,46,48                                       EFE20510
               C
0046          46 D=0.0                                                   EFE20520
               C                                                         EFE20530
0047             RETURN                                                  EFE20540
               C
               C  45 CONTINUE
               C
0048          48 CONTINUE
               C
               C     IF ((ABS(BIGA)) .LE. LIMI) BIGA = 0.0001
               C
               C*************************************************
0049             DO 55 I=1,N                                             EFE20580
0050             IF(I-K) 50,55,50                                        EFE20590
0051          50 IK=NK+I                                                 EFE20600
0052             AAA(IK)=AAA(IK)/(-BIGA)                                 EFE20610
0053          55 CONTINUE                                                EFE20620
               C                                                         EFE20630
               C        REDUCE MATRIX                                    EFE20640
               C                                                         EFE20650
0054             DO 65 I=1,N                                             EFE20660
0055             IK=NK+I                                                 EFE20670
0056             HOLD=AAA(IK)                                            EFE20680
0057             IJ=I-N                                                  EFE20690
0058             DO 65 J=1,N                                             EFE20700
0059             IJ=IJ+N                                                 EFE20710
0060             IF(I-K) 60,65,60                                        EFE20720
0061          60 IF(J-K) 62,65,62                                        EFE20730
0062          62 KJ=IJ-I+K                                               EFE20740
0063             AAA(IJ)=HOLD*AAA(KJ)+AAA(IJ)                            EFE20750
0064          65 CONTINUE                                                EFE20760
               C                                                         EFE20770
               C        DIVIDE ROW BY PIVOT                              EFE20780
               C                                                         EFE20790
0065             KJ=K-N                                                  EFE20800
```

```
0060          DO 75 J=1,N                                              EFE10010
0061          KJ=KJ+N                                                  EFE10020
0062          IF(J-K) 70,75,70                                         EFE10030
0063       70 AAA(KJ)=AAA(KJ)/BIGA                                     EFE10040
0064       75 CONTINUE                                                 EFE10050
C                                                                      EFE10060
C        PRODUCT OF PIVOTS                                             EFE10070
C                                                                      EFE10080
0065       D=D*BIGA                                                    EFE10090
C                                                                      EFE10100
C        REPLACE PIVOT BY RECIPROCAL                                   EFE10110
C                                                                      EFE10120
0066       AAA(KK)=1.0/BIGA                                            EFE10130
0067    80 CONTINUE                                                    EFE10140
C                                                                      EFE10150
C        FINAL ROW AND COLUMN INTERCHANGE                              EFE10160
C                                                                      EFE10170
0068       K=N                                                         EFE10180
0069    100 K=(K-1)                                                    EFE10190
0070       IF(K) 150,150,105                                           EFE10200
0071    105 I=LL(K)                                                    EFE10210
0072       IF(I-K) 130,120,108                                         EFE10220
0073    108 JC=N*(K-1)                                                 EFE10230
0074       JR=N*(I-1)                                                  EFE10240
0075       DO 110 J=1,N                                                EFE10250
0076       JK=JC+J                                                     EFE10260
0077       HOLD=AAA(JK)                                                EFE10270
0078       JI=JR+J                                                     EFE10280
0079       AAA(JK)=-AAA(JI)                                            EFE10290
0080    110 AAA(JI) =HOLD                                              EFE10300
0081    120 J=MM(K)                                                    EFE10310
0082       IF(J-K) 100,100,125                                         EFE10320
0083    125 KI=K-N                                                     EFE10330
0084       DO 130 I=1,N                                                EFE10340
0085       KI=KI+N                                                     EFE10350
0086       HOLD=AAA(KI)                                                EFE10360
0087       JI=KI-K+J                                                   EFE10370
0088       AAA(KI)=-AAA(JI)                                            EFE10380
0089    130 AAA(JI)=HOLD                                               EFE10390
0090       GO TO 100                                                   EFE10400
0091    150 RETURN                                                     EFE10410
0092       END                                                         EFE10420
```

* IBM Application Program, System 360 Scientific Subroutine Package Programmer's Manual

```
                C                                                                   EFE14250
                C                                                                   EFE14260
                C                                                                   EFE14270
                C                                                                   EFE14280
                C     SUBRCUTINA  MULTIC  A SER UTILIZADA PELA SUBRCTINA  EIGVAL     EFE14290
                C                                                                   EFE14300
0001                  SUBRCUTINE MULTIC (AM,BM,CM,N1,N2,N3)                         EFE14310
                C                                                                   
                C                                                                   EFE14320
                C                                                                   
                C     PROPOSICAO     ESTA SUBRCTINA EFETUA A MULTIPLICACAO   DA  MATRIZ
                C                    AM(N1,N2) PELA MATRIZ BM(N2,N3) GUARDANDO O RESUL-
                C                    TADO NA MATRIZ (M(N1,N3).
                C                                                                   
                C                                                                   
                C     DEFINICACAO DOS ARGUMENTOS                                    
                C                                                                   
                C     AM(N1,N2)      PRIMEIRA MATRIZ .                              
                C     BM(N2,N3)      SEGUNDA MATRIZ .                               
                C     CM(N1,N3)      RESULTADO DO PRODUTO AM X BM .                 
                C                                                                   
                C                                                                   
                C     DIMENSIONAMENTO DAS VARIAVEIS                                 EFE14330
                C                                                                   EFE14340
0002                  DIMENSION AM(14,14),BM(14,14),CM(14,14)                       EFE14350
                C                                                                   EFF14360
                C     EXECUCAO                                                      EFF14370
                C                                                                   EFE14380
0003                  DO 01 I = 1,N1                                                EFE14390
0004                        DO 01 KM = 1,N3                                         EFE14400
0005                        CM(I,KM) = 0.0                                          FFE14410
0006                        DO 01 J = 1, N2                                         EFE14420
0007                        CM(I,KM) = CM(I,KM) + AM(I,J)*BM(J,KM)                  EFE14430
0008                01 CONTINUE                                                     EFE14440
                C                                                                   EFE14450
0009                  RETURN                                                        EFE14460
0010                  END                                                           EFE14470
```

```
C                                                                       EFE13480
C                                                                       EFE13510
C                                                                       EFE13520
C                                                                       EFE13530
C
C
C
C     SUBROUTINE HSBG
C
C     PURPOSE
C        TO REDUCE A REAL MATRIX INTO UPPER ALMOST TRIANGULAR FORM.
C
C     USAGE
C        CALL HSBG (N,A,IA)
C
C     DESCRIPTION OF THE PARAMETERS
C
C        N     ORDER OF THE MATRIX
C        A     THE INPUT MATRIX, N BY N
C        IA    SIZE OF THE FIRST DIMENSION ASSIGNED TO THE ARRAY
C              A IN THE CALLING PROGRAM WHEN THE MATRIX IS    IN
C              DOUBLE SUBSCRIPTED DATA STORAGE MODE. IA =N  WHEN
C              THE MATRIX IS IN SSP VECTOR STORAGE MODE.
C
C     REMARKS
C        THE HESSENBERG FORM REPLACES THE ORIGINAL MATRIX IN THE
C        ARRAY A.
C
C     METHOD
C        SIMILARITY TRANSFORMATIONS USING ELEMENTARY ELIMINATION
C        MATRICES WITH PARTIAL PIVOTING.
C
C     REFERENCES
C        J.H. WILKINSON - THE ALGEBRAIC EIGENVALUE PROBLEM -
C        CLARENDON PRESS , OXFORD ,1965 .
C
C
C
      SUBROUTINE HSBG (N,A,IA)
      DIMENSION A(196)
      DOUBLE PRECISION S
      L=N
      NIA=L*IA
      LIA=NIA-IA
C
C     L IS THE ROW INDEX OF THE ELIMINATION
C
   20 IF(L-3) 360,40,40
```

```
0028          40 LIA=LIA-IA
0029             L1=L-1
0030             L2=L1-1
               C
               C     SEARCH FOR THE PIVOTAL ELEMENT IN THE LTH ROW
               C
0031             ISUB=LIA+L
0032             IPIV=ISUB-IA
0033             PIV=ABS(A(IPIV))
0034             IF(L-3) 90,90,50
0035          50 M=IPIV-IA
0036             DO 80 I=L,M,IA
0037             T=ABS(A(I))
0038             IF(T-PIV) 80,80,60
0039          60 IPIV=I
0040             PIV=T
0041          80 CONTINUE
0042          90 IF(PIV) 100,220,100
0043         100 IF(PIV-ABS(A(ISUB))) 180,180,120
               C
               C     INTERCHANGE THE COLUMNS
               C
0044         120 M=IPIV-L
0045             DO 140 I=1,L
0046             J=M+I
0047             T=A(J)
0048             K=LIA+I
0049             A(J)=A(K)
0050         140 A(K)=T
               C
               C     INTERCHANGE THE ROWS
               C
0051             M=L2-M/IA
0052             DO 160 I=L1,NIA,IA
0053             T=A(I)
0054             J=I-M
0055             A(I)=A(J)
0056         160 A(J)=T
               C
               C     TERMS OF THE ELEMENTARY TRANSFORMATIONS
               C
0057         180 DO 200 I=L,LIA,IA
0058         200 A(I)=A(I)/A(ISUB)
               C
               C     RIGHT TRANSFORMATIONS
               C
0059             J=-IA
0060             DO 240 I=1,L2
```

```
0041                    J=J+IA
0042                    LJ=L+J
0043                    DO 220 K=1,L1
0044                    KJ=K+J
0045                    KL=K+LIA
0046                220 A(KJ)=A(KJ)-A(LJ)*A(KL)
0047                240 CONTINUE
                    C
                    C   LEFT TRANSFORMATIONS
                    C
0048                    K=-IA
0049                    DO 300 I=1,N
0050                    K=K+IA
0051                    LK=K+L1
0052                    S=A(LK)
0053                    LJ=L-IA
0054                    DO 280 J=1,L2
0055                    JK=K+J
0056                    LJ=LJ+IA
0057                280 S=S+A(LJ)*A(JK)*1.0D0
0058                300 A(LK)=S
                    C
                    C   SET THE LOWER PART OF THE MATRIX TO ZERO
                    C
0059                    DO 310 I=L,LIA,IA
0060                310 A(I)=0.0
0061                320 L=L1
0062                    GO TO 20
0063                360 CONTINUE
0064                    RETURN
0065                    END
```

```
                C                                                                       EFE12670
                C                                                                       EFE12680
                C                                                                       EFE12690
                C                                                                       EFE12700
                C                                                                       EFE12710
0001                    SUBROUTINE ANG (XAB,YBB,TETA)                                   EFE12720
                C                                                                       EFE12730
                C                                                                       EFE12740
                C       PROPOSICAO   ESTA SUBROTINA DETERMINA O ARGUMENTO DE UM NUMERO  EFE12750
                C                    COMPLEXO DE PARTE REAL  AB  E PARTE IMAGINARIA  BB EFE12760
                C                    GUARDANDO O RESULTADO , EM RAD ,NO REGISTRO  TETA . EFE12770
                C                                                                       EFE12780
                C                                                                       EFE12790
                C       DECLARACAO DAS VARIAVEIS                                        EFE12800
                C
                C       AB      PARTE REAL DO NUMERO COMPLEXO.
                C       BB      PARTE IMAGINARIA DO NUMERO COMPLEXO.
                C       TETA    ARGUMENTO CALCULADO.
                C                                                                       EFE12810
0002                    IMPLICIT LOGICAL (A-Z)                                          EFE12820
                C                                                                       EFE12830
0003                    REAL XAB,YBB,TETA,LIMI,LIMIN,MODA,MODB                          EFE12840
0004                    REAL ATAN,ABS                                                   EFE12850
                C                                                                       EFE12860
                C       LIMITE DE PRECISAO                                              EFE12870
                C                                                                       EFE12880
0005                    LIMI = 0.00000001                                               EFE12890
                C                                                                       EFE12900
                C       EXECUCAO DO PROGRAMA                                            EFE12910
                C                                                                       EFE12920
0006                    LIMIN = - LIMI                                                  EFE12930
0007                    MODA  = ABS(XAB)                                                EFE12940
0008                    MODB  = ABS(YBB)                                                EFE12950
                C                                                                       EFE12960
0009                    IF (MODA .LE. LIMI) GO TO 001                                   EFE12970
0010                            IF (XAB .LT. LIMIN) GO TO 002                           EFE12980
0011                                    IF (MODB .LE. LIMI) GO TO 003                   EFE12990
0012                                            IF (YBB .LT. LIMIN) GO TO 004           EFE13000
0013                                            TETA = ATAN(MODB/MODA)                  EFE13010
0014                                            GO TO 009                               EFE13020
                C                                                                       EFE13030
0015                004                         CONTINUE                                EFE13040
0016                                            TETA = - ATAN(MODB/MODA)                EFE13050
0017                                            GO TO 009                               EFE13060
                C                                                                       EFE13070
0018                003                 CONTINUE                                        EFE13080
0019                                    TETA = 0.00                                     EFE13090
0020                                    GO TO 009                                       EFE13100
```

```
                C
0021              002  CONTINUE                                                  EFE13110
0022                   IF (MCOB .LE. LIMI) GO TO 005                             EFE13120
0023                          IF (YBB .LT. LIMIN) GO TO 006                      EFE13130
0024                          TETA = 3.1415 - ATAN(MCOB/MCOA)                    EFE13140
0025                          GO TO 009                                          EFE13150
                C                                                                EFE13160
0026              006         CONTINUE                                           EFE13170
0027                          TETA = 3.1415 + ATAN(MCOB/MCOA)                    EFE13180
0028                          GO TO 009                                          EFE13190
                C                                                                EFE13200
0029              005          CONTINUE                                          EFE13210
0030                           TETA = 3.1415                                     EFE13220
0031                           GO TO 009                                         EFE13230
                C                                                                EFE13240
0032              001 CONTINUE                                                   EFE13250
0033                  IF (MCOB .LE. LIMI) GO TO 007                              EFE13260
0034                          IF (YBB .LT. LIMIN) GO TO 008                      EFE13270
0035                          TETA = 3.1415/2.0                                  EFE13280
0036                          GO TO 009                                          EFE13290
                C                                                                EFE13300
0037              008         CONTINUE                                           EFE13310
0038                          TETA = - 3.1415/2.0                                EFE13320
0039                          GO TO 009                                          EFE13330
                C                                                                EFE13340
0040              007         CONTINUE                                           EFE13350
0041                          TETA = 0.00                                        EFE13360
                C                                                                EFE13370
0042              009 CONTINUE                                                   EFE13380
                C                                                                EFE13390
0043                  RETURN                                                     EFE13400
0044                  END                                                        EFE13410
                                                                                 EFE13420
```

APÊNDICE 2-B

RESULTADO DAS SIMULAÇÕES IMPLEMENTADAS

Seguem os resultados das simulações realizadas utilizando-se do programa principal que foi objeto recursivo para o estabelecimento das técnicas implementadas neste trabalho.

SIMULAÇÃO Nº 01

AJUSTES DE COMISSIONAMENTO

```
**********************************************************
*      SIMULACAO DIGITAL DO SISTEMA DE REGULACAO         *
*           USINA DE EMBURCACAO - MAQ 2                  *
*                    C E M I G                           *
**********************************************************

**********************************************
*    LUIZ RENATO GOMES - MN/PUC - JUNHO/85   *
**********************************************

**********************************************
********** CONDICAO NORMAL **********
**********************************************

**********************************************
** REGULADOR EM OPERACAO  VELOCIDADE OFF LINE **
**********************************************
```

******* DADOS DO SISTEMA ELETRICO *******

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0.0	0.0	1.0000	0.0	0.0	0.0

******** MATRIZ F CONFINDA ******

-.19E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.35E+00
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0
-.59E+01	-.59E+01	0.0	0.0	0.0	-.12E+02
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.59E+01	-.13E+01	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01

(1)

[illegible] IMAGINARY= [illegible]

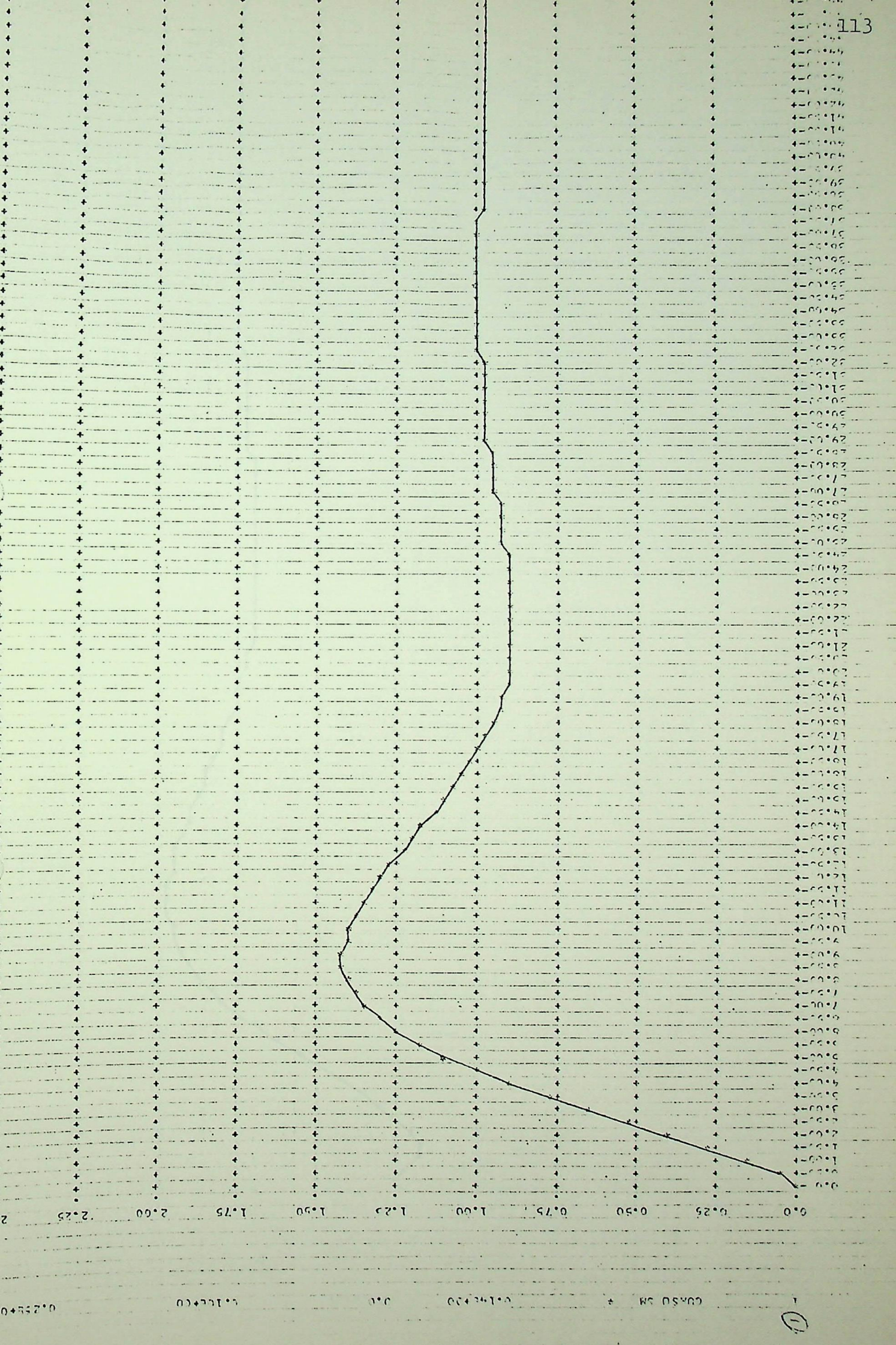
[illegible] IMAGINARY= -0.[illegible]+01

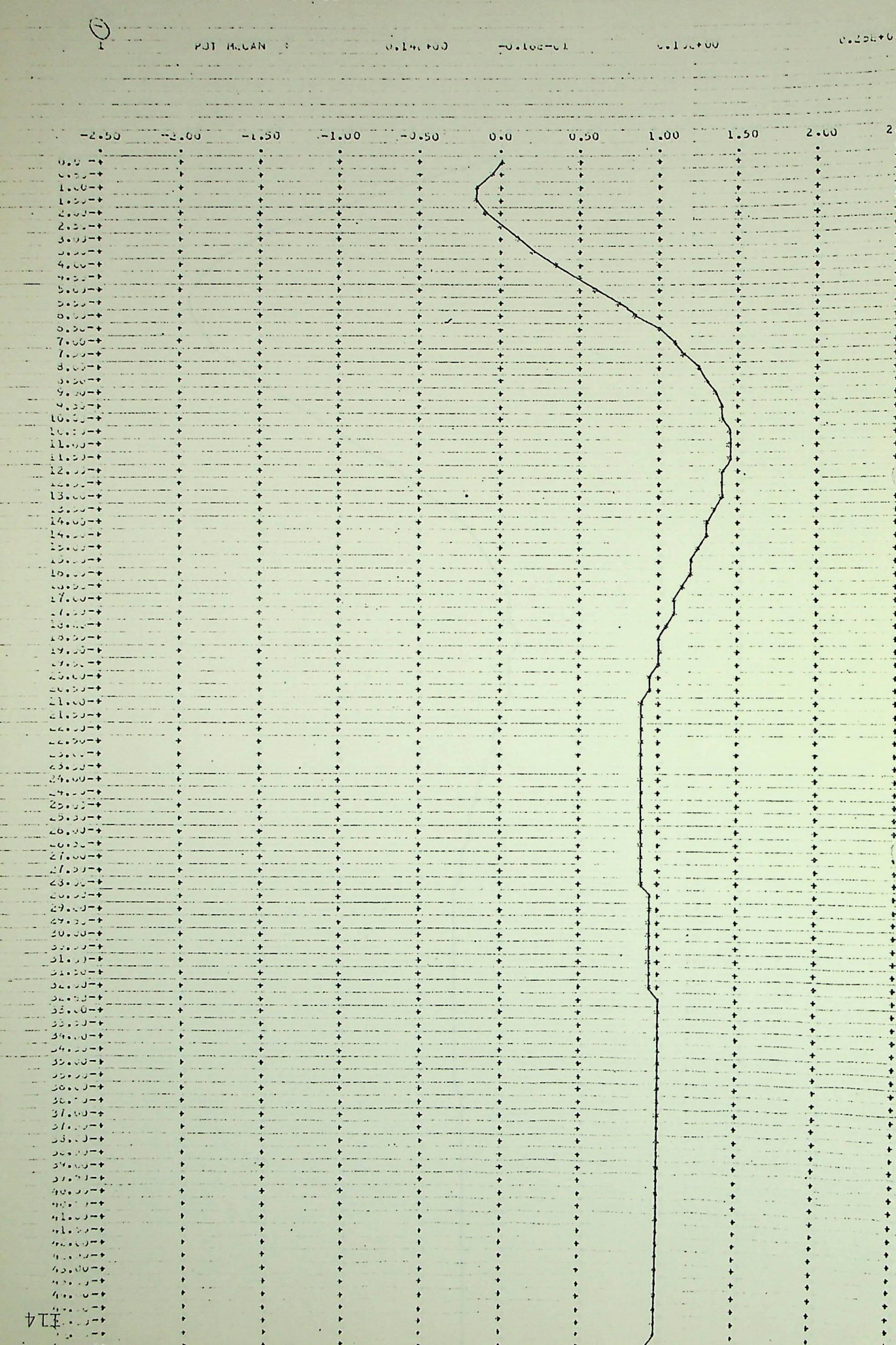
[illegible] IMAGINARY= 0.0

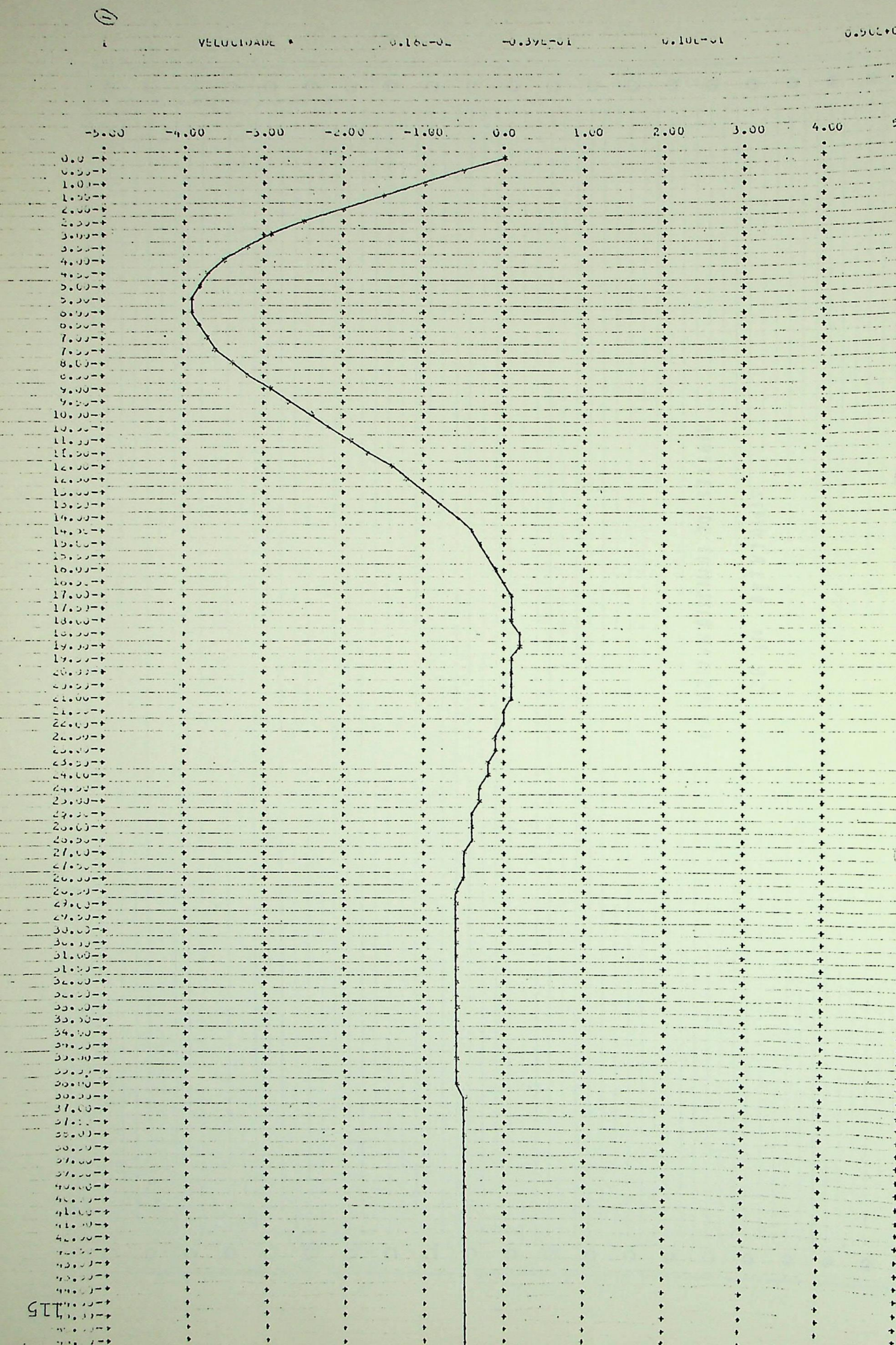
[illegible] IMAGINARY= 0.0

[illegible] IMAGINARY= 0.[illegible]+00

[illegible] IMAGINARY= -3.[illegible]+00




1
POT MEAN
-2.50
-2.00
-1.50
-1.00
-0.50
0.0
0.50
1.00
1.50
2.00


VELOCIDADE *
-5.00
-4.00
-3.00
-2.00
-1.00
0.0
1.00
2.00
3.00
4.00

SIMULAÇÃO Nº 02

AJUSTES DE COMISSIONAMENTO

```
**********************************************************
*        SIMULACAO DIGITAL DO SISTEMA DE REGULACAO       *
*            USINA DE EMBORCACAO - MAQ 2                 *
*                    C e M I G                           *
**********************************************************

**********************************************************
*     LUIZ RENATO GOMES - MN/PUC - JUNHO/85              *
**********************************************************

**********************************************************
**************** CONDICAO NORMAL *************************
**********************************************************

**********************************************************
**REGULADOR EM OPERACAO  REGULADOR DE POTENCIA**
**********************************************************
```

****** DADOS DO SISTEMA ELETRICO ******

(2)

K1	K2	K3	K4	K5	K6
3.0440	0.2384	0.3684	0.2472	0.0109	0.1046

(2)

******** MATRIZ F CONTINUA ******

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.40E+01	0.55E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.43E-01
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-.59E+01	-.59E+01	0.0	0.0	0.0	-.26E+02	-.36E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	-.23E+00
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01	-.29E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	-.23E-01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.38E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.52E-01	0.32E+00	-.10E+00	0.0	0.0	0.0	0.25E-01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.17E+02	0.10E+03	-.33E+02	-.33E+02	0.0	0.0	0.79E+01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-.49E+01	-.83E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.29E+00	0.0	-.42E+02	-.26E+02	0.0	0.28E+01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-.43E-01	0.0	0.11E+01	0.71E+00	-.14E+00	-.46E+00

(2)

* OS AUTOVALORES DO SISTEMA SAO:

REAL= -0.34E+02 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.45E+00 IMAGINARIO= 0.11E+02

REAL= -0.45E+00 IMAGINARIO= -0.11E+02

REAL= -0.83E+01 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.55E+01 IMAGINARIO= 0.45E+01

REAL= -0.55E+01 IMAGINARIO= -0.45E+01

REAL= -0.20E+01 IMAGINARIO= 0.11E+01

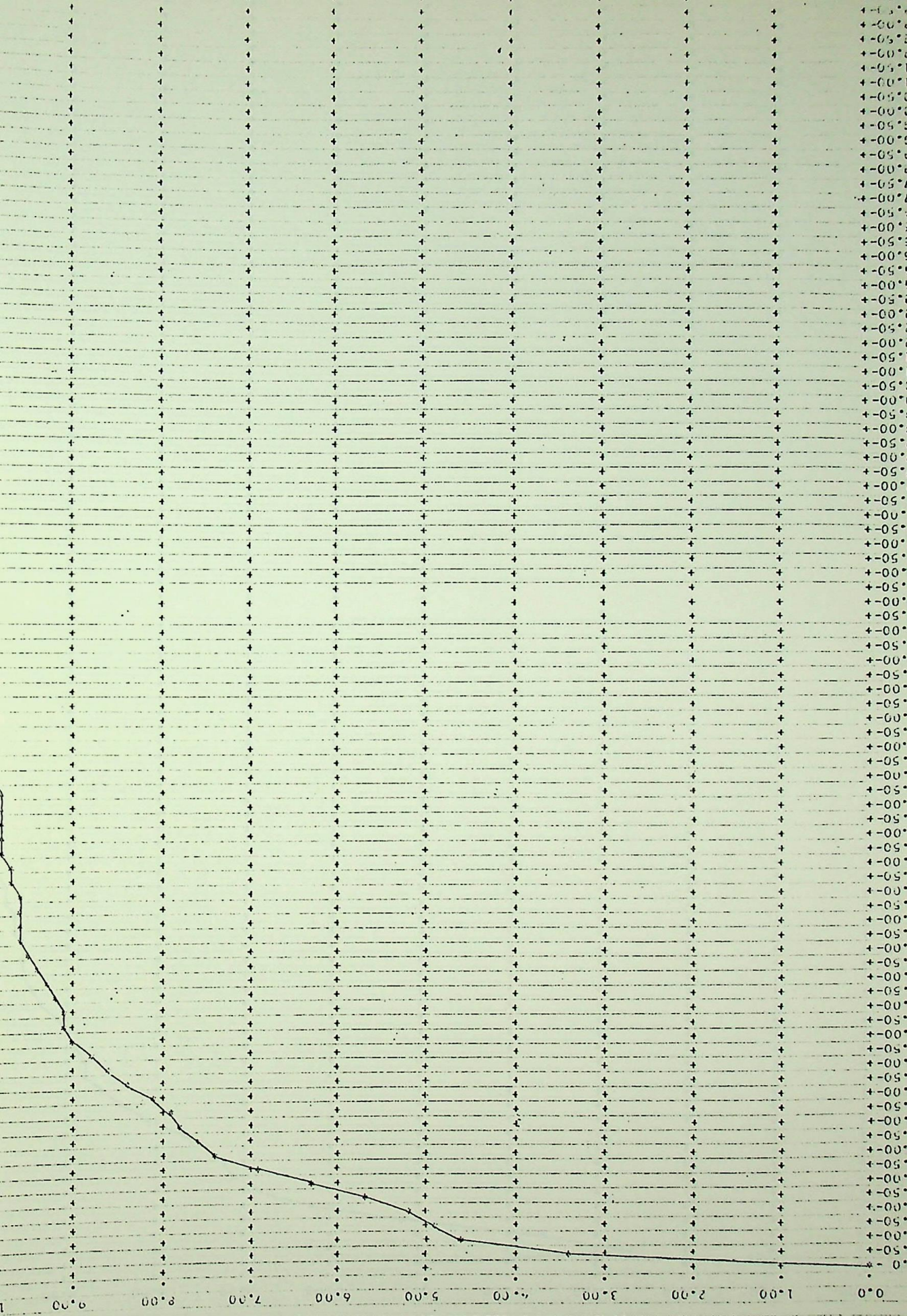
REAL= -0.20E+01 IMAGINARIO= -0.11E+01

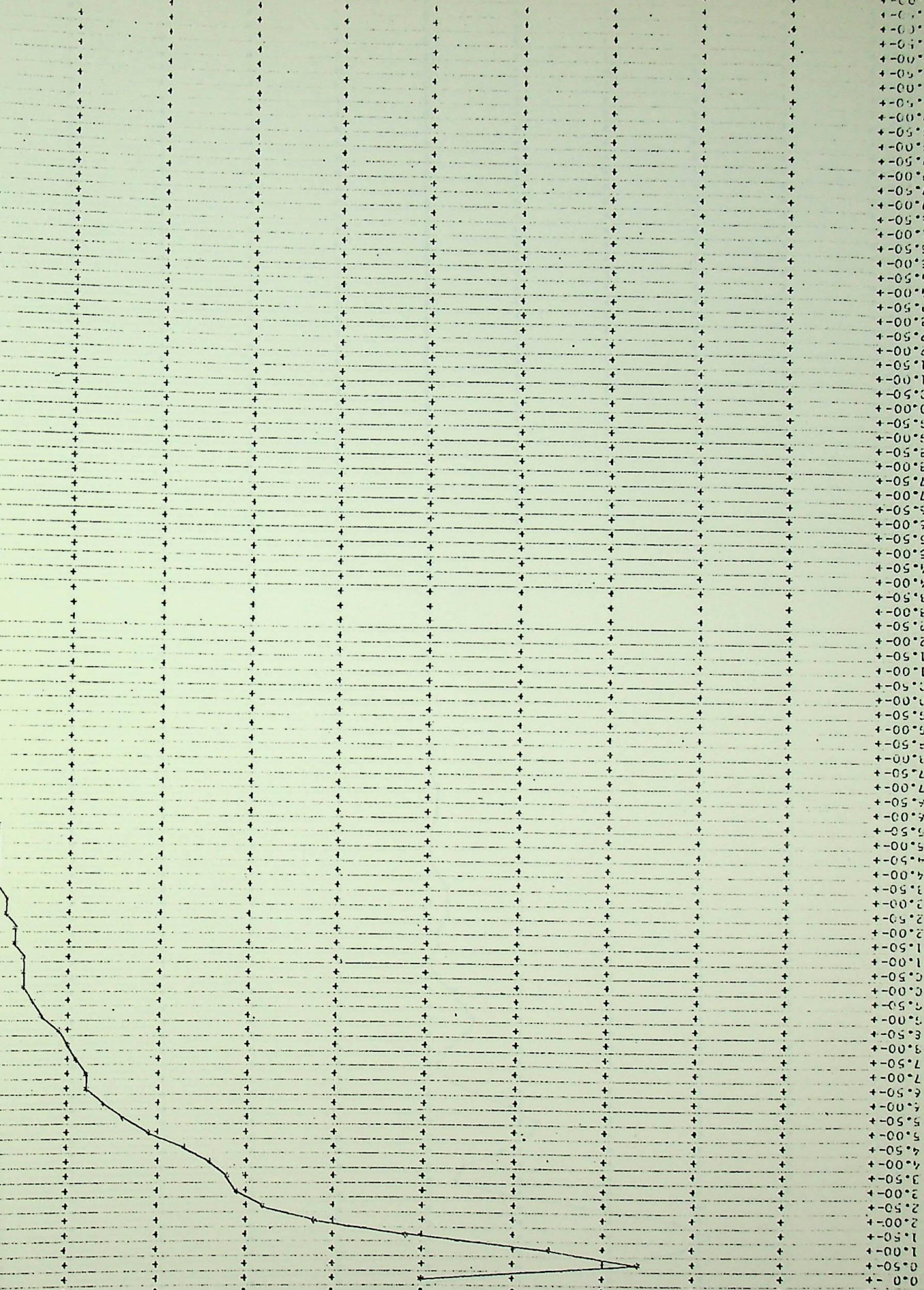
REAL= -0.25E+00 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.10E+00 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.23E+00 IMAGINARIO= 0.57E+00

REAL= -0.23E+00 IMAGINARIO= -0.57E+00





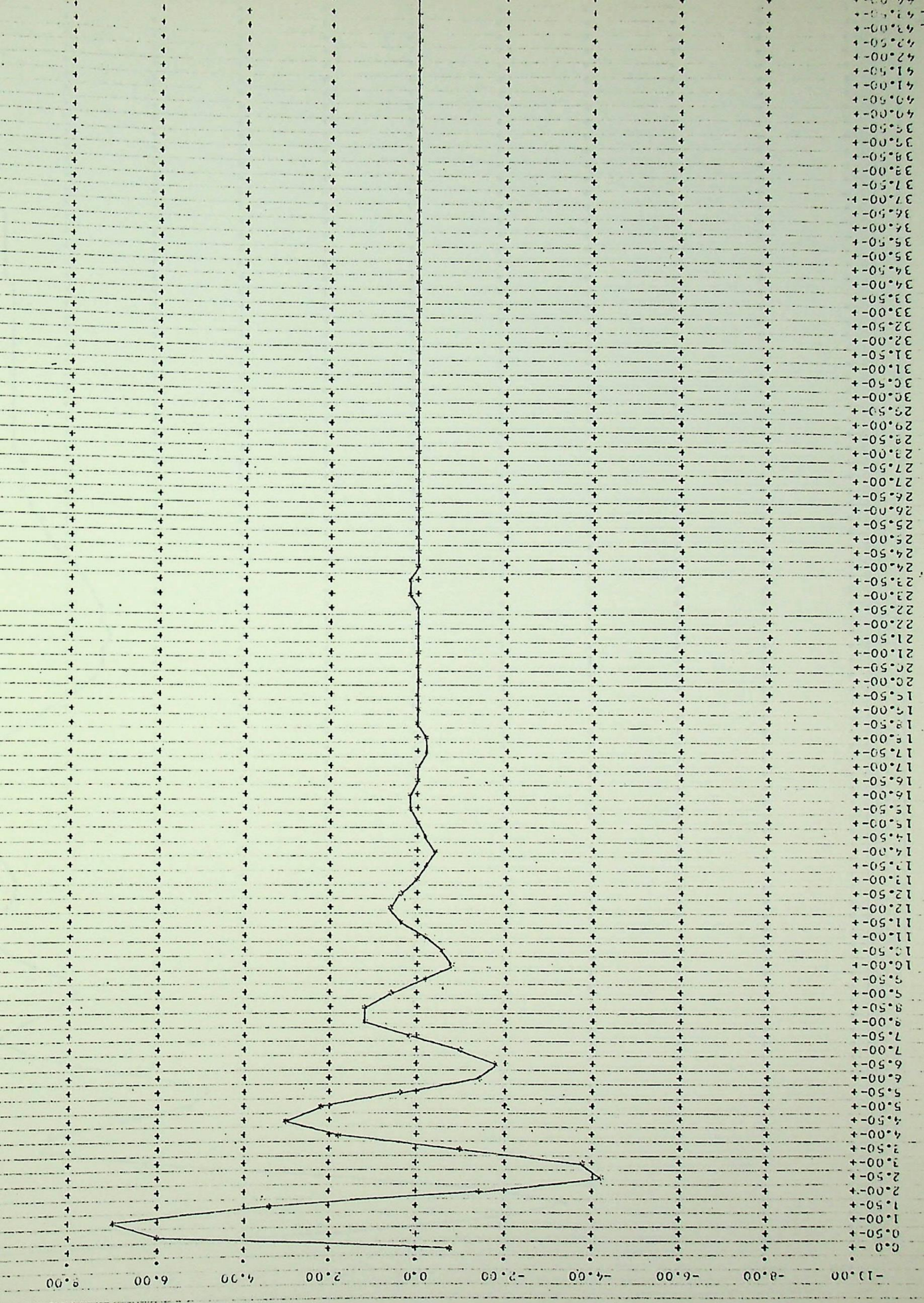
I PDT MCAN * 0.10E+00 -0.49E-01 0.10E-01 0.10E

FUNCAO MEMBER SIGNIFICADO SIMBOLO VARIAVEL MUDANC FATOR DE ESCALA FINAL DE ESC



L	POL ELEIR *	0.3E-03	-0.22E+00	0.10E+03	0.25E

FORCAD NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	NIVEL DE ESCALA



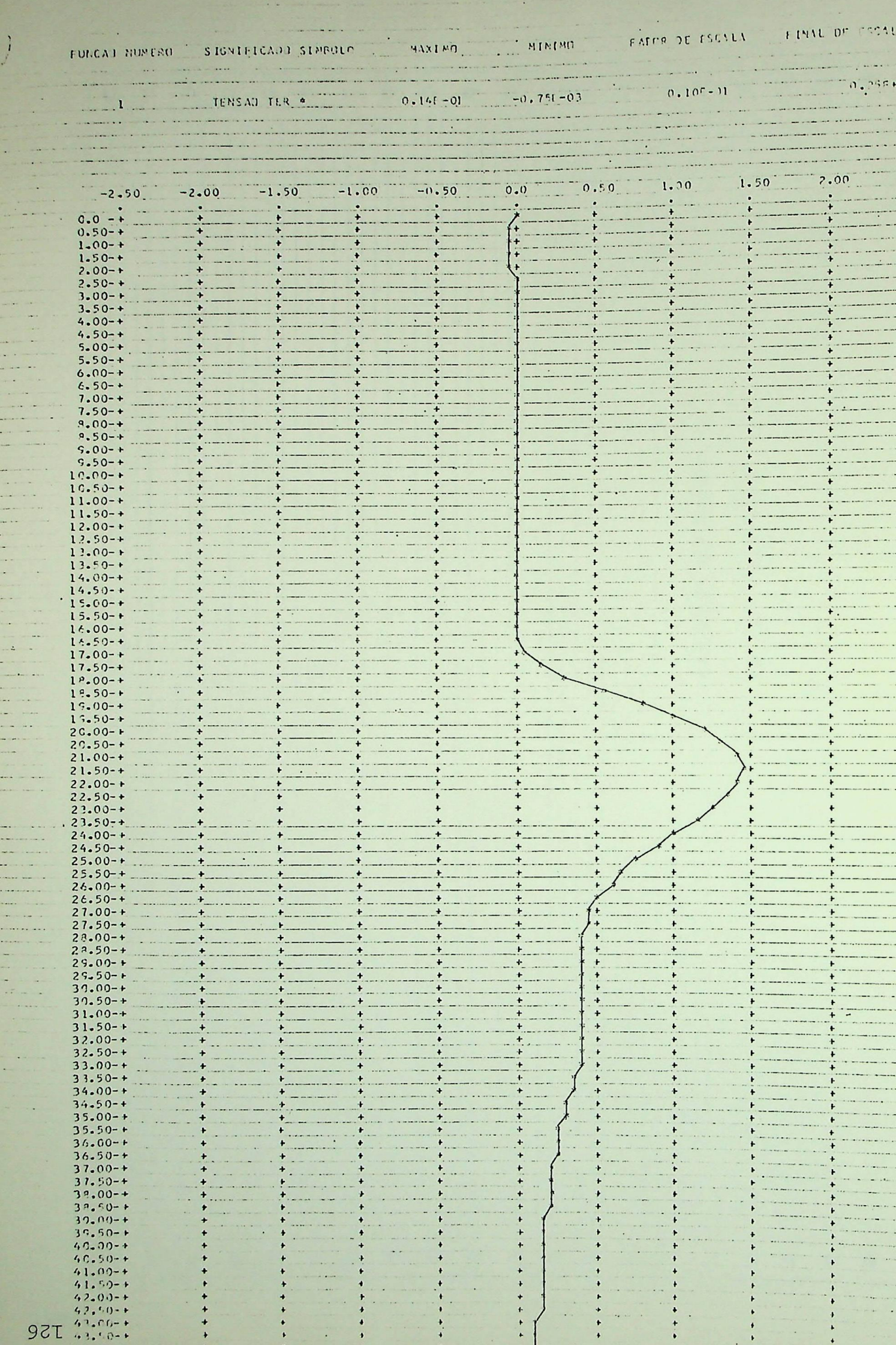
FUNCAO NUMERO SIGNIFICADO SIMBOLO MAXIMO MINIMO FATOR DE ESCALA PIXEL DE ESCA

1 VELOCIDADE * 0.79E-01 -0.98E-03 0.10E-02 0.10E

FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCA
1.	ANGULO POT *	0.0	-0.71E-01	0.10E-01	-0.75



FUNCAI NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	TENSAO TER *	0.14E-01	-0.75E-03	0.10E-01	0.25E+



SIMULAÇÃO Nº 03

SISTEMA NÃO AJUSTADO

```
**********************************************************
*          SIMULACAO DIGITAL DO SISTEMA DE REGULACAO     *
*              USINA DE EMBORCACAO - MAQ 2               *
*                       C E M I G                        *
**********************************************************

**********************************************************
*     LUIZ RENATO GOMES - MN/POS - JUNHO/85              *
**********************************************************

**********************************************************
********** CONDICAO NORMAL **********
**********************************************************

**********************************************************
** REGULADOR EM OPERACAO  VELOCIDADE OFF LINE **
**********************************************************
```

******* DADOS DO SISTEMA ELETRICO *******

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0.0	0.0	1.0000	0.0	0.0	0.0

******** MATRIZ F CONTINUA ******

-.50E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.90E+00
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0
-.59E+01	-.59E+01	0.0	0.0	0.0	-.12E+02
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01

* OS AUTOVALORES DO SISTEMA SAC *

REAL= -0.[illegible]E+01 IMAGINARIO= 0.60E+01

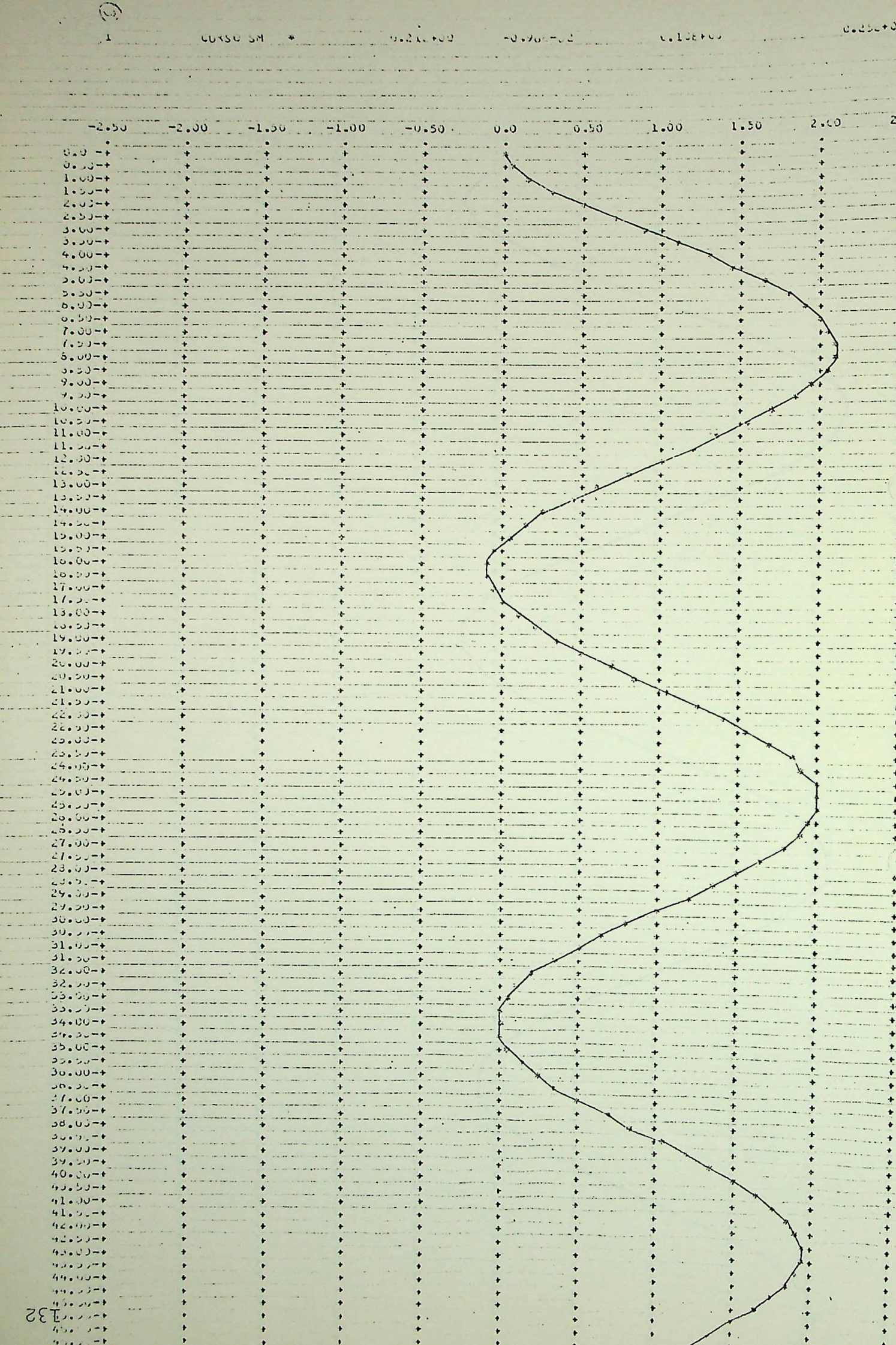
REAL= -0.[illegible]E+01 IMAGINARIO= -0.60E+01

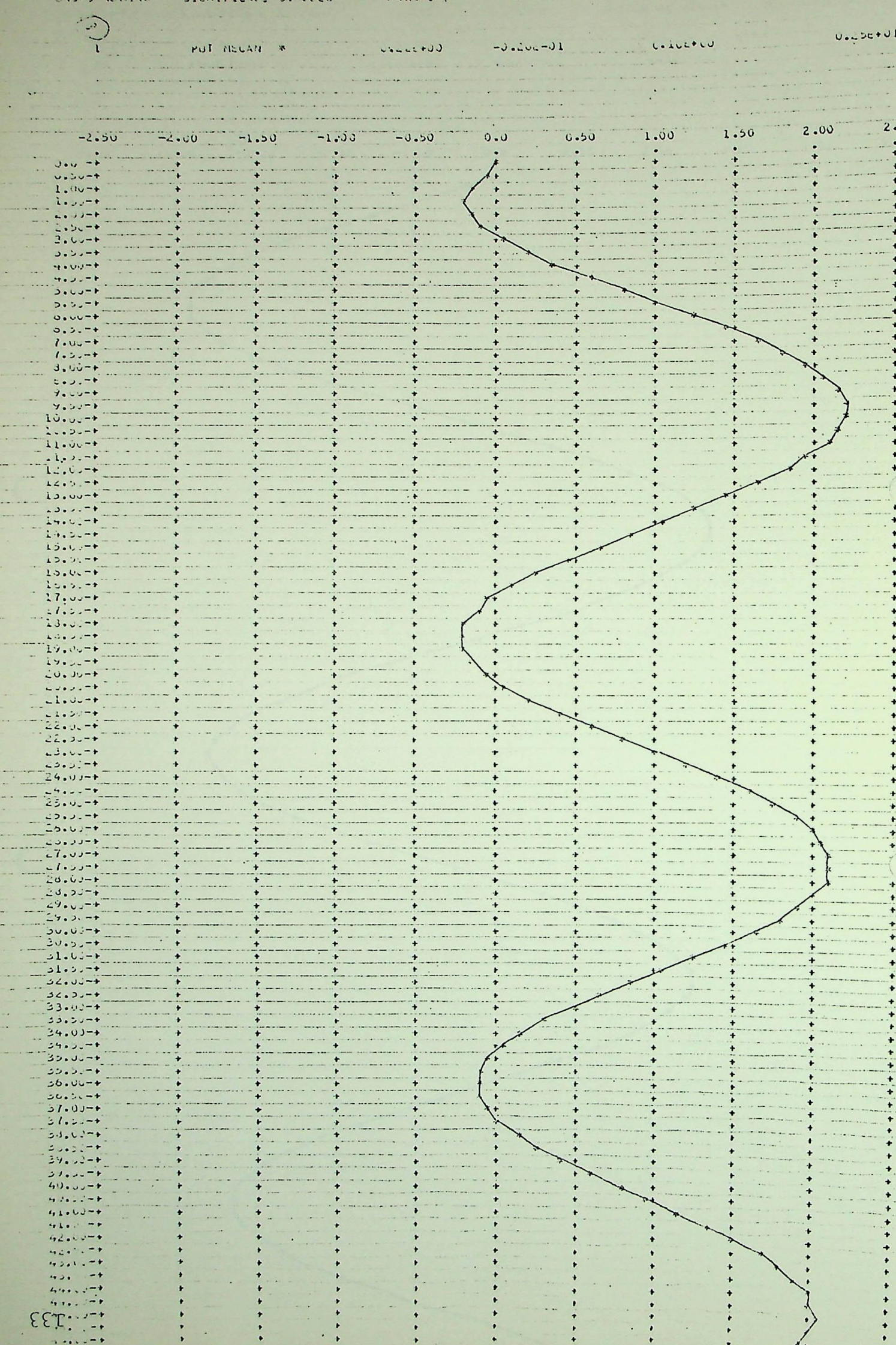
REAL= -0.[illegible] IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.[illegible] IMAGINARIO= 0.0

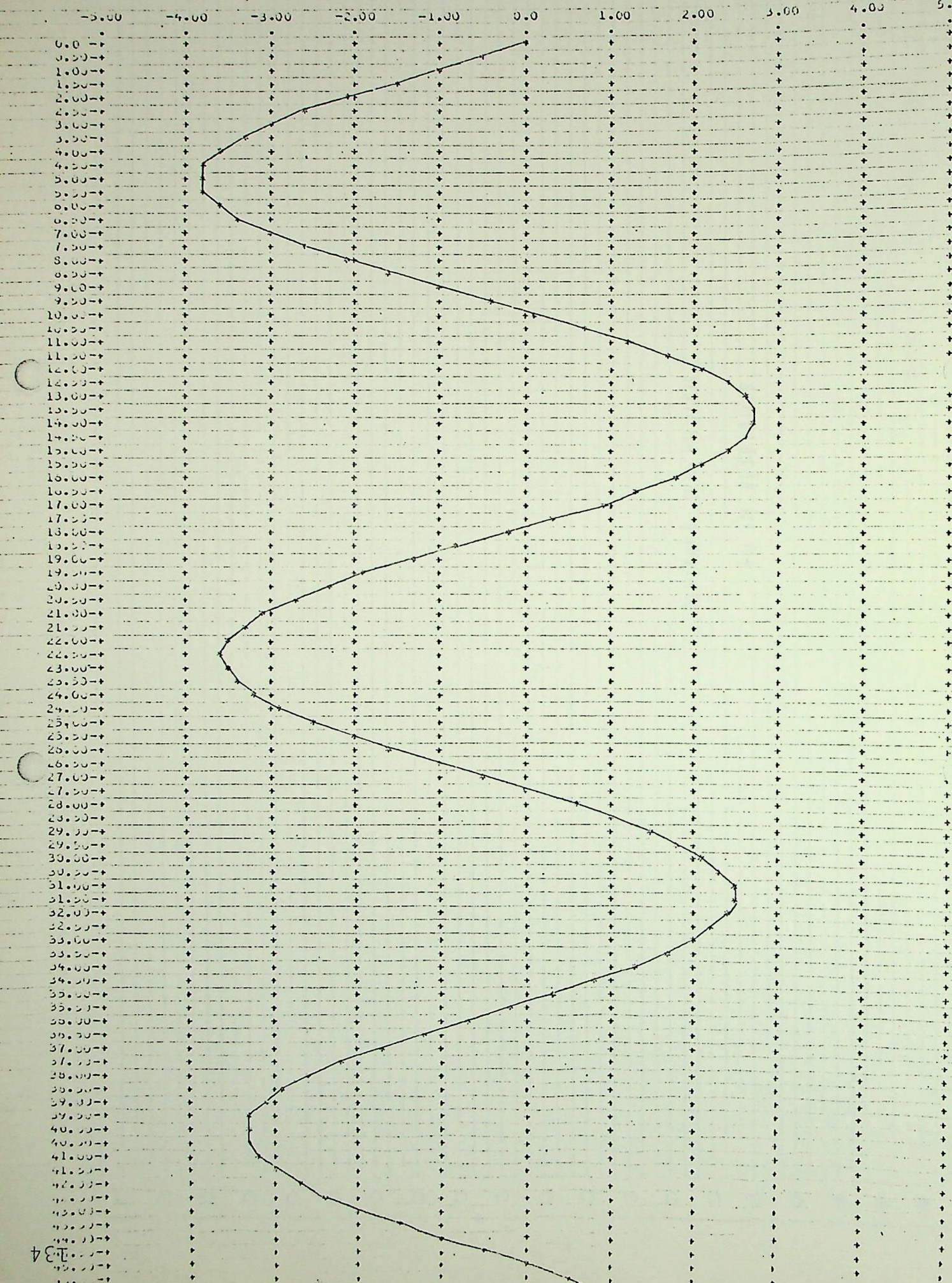
REAL= -0.[illegible] IMAGINARIO= 0.[illegible]E+00

REAL= -0.[illegible] IMAGINARIO= -0.[illegible]E+00


-2.50
-2.00
-1.50
-1.00
-0.50
0.0
0.50
1.00
1.50
2.00


1 PDT MEAN *
-2.50
-2.00
-1.50
-1.00
-0.50
0.0
0.50
1.00
1.50
2.00

PONTO NÚMERO	SIGNIFICADO SÍMBOLO	MÁXIMO	MÍNIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	VELOCIDADE *	0.27E-01	-0.36E-01	0.10E-01	0.36E-01



CONST. DE TEMPO TN2 = 0.3000

SIMULAÇÃO Nº 04

SISTEMA NÃO AJUSTADO

```
**********************************************************
*          SIMULACAO DIGITAL DO SISTEMA DE REGULACAO     *
*                  USINA DE EMBORCACAO - MAQ 2           *
*                          C E M I G                     *
**********************************************************

**********************************************************
*     LUIZ RENATO GOMES - MN/PD3 - JUNHO/85              *
**********************************************************

**********************************************************
********** CONDICAO NORMAL **********
**********************************************************

**********************************************************
**REGULADOR EM OPERACAO  REGULADOR DE POTENCIA**
**********************************************************
```

******* DADOS DO SISTEMA ELETRICO *******

K1	K2	K3	K4	K5	K6
3.0440	0.2384	0.3684	0.2472	0.0109	0.1046

******** MATRIZ F CONTINUA ******

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15E+02	0.20E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.16E+00
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-.59E+01	-.59E+01	0.0	0.0	0.0	-.26E+02	-.36E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	-.28E+00
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01	-.29E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	-.23E-01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.38E+03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.52E-01	0.32E+00	-.10E+00	0.0	0.0	0.0	0.25E-01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.17E+02	0.10E+03	-.33E+02	-.33E+02	0.0	0.0	0.79E+01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-.49E+01	-.83E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.29E+00	0.0	-.42E+02	-.26E+02	0.0	0.28E+01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-.43E-01	0.0	0.11E+01	0.71E+00	-.14E+00	-.46E+00

REAL= -0.34E+02 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.36E+00 IMAGINARIO= 0.11E+02

REAL= -0.36E+00 IMAGINARIO= -0.11E+02

REAL= -0.55E+01 IMAGINARIO= 0.50E+01

REAL= -0.55E+01 IMAGINARIO= -0.50E+01

REAL= -0.83E+01 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.44E+01 IMAGINARIO= 0.0

REAL= 0.10E-01 IMAGINARIO= 0.98E+00

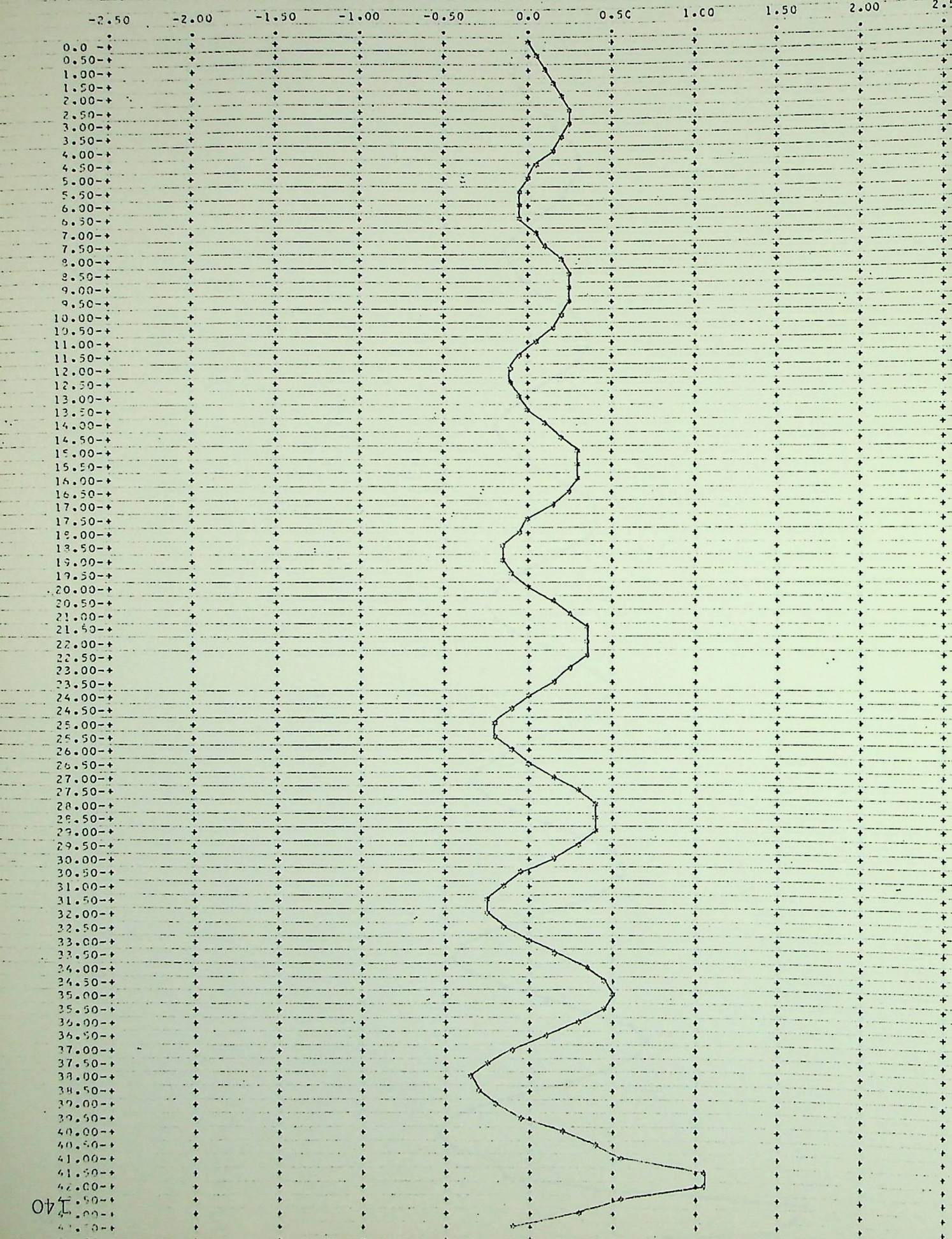
REAL= 0.10E-01 IMAGINARIO= -0.98E+00

REAL= -0.10E+00 IMAGINARIO= 0.0

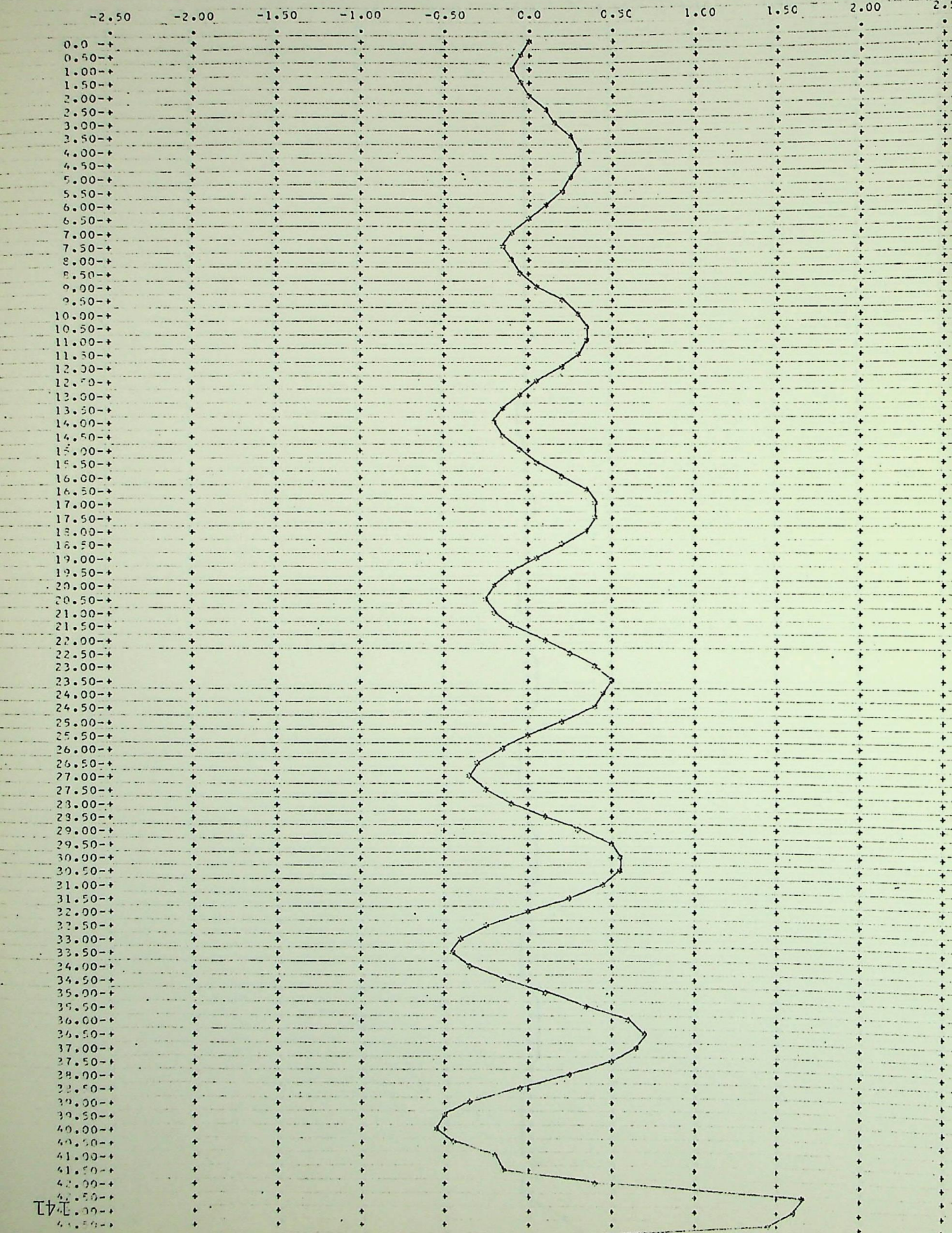
REAL= -0.21E+00 IMAGINARIO= 0.59E+00

REAL= -0.21E+00 IMAGINARIO= -0.59E+00

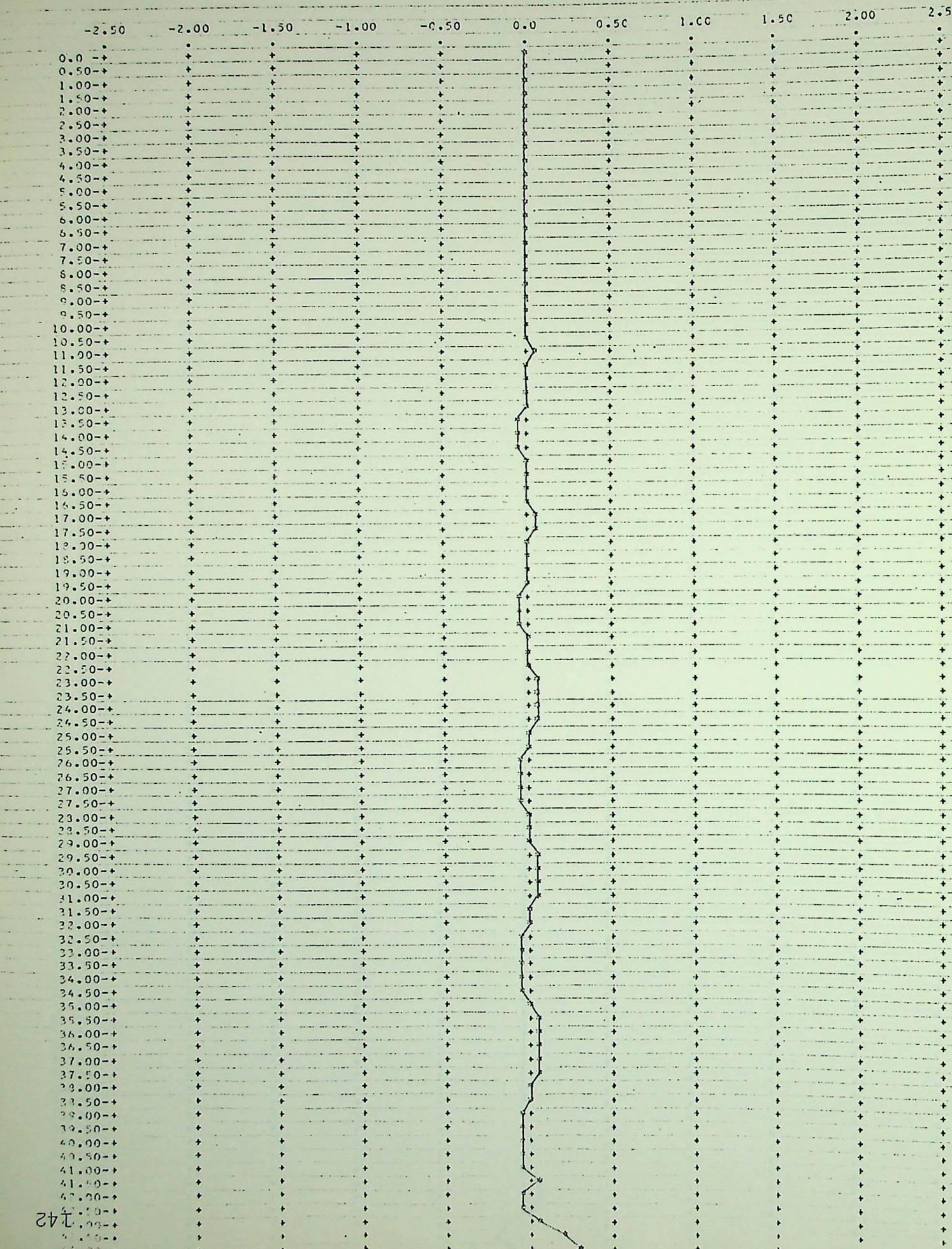
FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	CURSO SM *	C.11E+01	-0.5CE+CO	C.10E+C1	0.25E+01



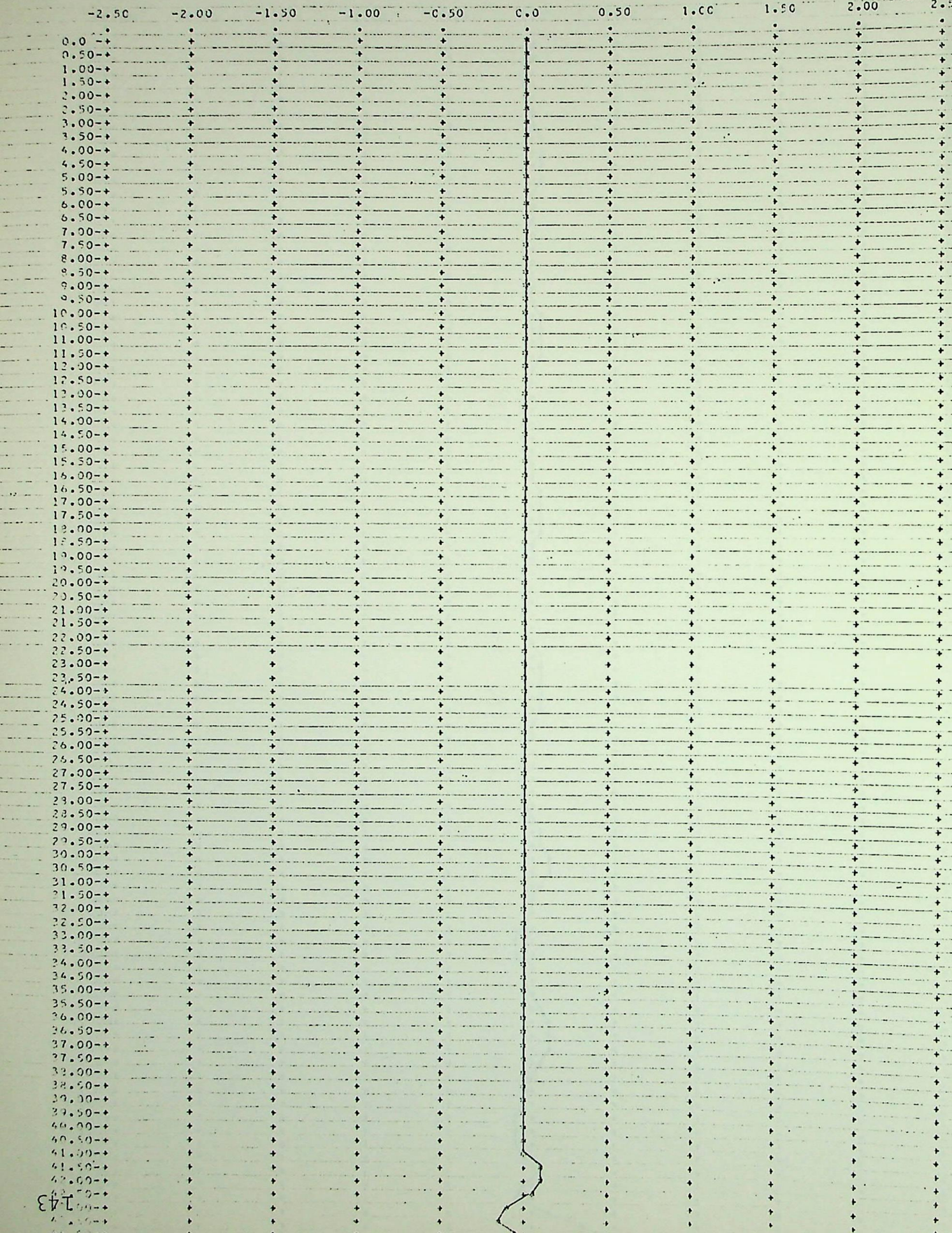
FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	POT MECAN Φ	0.17E+01	-0.12E+01	0.10E+01	0.25E+01



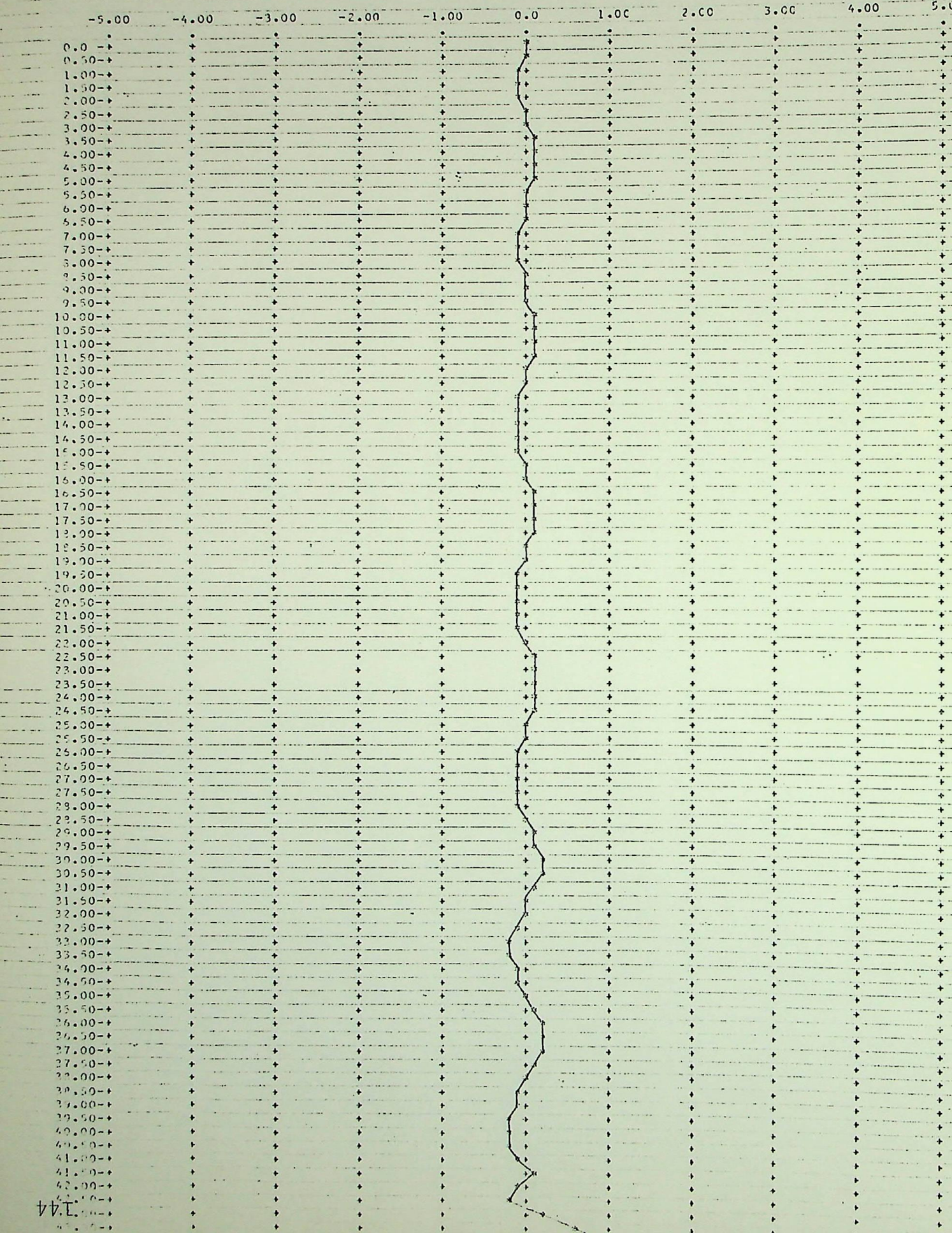
FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	POT ELETR *	0.13E+02	-0.13E+02	0.10E+02	0.25E+01



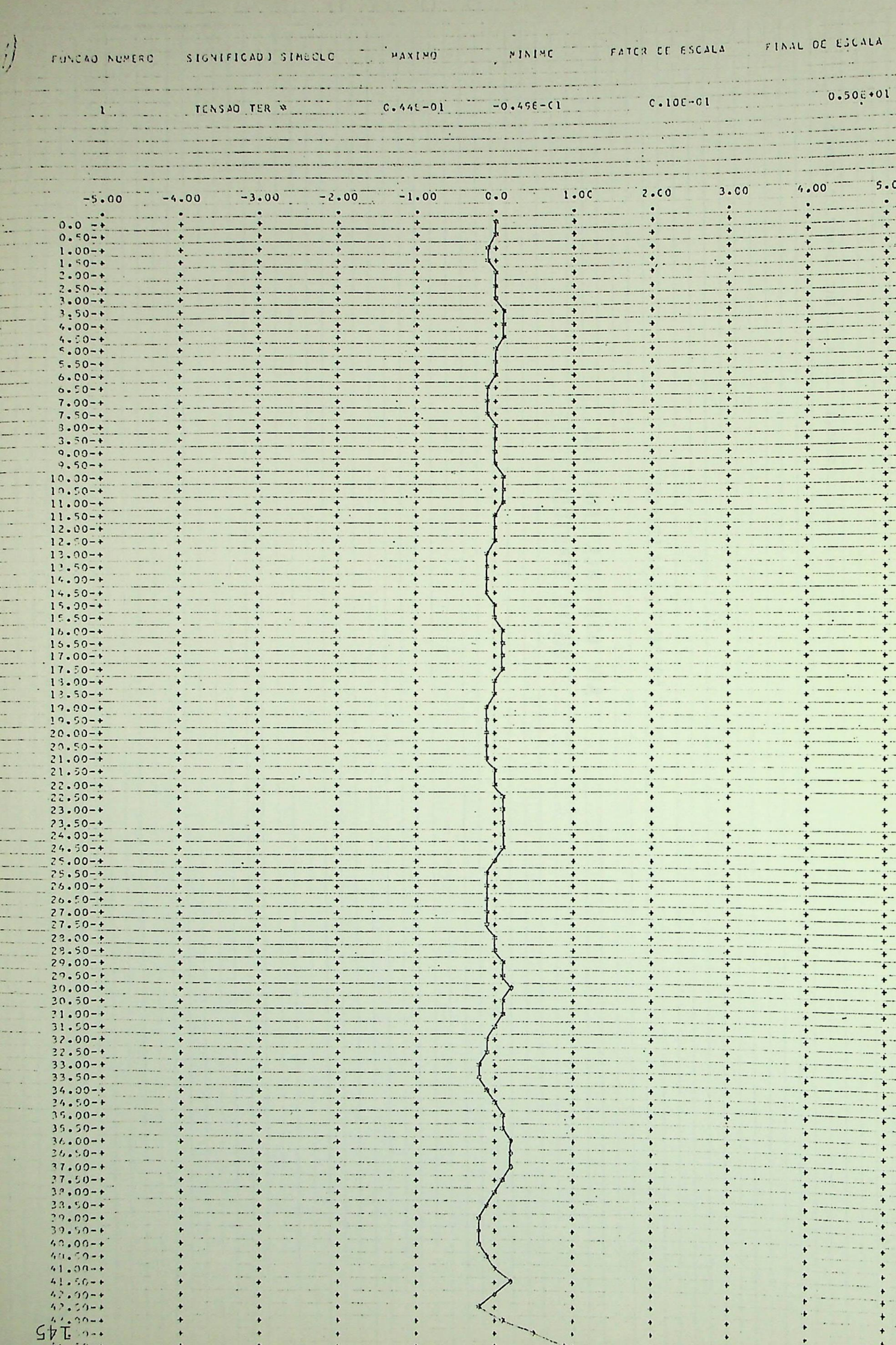
IDENTIFICAÇÃO NÚMERO	SIGNIFICADO SÍMBOLO	MÁXIMO	MÍNIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	VELOCIDADE *	0.12E+00	-0.11E+00	0.10E+00	0.25E+01



FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	ANGULO POT *	0.44E+01	-0.41E+01	0.10E+01	0.50E+01



FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	TENSAO TER N	0.44E-01	-0.49E-01	0.10E-01	0.50E+01



CONST. DE TEMPO TN1 = 2.0000

SIMULAÇÃO Nº 05

SISTEMA AJUSTADO VIA
CONTROLE ÓTIMO

```
**********************************************************
*        SIMULACAO DIGITAL DO SISTEMA DE REGULACAO       *
*           USINA DE EMBORCACAO - MAC 2                  *
*                    C E M I G                           *
**********************************************************

**********************************************************
*     LUIZ RENATO GOMES - MN/PUC - JUNHO/85              *
**********************************************************

**********************************************************
**********CONDICAO MODIFICADA*********************
**********************************************************

**********************************************************
** REGULADOR EM OPERACAO  VELOCIDADE OFF LINE **
**********************************************************
```

******* DADOS D SISTEMA ELETRICO *******

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0.0	0.0	1.0000	0.0	0.0	0.0

***** MATRIZ A DISCRETIZADA *****

0.10E+01 0.20E-08 -.14E-06 -.84E-05 0.43E-05 0.90E-02
-.28E-02 0.90E+00 0.95E-01 0.36E-05 -.18E-05 -.97E-02
-.55E-01 -.56E-01 0.10E+01 0.11E-03 -.56E-04 -.12E+00
-.14E-02 -.14E-02 0.49E-01 0.95E+00 -.92E-06 -.29E-02
-.19E-04 -.18E-04 0.95E-03 0.38E-01 0.09E+00 -.37E-04
0.92E-06 0.90E-06 -.47E-04 -.19E-02 0.95E-03 0.10E+01

***** MATRIZ B DISCRETIZADA *****

-.90E-02
0.57E-02
0.12E+00
0.29E-02
0.37E-04
-.18E-05

*** MATRIZ K DE RICCATI ***

ITERACAO KF = ICO

-.49E+01 -.83E-01 0.12E+00 0.14E+00 -.30E+00 -.90E+01
-.83E-01 -.22E-02 0.36E-02 0.40E-02 -.31E-02 -.15E+00
0.12E+00 0.36E-02 -.58E-02 -.67E-02 -.37E-02 0.24E+00
0.14E+00 0.40E-02 -.67E-02 -.73E-02 0.30E-02 0.23E+00
-.30E+00 -.30E-02 0.30E-02 0.30E-02 -.44E-01 -.90E+00
-.90E+01 -.15E+00 0.24E+00 0.23E+00 -.91E+00 -.23E+02

*** MATRIZ DE REALIMENTACAO ***

0.58E-01 0.12E-02 -.17E-02 -.71E-02 0.23E-02 0.11E+00

****** MATRIZ O DE ENTRADA ******

0.12E-01	-.10E-02	0.89E-03	0.91E-03	0.45E-02	0.70E-01
-.10E-02	-.17E-04	0.37E-04	0.21E-04	-.39E-03	0.21E-03
0.89E-03	0.37E-04	-.33E-04	0.23E-03	-.14E-03	0.17E-02
0.92E-03	0.31E-04	-.25E-04	-.75E-04	-.76E-04	0.14E-03
0.50E-02	-.13E-04	-.48E-04	-.60E-04	0.61E-03	0.13E-01
0.70E-01	0.21E-03	0.17E-02	0.48E-03	0.12E-01	0.21E+00

****** MATRIZ O DE ENTRADA ******

0.12E-01 -.10E-02 0.89E-03 0.91E-03 0.45E-02 0.70E-01
-.10E-02 -.17E-04 0.37E-04 0.21E-04 -.39E-03 0.21E-03
0.89E-03 0.37E-04 -.33E-04 0.23E-03 -.14E-03 0.17E-02
0.91E-03 0.31E-04 -.25E-04 -.75E-04 -.76E-04 0.14E-03
0.45E-02 -.13E-04 -.48E-04 -.60E-04 0.61E-03 0.13E-01
0.70E-01 0.21E-03 0.17E-02 0.48E-03 0.12E-01 0.21E+00

****** MATRIZ K DE ENTRADA ******

-.49E+01	-.83E-01	0.12E+00	0.14E+00	-.30E+00	-.90E+01
-.83E-01	-.22E-02	0.36E-02	0.40E-02	-.31E-02	-.15E+00
0.12E+00	0.36E-02	-.58E-02	-.67E-02	-.37E-02	0.24E+00
0.14E+00	0.40E-02	-.67E-02	-.73E-02	0.30E-02	0.23E+00
-.30E+00	-.30E-02	0.30E-02	0.30E-02	-.44E-01	-.90E+00
-.90E+01	-.15E+00	0.24E+00	0.23E+00	-.91E+00	-.23E+02

****** MATRIZ F CONTINUA ********

-.50E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.90E+00
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0
-.55E+01	-.55E+01	0.0	0.0	0.0	-.12E+02
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.43E-01

****** MATRIZ B CONTINUA *******

-.5CE+CC
0.0
0.12E+C2
0.0
0.0
0.0

**** NOVA MATRIZ F CONTINUA ****

0.24E-02	0.10E-02	-.16E-02	-.19E-02	0.21E-02	0.10E+01
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0
-.65E+01	-.59E+01	0.20E-01	0.24E-01	-.27E-01	-.13E+02
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01

+ OS AUTOVALORES DO SISTEMA SAC +

REAL= -0.5[illegible]+01 IMAGINARIO= 0.60E+01

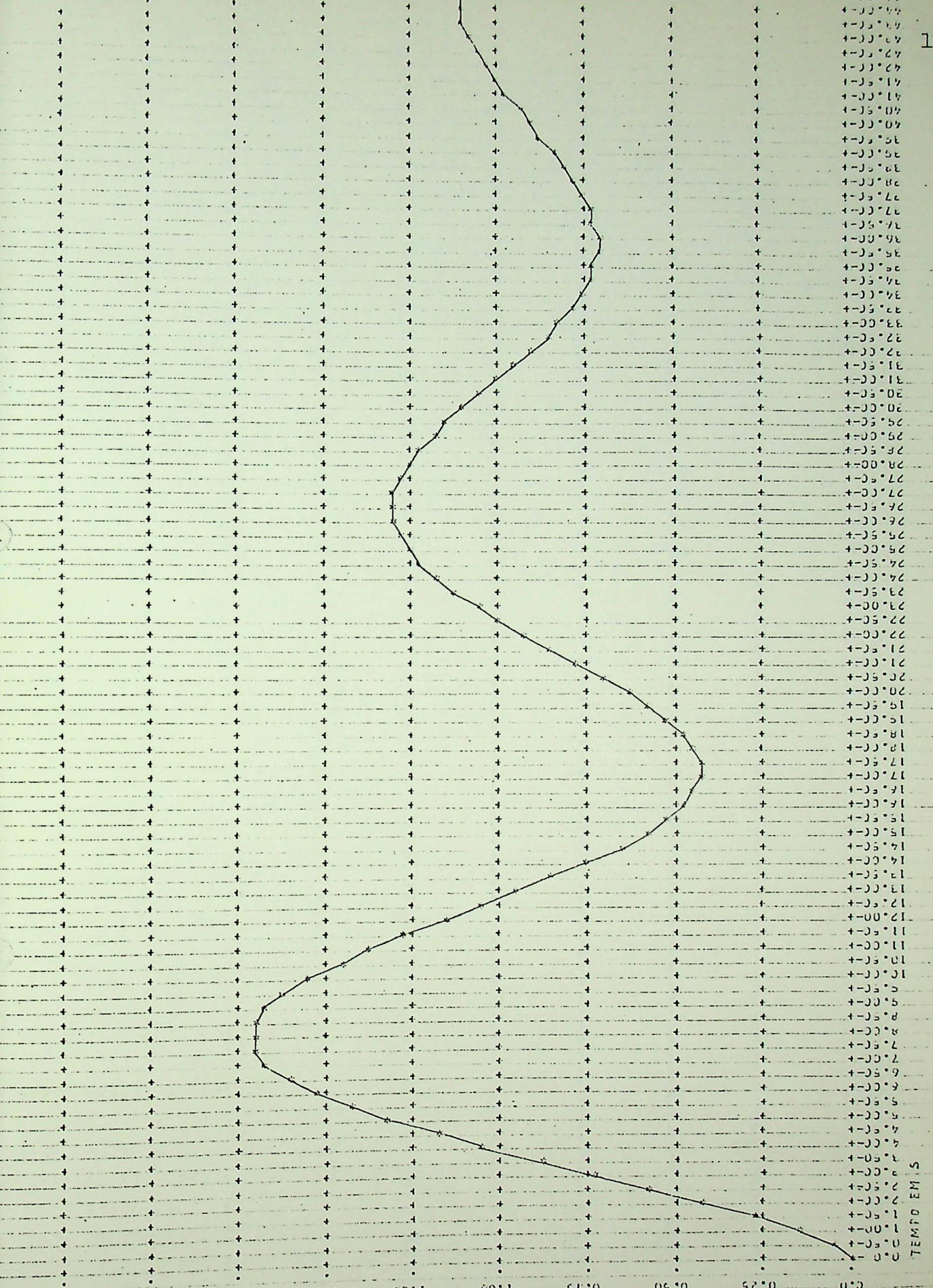
REAL= -0.[illegible]+01 IMAGINARIO= -0.60E+01

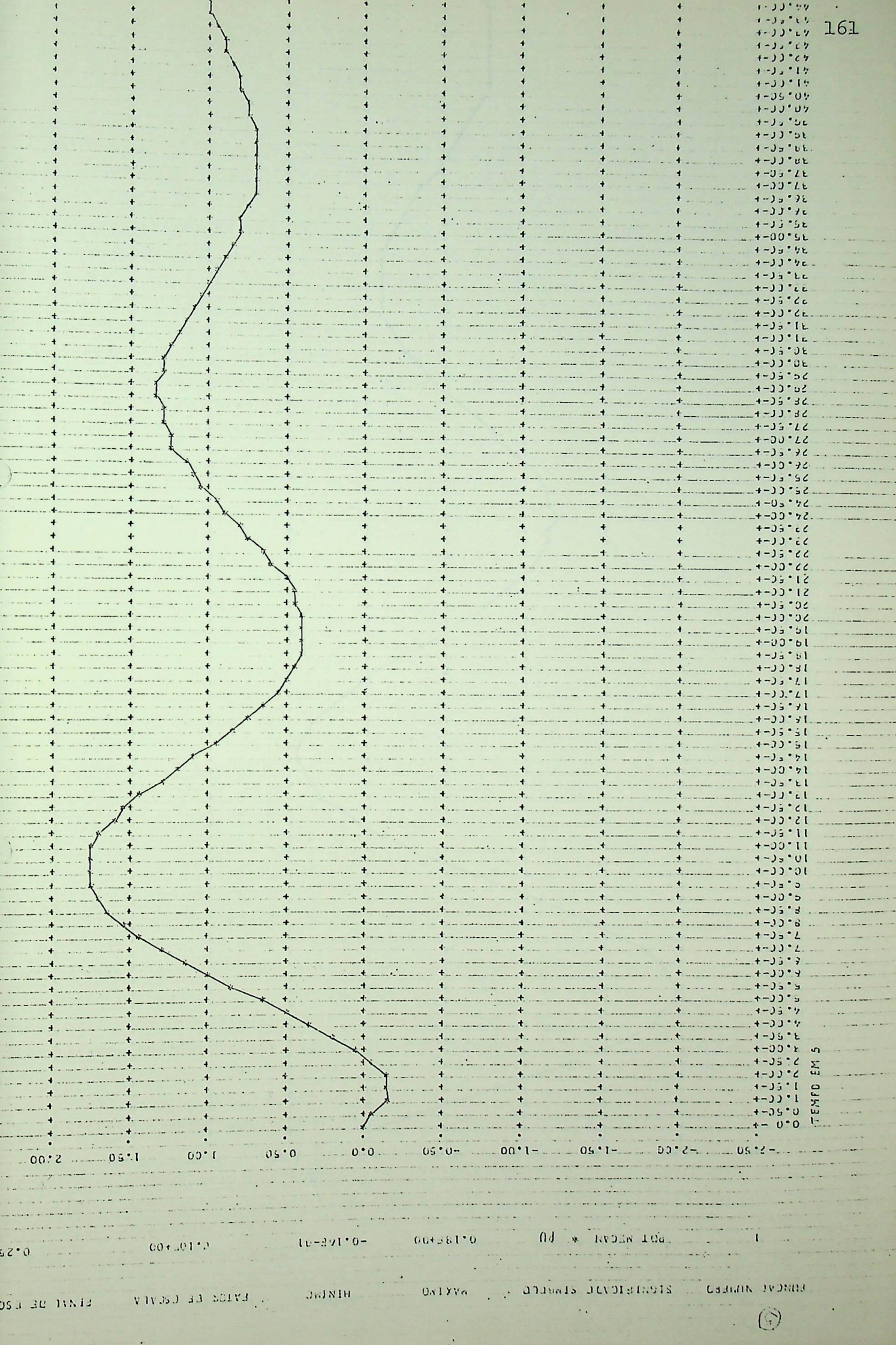
REAL= -0.5[illegible]+01 IMAGINARIO= 0.0

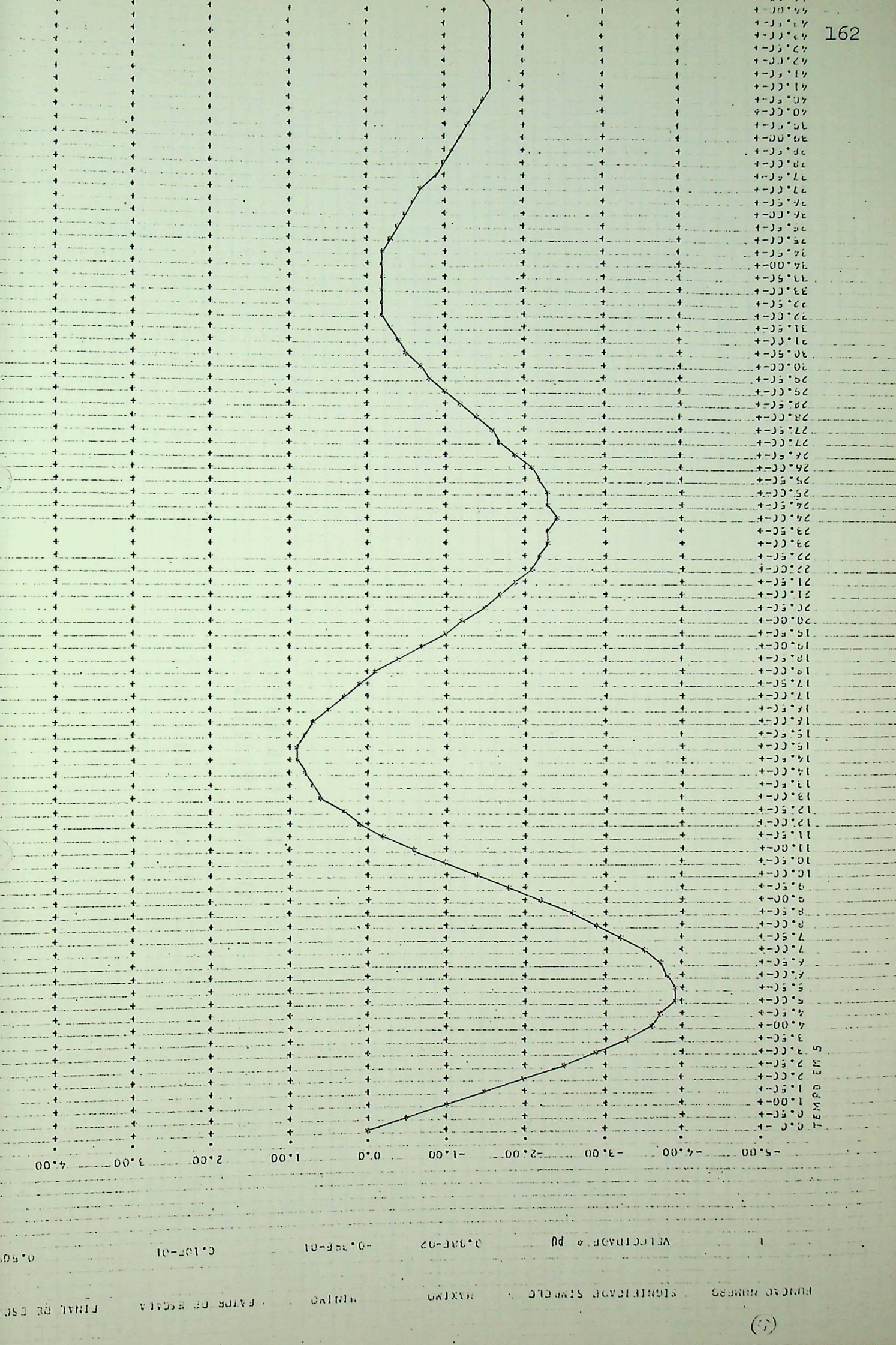
REAL= -0.69[illegible]+00 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.[illegible]-01 IMAGINARIO= 0.5[illegible]+00

REAL= -0.[illegible]-01 IMAGINARIO= -0.34[illegible]+00


TEMPO EM S
0.0
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
2.25


TEMPO EM S
0.0
0.50
1.00
1.50
2.00
-0.50
-1.00
-1.50
-2.00
-2.50


TEMPO EM S
-5.00
-4.00
-3.00
-2.00
-1.00
0.0
1.00
2.00
3.00
4.00

CONST. DE TEMPO TN2 = 0.3000

(6)

SIMULAÇÃO Nº 06

SISTEMA AJUSTADO VIA
CONTROLE ÓTIMO

(6)

```
**********************************************************
*        SIMULACAO DIGITAL DO SISTEMA DE REGULACAO       *
*                USINA DE EMBORCACAO - MAC 2             *
*                        C E M I C                       *
**********************************************************

          ********************************************
          *     LUIZ RENATO GOMES - MN/PEB - JUNHO/85    *
          ********************************************

          ********************************************
          ***********CONDICAO MODIFICADA**************
          ********************************************

          ********************************************
          **REGULADOR EM OPERACAO  REGULADOR DE POTENCIA**
          ********************************************
```

******* DADOS DO SISTEMA ELETRICO *******

K1	K2	K3	K4	K5	K6
3.0440	0.2384	0.3684	0.2472	0.0109	0.1046

***** MATRIZ A DISCRETIZADA *****

0.10E+01	0.37E-07	-.26E-05	-.16E-03	0.83E-04	0.19E+00	0.20E-01	-.92E-06	0.80E-05	0.56E-05	-.11E-05	0.16E-02
-.28E-02	0.90E+00	0.95E-01	0.91E-05	-.46E-05	-.15E-01	-.17E-02	0.40E-07	-.48E-06	-.32E-06	0.65E-07	-.14E-03
-.59E-01	-.56E-01	0.10E+01	0.29E-03	-.15E-03	-.33E+00	-.36E-01	0.16E-05	-.14E-04	-.99E-05	0.20E-05	-.28E-02
-.14E-02	-.14E-02	0.49E-01	0.95E+00	-.23E-05	-.76E-02	-.88E-03	0.20E-07	-.24E-06	-.16E-06	0.33E-07	-.69E-04
-.19E-04	-.18E-04	0.95E-03	0.38E-01	0.99E+00	-.94E-04	-.11E-04	0.16E-05	-.24E-08	-.16E-08	0.32E-09	-.89E-06
0.92E-06	0.90E-06	-.47E-04	-.18E-02	0.95E-03	0.99E+00	-.29E-02	0.13E-06	-.12E-05	-.81E-06	0.16E-06	-.23E-03
0.87E-06	0.85E-06	-.59E-04	-.35E-02	0.18E-02	0.38E+01	0.99E+00	0.13E-06	-.15E-05	-.10E-05	0.20E-06	-.43E-03
0.67E-09	0.66E-09	-.55E-07	-.42E-05	0.22E-05	0.65E-02	0.32E-02	0.10E+01	0.12E-05	0.98E-06	-.18E-06	0.25E-03
0.20E-06	0.20E-06	-.17E-04	-.12E-02	0.63E-03	0.19E+01	0.86E+00	-.28E+00	0.72E+00	0.25E-03	-.51E-04	0.67E-01
-.17E-08	-.17E-08	0.17E-06	0.16E-04	-.80E-05	-.31E-01	-.21E-01	0.71E-02	-.40E-01	0.92E+00	0.83E-06	-.17E-02
-.14E-07	-.14E-07	0.14E-05	0.13E-03	-.67E-04	-.27E+00	-.18E+00	0.62E-01	-.35E+00	-.25E+00	0.10E+01	0.13E-01
0.33E-09	0.32E-09	-.33E-07	-.32E-05	0.16E-05	0.67E-02	0.47E-02	-.17E-02	0.97E-02	0.70E-02	-.14E-02	0.10E+01

***** MATRIZ B DISCRETIZADA *****

-.67E-02 -.92E-06 0.57E-05
0.57E-03 0.40E-07 -.33E-06
0.12E-01 0.16E-05 -.10E-04
0.29E-03 0.20E-07 -.17E-06
0.38E-05 0.16E-09 -.16E-08
-.19E-06 0.13E-06 -.83E-06
-.18E-06 0.13E-06 -.10E-05
-.14E-09 -.10E-02 0.90E-06
-.41E-07 -.28E+00 0.26E-03
0.34E-09 0.71E-02 -.42E-05
0.29E-08 0.62E-01 -.26E+00
-.66E-10 -.17E-02 0.73E-02

*** MATRIZ K DE RICCATI ***

ITERACAO KF = 100

-.13E+03	-.99E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.96E-04	-.10E+02	-.10E+02	-.95E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E+02
-.10E-03	-.30E-06	-.99E-04	-.98E-04	-.10E-03	-.15E-03	-.98E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.99E-04	-.10E-03	-.20E-05	-.10E-03	-.98E-04	0.83E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.99E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.65E-05	-.99E-04	0.31E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.98E-04	-.93E-04	-.47E-05	-.47E-03	-.96E-04	-.97E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.99E-04
-.10E+02	0.60E-05	-.22E-03	0.11E-03	0.11E-04	-.10E+01	-.50E+01	-.59E-04	-.10E-03	-.11E-03	-.95E-04	-.50E+01
-.10E+02	-.98E-04	-.11E-03	-.11E-03	-.92E-04	-.50E+01	-.10E+01	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.40E+01
-.10E-03	-.10E-03	-.99E-04	-.10E-03	-.10E-03	0.46E-04	-.10E-03	-.48E-06	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.11E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.92E-05	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.99E-04	-.14E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.20E-07	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.87E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.17E-08	-.10E-03
-.10E+02	-.97E-04	-.10E-03	-.10E-03	-.93E-04	-.50E+01	-.40E+01	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E+01

*** MATRIZ DE REALIMENTACAC ***

0.87E+00	-.39E-06	-.89E-05	-.50E-03	0.26E-03	0.48E+00	0.84E-01	-.12E-02	0.66E-02	0.48E-03	-.97E-04	0.68E-01
0.17E-01	0.18E-04	0.24E-04	-.21E-04	0.43E-04	0.37E-01	0.71E-02	0.22E-04	0.17E-05	0.26E-04	0.25E-04	0.18E-02
-.74E-01	0.22E-04	0.33E-04	0.21E-03	-.68E-04	-.16E+00	-.31E-01	0.31E-04	-.54E-04	-.28E-04	0.98E-05	-.74E-02

****** MATRIZ C DE ENTRADA ******

0.76E+00	-.19E-06	-.14E-02	-.75E-01	0.38E-01	0.62E+02	0.26E+01	-.17E-01	C.99E-01	0.71E-01	-.14E-01	0.21E+00
-.19E-06	-.10E-04	-.65E-05	-.17E-04	-.16E-04	0.45E-03	0.44E-04	-.34E-04	-.71E-04	-.43E-04	-.16E-04	-.13E-05
-.14E-02	-.65E-05	0.30E-04	0.96E-05	0.12E-04	-.12E-02	-.26E-03	-.98E-05	-.66E-04	-.26E-04	C.15E-04	-.47E-03
-.75E-01	-.17E-04	0.96E-05	0.11E-03	-.59E-04	-.89E-01	-.16E-01	C.19E-04	-.31E-03	-.21E-03	0.34E-04	-.25E-01
0.38E-01	-.16E-04	0.12E-04	-.59E-04	0.27E-04	0.46E-01	0.52E-02	-.44E-04	C.58E-04	0.57E-04	-.19E-04	0.13E-01
0.62E+02	0.45E-03	-.12E-02	-.89E-01	0.46E-01	0.74E+02	0.71E+01	-.37E-01	C.21E+00	0.15E+00	-.31E-01	0.17E+02
0.26E+01	0.44E-04	-.26E-03	-.16E-01	0.82E-02	0.71E+01	0.46E+00	-.71E-02	C.41E-01	0.29E-01	-.59E-02	0.17E+00
-.17E-01	-.34E-04	-.98E-05	0.19E-04	-.44E-04	-.37E-01	-.71E-02	-.44E-04	-.68E-04	-.58E-04	-.26E-04	-.17E-02
0.99E-01	-.71E-04	-.66E-04	-.31E-03	0.58E-04	0.21E+00	0.41E-01	-.68E-04	C.44E-04	-.13E-04	-.45E-04	0.98E-02
0.71E-01	-.43E-04	-.26E-04	-.21E-03	0.57E-04	0.15E+00	0.29E-01	-.58E-04	-.13E-04	0.47E-05	-.18E-04	0.71E-02
-.14E-01	-.16E-04	0.15E-04	0.34E-04	-.19E-04	-.31E-01	-.59E-02	-.26E-04	-.45E-04	-.18E-04	0.18E-05	-.14E-02
0.21E+00	-.13E-05	-.47E-03	-.25E-01	0.13E-01	0.17E+02	0.17E+00	-.17E-02	C.98E-02	0.71E-02	-.14E-02	0.22E-01

****** MATRIZ K DE ENTRADA ******

-.13E+03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E+02	-.10E+02	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E+02
-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E+02	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E+01	-.50E+01	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.50E+01
-.10E+02	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.50E+01	-.10E+01	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.40E+01
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03
-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03
-.10E+02	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.50E+01	-.40E+01	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.10E+01

(5)

****** MATRIZ F CONTINUA ********

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.15E+02	0.20E+01	C.C	C.C	0.0	0.0	0.16E+00
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	C.C	C.C	0.0	0.0	0.0
-.59E+01	-.59E+01	0.0	0.0	0.0	-.26E+02	-.36E+01	C.C	C.C	0.0	0.0	-.28E+00
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0	0.0	C.C	C.C	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0	0.0	C.C	C.C	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01	-.29E+00	C.C	C.C	0.0	0.0	-.23E-01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.38E+03	0.0	C.C	C.C	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.52E-01	0.32E+00	-.10E+00	C.C	0.0	0.0	0.25E-01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.17E+02	0.10E+03	-.33E+02	-.33E+02	0.0	0.0	0.79E+01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	C.C	-.49E+01	-.83E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.29E+00	C.C	-.42E+02	-.26E+02	0.0	0.28E+01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-.43E-01	C.C	C.11E+01	0.71E+00	-.14E+00	-.46E+00

****** MATRIZ G CONTINUA *******

-.67E+00	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.12E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	-.10E+00	0.0
0.0	-.33E+02	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	-.26E+02
0.0	0.0	0.71E+00

***** NOVA MATRIZ A CONTINUA ****

-.58E+00	0.26E-06	0.59E-05	0.34E-03	-.17E-03	0.15E+02	0.20E+01	C.77E-04	-.44E-03	-.32E-03	0.65E-04	0.11E+00
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0	0.0	C.C	C.0	0.0	0.0	0.0
-.48E+01	-.59E+01	-.10E-04	-.59E-03	0.30E-03	-.25E+02	-.35E+01	-.14E-03	C.77E-03	0.56E-03	-.11E-03	-.20E+00
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0	0.0	C.C	C.C	0.0	C.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0	0.0	C.C	C.C	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01	-.29E+00	C.C	C.C	0.0	0.0	-.23E-01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.38E+03	0.0	C.C	C.C	0.0	C.0	0.0
-.18E-02	-.19E-05	-.25E-05	0.22E-05	-.45E-05	0.48E-01	0.32E+00	-.10E+00	-.17E-06	-.27E-05	-.26E-05	0.25E-01
-.58E+00	-.61E-03	-.80E-03	0.71E-03	-.14E-02	0.15E+02	0.10E+03	-.33E+02	-.33E+02	-.86E-03	-.85E-03	0.79E+01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	C.C	-.49E+01	-.83E+01	C.0	0.0
0.20E+01	-.57E-03	-.86E-03	-.55E-02	0.18E-02	0.42E+01	0.11E+01	-.82E-03	-.42E+02	-.26E+02	-.26E-03	0.29E+01
-.53E-01	0.15E-04	0.23E-04	0.15E-03	-.49E-04	-.11E+00	-.65E-01	C.22E-04	C.11E+01	0.71E+00	-.14E+00	-.47E+00

REAL= -0.34E+02 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.38E+00 IMAGINARIO= 0.11E+02

REAL= -0.38E+00 IMAGINARIO= -0.11E+02

REAL= -0.55E+01 IMAGINARIO= 0.49E+01

REAL= -0.55E+01 IMAGINARIO= -0.49E+01

REAL= -0.83E+01 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.43E+01 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.22E+00 IMAGINARIO= 0.14E+01

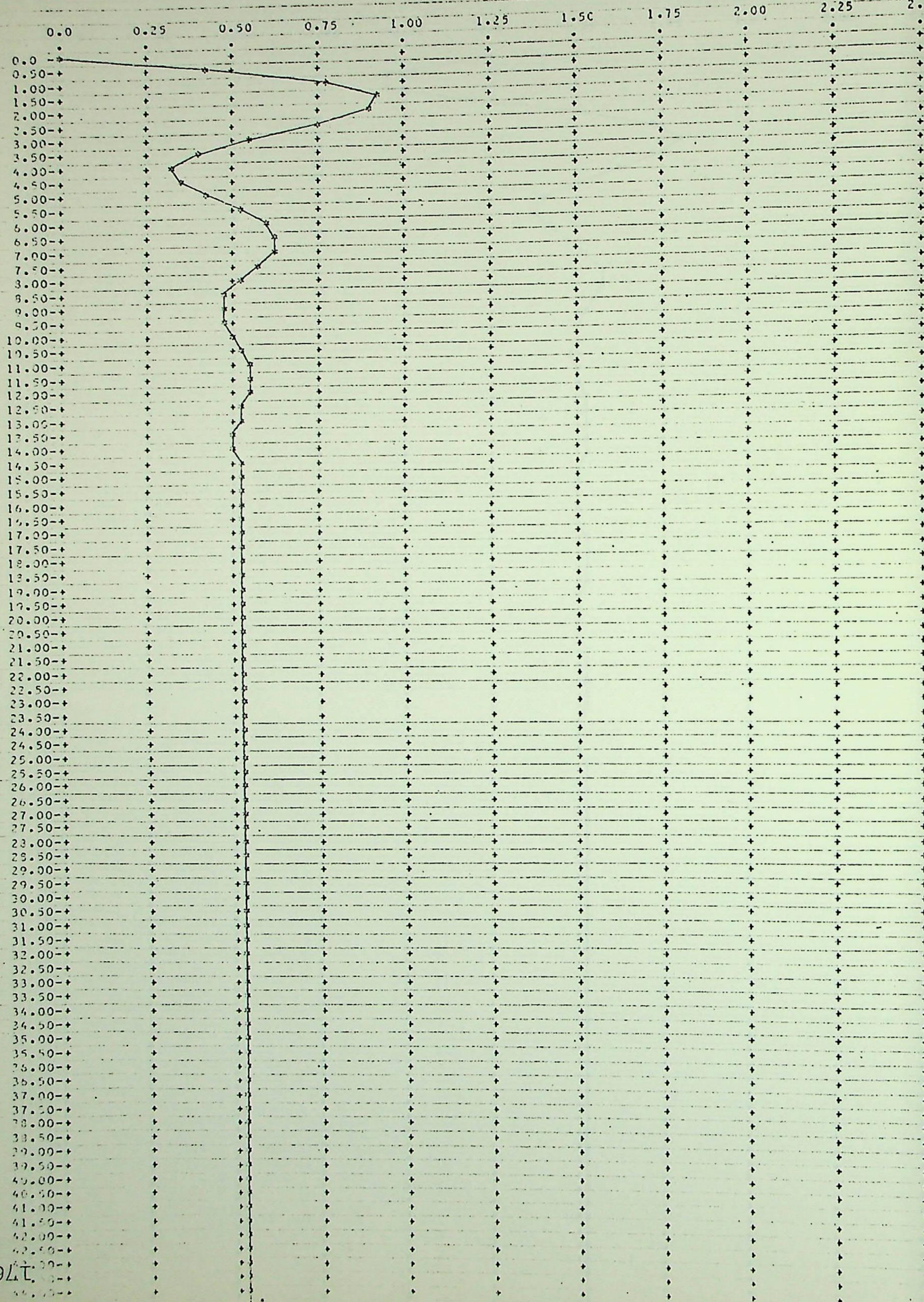
REAL= -0.22E+00 IMAGINARIO= -0.14E+01

REAL= -0.25E+00 IMAGINARIO= 0.36E+00

REAL= -0.25E+00 IMAGINARIO= -0.36E+00

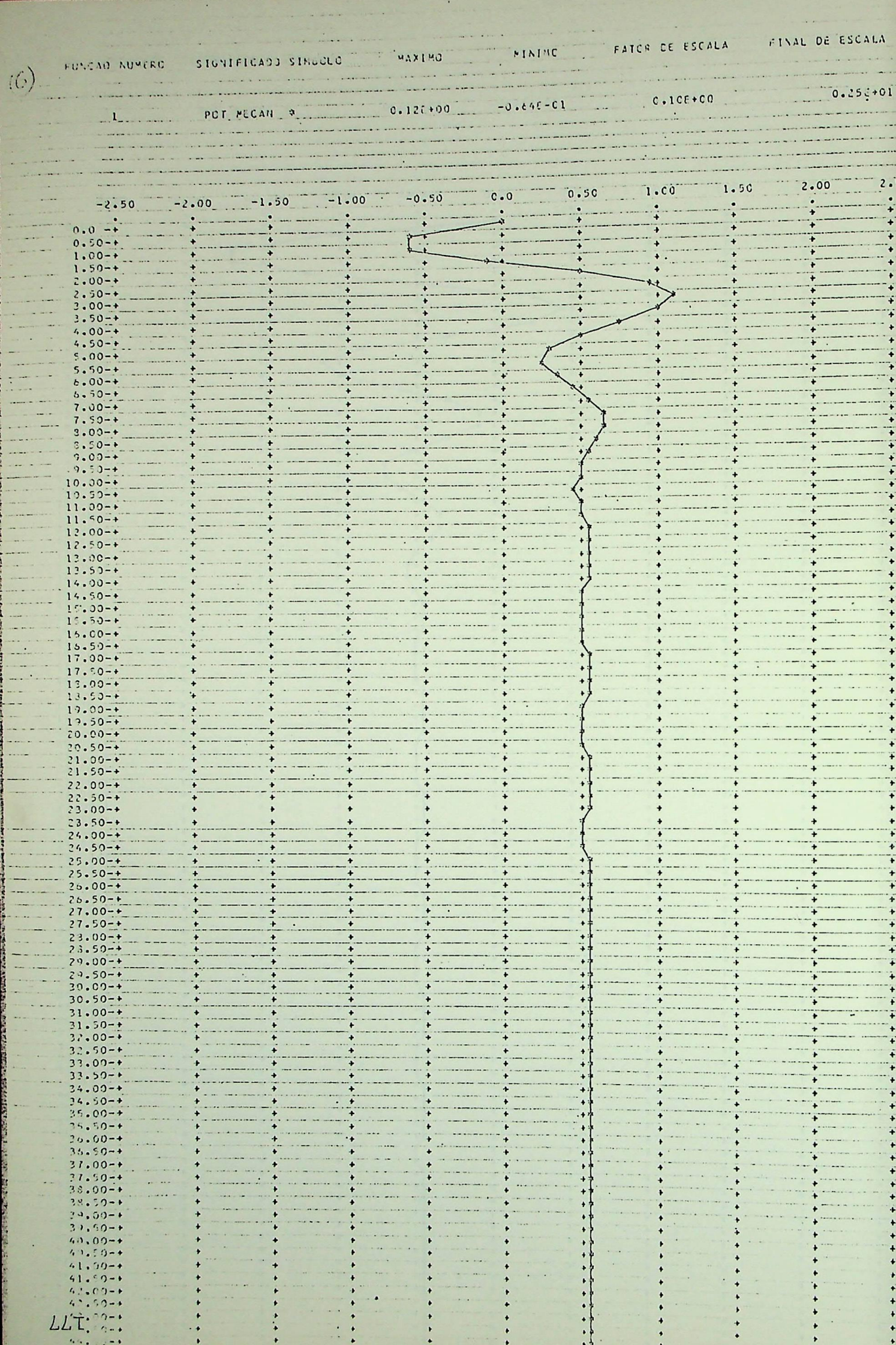
REAL= -0.19E+00 IMAGINARIO= 0.0

FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	CURSO SH *	0.1CE+00	0.C	0.1CE+CC	0.25E+01

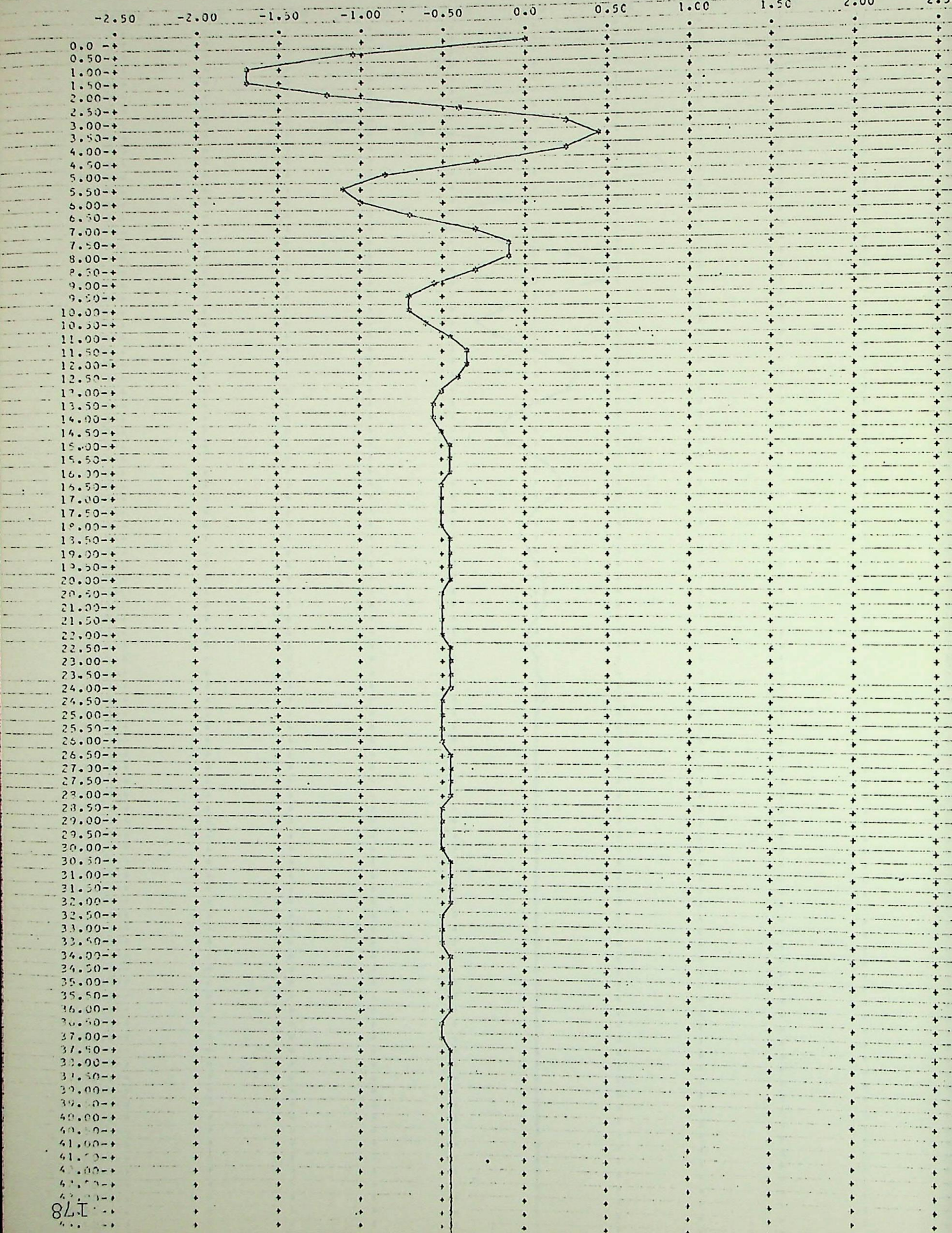


(6)

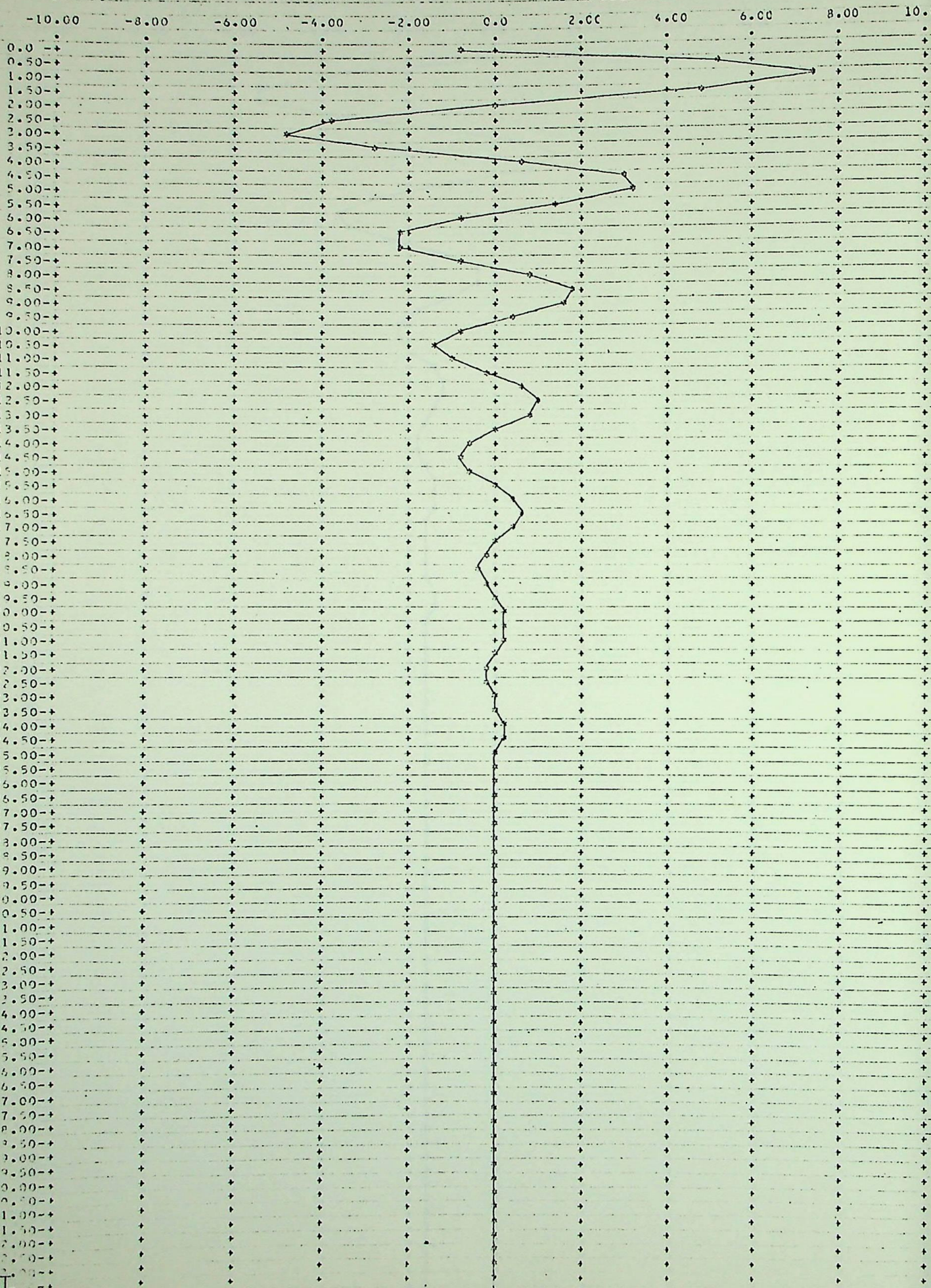
FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	POT MECAN *	0.12E+00	-0.64E-01	0.1CE+CO	0.25E+01



FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	POT ELETR ?	0.61E-01	-0.24E+00	0.10E+00	0.25E+01

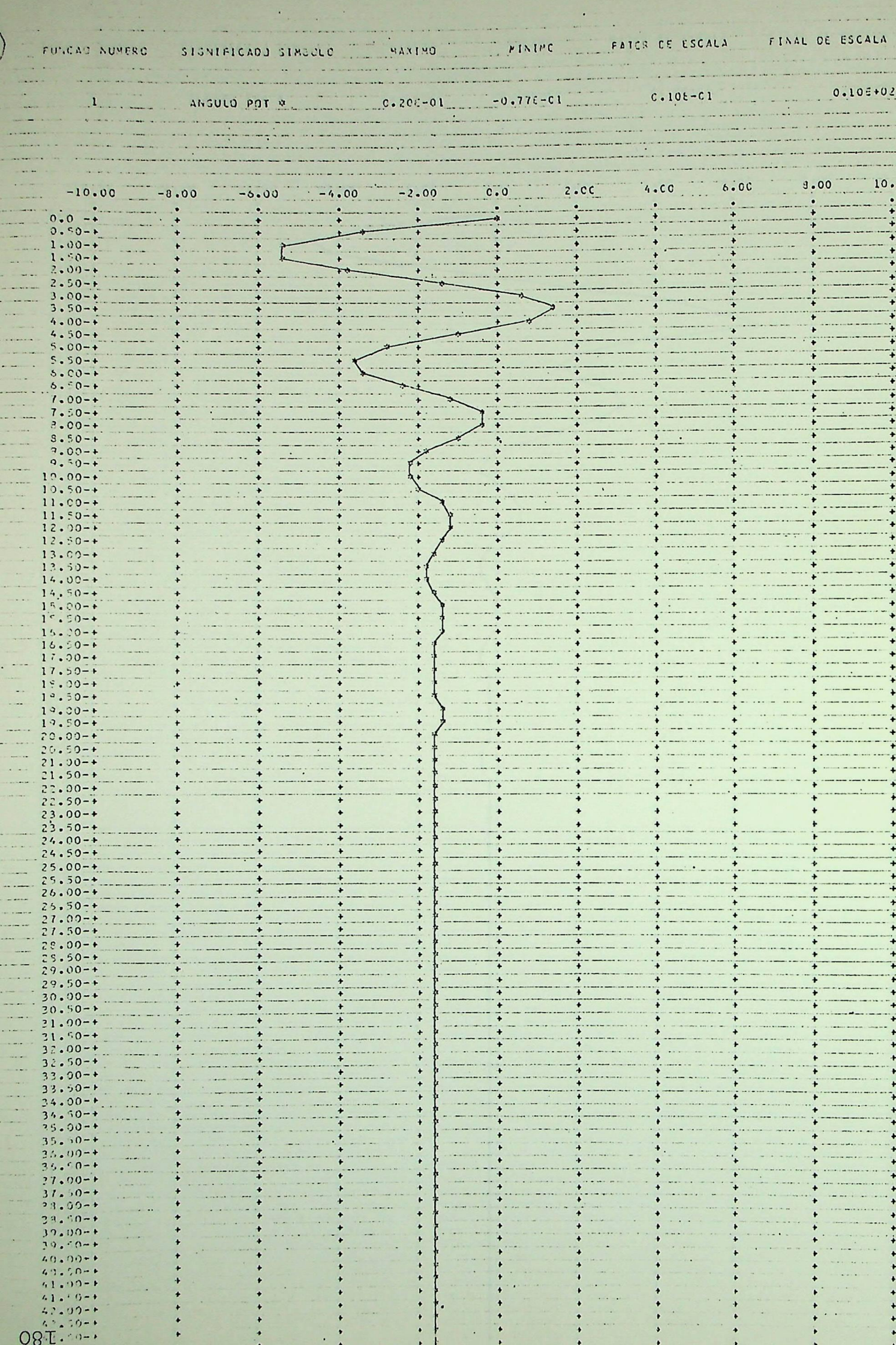


CURVA NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	VELOCIDADE *	0.74E-03	-0.56E-03	0.10E-03	0.10E+02

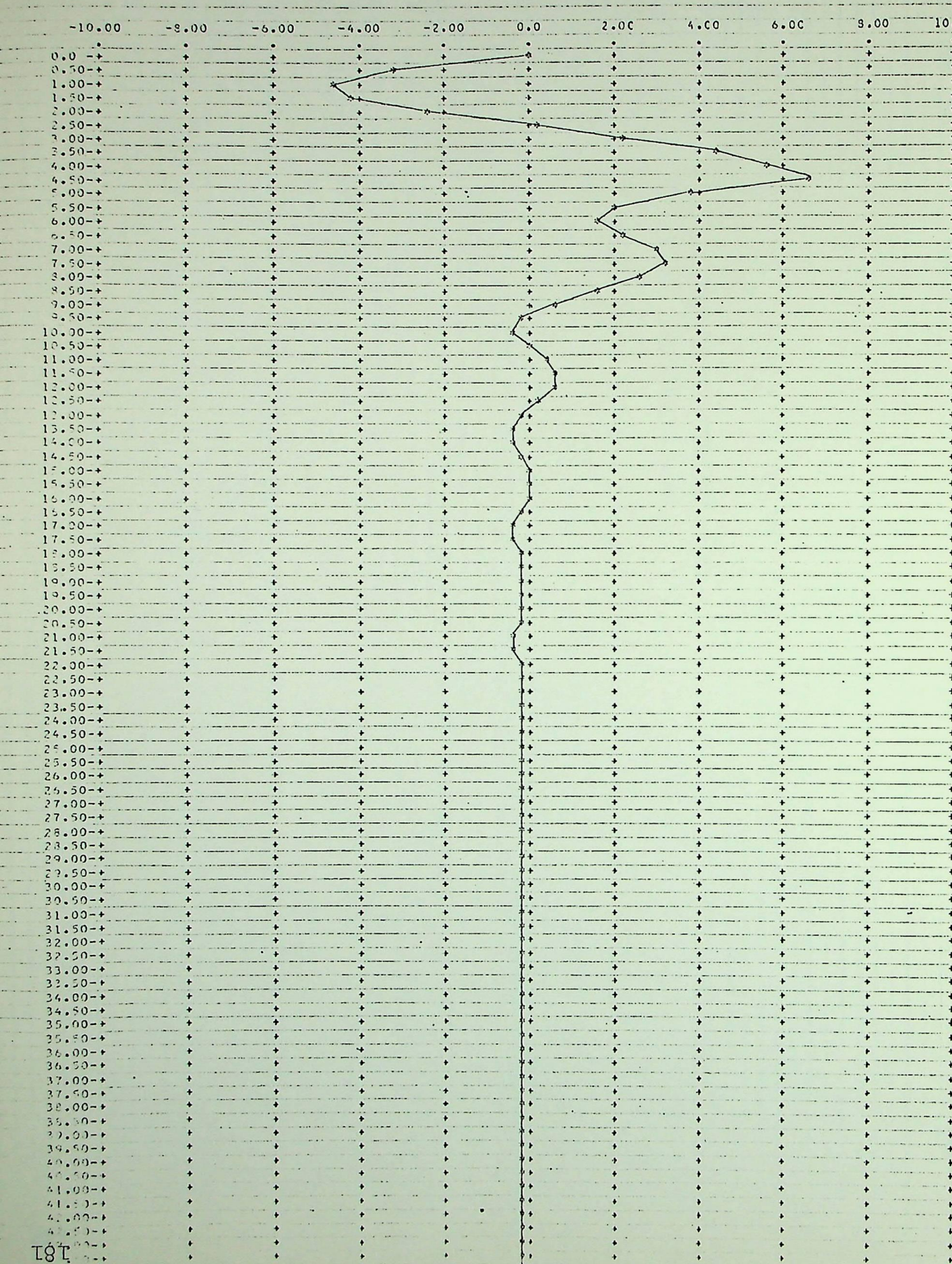


64T

FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	ANGULO POT *	C.20E-01	-0.77E-01	C.10E-01	0.10E+02



FUNCAO NUMERO	SIGNIFICADO SIMBOLO	MAXIMO	MINIMO	FATOR DE ESCALA	FINAL DE ESCALA
1	TENSAO TER *	0.78E-03	-0.75E-03	0.10E-03	0.10E+0



CONST. DE TEMPO INI = 2.0000

SIMULAÇÃO Nº 07

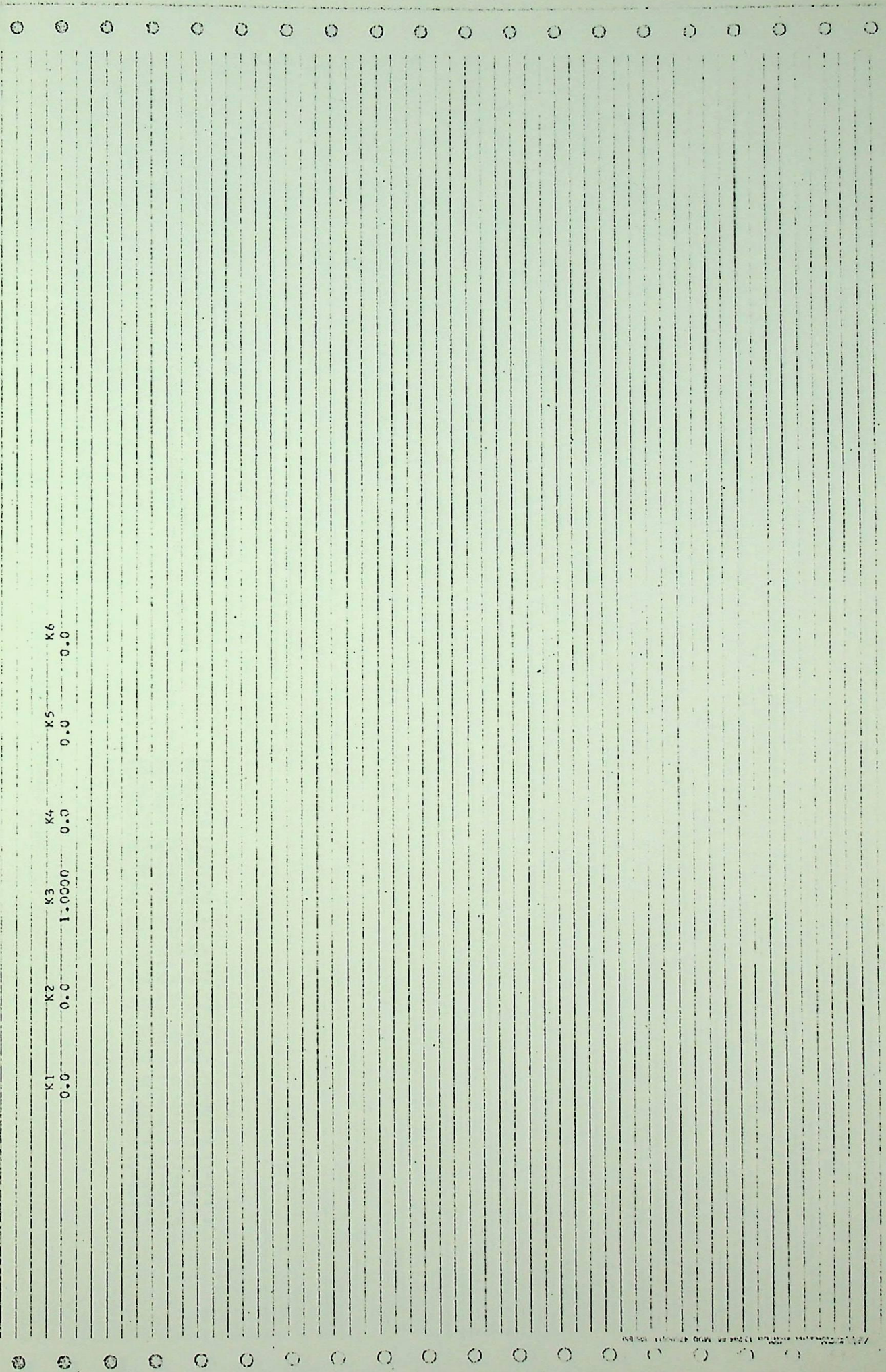
SISTEMA AJUSTADO VIA CONTROLE ÓTIMO

```
**********************************************************
*          SIMULACAO DIGITAL DE SISTEMA DE REGULACAO     *
*              USINA DE EMBORCACAO - MAQ 2               *
*                        C E M I G                       *
**********************************************************

**********************************************************
*     LUIZ RENATO GOMES - MN/203 - JUNHO/85              *
**********************************************************

**********************************************************
**********CONDICAO MODIFICADA*********************
**********************************************************

**********************************************************
** REGULADOR EM OPERACAO  VELOCIDADE OFF LINE **
**********************************************************
```


K1 K2 K3 K4 K5 K6
0.0 0.0 1.0000 0.0 0.0 0.0

***** MATRIZ A DISCRETIZADA *****

0.10E+01	0.20E-08	-.14E-06	-.84E-05	0.43E-05	0.90E-02
-.28E-02	0.90E+00	0.99E-01	0.36E-05	-.12E-05	-.57E-02
-.59E-01	-.55E-01	0.10E+01	0.11E-03	-.56E-04	-.12E+00
-.14E-02	-.14E-02	0.49E-01	0.95E+00	-.92E-06	-.29E-02
-.19E-04	-.18E-04	0.99E-03	0.38E-01	0.99E+00	-.37E-04
0.92E-06	0.90E-06	-.47E-04	-.19E-02	0.95E-03	0.10E+01

***** MATRIZ B DISCRETIZADA *****

-.90E-02
0.57E-02
0.12E+00
0.29E-02
0.37E-04
-.18E-05

*** MATRIZ K DE RICCATI ***

ITERACAO KF = 100

-.30E+02	-.83E-01	0.12E+00	0.14E+00	-.30E+00	-.10E+02
-.83E-01	-.22E-02	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.15E+00
0.12E+00	-.10E-03	-.21E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.24E+00
0.14E+00	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	0.23E+00
-.30E+00	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E+01
-.10E+02	-.15E+00	0.24E+00	0.23E+00	-.10E+01	-.20E+02

*** MATRIZ DE REALIMENTACAO ***

0.29E+00 0.72E-03 -.11E-02 -.13E-02 0.28E-02 0.12E+00

****** MATRIZ C DE ENTRADA ******

0.65E-01	-.11E-02	0.97E-03	-.10E-02	0.65E-02	0.32E+00
-.11E-02	-.42E-03	0.17E-03	-.29E-03	0.13E-03	-.27E-03
0.97E-03	0.17E-03	0.73E-04	0.46E-03	-.26E-03	0.27E-02
-.10E-02	-.29E-03	0.46E-03	0.75E-03	-.20E-02	0.10E-01
0.65E-02	0.13E-03	-.26E-03	-.20E-02	0.19E-02	0.69E-02
0.32E+00	-.27E-03	0.27E-02	0.10E-01	0.69E-02	0.26E+00

****** MATRIZ K DE ENTRADA ******

-.13CE+02	-.83E-01	0.12E+00	0.14E+00	-.30E+00	-.10E+02
-.8BE-01	-.22E-02	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	-.15E+00
0.12E+00	-.10E-03	0.0	-.10E-03	-.10E-03	0.24E+00
0.14E+00	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E-03	0.23E+00
-.30E+00	-.10E-03	-.10E-03	-.10E-03	0.0	-.10E+01
-.10E+02	-.15E+00	0.24E+00	0.23E+00	-.10E+01	-.20E+02

****** MATRIZ F CONTINUA ********

-.50E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.90E+00
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0
-.59E+01	-.59E+01	0.0	0.0	0.0	-.12E+02
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.39E+01	-.13E+01	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01

****** MATRIZ G CONTINUA *******

-.9CE+CC
G.G
C.12E+C7
G.G
C.G
C.C

****** MATRIZ C CONTINUA *******

-.90E+00
0.0
0.12E+07
0.0
0.0
0.0

***** NOVA MATRIZ F CONTINUA ****

0.21E+00	0.64E-03	-.97E-03	-.12E-02	0.25E-02	0.10E+01
0.0	-.10E+02	0.10E+02	0.0	0.0	0.0
-.52E+01	-.55E+01	0.13E-01	0.16E-01	-.33E-01	-.13E+02
0.0	0.0	0.50E+01	-.50E+01	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.30E+01	-.13E+01	0.0
0.0	0.0	0.0	-.19E+00	0.96E-01	-.48E-01

REAL= -0.51E+01 IMAGINARIO= 0.00E+01

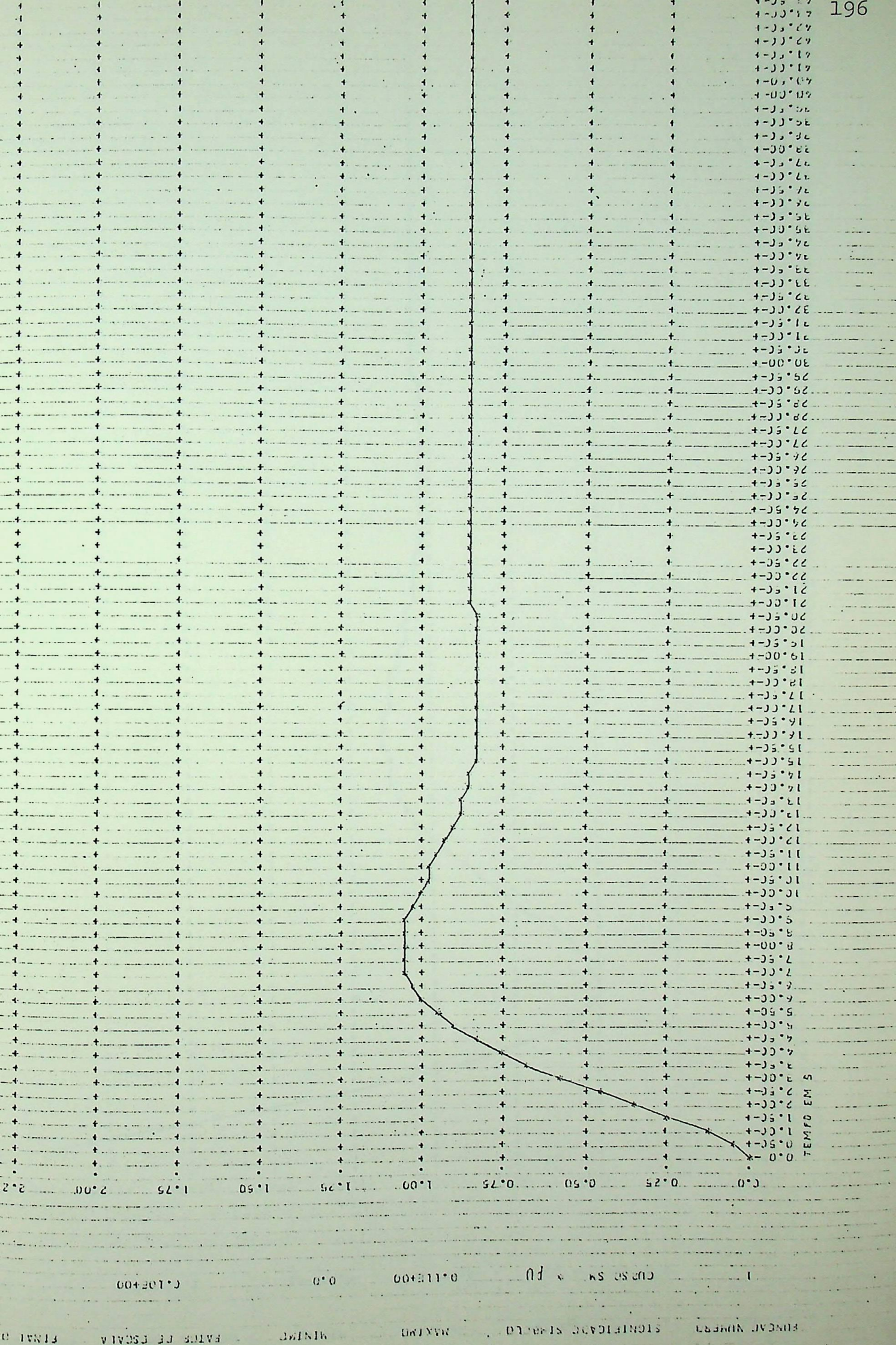
REAL= -0.71E+01 IMAGINARIO= -0.00E+01

REAL= -0.94E+01 IMAGINARIO= 0.0

REAL= -0.79E+00 IMAGINARIO= 0.0

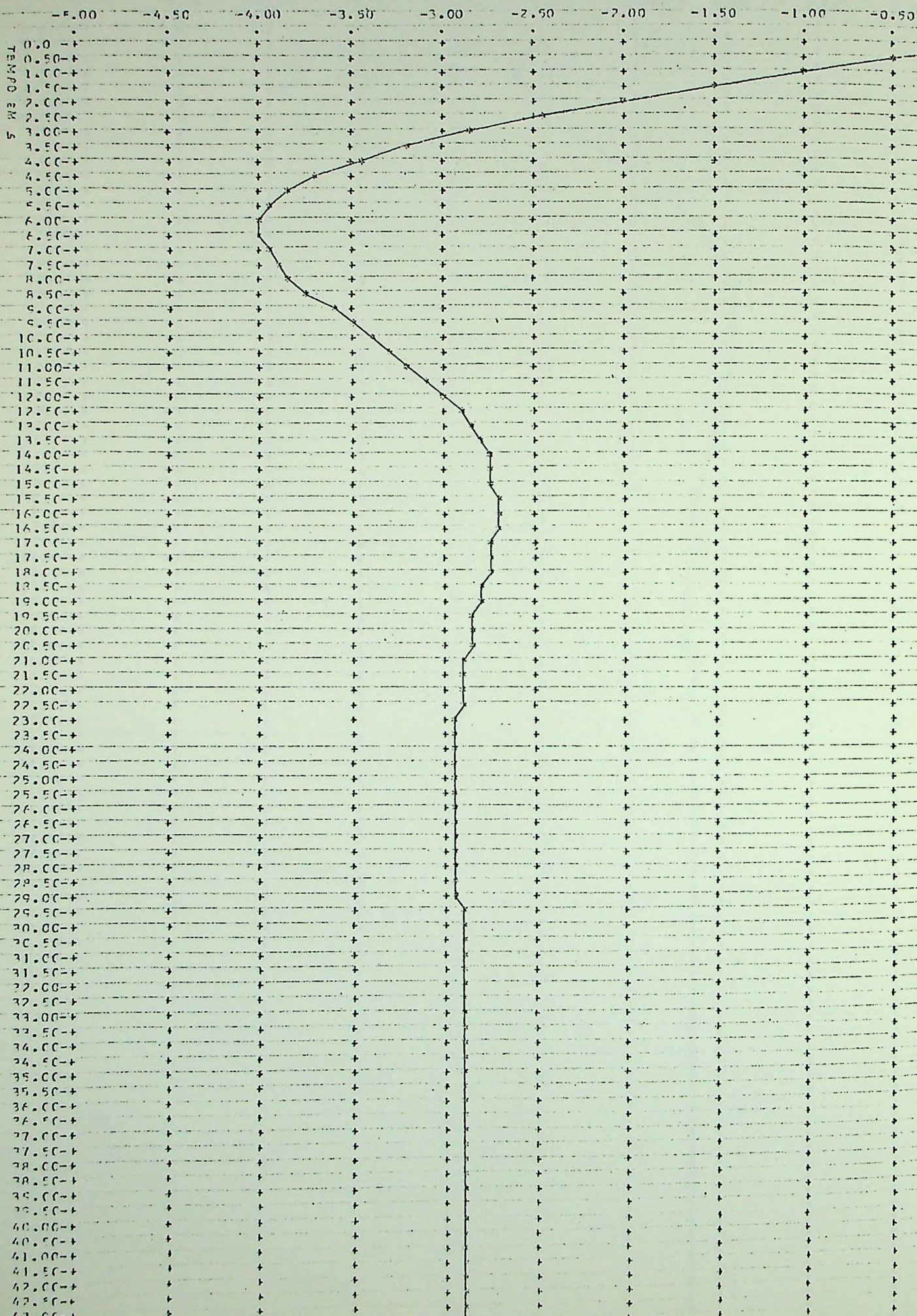
REAL= -0.13E+00 IMAGINARIO= 0.00E+00

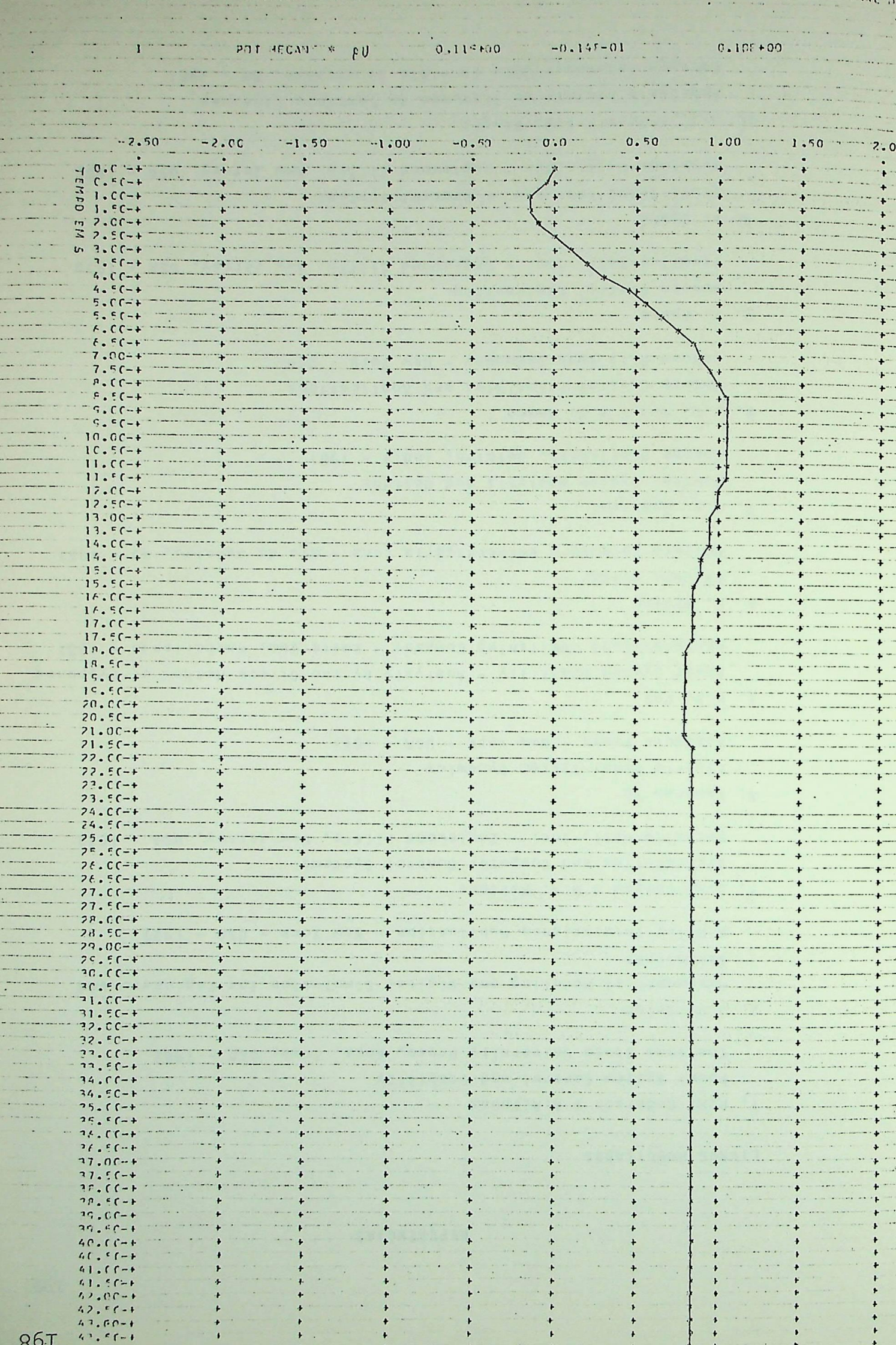
REAL= -0.13E+00 IMAGINARIO= -0.00E+00


TEMPO EM S
0.0
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00

FUNCAO NUMERO SIMBOLO ESCALA ESCALA DE TEMPO

1 VELOCIDADE * PU -0.725-04 -0.40E-01 0.10E-01




1 POT MECAN * pU 0.11E+00 -0.14E-01 0.10E+00
-2.50 -2.00 -1.50 -1.00 -0.50 0.0 0.50 1.00 1.50 2.0
TEMPO EM S
0.0C-+
0.5C-+
1.00-+
1.5C-+
2.00-+
2.5C-+
3.00-+
3.5C-+
4.00-+
4.5C-+
5.00-+
5.5C-+
6.00-+
6.5C-+
7.00-+
7.5C-+
8.00-+
8.5C-+
9.00-+
9.5C-+
10.00-+
10.5C-+
11.00-+
11.5C-+
12.00-+
12.5C-+
13.00-+
13.5C-+
14.00-+
14.5C-+
15.00-+
15.5C-+
16.00-+
16.5C-+
17.00-+
17.5C-+
18.00-+
18.5C-+
19.00-+
19.5C-+
20.00-+
20.5C-+
21.00-+
21.5C-+
22.00-+
22.5C-+
23.00-+
23.5C-+
24.00-+
24.5C-+
25.00-+
25.5C-+
26.00-+
26.5C-+
27.00-+
27.5C-+
28.00-+
28.5C-+
29.00-+
29.5C-+
30.00-+
30.5C-+
31.00-+
31.5C-+
32.00-+
32.5C-+
33.00-+
33.5C-+
34.00-+
34.5C-+
35.00-+
35.5C-+
36.00-+
36.5C-+
37.00-+
37.5C-+
38.00-+
38.5C-+
39.00-+
39.5C-+
40.00-+
40.5C-+
41.00-+
41.5C-+
42.00-+
42.5C-+
43.00-+
43.5C-+

REFERENCIAS

LIVROS PUBLICADOS

1. P.M. Anderson & A.A.Fouad
   Power System Control and Stability
   The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA - 1982

2. J.M. Smith
   Mathematical Modeling and Digital Simulation for Engineers and Scientists
   A Wiley-Interscience Publication - New York - USA - 1977

3. J.A. Cadzow & H.R. Martens
   Discret-Time and Computer Control Systems
   Prentice-Hall, Inc. - Englewood Cliffs, New Jersey, USA - 1970

4. Yao-nan Yu
   Eletric Power System Dynamics
   Academic Press - New York - USA - 1983

5. M.A. Pai
   Power System Stability - Analysis by the Direct Method of Lyapunov
   North-Holland Publishing Company - Amsterdam, Netherlands - 1981

6. G. Hadley
   Álgebra Linear
   Editora Forense - Universitária Ltda - Rio de Janeiro, RJ - 1961

7. K.K. Aggarwal
   Control System Analysis and Designs
   Khanna Publishers, Delhi-6, India - 1981

8. J.C. Hsu & A.U. Meyer
   Modern Control Principles and Applications
   McGraw-Hill Book Caompany - New York - USA

9. K. Ogata
   Modern Control Engineering
   Prentice-Hall, Inc. - Englewood Cliffs, New Jersey, USA - 1970

10. K. Ogata
    State Space Analysis of Control Systems
    Prentice-Hall, Inc. - Englewood Cliffs, New Jersey, USA - 1967

11. J.J. D'Azzo & C.H. Houpis
    Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares
    Editora Guanabara Dois SA - Rio de Janeiro, RJ - 1981

12. E.W. Kimbark
Synchronous Machine
Dover Publications, Inc. - New York, USA - 1956

13. L.K. Kirchmayer
Economic Control of Interconnected Systems
John Wiley & Sons, Inc. Publishers - New York, USA - 1959

14. O.I. Elgerd
Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica
Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda - São Paulo, SP - 1976

15. J. Feinstein
Teoria dos Sistemas de Controle - Enfoque por Variáveis de Estado
Editora Campus Ltda/Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Rio de Janeiro; RJ - 1979

ARTIGOS E TRABALHOS

1. J. Feinstein
Estabilidad de Representaciones de EStado
Apostila do Curso "Sistema de Controle por Método de Estado" referente ao Mestrado em Engenharia Elétrica/EFEI - 1983

2. J. Feinstein
Regulador de Estado
Notas de aula do Curso "Sistema de Controle por Método de Estado" 1983

3. J. Feinstein
Control Optimo - Una Introducción
Notas de aula do Curso "Sistema de Controle por Método de Estado" 1983

4. Yao-nan Yu, K. Vongssuriya & L.N. Wedman
Application of an Optimal Control to a Power System
IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-89, nº 1, JAN/1970.

5. V. Shaked
Guaranteed Stability Margins for the Discrete-Time Linear Quadratic Optimal Regulator
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. AC - 31, nº2, FEB/1986

6. J.C. Geromel & P.L.D. Peres
Decentralised Load-Frequency Control
IEE Procedings, Vol. 132, Pt.D, nº 5, SEP/1985

7. Y.H.Ngo
State-Space Eigenvalues Program for Stability of Regulated Synchonous Machine
IEE Procedings, Vol. 118, nº 9, SEPT/1971

8. G. Hutarrew
Test on Turbine Governing Systems - Partes 1, 2 e 3
Water Power Publication - páginas 157 a 248 - APRIL/1963.

9. D.G. Ramey & J.W. Skooglund
Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89,nº 1, JAN/1970

10. F.P. de Mello, L.N. Hannett & J.M. Undrill
Practical Approaches to Suplementary Stabilizing for Accelerating Power
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-97,nº 5, SEPT/1978

11. Computer Representation of Excitation Systems
IEEE Committee Report, Vol. PAS-87, nº 6, JUNE/1968

12. C.A.D. Coelho
Apostila do Curso "Análise e Projeto de Reguladores e Sistemas de Controle Automático" - FUPAI - Itajubá-MG, JULHO/1985

13. N. Bravo & J. Tadeu
Seminário sobre Reguladores para Turbinas Hidráulicas
Impresso pelo Depto. de Turbinas da Neyrpic- Glenobre, França/Mecânica Pesada, São Paulo, SP - 1979

14. L.R. Gomes
Ensaios de Comissionamento dos Reguladores de Velocidade e Potência, Máquina 2, Usina de Emborcação, CEMIG, nº 11.142 - MN/EG1 - 0.053- 1982

15. L.R. Gomes
Levantamento das Funções de Transferência, Sistema de Excitação,Máquina 2, Usina de Emborcação, CEMIG, nº 11.142 - MN/PD3 - 0.097 - 1985

16. SIEMENS S/A
Manual de Operação e Manutenção, Geradores e Sistema de Excitação, Usina de Emborcação - MEI - VA.14
Siemens SA, São Paulo, SP - 1981

17. H. Mokarzel & E.M.N. Negrisoli
Dinâmica e Controle dos Sistemas Elétricos
Publicação FUPAI/EFEI, Itajubá, MG - 1979

18. L.R. Gomes
Regulador da Turbina, Modelo Simplificado com Parâmetros, nº 11.142
MN/EG1 - 0.050 - CEMIG - 1982

19. International Electrotechnical Commission
International Code for Testing of Speed Governing Systems for Hydraulic Turbines
Publication 308 - 1970

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Belo Horizonte, JULHO/1986

DATA 08/10/1987
PROC.
PED. PPG
LIV.
NCr$ DOAÇÃO

519.71:621.311.21(043.2)
G633a T.479

EFEI / Biblioteca Mauá

Gomes, Luiz Renato

Aplicação da teoria do controle ótimo via realimentação de estado aos sistemas de regulação e controle de instalações hidroelétricas.....

Data da	Nº. Registro	Data Devol

EFEI

BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200479
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA