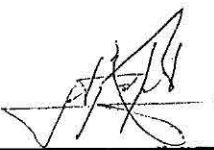
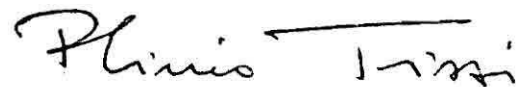


1. Classificação <i>INPE-COM.1/TPT</i> <i>C.D.U.: 621.396.67</i>		2. Período <i>junho de 1976</i>	4. Critério de Distribuição: interna ☐ externa ☒
3. Palavras Chave (selecionadas pelo autor) <i>OTIMIZAÇÃO ANTENA YAGI-UDA</i>			
5. Relatório nº <i>INPE-920-TPT/034</i>	6. Data <i>15 de julho de 1976</i>	7. Revisado por - <i>Clovis Solano Pereira</i>	
8. Título e Sub-Título <i>OTIMIZAÇÃO DAS ALTURAS E ESPAÇAMENTOS DOS ELEMENTOS DE UMA ANTENA YAGI-UDA</i>		9. Autorizado por - <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>	
10. Setor <i>DAT</i>	Código <i>500</i>	11. Nº de cópias - <i>10</i>	
12. Autoria <i>Satoshi Koshima</i>		14. Nº de páginas - <i>122</i>	
13. Assinatura Responsável 		15. Preço <i>76,00</i>	
16. Sumário/Notas <i>Um método para maximizar a diretividade de uma antena Yagi-Uda é apresentado. A análise da distribuição de corrente em cada elemento da antena é baseada na expansão de três termos de King-Middleton. O máximo da diretividade é obtido aplicando-se o método da perturbação aos espaçamentos e alturas dos elementos da antena. Utilizando-se o programa de computação desenvolvido para a otimização da antena Yagi, foi observada uma dependência sensível da diretividade em relação aos raios dos elementos. Uma série de medidas experimentais é apresentada comparando-se com os resultados teoricamente previstos.</i>			
17. Observações <i>Tese de Mestrado em Eletrônica e Telecomunicações, aprovada em 9 de junho de 1976.</i>			

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento aos requisitos exigidos
para a obtenção do Título de Mestre em
Eletrônica e Telecomunicações

Dr. Plínio Tissi



Presidente da Banca

Dr. Clóvis Solano Pereira



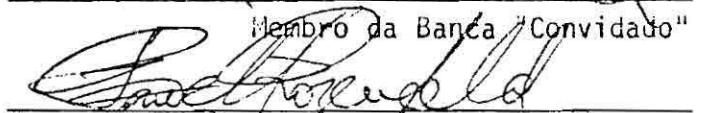
Orientador

Dr. Antonio Roberto Panicali



Membro da Banca "Convocado"

Dr. Pawel Rozenfeld



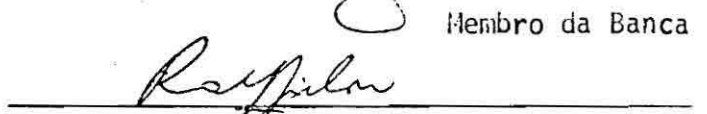
Membro da Banca

Dr. Ivan Jelinek Kantor



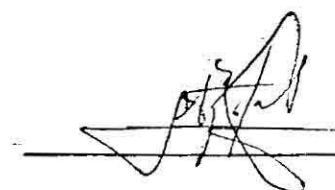
Membro da Banca

Dr. Ralf Gielow



"ex-officio"

Satoshi Koshima



Candidato

São José dos Campos, 09 de junho de 1976

ÍNDICE

ABSTRACT -	vii
LISTA DE SÍMBOLOS -	viii
LISTA DE FIGURAS -	ix
LISTA DE TABELAS -	x
CAPÍTULO I - Introdução.....	1
CAPÍTULO II - Derivação de um Sistema de Equações Integrais.....	3
CAPÍTULO III - Distribuição de Correntes nos Elementos da Antena Yagi.	13
3.1 - Aproximações das integrais.....	14
3.2 - Determinação dos coeficientes de distribuição de correntes.....	16
CAPÍTULO IV - Campos Distante e Diretividade.....	21
4.1 - Expressão para o campo distante.....	21
4.2 - Diretividade da antena Yagi.....	23
CAPÍTULO V - Método da Perturbação Aplicado aos Espaçamentos entre os Elementos.....	25
5.1 - Dedução dos novos coeficientes de distribuição de correntes.....	25
5.2 - Modificação do campo distante.....	30
5.3 - Incremento da diretividade.....	31

CAPÍTULO VI - Método da Perturbação Aplicado às Alturas dos Elementos..	35
6.1 - Dedução dos novos coeficientes de distribuição de correntes	35
6.2 - Modificação do campo distante	39
6.3 - Incremento da diretividade	40
 CAPÍTULO VII - Comentários sobre o Programa Desenvolvido para a Otimização	43
7.1 - Problemas numéricos	45
7.2 - Algumas aplicações do programa desenvolvido	47
7.3 - Escolha da configuração inicial	49
 CAPÍTULO VIII - Comprovação Experimental	51
 CAPÍTULO IX - Conclusões	59
 BIBLIOGRAFIA -	65
 APÊNDICE A - Expressões de $\frac{\partial \phi}{\partial d_k}$ e $\frac{\partial \psi^h_d}{\partial d_k}$	A.1
APÊNDICE B - Expressões $[P_U]$ e $[P_D]$ (Otimização dos Espaçamentos).....	B.1
APÊNDICE C - Expressões de $\frac{\partial \phi}{\partial h_i}$, $\frac{\partial \psi^h_d}{\partial h_i}$, $\frac{\partial \phi}{\partial h_k}$, $\frac{\partial \psi^h_d}{\partial h_k}$	C.1
APÊNDICE D - Expressões de $[P_U]$ e $[P_D]$ (Otimização das Alturas)	D.1
APÊNDICE E - Listagem do Programa Desenvolvido para a Otimização da Antena Yagi	E.1

APÊNDICE F - Tabelas da Diretividade e RFC de Antenas Yagi com Alturas e Espaçamentos dos Diretores Uniformes	F.1
APÊNDICE G - Alguns Valores Relativos a Configurações Otimizadas de Antenas Yagi de 3 até 10 Elementos	G.1
APÊNDICE H - Comentários sobre Desenvolvimento Teórico Efetuado por King (1968)	H.1

ABSTRACT

A method to maximize the directivity of a Yagi-Uda array is presented. The analysis of the current distribution in each element of the array is based upon the three-term expansion given by King-Middleton. The maximum of the directivity is obtained by applying the perturbation method to the heights and spacings of the antenna elements. Using the computer program for the optimization, the directivity showed to be strongly dependent upon the radii of the antenna elements. Several experimental data are presented and a comparison with the theoretical results is made.

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{A}(\bar{r})$	- potencial vetorial
a	- raio dos elementos da antena
b_{ki}	- distância entre os elementos k e i
$D(\theta_o, \phi_o)$	- diretividade da antena na direção (θ_o, ϕ_o)
d_k	- coordenada do k -ésimo elemento
$\bar{E}$	- campo elétrico vetorial
$G(\bar{r} \bar{r}')$	- função de Green no espaço livre
$\bar{H}$	- campo magnético vetorial
h_k	- altura do k -ésimo elemento
$I_i(z_i')$	- corrente no i -ésimo elemento
$\bar{J}(\bar{r})$	- densidade volumétrica de corrente
$\bar{J}_s(\bar{r})$	- densidade superficial de corrente
N	- número de elementos da antena Yagi
V_{o2}	- tensão de excitação
β	- número de onda no meio
ϵ	- permissividade elétrica do meio
ζ	- impedância característica do meio
λ	- comprimento de onda no meio
μ	- permeabilidade magnética do meio
ϕ	- potencial escalar
ω	- frequência da onda eletromagnética, em radianos por segundo

LISTA DE FIGURAS

Figura	I.1	- Antena Yagi convencional.....	1
Figura	II.1	- Sistema real de alimentação de uma antena.....	5
Figura	II.2	- Distância R_{ki} e R_{θ}	9
Figura	IV.1	- Coordenadas polares para antena Yagi de 4 elementos	21
Figura	VII.1	- Diagrama esquemático do programa desenvolvido para otimização da antena Yagi-Uda.....	44
Figura	VII.2	- Integração pelo método citado por Kajfez.....	46
Figura	VII.3	- Variação da diretividade com o raio dos elementos.	47
Figura	VII.4	- Resposta em frequência de uma antena Yagi encon- trado por Kajfez.....	48
Figura	VIII.1	- Diagrama de irradiação no plano E de uma antena de 8 elementos com espaçamentos e alturas dos di- retos uniformes.....	53
Figura	VIII.2	- Diagrama de irradiação no plano H de uma antena de 8 elementos com espaçamentos e alturas dos di- retos uniformes.....	54
Figura	VIII.3	- Diagrama de irradiação no plano E de uma antena otimizada de 8 elementos.....	55
Figura	VIII.4	- Diagrama de irradiação no plano H de uma antena otimizada de 8 elementos.....	56

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As antenas Yagi-Uda são bastante usadas na prática devido à simplicidade de fabricação e ao ganho relativamente alto, apesar da sua faixa estreita de operação (Jasik, 1961). Uma antena Yagi convencional, conforme Figura I.1, consiste de N elementos cilíndricos dispostos paralelamente dos quais apenas o segundo é excitado por uma tensão externa e por essa razão denominado elemento excitador. Os demais elementos são parasitas sendo que o primeiro é chamado de elemento refletor enquanto os outros são simplesmente elementos diretores.

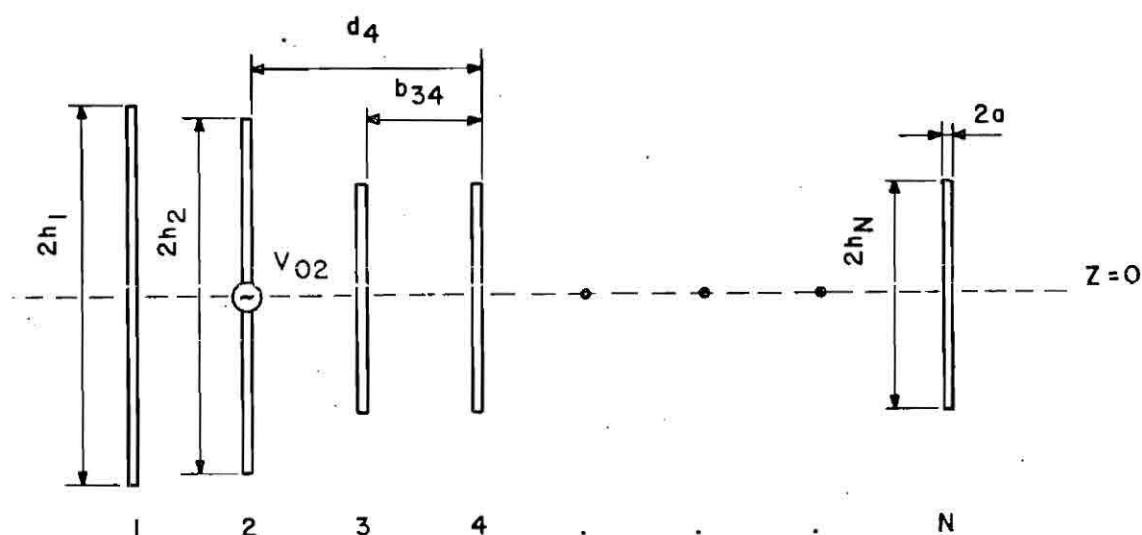


Fig. I.1 - Antena Yagi-Uda Convencional

Até recentemente, as dificuldades existentes na solução analítica de sistemas de equações integrais impediam um estudo teórico relativamente preciso de uma antena deste tipo. Assim sendo, para qualquer projeto da mesma havia necessidade de recorrer-se a dados experimentais. É fácil imaginar a ineficiência ou mesmo as dificuldades existentes na determinação empírica de uma configuração adequada de uma Yagi, por exemplo, de 8 elementos. Neste caso, mesmo excluídas as variações dos diâmetros dos elementos, restam ainda 15 variáveis (8 alturas e 7 espaçamentos entre os elementos).

Com o aperfeiçoamento dos computadores modernos, atualmente estes sistemas de equações integrais podem ser resolvidos numericamente. Existem vários métodos de resolução numérica de equações integrais encontradas no estudo de antenas Yagi, mas neste trabalho é utilizada a teoria desenvolvida por King e seus associados, onde a distribuição de corrente num elemento da antena é aproximada por três termos trigonométricos.

Duas partes distintas são identificáveis no presente estudo: a primeira refere-se à determinação da distribuição de correntes nos elementos da antena através da solução de um sistema linear de equações, enquanto a segunda consiste na utilização do método da perturbação idealizado por Chen e Cheng, para a obtenção das alturas e espaçamentos que maximizam a diretividade.

CAPÍTULO II

DERIVAÇÃO DE UM SISTEMA DE EQUAÇÕES INTEGRAIS

Considerando propagação num meio homogêneo e assumindo também uma dependência harmônica no tempo da forma $e^{j\omega t}$ resultam das equações de Maxwell as seguintes expressões para o campo elétrico $\vec{E}$ e o campo magnético $\vec{H}$ (veja V. Bladel, 1964):

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{E} = -\nabla\phi - j\omega\vec{A} \quad (\text{II.2})$$

sendo

μ = permeabilidade magnética do meio

ϕ = potencial escalar

$\vec{A}$ = potencial vetorial

Os potenciais são dados por:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \mu \iiint_V \vec{J}(\vec{r}') G(\vec{r}|\vec{r}') dV' \quad (\text{II.3})$$

$$\phi(\vec{r}) = -\frac{\nabla \cdot \vec{A}(\vec{r})}{j\omega \mu \epsilon} \quad (\text{condição de Lorentz}) \quad (\text{II.4})$$

onde $\vec{J}(\vec{r})$ representa a densidade volumétrica de correntes, ϵ é a permissividade do meio e $G(\vec{r}|\vec{r}')$ é a função de Green no espaço livre, ou seja $G(\vec{r}|\vec{r}') = \exp(-j\beta|\vec{r}-\vec{r}'|)/4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|$

Das expressões acima pode-se notar que os campos eletromagnéticos são determinados uma vez que se conheça a distribuição de correntes $\vec{J}(\vec{r}')$.

Numa antena Yagi, as correntes se distribuem apenas nos N condutores cilíndricos dispostos paralelamente e, ao se admitir que tais condutores sejam de perdas desprezíveis (implicando no fluxo de correntes pelas N superfícies metálicas), conclui-se que:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \mu \sum_{i=1}^N \iint \vec{J}_{si}(\vec{r}') G(\vec{r}|\vec{r}') ds' \quad (II.5)$$

sendo $\vec{J}_{si}$ a densidade superficial de corrente no elemento i da antena.

Devido às dificuldades matemáticas, certas simplificações são necessárias para que se torne possível a determinação da distribuição de correntes nos elementos da antena e uma destas aproximações está relacionada com a excitação da mesma.

Normalmente entre a antena e o gerador sempre existe uma linha de transmissão como na Figura II.1.

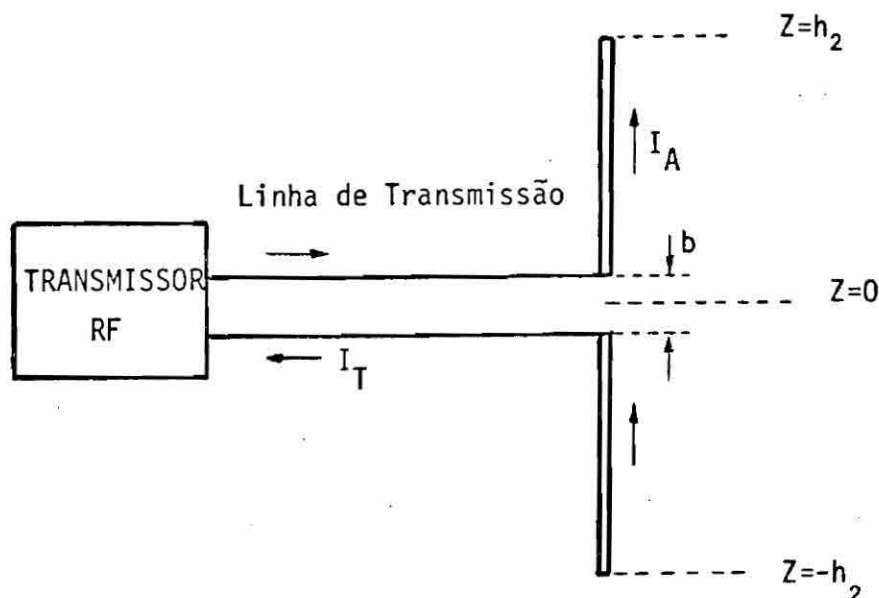


Fig. II.1 - Sistema Real de Alimentação de uma Antena

No entanto devido à complexidade da condição de contorno, há necessidade de se recorrer ao modelo teórico de excitação que substitua com boa precisão o sistema composto por gerador e linha de transmissão. Um modelo bastante usado por sua simplicidade é o gerador de função delta e um estudo detalhado desse modelo é encontrado em King (1956). Segundo King, vários resultados teóricos obtidos a partir do modelo proposto podem ser reproduzidos experimentalmente se o afastamento de alimentação ("gap") do elemento excitador for bem pequeno comparado com o comprimento de onda ou seja, $b \ll \lambda$.

Segundo o modelo do gerador delta, o campo elétrico tangen

cial na superfície externa do cilindro excitador é nulo exceto na região de alimentação, onde a direção do campo elétrico é axial, ou seja:

$$E_z = -V_{02} \delta(z_2) \quad (II.6)$$

onde V_{02} é a tensão de alimentação e $\delta(z_2)$ é a função delta representando o afastamento entre condutores no elemento excitador ("gap").

Outra simplificação utilizada em antenas Yagi convencionais resulta do fato das dimensões transversais dos elementos serem desprezíveis em relação à distância entre os mesmos. Nestas circunstâncias, pode-se assumir que as correntes J_{si} estejam com fluxo axial sem nenhuma dependência angular (King, 1956; Richmond, 1965), isto é

$$J_{si}(\vec{r}') = J_i(z') \hat{z} \quad (II.7)$$

Com essa distribuição de corrente, resulta para o potencial vetorial:

$$\vec{A}(\vec{r}) = A_z \hat{z} = \mu \hat{z} \sum_{i=1}^N \left[\int_{-h_i}^{h_i} J_i(z') G(z, c; z', c') dz' \right] \oint_{C_i} \quad (II.8)$$

onde a integral $\oint_C dz'$ é considerada no contorno C_i do i -ésimo elemento e $G(z, c; z', c') = G(\vec{r}|\vec{r}')$.

Das considerações acima para as correntes e para o potencial vetorial resulta, das Equações (2) e (4), a seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} + \beta^2 A_z = - \frac{\beta^2}{j\omega} E_z \quad (II.9)$$

onde β é o número de onda no meio ou seja $\beta^2 = \omega^2 \mu \epsilon$

Sendo as alturas dos elementos bem maiores que seus diâmetros, os efeitos das bordas são desprezados, resultando das Equações II.6 e II.9 a seguinte equação para o potencial vetorial num ponto qualquer do elemento excitador:

$$\frac{d^2 A_z}{dz^2} + \beta^2 A_z = \frac{\beta^2}{j\omega} V_{02} \delta(z_2) \quad (II.10)$$

A solução analítica dessa equação diferencial (Hildebrand, 1962) é dada por:

$$A_z = K_1 \cos \beta z_2 + K_2 \sin \beta z_2 - \frac{j\mu V_{02}}{2\zeta} \sin \beta |z_2| \quad (II.11)$$

onde ζ é a impedância característica do meio, $\zeta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \approx 120 \pi$ ohms

A antena Yagi possui estrutura simétrica segundo o eixo $z=0$ conforme Figura I.1. Desta simetria geométrica e do modelo de excitação idealizado resulta a paridade do potencial vetorial com relação a z , isto é $K_2 = 0$, ou:

$$A_z = K_1 \cos \beta z_2 - \frac{j\mu V_{02}}{2\zeta} \sin \beta |z_2| \quad (\text{II.12})$$

Das Equações (8) e (12) resulta a primeira equação integral da forma:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \int_{-h_i}^{h_i} \oint_{C_i} J_i(z'_i) G(z_2, c_2; z'_i, c'_i) dc'_i dz'_i = \\ = - \frac{j}{\zeta} (C_2 \cos \beta z_2 + \frac{1}{2} V_{02} \sin \beta |z_2|) \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

Considerando as condições de contorno para (N-1) superfícies cilíndricas dos elementos parasitas, pode-se encontrar as (N-1) equações integrais adicionais que possuem forma análoga à Equação II.13. Sucintamente podemos escrever este conjunto de N equações na forma geral:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \int_{-h_i}^{h_i} \oint_{C_i} J_i(z'_i) G(z_k, c_k; z'_i, c'_i) dc'_i dz'_i = \\ = - \frac{j}{\zeta} (C_k \cos \beta z_k + \frac{1}{2} V_{ok} \sin \beta |z_k|) \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

$$K = 1, 2, \dots, N$$

Devido à existência da excitação apenas no elemento 2, $V_{ok}=0$ para $K \neq 2$. Como os afastamentos entre os elementos são bem maiores que os diâmetros dos mesmos, a equação integral acima tomará a forma:

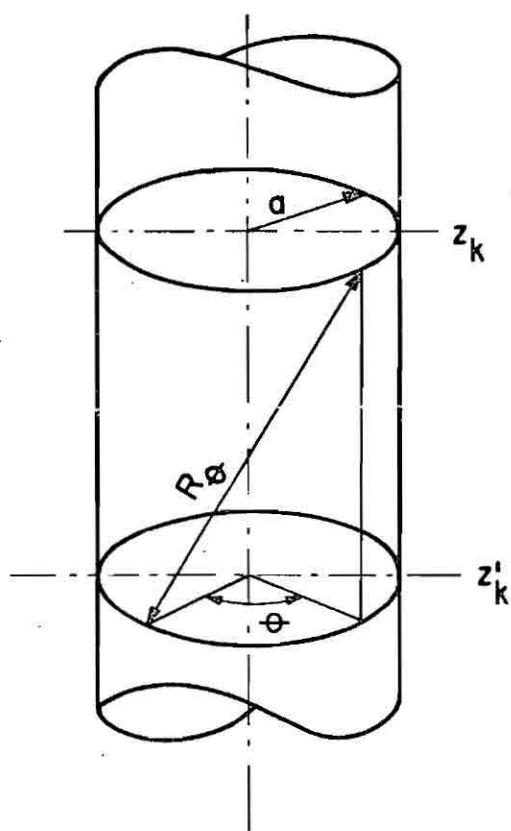
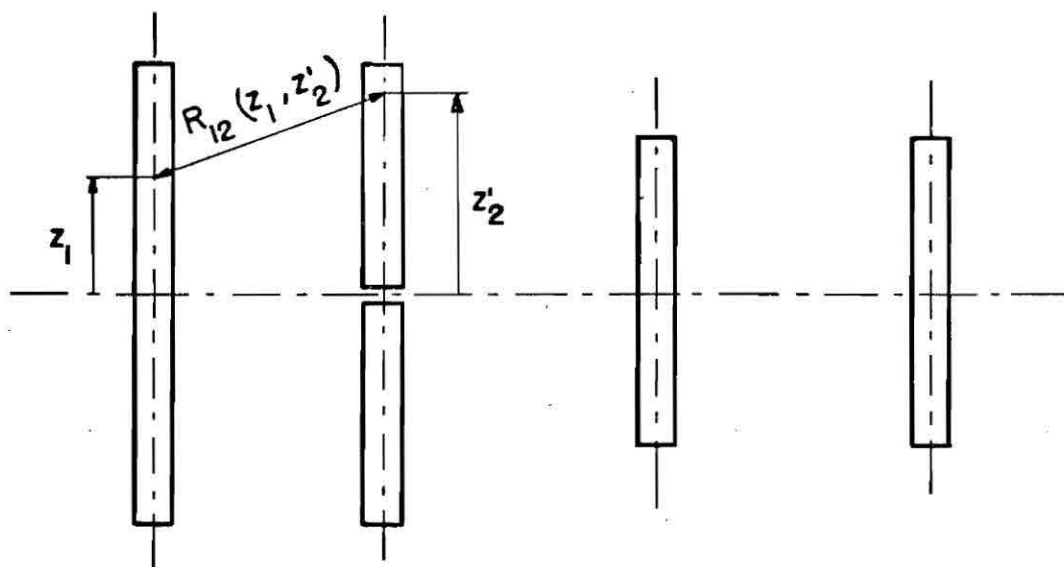


Fig. II.2 - Distâncias R_{ki} e R_{θ} .

$$\sum_{i=1}^N \int_{-h_i}^{h_i} I_i(z'_i) K_{ki}(z_k, z'_i) dz'_i = - \frac{j4\pi}{\zeta} (C_k \cos\beta z_k + \frac{1}{2} V_{ok} \sin\beta |z_k|) \quad (II.15)$$

sendo:

$$I_i(z'_i) = 2\pi a J_i(z'_i) \quad (II.16)$$

$$K_{ki}(z_k, z'_i) = \frac{e^{-j\beta R_{ki}}}{R_{ki}} \quad i \neq k \quad (II.17)$$

$$R_{ki} = \sqrt{(z_k - z'_i)^2 + b_{ki}^2} \quad i \neq k \quad (II.18)$$

$$K_{kk}(z_k, z'_k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-j\beta R_{\theta}}}{R_{\theta}} d\theta \quad (II.19)$$

$$R_{\theta} = \sqrt{(z_k - z'_k)^2 + (2a \sin \frac{\theta}{2})^2} \quad (II.20)$$

Uma aproximação utilizada para antenas filiformes (King, 1956; Mei, 1965) implica em:

$$K_{kk}(z_k, z'_k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-j\beta R_{\theta}}}{R_{\theta}} d\theta \approx \frac{e^{-j\beta R_{kk}}}{R_{kk}} \quad (II.21)$$

onde:

$$R_{kk} = \sqrt{(z_k - z'_k)^2 + a^2} \quad (II.22)$$

Esta aproximação seria exata se toda a corrente nos condutores cilíndricos estivesse concentrada nos seus eixos. Como nos casos reais isto não ocorre, a aproximação só é válida para elementos com diâmetros bem menores que o comprimento de onda λ .

A constante C_k pode ser eliminada, originando o conjunto de N equações integrais equivalente a II.15:

$$\sum_{i=1}^N \int_{-h_i}^{h_i} I_i(z'_i) K_{kid}(z_k, z'_i) dz'_i = \frac{j4\pi}{z \cos \beta h_k} \left(\frac{1}{2} V_{ok} M_{ozk} + U_k F_{ozk} \right) \quad (II.23)$$

onde:

$$M_{ozk} = \sin \beta (h_k - |z_k|) \quad (II.24)$$

$$F_{ozk} = \cos \beta z_k - \cos \beta h_k \quad (II.25)$$

$$K_{kid}(z_k, z'_i) = K_{ki}(z_k, z'_i) - K_{ki}(h_k, z'_i) \quad (II.26)$$

$$K_{ki}(z_k, z'_i) = \frac{e^{-j\beta R_{ki}(z_k)}}{R_{ki}(z_k)} \quad (II.27)$$

$$R_{ki}(z_k) = \sqrt{(z_k - z'_i)^2 + b_{ki}^2} \quad (II.28)$$

$$U_k = - \frac{j\zeta}{4\pi} \sum_{i=1}^N \int_{-h_k}^{h_k} I_i(z'_i) K_{ki}(h_k, z'_i) dz'_i \quad (II.29)$$

Observação: Quando $i=k$, toma-se $b_{kk} = a$ na Expressão II.28.

CAPÍTULO III

DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES NOS ELEMENTOS DA ANTENA YAGI

A resolução de sistemas de equações integrais dadas por II.23 sô é possível mediante uso de algum método aproximado. Dentre esses métodos, o de King-Middleton é o mais adequado devido a sua simplicidade.

Segundo a teoria de três termos de King, (King et al., 1968) a distribuição de corrente num elemento da antena pode ser representada pela soma de três termos trigonométricos, ou seja:

$$I_k(z_k) = \delta_{k2} A_k M_{ozk} + B_k F_{ozk} + D_k H_{ozk} \quad (\text{III.1})$$

onde:

$$\delta_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{se } k = i \\ 0 & \text{se } k \neq i \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

$$M_{ozk} = \text{sen} \beta (h_k - |z_k|) \quad (\text{III.3})$$

$$F_{ozk} = \cos \beta z_k - \cos \beta h_k \quad (\text{III.4})$$

$$H_{ozk} = \cos \frac{1}{2} \beta z_k - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \quad (\text{III.5})$$

As funções M_{ozk} , F_{ozk} e H_{ozk} são chamadas de funções de distribuição de corrente enquanto A_k , B_k e D_k são os coeficientes de distribuição de corrente no K -ésimo elemento.

3.1 - APROXIMAÇÃO DAS INTEGRAIS

Conforme King (1968), quando as alturas dos elementos forem tais que $\beta h \leq 5\pi/4$, as características especiais dos cerns das equações integrais K_{kid} possibilitam a efetuação de certas aproximações:

$$W_{kkV}(z_k) = \int_{-h_k}^{h_k} M_{oz',k} K_{kkd}(z_k, z') dz' \approx \psi_{kkdV}^m M_{ozk} + \psi_{kkdV}^h H_{ozk} \quad (III.6)$$

$$W_{kiU}(z_k) = \int_{-h_i}^{h_i} F_{oz',i} K_{kid}(z_k, z') dz' \approx \psi_{kidU}^f F_{ozk} + \psi_{kidU}^h H_{ozk} \quad (III.7)$$

$$W_{kiD}(z_k) = \int_{-h_i}^{h_i} H_{oz',i} K_{kid}(z_k, z') dz' \approx \psi_{kidD}^f F_{ozk} + \psi_{kidD}^h H_{ozk} \quad (III.8)$$

$$W_{kiV}(z_k) = \int_{-h_i}^{h_i} M_{oz',i} K_{kid}(z_k, z') dz' \approx \psi_{kidV}^f F_{ozk} + \psi_{kidV}^h H_{ozk} \quad i \neq k \quad (III.9)$$

As constantes Ψ podem ser determinadas pelo método de solução

ção em pontos discretos ("point matching method"). Em particular, tomando-se os pontos $z_k = 0$ e $z_k = h_k/2$ resulta:

$$\begin{aligned} \Psi_{kkV}^m = \Delta_1^{-1} \left\{ W_{kkV}(0) \left(\cos \frac{1}{4} \beta h_k - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) - \right. \\ \left. - W_{kkV} \left(\frac{h_k}{2} \right) \left(1 - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

$$\Psi_{kkV}^h = \Delta_1^{-1} \left\{ W_{kkV} \left(\frac{h_k}{2} \right) \operatorname{sen} \beta h_k - W_{kkV}(0) \operatorname{sen} \frac{1}{2} \beta h_k \right\} \quad (\text{III.11})$$

$$\begin{aligned} \Psi_{kix}^f = \Delta_2^{-1} \left\{ W_{kix}(0) \left(\cos \frac{1}{4} \beta h_k - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) - \right. \\ \left. - W_{kix} \left(\frac{h_k}{2} \right) \left(1 - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

$$\begin{aligned} \Psi_{kix}^h = \Delta_2^{-1} \left\{ W_{kix} \left(\frac{h_k}{2} \right) (1 - \cos \beta h_k) - W_{kix}(0) \left(\cos \frac{1}{2} \beta h_k - \right. \right. \\ \left. \left. - \cos \beta h_k \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

onde:

$$x = \begin{cases} U, D \text{ ou } V \text{ para } i, k \text{ quaisquer em III.12} \\ U \text{ ou } D \text{ para } i, k \text{ quaisquer, ou } V \text{ para } i \neq k \text{ em III.13} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Delta_1 = \operatorname{sen} \beta h_k \left(\cos \frac{1}{4} \beta h_k - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) - \operatorname{sen} \frac{1}{2} \beta h_k (1 - \\ - \cos \frac{1}{2} \beta h_k) \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

$$\Delta_2 = (1 - \cos \beta h_k) \left(\cos \frac{1}{4} \beta h_k - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) - \left(\cos \frac{1}{2} \beta h_k - \cos \beta h_k \right) \left(1 - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) \quad (\text{III.15})$$

3.2 - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES

Substituindo as expressões de correntes III.1 nas equações integrais II.23, encontraremos equações que, após a identificação dos termos, darão origem a um sistema de equações lineares cuja solução resulta nos coeficientes de distribuição de correntes.

$$A_2 \int_{-h_2}^{h_2} M_{oz'2} K_{k2d}(z_k, z') dz' + \sum_{i=1}^N \left[B_i \int_{-h_i}^{h_i} F_{oz'i} K_{kid}(z_k, z') dz' + D_i \int_{-h_i}^{h_i} H_{oz'i} K_{kid}(z_k, z') dz' \right] = \frac{j4\pi}{\epsilon \cos \beta h_k} \left(\frac{1}{2} V_{ok} M_{ozk} + U_k F_{ozk} \right) \quad k=1, 2, \dots, N \quad (\text{III.16})$$

onde $V_{ok} = 0$ para $k \neq 2$

Aplicando-se as aproximações III.6 - III.9 à Expressão III.16 tem-se:

$$A_2(\psi_{22dv}^m M_{oz2} + \psi_{22dv}^h H_{oz2}) + \sum_{i=1}^N \left[B_i(\psi_{2idu}^f F_{oz2} + \psi_{2idu}^h H_{oz2}) + \right. \\ \left. + D_i(\psi_{2idD}^f F_{oz2} + \psi_{2idD}^h H_{oz2}) \right] = \frac{j4\pi}{\zeta \cos \beta h_k} \left(\frac{1}{2} V_{o2} M_{oz2} + U_2 F_{oz2} \right) \quad (III.17)$$

$$A_2(\psi_{k2dv}^f F_{ozk} + \psi_{k2dv}^h H_{ozk}) + \sum_{i=1}^N \left[B_i(\psi_{kidu}^f F_{ozk} + \psi_{kidu}^h H_{ozk}) + \right. \\ \left. + D_i(\psi_{kidD}^f F_{ozk} + \psi_{kidD}^h H_{ozk}) \right] = \frac{j4\pi}{\zeta \cos \beta h_k} U_k F_{ozk} \quad (III.18)$$

$$k = 1, 3, 4, \dots, N$$

Identificando-se cada um dos termos da expansão da distribuição de correntes vem:

$$A_2 = \frac{j 2\pi V_{o2}}{\zeta \cos \beta h_2 \psi_{22dv}^m} \quad (III.19)$$

$$\left[A_2(1 - \delta_{k2}) \psi_{k2dv}^f + \sum_{i=1}^N (B_i \psi_{kidu}^f + D_i \psi_{kidD}^f) \right] \cos \beta h_k - \frac{j4\pi}{\zeta} U_k = 0 \quad (III.20)$$

$$A_2 \psi_{k2dv}^h + \sum_{i=1}^N (B_i \psi_{kidu}^h + D_i \psi_{kidD}^h) = 0 \quad (III.21)$$

A expressão de U_k resulta da substituição de III.1 em II.29 ou seja:

$$U_k = - \frac{j\zeta}{4\pi} \left\{ A_2 \psi_{k2V}(h_k) + \sum_{i=1}^N \left[B_i \psi_{kiU}(h_k) + D_i \psi_{kiD}(h_k) \right] \right\} \quad (\text{III.22})$$

nde:

$$\psi_{kiV}(h_k) = \int_{-h_i}^{h_i} M_{oz'i} K_{ki}(h_k, z') dz' \quad (\text{III.23})$$

$$\psi_{kiU}(h_k) = \int_{-h_i}^{h_i} F_{oz'i} K_{ki}(h_k, z') dz' \quad (\text{III.24})$$

$$\psi_{kiD}(h_k) = \int_{-h_i}^{h_i} H_{oz'i} K_{ki}(h_k, z') dz' \quad (\text{III.25})$$

De III.22 e III.20 vem portanto:

$$A_2 \left[\psi_{k2V}(h_k) - (1 - \delta_{k2}) \psi_{k2dV}^f \cos \beta h_k \right] + \sum_{i=1}^N \left\{ B_i \left[\psi_{kiU}(h_k) - \psi_{kiU}^f \cos \beta h_k \right] + D_i \left[\psi_{kiD}(h_k) - \psi_{kiD}^f \cos \beta h_k \right] \right\} = 0 \quad (\text{III.26})$$

Introduzindo-se a notação:

$$\phi_{k2V} = \psi_{k2V}(h_k) - (1 - \delta_{k2}) \psi_{k2dV}^f \cos \beta h_k \quad (\text{III.27})$$

$$\phi_{kiU} = \psi_{kiU}(h_k) - \psi_{kiU}^f \cos \beta h_k \quad (\text{III.28})$$

$$\phi_{kiD} = \psi_{kiD}(h_k) - \psi_{kidD}^f \cos \beta h_k \quad (\text{III.29})$$

resulta das Expressões III.21 e III.26 o seguinte sistema de equações:

$$\sum_{i=1}^N (\phi_{kiU} B_i + \phi_{kiD} D_i) = - \phi_{k2V} A_2 \quad k=1,2,\dots,N \quad (\text{III.30})$$

$$\sum_{i=1}^N (\psi_{kidU}^h B_i + \psi_{kidD}^h D_i) = - \psi_{k2V}^h A_2 \quad k=1,2,\dots,N \quad (\text{III.31})$$

cujas formas matriciais são dadas por:

$$[\phi_U] \{ B \} + [\phi_D] \{ D \} = - \{ \phi_{2V} \} A_2 \quad (\text{III.32})$$

$$[\psi_{dU}^h] \{ B \} + [\psi_{dD}^h] \{ D \} = - \{ \psi_{2V}^h \} A_2 \quad (\text{III.33})$$

A solução deste sistema fornece os coeficientes de distribuição B_k e D_k . Estes coeficientes juntamente com a Expressão III.19 para o coeficiente A_2 , substituídos na Equação III.1, determinam as correntes em cada um dos elementos da antena.

CAPÍTULO IV

CAMPO DISTANTE E DIRETIVIDADE DA ANTENA YAGI

4.1 - EXPRESSÃO PARA O CAMPO DISTANTE

Conhecendo-se as correntes nos elementos da antena Yagi, o campo distante pode ser expresso por:

$$E_{\theta}(R_2, \theta, \phi) = \frac{j\beta\zeta}{4\pi} \sin\theta \sum_{i=1}^N \frac{e^{-j\beta R_i}}{R_i} \int_{-h_i}^{h_i} I_{zi}(z') e^{j\beta z' \cos\theta} dz' \quad (IV.1)$$

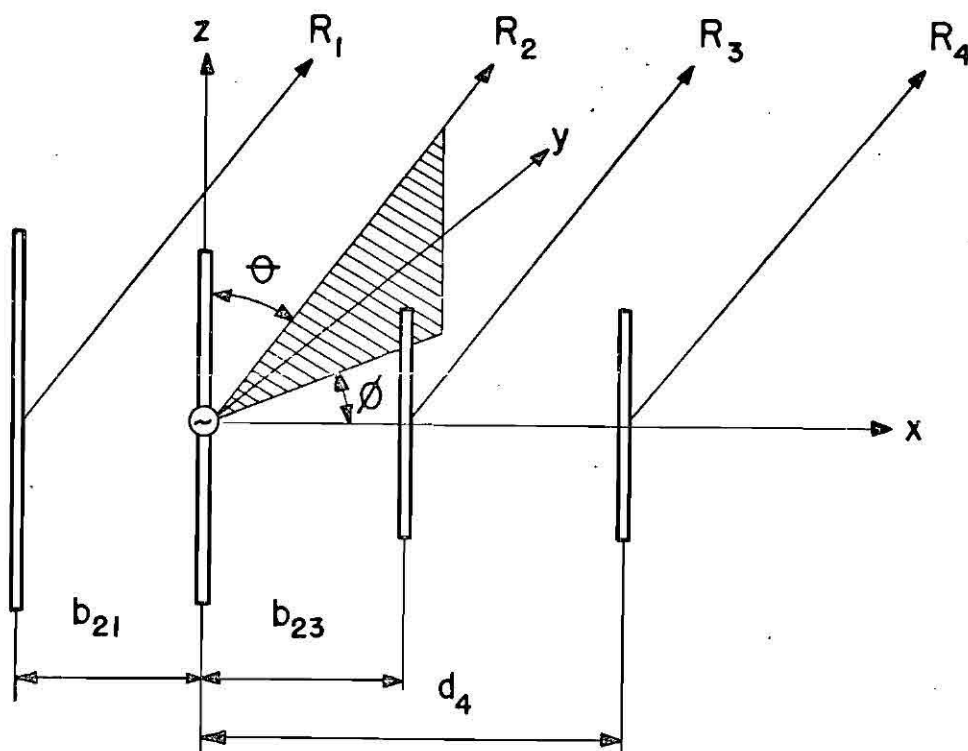


Fig. IV.1 - Coordenadas polares para antena Yagi de 4 elementos

Introduzindo-se a distribuição de correntes representada por

III.1 obtêm-se:

$$E_{\theta}(R_2, \theta, \phi) = \frac{j\zeta}{2\pi} \left\{ A_2 \frac{e^{-j\beta R_2}}{R_2} F_m(\theta, \beta h_2) + \sum_{i=1}^N \frac{e^{-j\beta R_i}}{R_i} \left[B_i G_m(\theta, \beta h_i) + D_i D_m(\theta, \beta h_i) \right] \right\} \quad (IV.2)$$

onde:

$$F_m(\theta, \beta h) = \frac{\beta}{2} \sin \theta \int_{-h}^h M_{ozz} e^{j\beta z' \cos \theta} dz' = \frac{\cos(\beta h \cos \theta) - \cos \beta h}{\sin \theta} \quad (IV.3)$$

$$G_m(\theta, \beta h) = \frac{\beta}{2} \sin \theta \int_{-h}^h F_{ozi} e^{j\beta z' \cos \theta} dz' = \frac{\sin \beta h \cos(\beta h \cos \theta) \cos \theta - \cos \beta h \sin(\beta h \cos \theta)}{\sin \theta \cos \theta} \quad (IV.4)$$

$$D_m(\theta, \beta h) = \frac{\beta}{2} \sin \theta \int_{-h}^h H_{ozi} e^{j\beta z' \cos \theta} dz' = \left[\frac{2 \cos(\beta h \cos \theta) \sin \frac{1}{2} \beta h - 4 \sin(\beta h \cos \theta) \cos \theta \cos \frac{1}{2} \beta h}{1 - 4 \cos^2 \theta} - \frac{\sin(\beta h \cos \theta) \cos \frac{1}{2} \beta h}{\cos \theta} \right] \sin \theta \quad (IV.5)$$

De IV.2 vem:

$$E_{\theta}(R_2, \theta, \phi) = \frac{j\zeta}{2\pi} \frac{e^{-j\beta R_2}}{R_2} \left\{ A_2 F_m(\theta, \beta h_2) + \sum_{i=1}^N e^{-j\beta(R_i - R_2)} \left[B_i G_m(\theta, \beta h_i) + D_i D_m(\theta, \beta h_i) \right] \right\} \quad (IV.6)$$

sendo:

$$R_i - R_2 = (d_2 - d_i) \sin\theta \cos\phi = b_{2i} \sin\theta \cos\phi \quad (IV.7)$$

4.2 - DIRETIVIDADE DA ANTENA YAGI

O vetor de Poynting num ponto distante da antena é dado por:

$$|S_R(R, \theta, \phi)| = \frac{|E_{\theta}(R, \theta, \phi)|^2}{2\zeta} \quad (IV.8)$$

A diretividade de uma antena na direção (θ_0, ϕ_0) é representada por:

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{4\pi R^2 |S_R(R, \theta_0, \phi_0)|}{P_I} \quad (IV.9)$$

Sendo desprezadas as perdas ôhmicas nos elementos, a potência irradiada pela antena é exatamente igual à potência fornecida pelo gerador em $z=0$, ou seja:

$$P_I = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[V_{02} I_{Z2}^* (0) \right] \quad (\text{IV.10})$$

Como $E_\theta (R, \theta, \phi)$ é inversamente proporcional a R , resulta para a diretividade:

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{|E_\theta(\theta_0, \phi_0)|^2}{60 P_I} \quad (\text{IV.11})$$

Onde $|E_\theta(\theta_0, \phi_0)|$ é obtido de IV.6, isto é:

$$|E_\theta(\theta_0, \phi_0)| = 60 \left| A_2 F_m(\theta_0, \beta h_2) + \sum_{i=1}^N e^{-j\beta(R_i - R_2)} [B_i G_m(\theta_0, \beta h_i) + D_i D_m(\theta_0, \beta h_i)] \right| \quad (\text{IV.12})$$

Um parâmetro muito importante no projeto de antenas é a relação frente-costas ("front-to-back ratio"). No caso de antenas Yagi é dado por:

$$\text{RFC} = 20 \operatorname{Log} \frac{|E_\theta(\frac{\pi}{2}, 0)|}{|E_\theta(\frac{\pi}{2}, \pi)|}$$

CAPÍTULO V

MÉTODO DA PERTURBAÇÃO APLICADO AOS ESPAÇAMENTOS ENTRE OS ELEMENTOS

A otimização dos espaçamentos no sentido de se obter um ga
nho máximo pode ser conseguida pelo método de perturbação, que consiste em
realizar pequenas variações nas posições dos elementos da antena represent
tadas pelo vetor $\{\Delta d\}$ cujos componentes são Δd_k .

Para se estudar a variação da diretividade, em relação ã
perturbação das coordenadas dos elementos, ẽ preciso analisar o comportam
mento do campo distante bem como da potência irradiada em relação ãs variã
veis d_k . A não ser pelo fator $\exp(-j\beta(d_2 - d_1) \sin\theta \cos\phi)$, como pode ser obs
servado na Expressão IV.6, toda a variação tanto do campo distante como
da potência irradiada ẽ devida ãs variações dos coeficientes de distribuiç
ção de correntes.

5.1 - DEDUÇÃO DOS NOVOS COEFICIENTES DE DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES

As distribuições de correntes são determinadas resolvendo-se o sistema de equações III.32 e III.33. Tanto os coeficientes desse sist
tema linear como as constantes são combinações lineares das integrais do
tipo abaixo:

$$I = \int_{-h_i}^{h_i} S_m(h_i, z') K_{ki}(z_k, z') dz' \quad (V.1)$$

onde:

$$S_1(h_i, z') = M_{Ozi} = \text{sen} \beta (h_i - |z'|)$$

$$S_2(h_i, z') = F_{Ozi} = \cos \beta z' - \cos \beta h_i$$

$$S_3(h_i, z') = H_{Ozi} = \cos \frac{1}{2} \beta z' - \cos \frac{1}{2} \beta h_i$$

$$K_{ki}(z_k, z') = \frac{e^{-j\beta R_{ki}}}{R_{ki}}$$

$$R_{ki} = \sqrt{(z_k - z'_i)^2 + b_{ki}^2}$$

$$b_{ki} = \begin{cases} d_k - d_i & i \neq k \\ a & i = k \end{cases}$$

Como as funções $S_m(h_i, z')$ independem de d_k , toda a variação da integral V.1 é devida a $K_{ki}(z_k, z')$. Assim a integral V.1, após a perturbação é dada por:

$$I^P = I + \Delta I \approx I + \frac{\partial I}{\partial d_k} \Delta d_k + \frac{\partial I}{\partial d_i} \Delta d_i \quad (V.2)$$

onde:

$$\frac{\partial I}{\partial d_k} = - \frac{\partial I}{\partial d_i} = \int_{-h_i}^{h_i} S_m(h_i, z') \frac{\partial K_{ki}}{\partial d_k} dz' \quad (V.3)$$

$$\frac{\partial K_{ki}}{\partial d_k} = -b_{ki} \left(j\beta + \frac{1}{R_{ki}} \right) \frac{K_{ki}}{R_{ki}} \quad (V.4)$$

Logo a integral V.I após a perturbação dos espaçamentos será dada por:

$$I^P = I - b_{ki} (\Delta d_k - \Delta d_i) \int_{-h_i}^{h_i} S_m(h_i, z') \left(j\beta + \frac{1}{R_{ki}} \right) \frac{K_{ki}}{R_{ki}} dz' \quad (V.5)$$

O termo adicional devido às perturbações é proporcional a $(\Delta d_k - \Delta d_i)$; desta forma, em consequência da linearidade de ϕ e ψ em relação a integrais da forma geral V.I, tem-se

$$[\Delta \phi_x]_{ki} = (\Delta d_k - \Delta d_i) \frac{\partial \phi_{kix}}{\partial d_k} \quad x = U, D \quad (V.6)$$

$$[\Delta \psi_{dx}^h]_{ki} = (\Delta d_k - \Delta d_i) \frac{\partial \psi_{kidx}^h}{\partial d_k} \quad (V.7)$$

$$\{ \Delta \phi_{2V} \}_k = (\Delta d_k - \Delta d_2) \frac{\partial \phi_{k2V}}{\partial d_k} \quad (V.8)$$

$$\{ \Delta \Psi_{2dV}^h \}_k = (\Delta d_k - \Delta d_2) \frac{\partial \Psi_{k2dV}^h}{\partial d_k} \quad (V.9)$$

As expressões para as derivadas em relação a d_k de Ψ_{kidx}^h , ϕ_{k2V} e Ψ_{k2dV}^h constam no Apêndice A.

Os novos coeficientes da matriz podem ser expressos sob a seguinte forma:

$$[\phi_x]^P = [\phi_x] + [\Delta \phi_x] \quad x = U, D \quad (V.10)$$

$$[\Psi_{dx}^h]^P = [\Psi_{dx}^h] + [\Delta \Psi_{dx}^h] \quad x = U, D \quad (V.11)$$

$$\{ \phi_{2V} \}^P = \{ \phi_{2V} \} + \{ \Delta \phi_{2V} \} \quad (V.12)$$

$$\{ \Psi_{2dV}^h \}^P = \{ \Psi_{2dV}^h \} + \{ \Delta \Psi_{2dV}^h \} \quad (V.13)$$

Devido à perturbação dos espaçamentos, os coeficientes de distribuição de correntes sofrem modificações de modo que:

$$\{ B \}^P = \{ B \} + \{ \Delta B \} \quad (V.14)$$

$$\{ D \}^P = \{ D \} + \{ \Delta D \} \quad (V.15)$$

Substituindo-se as expressões V.10 a V.15 no sistema de equações III.32 e III.33 e desprezando-se as variações de segunda ordem resulta:

$$[\phi_U]' \{ \Delta B \} + [\phi_D]' \{ \Delta D \} = - \{ \Delta \phi_{2V} \} A_2 - [\Delta \phi_U]' \{ B \} - [\Delta \phi_D]' \{ D \} \quad (V.16)$$

$$[\psi_U^h]' \{ \Delta B \} + [\psi_D^h]' \{ \Delta D \} = - \{ \Delta \psi_{2V}^h \} A_2 - [\Delta \psi_U^h]' \{ B \} - [\Delta \psi_D^h]' \{ D \} \quad (V.17)$$

Com a introdução das Expressões V.6 a V.9 em V.16 e V.17 tem-se:

$$[\phi_U]' \{ \Delta B \} + [\phi_D]' \{ \Delta D \} = [P_U]' \{ \Delta d \} \quad (V.18)$$

$$[\psi_{dU}^h]' \{ \Delta B \} + [\psi_{dD}^h]' \{ \Delta D \} = [P_D]' \{ \Delta d \} \quad (V.19)$$

onde as expressões dos elementos das matrizes $[P_U]$ e $[P_D]$ são obtidas no Apêndice B.

Os incrementos $\{ \Delta B \}$ e $\{ \Delta D \}$ resultam portanto da inversão da matriz, ou seja:

$$\begin{Bmatrix} \{ \Delta B \} \\ \{ \Delta D \} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [\phi_U] & [\phi_D] \\ [\psi_{dU}^h] & [\psi_{dD}^h] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [P_U] \\ [P_D] \end{bmatrix} \{ \Delta d \} = \begin{bmatrix} [Q_U] \\ [Q_D] \end{bmatrix} \{ \Delta d \} \quad (V.20)$$

5.2 - CAMPO DISTANTE APÓS A PERTURBAÇÃO

Pela escolha da origem do sistema de coordenadas, $d_2=0$ e, ao se tomar o termo linear da expansão de Taylor, tem-se da expressão IV.6:

$$E_{\theta}^p = E_{\theta} + \frac{j\zeta}{2\pi} \frac{e^{-j\beta R}}{R} \sum_{i=1}^N \exp(j\beta d_i \sin\theta \cos\phi) \{ j\beta \sin\theta \cos\phi [B_i G_m(\theta, \beta h_i) + D_i D_m(\theta, \beta h_i)] \Delta d_i + [G_m(\theta, \beta h_i) \Delta B_i + D_m(\theta, \beta h_i) \Delta D_i] \} \quad (V.21)$$

De acordo com a V.20, ΔB_i e ΔD_i são dados por:

$$\Delta B_i = \sum_{k=1}^N [Q_U]_{ik} \Delta d_k \quad (V.22)$$

$$\Delta D_i = \sum_{k=1}^N [Q_D]_{ik} \Delta d_k \quad (V.23)$$

Substituindo-se V.22 e V.23 em V.21 tem-se:

$$E_{\theta}^p = E_{\theta} + \{ E'_{\theta} \}^T \{ \Delta d \} \quad (V.24)$$

onde:

$$\{ E'_{\theta} \}_k = \frac{\partial E_{\theta}}{\partial d_k} = \frac{j\zeta}{2\pi} \frac{e^{-j\beta R}}{R} \{ j\beta \sin\theta \cos\phi \exp(j\beta d_k \sin\theta \cos\phi) \}.$$

$$\begin{aligned}
 & [B_i G_m(\theta, \beta h_i) + D_i D_m(\theta, \beta h_i)] + \\
 & + \sum_{i=1}^N \exp(j\beta d_i \sin\theta \cos\phi) (G_m(\theta, \beta h_i) [Q_U]_{ik} + \\
 & D_m(\theta, \beta h_i) [Q_D]_{ik}) \}
 \end{aligned} \tag{V.25}$$

5.3 - INCREMENTO DA DIRETIVIDADE

A diretividade da antena é calculada pela Fórmula IV.9 ou se
ja:

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{|E_\theta(\theta_0, \phi_0)|^2}{60 P_I}$$

Após a perturbação tem-se novo valor para a diretividade

$$D^P(\theta_0, \phi_0) = \frac{|E_\theta^P|^2}{60 P_I^P} \tag{V.26}$$

Da Expressão V.24 tem-se:

$$|E_\theta^P|^2 = |E_\theta|^2 + 2 \{ \Delta d \}^T \{ E_1 \} + \{ \Delta d \}^T [R_e E_2] \{ \Delta d \} \tag{V.27}$$

sendo:

$$\{ E_1 \} = R_e \{ E_\theta \{ E'_\theta \} \} \tag{V.28}$$

$$[E_2] = \{E'_0\}^* \{E'_0\}^T \quad (V.29)$$

Por sua vez a nova potência média irradiada $\bar{e}$ é dada por:

$$P_I^P = \frac{1}{2} R_e [V_{o2}^* I_2^P(0)] \quad (V.30)$$

Devido à variação dos espaçamentos, a corrente no elemento excitador $\bar{e}$ é dada por:

$$I_2^P(0) = I_2(0) + F_{oz2}(0) \Delta B_2 + H_{oz2}(0) \Delta D_2 \quad (V.31)$$

Substituindo V.22 e V.23 em V.31 tem-se:

$$I_2^P(0) = I_2(0) + \sum_{k=1}^N \{ [Q_U]_{2k} F_{oz2}(0) + [Q_D]_{2k} H_{oz2}(0) \} \Delta d_k \quad (V.32)$$

Introduzindo-se essa última expressão em V.30 tem-se:

$$P_I^P = P_I + \{ \Delta d \}^T \{ P_I' \} \quad (V.33)$$

$$\{ P_I' \}_k = \frac{\partial P_I}{\partial d_k} = \frac{1}{2} V_{o2} R_e \{ [Q_U]_{2k} F_{oz2}(0) + [Q_D]_{2k} H_{oz2}(0) \} \quad (V.34)$$

Substituindo V.27 e V.33 em V.26 acha-se a expressão da nova diretividade:

$$D^P(\theta_0, \phi_0) = \frac{|E_\theta|^2 + 2 \{\Delta d\}^T \{E_1\} + \{\Delta d\}^T [R_e E_2] \{\Delta d\}}{60 [P_I + \{\Delta d\}^T \{P_I'\}]} \quad (V.35)$$

Portanto a variação na diretividade devido à perturbação é dada por:

$$\Delta D(\theta_0, \phi_0) = \frac{\{\Delta d\}^T \{C\} + \{\Delta d\}^T [R_e E_2] \{\Delta d\}}{60 P_I^P} \quad (V.36)$$

onde:

$$\{C\} = 2 \{E_1\} - 60 D(\theta_0, \phi_0) \cdot \{P_I'\} \quad (V.37)$$

Como $[R_e E_2]$ é uma matriz positiva definida, a forma quadrática que se apresenta no numerador é não negativa. Além disso a potência irradiada é sempre positiva e portanto para que a diretividade cresça com a perturbação dos espaçamentos basta que $\{\Delta d\}^T \{C\}$ seja positivo. Essa condição será satisfeita se:

$$\{\Delta d\} = \alpha \{C\} \quad (V.38)$$

A constante positiva α deve ser suficientemente pequena de modo que seja satisfeita a condição de pequena perturbação.

Após certo número de perturbações obtêm-se os espaçamentos para uma diretividade maximizada. O valor final da diretividade depende muito

dos espaçamentos iniciais, devido à natureza desse método de otimização que procura o máximo local.

CAPÍTULO VI

MÉTODO DA PERTURBAÇÃO APLICADO ÀS ALTURAS DOS ELEMENTOS

O método da otimização pela perturbação das alturas é semelhante ao da perturbação dos espaçamentos ou seja, baseia-se em pequenas variações das alturas de modo que a cada perturbação se garanta um acréscimo na diretividade da antena.

6.1 - PERTURBAÇÃO NOS COEFICIENTES DE DISTRIBUIÇÃO DAS CORRENTES

No cálculo dos coeficientes de distribuição de correntes encontram-se integrais da forma geral:

$$I = \int_{-h_i}^{h_i} S_m(h_i, z') \frac{\exp(-j\beta R_{ki}(\sigma h_k, z'))}{R_{ki}(\sigma h_k, z')} dz' \quad (VI.1)$$

$m = 1, 2, 3$
 $\sigma = 0, 1/2, 1$

sendo:

$$S_1(h_i, z') = \sin \beta(h_i - |z'|)$$

$$S_2(h_i, z') = \cos \beta z' - \cos \beta h_i$$

$$S_3(h_i, z') = \cos \frac{1}{2} \beta z' - \cos \frac{1}{2} \beta h_i$$

$$R_{ki}(\sigma h_k, z') = \sqrt{(\sigma h_k - z')^2 + b_{ki}^2}$$

Com a perturbação das alturas as integrais VI.1 tomam a forma:

$$I^P = I + \frac{\partial I}{\partial h_i} \Delta h_i + \frac{\partial I}{\partial h_k} \Delta h_k \quad (\text{VI.2})$$

Aplicando-se a regra de Leibnitz para diferenciação das integrais, tem-se:

$$\frac{\partial I}{\partial h_i} = \int_{-h_i}^{h_i} K_{ki} \frac{\partial S_m}{\partial h_i} dz' + [S_m(h_i, h_i) + S_m(h_i, -h_i)] K_{ki} \quad (\text{VI.3})$$

Mas $S_m(h_i, \pm h_i) = 0$, portanto:

$$\frac{\partial I}{\partial h_i} = \int_{-h_i}^{h_i} \frac{\exp(-j\beta R_{ki})}{R_{ki}} \frac{\partial S_m}{\partial h_i} dz' \quad (\text{VI.4})$$

onde:

$$\frac{\partial S_1}{\partial h_i} = \beta \cos \beta (h_i - |z'|) \quad (\text{VI.5})$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial h_i} = \beta \sin \beta h_i \quad (\text{VI.6})$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial h_i} = \frac{\beta}{2} \sin \frac{1}{2} \beta h_i \quad (\text{VI.7})$$

Por outro lado:

$$\frac{\partial I}{\partial h_k} = - \int_{-h_i}^{h_i} S_m(h_i, z') \frac{\partial}{\partial h_k} \frac{\exp(-j\beta R_{ki}(\sigma h_k, z'))}{R_{ki}(\sigma h_k, z')} dz' \quad (VI.8)$$

com:

$$\frac{\partial}{\partial h_k} \frac{\exp(-j\beta R_{ki})}{R_{ki}} = -\sigma(\sigma h_k - z')(j\beta + \frac{1}{R_{ki}}) \frac{\exp(-j\beta R_{ki})}{R_{ki}^2} \quad (VI.9)$$

Da introdução de VI.2 nas expressões de ϕ e ψ tem-se:

$$[\phi_x]^p = [\phi_x] + [\Delta\phi_x] \quad x = U, D \quad (VI.10)$$

$$[\psi_{dx}]^p = [\psi_{dx}^h] + [\Delta\psi_{dx}^h] \quad x = U, D \quad (VI.11)$$

$$\{\phi_{2V}\}^p = \{\phi_{2V}\} + \{\Delta\phi_{2V}\} \quad (VI.12)$$

$$\{\psi_{2dV}\}^p = \{\psi_{2dV}^h\} + \{\Delta\psi_{2dV}^h\} \quad (VI.13)$$

Os incrementos matriciais são dados por:

$$[\Delta\phi_x]_{ki} = \frac{\partial \phi_{kix}}{\partial h_k} \Delta h_k + \frac{\partial \phi_{kix}}{\partial h_i} \Delta h_i \quad x = U, D \quad (VI.14)$$

$$[\Delta \Psi_{dx}^h]_{ki} = \frac{\partial \Psi_{kidx}^h}{\partial h_k} \Delta h_k + \frac{\partial \Psi_{kidx}^h}{\partial h_i} \Delta h_i \quad x=U,D \quad (VI.15)$$

$$\{\Delta \phi_{2V}\}_k = \frac{\partial \phi_{k2V}}{\partial h_k} \Delta h_k + \frac{\partial \phi_{k2V}}{\partial h_i} \Delta h_i \quad i=2 \quad (VI.16)$$

$$\{\Delta \Psi_{2dV}^h\}_k = \frac{\partial \Psi_{k2dV}^h}{\partial h_k} \Delta h_k + \frac{\partial \Psi_{k2dV}^h}{\partial h_i} \Delta h_i \quad i=2 \quad (VI.17)$$

As fórmulas das derivadas parciais de ϕ e Ψ encontram-se no Apêndice C.

Desprezando-se as variações de segunda ordem tem-se:

$$\begin{aligned} [\phi_U] \{\Delta B\} + [\phi_D] \{\Delta D\} = & - [\Delta \phi_U] \{B\} - [\Delta \phi_D] \{D\} - \\ & - \Delta A_2 \{\phi_{2V}\} - A_2 \{\Delta \phi_{2V}\} \end{aligned} \quad (VI.18)$$

$$\begin{aligned} [\Psi_{dU}^h] \{\Delta B\} + [\Psi_{dD}^h] \{\Delta D\} = & [\Delta \Psi_{dU}^h] \{B\} - [\Delta \Psi_{dD}^h] \{D\} - \\ & - \Delta A_2 \{\Psi_{2dV}^h\} - A_2 \{\Delta \Psi_{2V}^h\} \end{aligned} \quad (IV.19)$$

As Equações VI.18 e VI.19 podem ser colocadas sob a forma:

$$[\phi_U] \{\Delta B\} + [\phi_D] \{\Delta D\} = [P_U] \{\Delta h\} \quad (VI.20)$$

$$[\psi_{dU}^h] \{\Delta B\} + [\psi_{dD}^h] \{\Delta D\} = [P_D] \{\Delta h\} \quad (\text{VI.21})$$

onde as expressões dos elementos das matrizes $[P_U]$ e $[P_D]$ encontram-se no Apêndice D.

Do sistema de Equações VI.20 e VI.21 resulta que:

$$\begin{Bmatrix} \{\Delta B\} \\ \{\Delta D\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [Q_U] \\ [Q_D] \end{bmatrix} \{\Delta h\} \quad (\text{VI.22})$$

6.2 - CAMPO DISTANTE APÓS A PERTURBAÇÃO

Devido à perturbação das alturas encontra-se novo valor para o campo distante dado por:

$$E_{\theta}^p = E_{\theta} + j 60 \frac{e^{-j\beta R}}{R} \left\{ (F_m \frac{\partial A_2}{\partial h_2} + A_2 \frac{\partial F_m}{\partial h_2}) \Delta h_2 + \sum_{k=1}^N \exp(j\beta(d_k - d_2)) \cdot \right. \\ \left. \cdot \sin\theta \cos\phi \right\} (G_m \Delta B_k + D_m \Delta D_k + B_k \Delta G_m + D_k \Delta D_m) \quad (\text{VI.23})$$

A maximização da diretividade é desejada na direção $\theta = \pi/2$ e $\phi = 0$; portanto de IV.3 a IV.5 tem-se:

$$\frac{\partial F_m}{\partial h} = \beta \sin\beta h \quad (\text{VI.24})$$

$$\frac{\partial G_m}{\partial h} = \beta^2 h \sin\beta h \quad (\text{VI.25})$$

$$\frac{\partial D_m}{\partial h} = \frac{\beta^2 h}{2} \sin \frac{1}{2} \beta h \quad (\text{VI.26})$$

Introduzindo-se VI.24 a VI.26 em VI.23 vem que:

$$E_{\theta}^P = E_{\theta} + \{E'_{\theta}\} \{\Delta h\} \quad (\text{VI.27})$$

onde

$$\begin{aligned} \{E'_{\theta}\}_k = \frac{\partial E_{\theta}}{\partial h_k} = j 60 \frac{e^{-j\beta R}}{R} \{ \delta_{k2} (F_m \frac{\partial A_2}{\partial h_2} + A_2 \frac{\partial F_m}{\partial h_2}) + \\ \exp(j\beta(d_k - d_2)) [B_k \frac{\partial G_m}{\partial h_k} + D_k \frac{\partial D_m}{\partial h_k} + \\ \sum_{i=1}^N \exp(j\beta(d_i - d_2)) (G_m [Q_U]_{ik} + D_m [Q_D]_{ik})] \} \end{aligned} \quad (\text{VI.28})$$

6.3 - INCREMENTO DA DIRETIVIDADE

Após a perturbação das alturas temos a nova diretividade dada por:

$$D^P(\theta_0, \phi_0) = \frac{|E_{\theta}^P|^2}{60 P_I^P} \quad (\text{VI.29})$$

Da expressão VI.27 tem-se:

$$|E^P|^2 = |E_{\theta}|^2 + 2\{\Delta h\}^T \{E_1\} + \{\Delta h\}^T [R_e E_2] \{\Delta h\} \quad (\text{VI.30})$$

onde

$$\{E_1\} = R_e \{E_{\theta} \{E'_{\theta}\}\} \quad (\text{VI.31})$$

$$[E_2] = \{E'_\theta\}^* \{E'_\theta\}^T \quad (\text{VI.32})$$

Por outro lado a potência $\bar{e}$ então dada por:

$$P_I^D = P_I + \{\Delta h\}^T \{P_I'\} \quad (\text{VI.33})$$

com:

$$\begin{aligned} \{P_I'\}_k = \frac{\partial P_I}{\partial h} = \frac{1}{2} V_{o2} R_e \{ [Q_U]_{2k} F_{oz2}(o) + [Q_D]_{2k} H_{oz2}(o) + \\ \delta_{k2} (M_{oz2}(o) \frac{\partial A_2}{\partial h_2} + A_2 \frac{\partial M_{oz2}}{\partial h_2} + B_2 \frac{\partial F_{oz2}}{\partial h_2} + D_2 \frac{\partial H_{oz2}}{\partial h_2}) \} \end{aligned} \quad (\text{VI.34})$$

A variação da diretividade portanto será dada por:

$$\Delta D(\theta_o, \phi_o) = \frac{\{\Delta h\}^T \{C\} + \{\Delta h\}^T [R_e E_2] \{\Delta h\}}{60 P_I^D} \quad (\text{VI.35})$$

sendo

$$\{C\} = 2\{E_1\} - 60 D(\theta_o, \phi_o) \cdot \{P_I'\} \quad (\text{VI.36})$$

Analogamente ao que foi feito com a perturbação dos espaçamentos, tomando-se $\{\Delta h\} = \alpha\{C\}$, garante-se que a nova diretividade seja maior que a inicial. Portanto as alturas devem sofrer incrementos da forma:

$$\{\Delta h\} = \alpha \{C\} \quad (VI.37)$$

A constante positiva α deve ser suficientemente pequena de modo que seja válida a condição de pequena perturbação.

CAPÍTULO VII

COMENTÁRIOS SOBRE O PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA A OTIMIZAÇÃO

Visando à obtenção de uma configuração de espaçamentos e alturas de uma antena Yagi com diretividade melhorada, foi desenvolvido em linguagem FORTRAN IV, um programa baseado nas fórmulas contidas nos capítulos anteriores. O diagrama esquemático desse programa está apresentado na Figura VII.1.

Para facilitar o seu acesso, esse programa foi colocado na forma de subrotina. O seu uso é bastante simples, bastando fornecer a configuração geométrica inicial e o comprimento de onda transmitida (ou recebida) pela antena. O programa será então capaz de: a) fornecer apenas as características da antena; b) efetuar perturbações dos espaçamentos; c) realizar perturbações das alturas. Nesses dois últimos casos é preciso definir o número de perturbações desejadas NP.

A subrotina desenvolvida pode portanto fornecer a diretividade, o diagrama de irradiação e também os espaçamentos e alturas otimizadas de qualquer antena Yagi que obedeça às condições de aproximações realizadas na teoria. Todos os dados desejados da antena são impressos, sem que o usuário dessa subrotina necessite se preocupar com as instruções de saída.

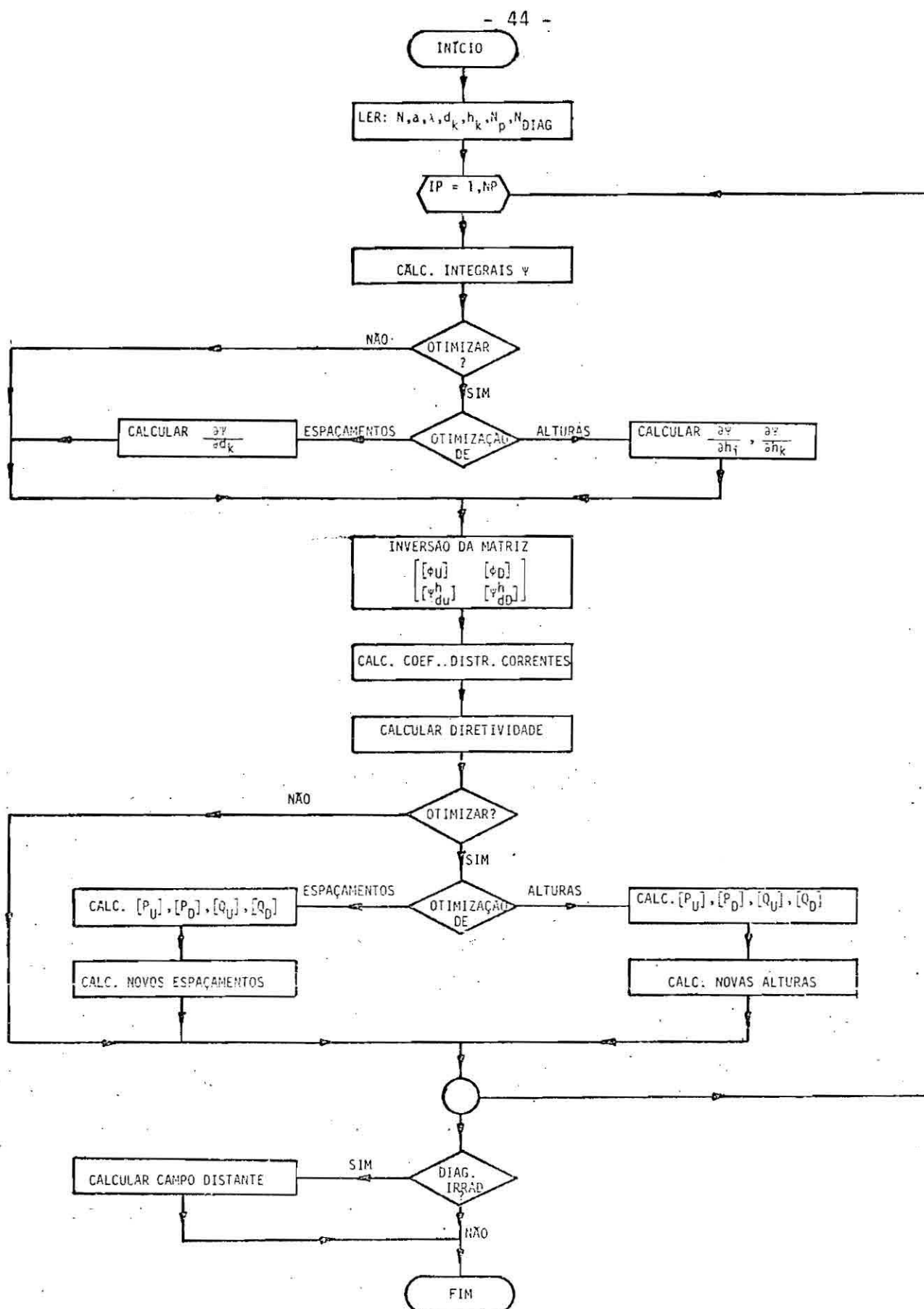


Fig. VII.1 - Diagrama esquemático do programa desenvolvido para a otimização da antena Yagi-Uda.

7.1 - PROBLEMAS NUMÉRICOS

Os maiores problemas numéricos se concentram nos cálculos das integrais Ψ . Isso decorre do fato do cerne das equações integrais K_{ki} ter aspecto impulsivo nos casos em que $k = i$. Devido ao número elevado de integrais envolvidas, é conveniente que se adote um método numérico que ofereça uma boa precisão nos valores dessas integrais com número reduzido de intervalos de integração.

Foi utilizado neste trabalho o método de integração sugerido por Kajfez (1972) devido a sua simplicidade e à boa precisão. Esse método baseia-se na aproximação da função integranda pelo polinômio de quinto grau como no método de Newton-Côtes, porém se distingue deste ao utilizar a derivada nos extremos da integração para a determinação dos coeficientes de polinômio.

De acordo com esse método tem-se:

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x) dx = \frac{h}{15} (f'_0 h + 7f_0 + 16f_1 + 7f_2 - f'_2 h) \quad (\text{VII.1})$$

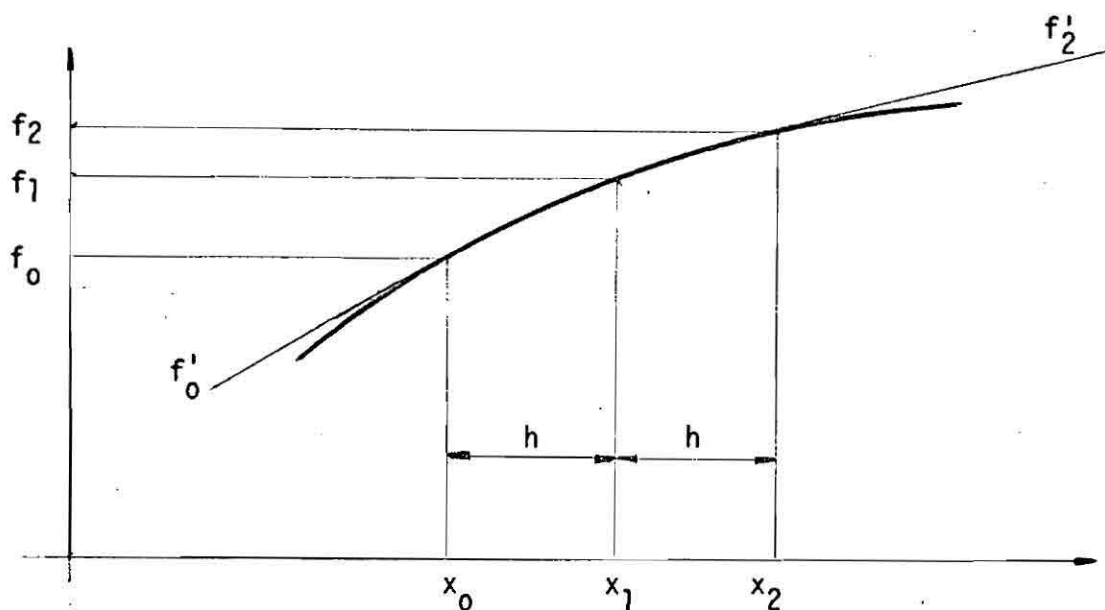


Fig. VII.2 - Integração pelo método citado por Kajfez.

Ao se tomar um domínio de integração contendo $2n$ intervalos a integral é dada aproximadamente por:

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x) dx \approx \frac{h}{15} (f'_0 h + 7f_0 + 16f_1 + 14f_2 + 16f_3 + 14f_4 + \dots + 14f_{2n-4} + 16f_{2n-3} + 14f_{2n-2} + 16f_{2n-1} + 7f_{2n} - f'_{2n} h)$$

(VII.2)

A inversão da matriz é realizada pelo método de Gauss. A subrotina da inversão foi testada fornecendo resultados com a precisão desejada.

Quanto à convergência do método utilizado para otimização pode-se dizer que é boa, visto que com a escolha adequada de constante α , pode-se obter a diretividade máxima em menos de dez perturbações sucessivas tanto variando as alturas como os espaçamentos.

7.2 - ALGUMAS APLICAÇÕES DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

Utilizando-se o programa elaborado foi constatado que a diretividade da antena Yagi varia de modo significativo com o raio dos elementos. A diretividade pode variar de mais de 2db como pode ser observado na Figura VII.3.

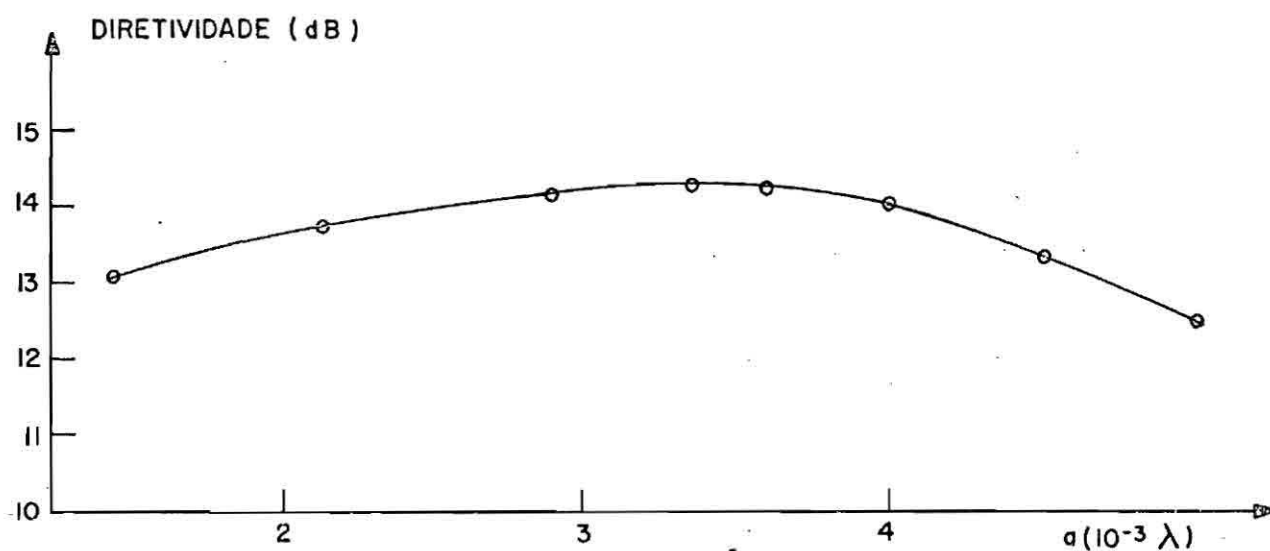


Fig. VII.3 - Variação da diretividade com o raio dos elementos.

Variando-se o comprimento de onda, que é um dos parâmetros de entrada da subrotina desenvolvida, pode-se obter a resposta em frequência de uma antena Yagi. Para exemplificar foi tomada a configuração proposta por Kajfez (1975) e verificou-se que esta antena possui resposta em frequência como pode ser visto na Figura VII.4.

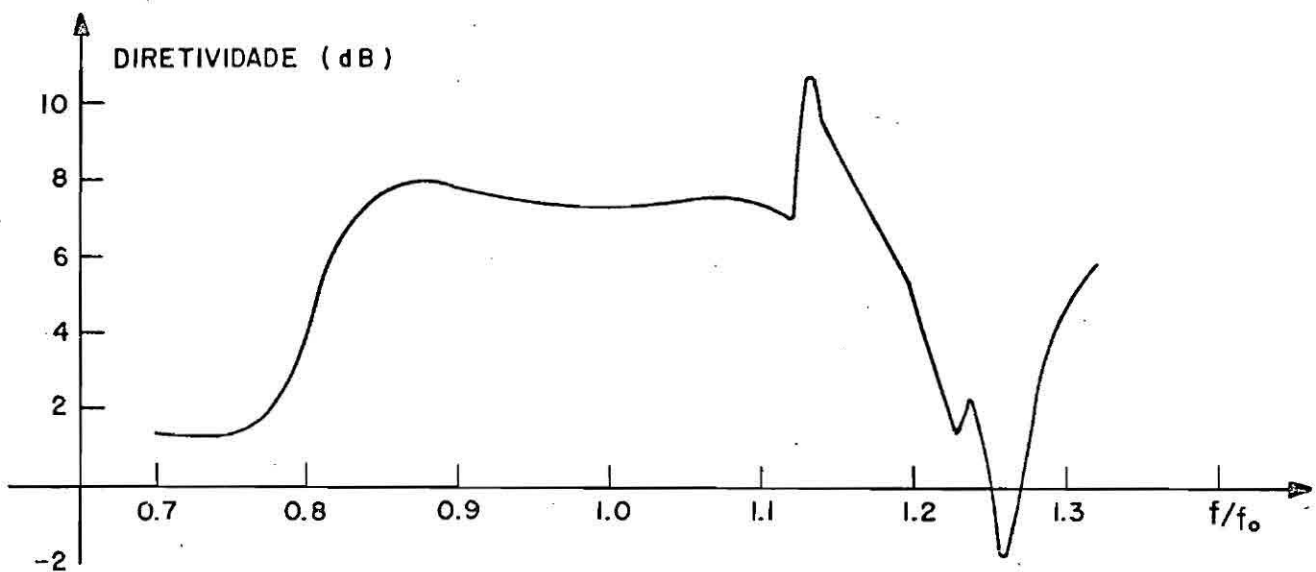


Fig.VII.4 - Resposta em frequência de uma antena Yagi, encontrado por Kajfez.

7.3 - ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO INICIAL

Como ocorre em qualquer problema de otimização, o valor final da diretividade depende muito da configuração inicial. Quanto ã escolha dessa configuração inicial poderia ser efetuada de dois modos:

1. Tomar aleatoriamente dentro dos limites permitidos, as alturas e os espaçamentos e por meio de várias tentativas procurar uma antena que possuía diretividade elevada.

2. Toma-se por configuração inicial uma antena com diretividade razoavelmente elevada.

A eficiência do primeiro método é duvidosa pois o número de tentativas até se conseguir um resultado desejado poderia ser muito grande. Desta maneira com a finalidade de se obter várias configurações otimizadas de antenas Yagi com 3 até 10 elementos, foram calculadas as diretvidades e a relação frente-costas para antenas com espaçamento entre os diretores uniformes e alturas dos diretores iguais.

Essas configurações foram tabuladas e constam nas Tabelas F.1 a F.8 do Apêndice F. O valor superior do quadro corresponde ã diretividade da antena com espaçamento entre os diretores d/λ e às alturas dos diretores h/λ , enquanto o valor inferior refere-se ã relação frente-

costas. A altura h_1 do elemento refletor é $0,51\lambda$ enquanto a do elemento excitador h_2 é $0,49\lambda$ e o espaçamento entre o refletor e o excitador é $0,250\lambda$.

A razão da escolha de uma antena com espaçamentos e alturas dos diretores uniformes como configuração inicial deve-se essencialmente à relativa rapidez com que essas configurações podem ser calculadas, possibilitando dessa maneira a elaboração de tabelas que indicam a configuração inicial.

Baseando-se nas tabelas do Apêndice F, foram determinadas algumas configurações otimizadas de antenas Yagi de 3 até 10 elementos que foram incluídas no Apêndice G.

CAPÍTULO VIII

COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL

Os diagramas de irradiação medidos no Laboratório de Antenas do INPE indicaram uma boa aproximação com os diagramas analíticos obtidos segundo a teoria de King-Middleton. As Figuras VIII.1 e VIII.2 contêm os diagramas de irradiação teóricos e experimentais no plano E e no plano H respectivamente de uma antena Yagi de oito elementos com espaçamentos e alturas dos diretores uniformes conforme a Tabela VIII.1. As Figuras VIII.3 e VIII.4 contêm os diagramas de irradiação no plano E e plano H, respectivamente, de uma antena Yagi otimizada a partir da antena uniforme, sendo a sua configuração a da Tabela VIII.2. Pode-se observar dessas quatro figuras que as curvas teóricas e experimentais concordam satisfatoriamente.

TABELA VIII.1

CONFIGURAÇÃO DE UMA ANTENA YAGI DE 8 ELEMENTOS

elemento	1	2	3	4	5	6	7	8
h_i/λ	0,255	0,245	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215
d_i/λ	0,00	0,25	0,55	0,85	1,15	1,45	1,75	2,05

$a = 0,003369\lambda$

Diretividade = 16.7 (12.2 dB)

TABELA VIII.2

CONFIGURAÇÃO DA ANTENA YAGI OTIMIZADA A PARTIR DA CONFIGURAÇÃO ANTERIOR

elemento	1	2	3	4	5	6	7	8
h_i/λ	0,244	0,244	0,220	0,214	0,213	0,215	0,215	0,215
d_i/λ	0,000	0,195	0,462	0,713	1,005	1,335	1,694	2,099

$$a = 0,003369\lambda$$

$$\text{Diretividade} = 26.3 \text{ (14.2dB)}$$

Conforme observado anteriormente, da análise do programa desenvolvido, foi verificado que os diagramas de irradiação e consequentemente a diretividade variavam sensivelmente com o raio dos elementos da antena Yagi. Essa variação conforme o caso atingia mais de 2dB mesmo que os raios envolvidos obedecessem à condição $a/\lambda \ll 1$, o que em primeira instância parecia ser muito excessiva.

Desse modo foram realizadas uma série de medidas tomando-se quatro valores para os raios dos elementos. Apesar do número relativamente reduzido de raios tomados, pode-se concluir das medições efetuadas que a diretividade de fato varia sensivelmente com o raios dos elementos, conforme a Tabela VIII.3. A configuração das alturas e dos espaçamentos é a mesma da antena otimizada de 8 elementos segundo a Tabela VIII.2.

TABELA VIII.3

VARIAÇÃO DA DIRETIVIDADE COM O RAIO a

Raio (a/λ)	0,00144	0,00216	0,00288	0,00360
Diretividade Teórica (dB)	13,1	13,7	14,2	14,2
Diretividade Medida (dB)	13,0	13,7	14,0	15,0

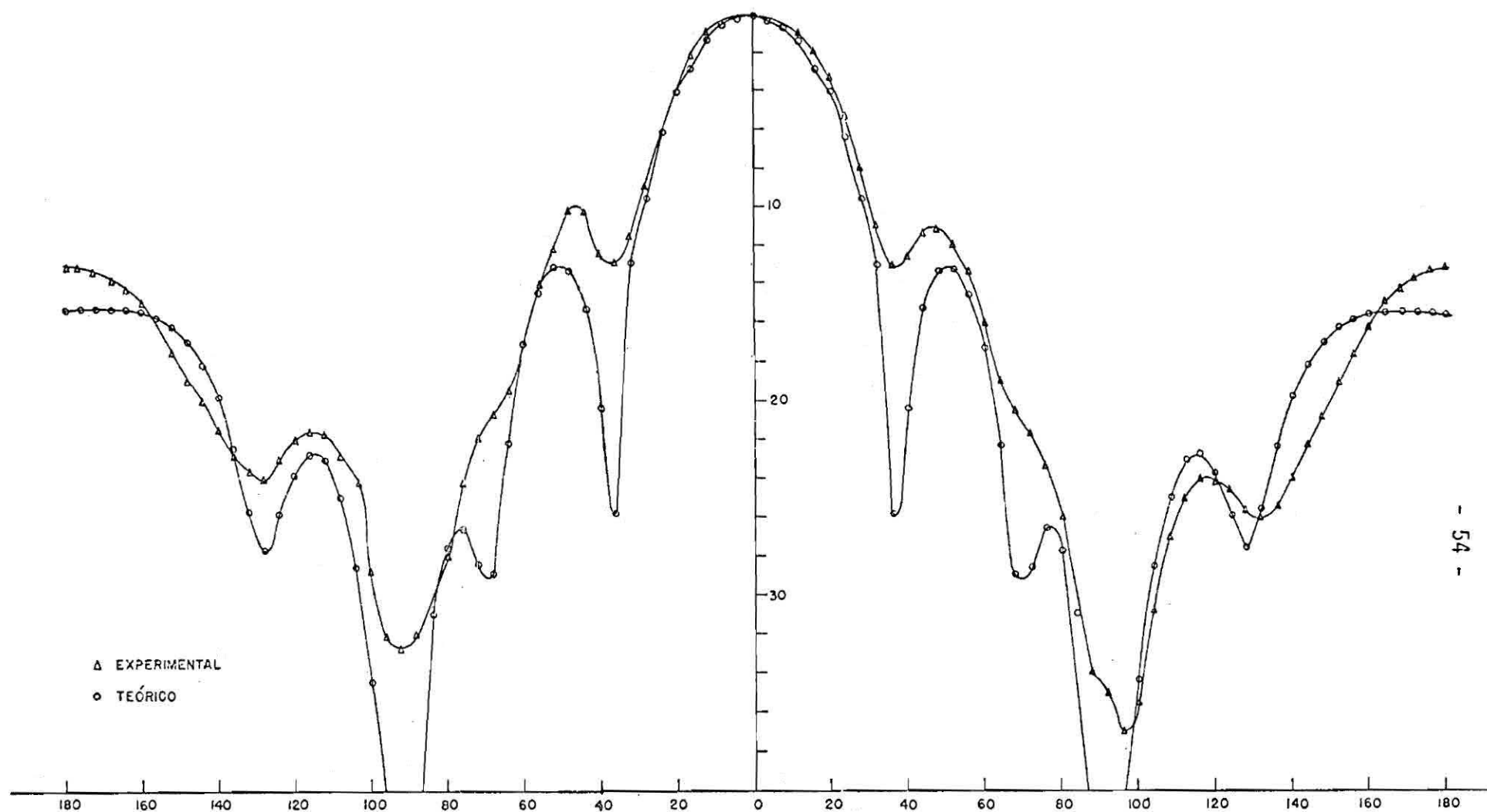


Fig. VIII.1 - Diagrama de irradiação no plano E de uma antena de 8 elementos com espaçamentos e alturas dos diretores uniformes.

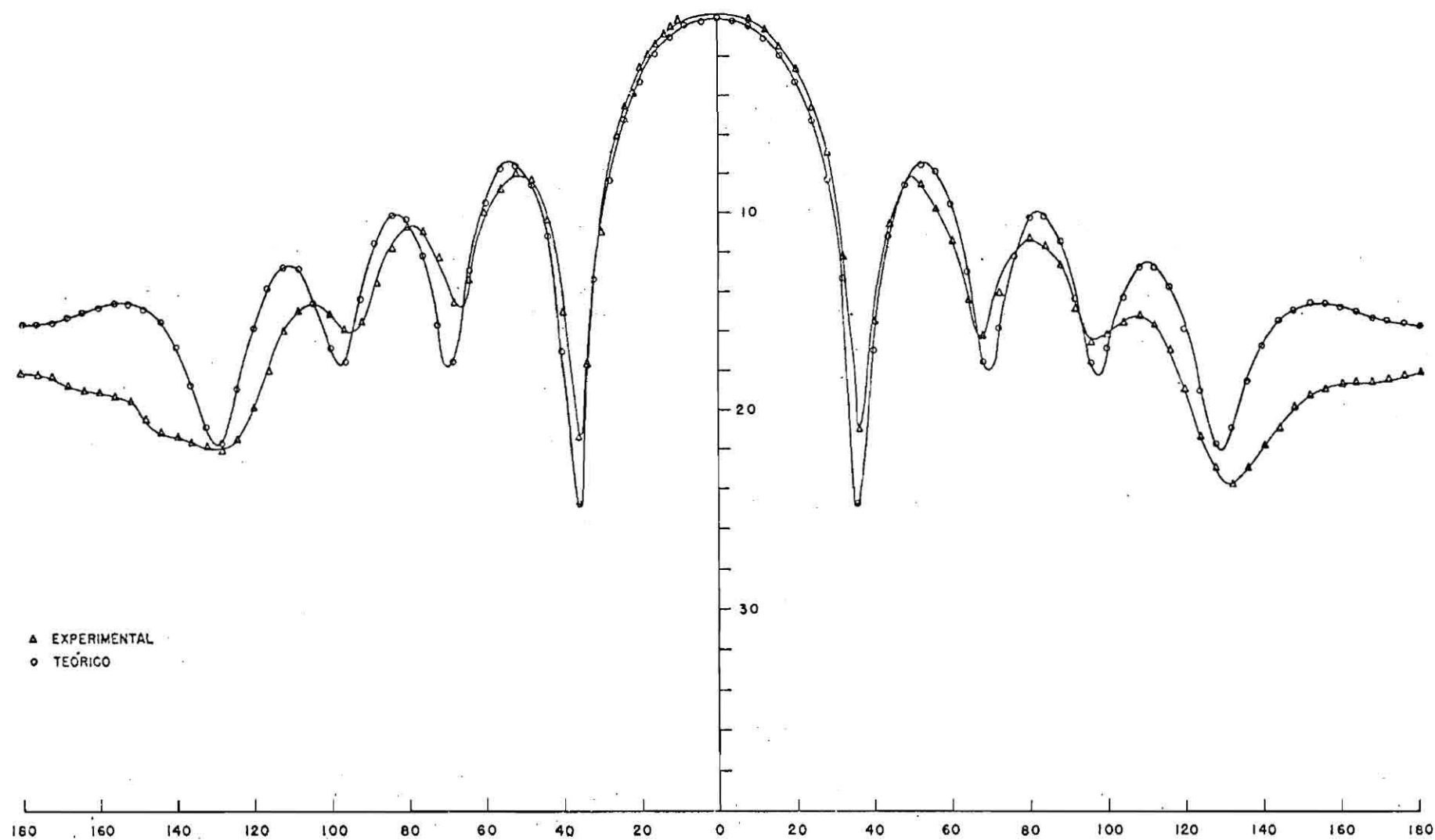


Fig. VIII.2 - Diagrama de irradiação no plano H de uma antena de 8 elementos com espaçamentos e alturas dos diretores uniformes.

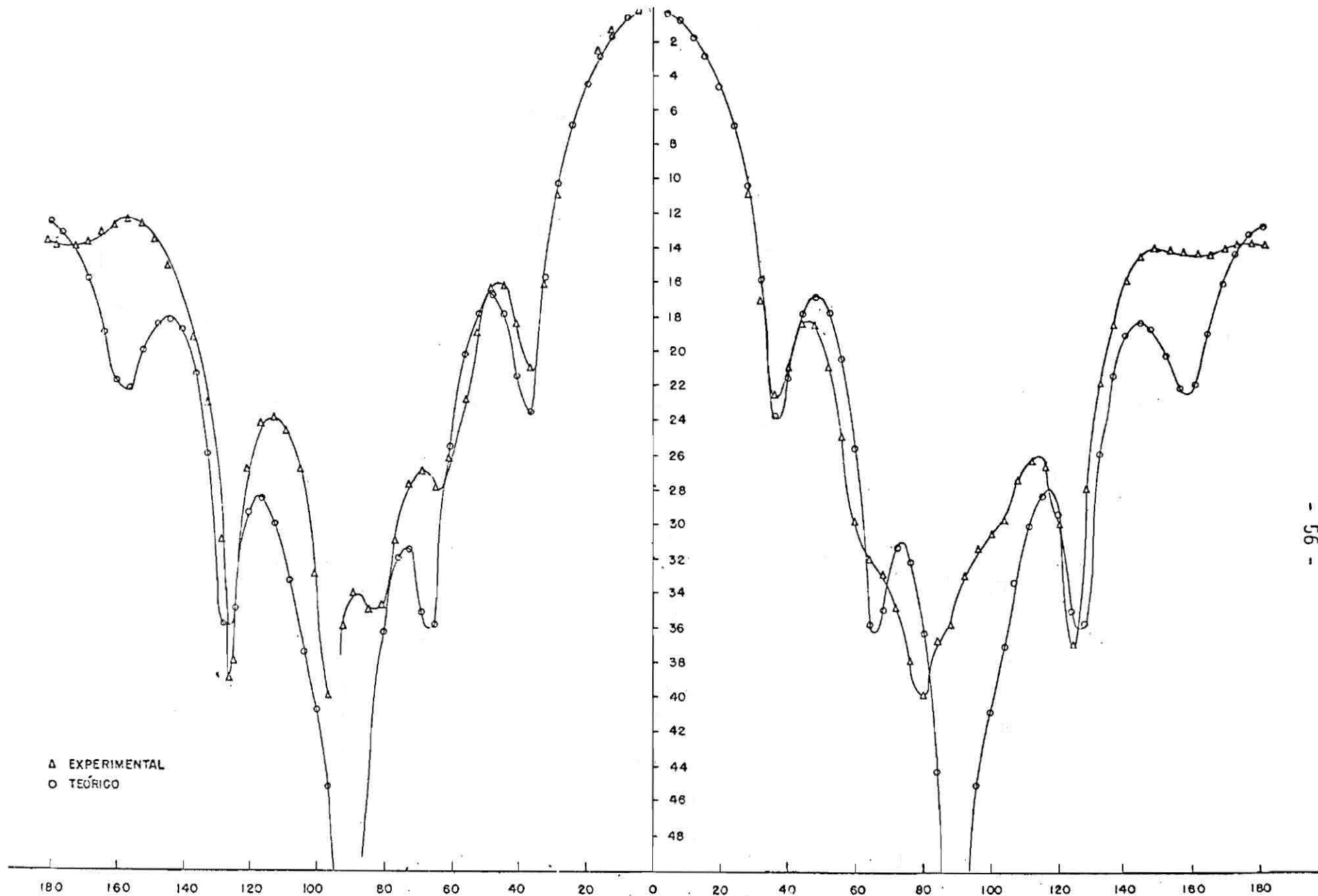


Fig. VIII.3 - Diagrama de irradiação no plano E de uma antena otimizada de 8 elementos.

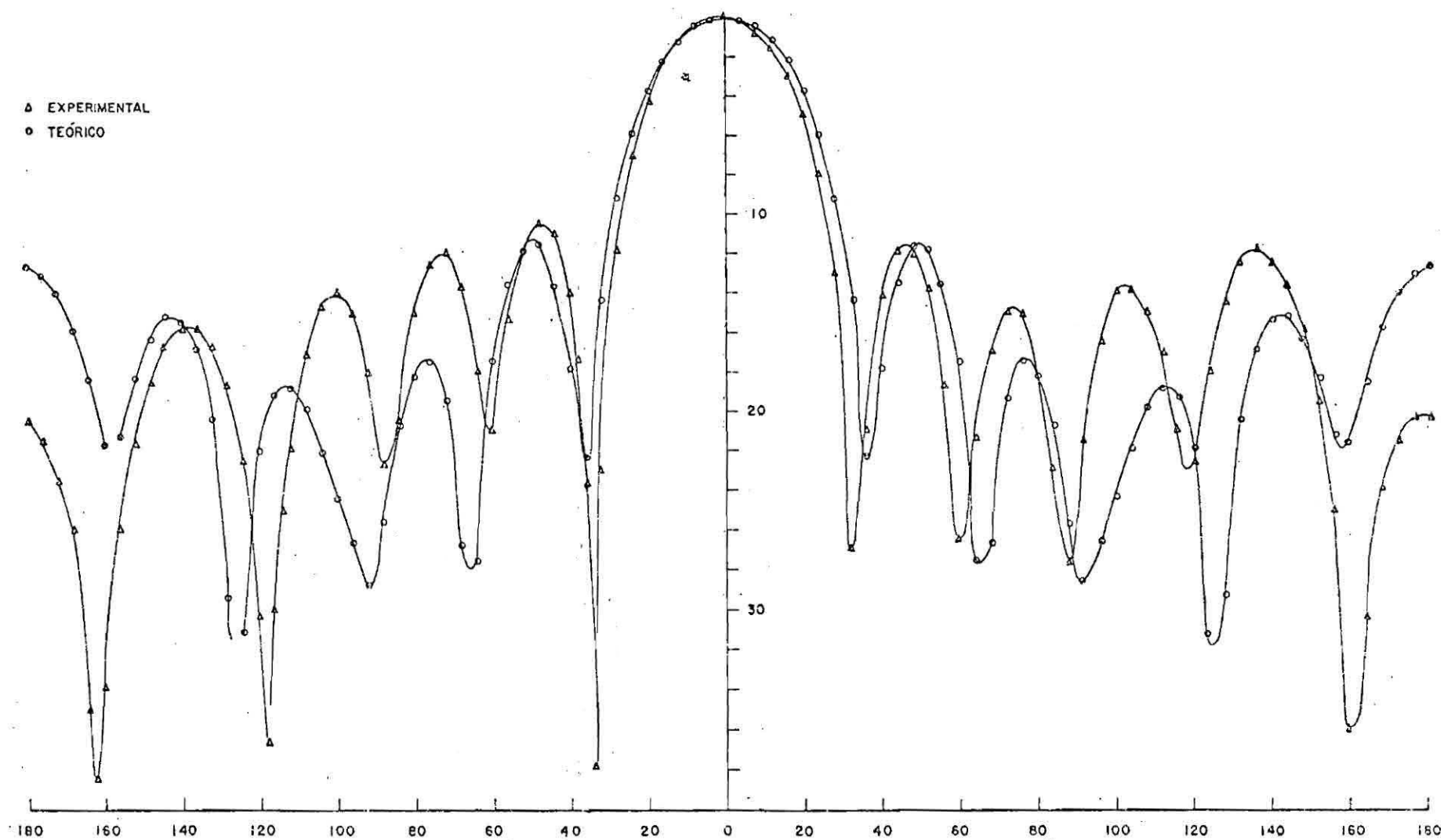


Fig. VIII.4 - Diagrama de irradiação no plano H de uma antena otimizada de 8 elementos.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

A formulação teórica apresentada para a determinação da distribuição de correntes nos elementos da antena Yagi não é senão um rearranjo das expressões desenvolvidas por King et al. (1968). Poderíamos ter apresentado apenas um resumo teórico, mas achamos conveniente que este trabalho contivesse todos os detalhes necessários a uma pesquisa posterior envolvendo antenas Yagi.

Quanto à otimização dos espaçamentos e alturas seguimos basicamente os trabalhos de Chen e Cheng (1973 e 1975), mas foram feitas algumas modificações tais como:

1. As expressões V.38 e VI.37 para o cálculo do vetor de perturbação para os espaçamentos e alturas respectivamente são diferentes daquelas apresentadas por Chen e Cheng. Essas fórmulas modificadas são mais simples, eliminando-se a necessidade de cálculo da integração dupla e a inversão de uma matriz de ordem $N \times N$, diminuindo portanto o tempo de computação.

2. As integrais da forma $\beta/2 \int_{h_i}^{h_i} S_m(h_i, z) \exp(j\beta z \cos \theta) \sin \theta dz$ possuem formas fechadas expressas por V.3, V.4 e V.5 o que não é explícito nas referências mencionadas.

3. As fórmulas para $[P_U]$ e $[P_D]$ para a otimização das alturas foram aqui deduzidas pois não constavam no trabalho original.

Quanto à parte experimental houve boa concordância entre os valores teóricos obtidos da teoria de King e os medidos através dos diagramas de irradiação. Uma conclusão interessante a que chegamos, das experiências realizadas, é que o raio dos elementos da antena Yagi influi muito nos diagramas de irradiação e na diretividade dessa antena. Pode-se conseguir variações na diretividade de mais de 2 dB mediante o ajuste do raio, desta forma não se podendo escolher arbitrariamente o diâmetro dos tubos metálicos que compõem a antena.

Utilizando-se o computador B-6700 da Burroughs Corporation, despendeu-se cerca de 3 minutos de processamento para o programa de otimização conjunta de espaçamentos e alturas de uma antena Yagi de 6 elementos, com as seguintes condições: 1. As alturas e os espaçamentos são perturbados dez vezes; 2. O método de integração utilizado é o de Kajfez sendo que as integrais da forma

$$\int_0^{h_i} S_m(h_i, z_i') \frac{e^{-j\beta\sqrt{(z_k - z_i')^2 + a^2}}}{\sqrt{(z_k - z_i')^2 + a^2}} dz_i'$$

são calculados tomando-se 60 intervalos enquanto as integrais

$$\int_0^{h_i} S_m(h_i, z_i') \frac{e^{-j\beta\sqrt{(z_k \pm z_i')^2 + b_{ki}^2}}}{\sqrt{(z_k \pm z_i')^2 + b_{ki}^2}} dz_i'$$

são determinadas considerando-se apenas 6 intervalos de integração.

Acreditamos que a análise teórica contida neste texto e o programa de otimização elaborado sejam de grande interesse nos projetos da antena Yagi. Entretanto visando a um melhor desempenho dessas antenas, podem ser feitas algumas sugestões para trabalhos adicionais, como por exemplo:

1. Determinação da impedância da antena, um parâmetro de muita importância nos projetos.
2. Introdução do cálculo das perdas nos elementos.
3. Otimização da diretividade pela variação dos raios dos elementos.
4. Inclusão de mais elementos refletores. A análise teórica de uma antena com dois refletores coplanares aos outros elementos não seria tão complexa visto que é semelhante ao que foi realizada neste trabalho, porém poder-se-ia colocar dois ou mais refletores simulando um plano de terra ortogonal ao plano dos elementos excitador e diretores. Acreditamos que com mais elementos refletores a relação frente-costa da antena seria melhorada, talvez com maior possibilidade para o último caso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em particular ao Dr. Clovis Solano Pereira pelo constante incentivo e valiosa orientação.

Devo muito a Jacques Volland pelas séries de medições efetuadas diligentemente no Laboratório de Antenas do INPE, e também à Srta. Maria Dorotéia Cabral e à Sra. Sueli Aparecida de Godoi Guratti pelas cuidadosas transcrições datilográficas dos meus manuscritos.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais, agradeço pela grande oportunidade e pelo auxílio material que me foram fornecidos para a realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- BLADEL, J. V. *Electromagnetic Fields*. New York, McGraw-Hill, 1974.
- CHEN, C. A.; CHENG, D. K. Optimum element spacing for Yagi-Uda array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 21: 615-623, Sep. 1973.
- . Optimum element heights for Yagi-Uda arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23: 8-15, Jan. 1975.
- HILDEBRAND, F. B. *Advanced Calculus for Applications*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1962.
- JASIK, H. *Antenna Engineering Handbook*. New York, McGraw-Hill, 1961.
- KAJFEZ, D. Numerical integration by deficient splines. *Proceedings of the IEEE (Proceedings Letters)*, 60: 1015-1016, Aug. 1972.
- . Nonlinear optimization extends the bandwidth of Yagi antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Communications)*, 23: 287-289, Mar. 1975.
- KING, R. W. P. *The Theory of Linear Antennas*. Cambridge, Harvard University Press, 1956.
- KING, R. W. P.; MACK, R. B.; SANDLER, S. S. *Arrays of Cylindrical Dipoles*. New York, Cambridge University Press, 1968.
- MEI, K. K. On the integral equations of thin wire antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 13: 374-378, May 1965.
- RICHMOND, J. H. Digital computer solutions of the rigorous equations for scattering problems. *Proceedings of the IEEE*, 53: 796-804, Aug. 1965.

APENDICE A

EXPRESSÕES DE $\frac{\partial \phi_x}{\partial d_k}$ e $\frac{\partial \psi_{dx}^h}{\partial d_k}$

$$\frac{\partial \phi_{kix}}{\partial d_k} = (1 - \delta_{ki}) \left(\frac{\partial \psi_{kix}(h_k)}{\partial d_k} \right) - \frac{\partial \psi_{kidx}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k \quad x = U, D \quad (A.1)$$

$$\frac{\partial \phi_{k2V}}{\partial d_k} = (1 - \delta_{k2}) \left(\frac{\partial \psi_{k2V}(h_k)}{\partial d_k} \right) - \frac{\partial \psi_{k2dV}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k \quad (A.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{kidx}^f}{\partial d_k} = (1 - \delta_{ki}) \Delta_2^{-1} \left[\left(\cos \frac{1}{4} \beta h_k - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) \frac{\partial w_{kix}(0)}{\partial d_k} \right. \\ \left. - \left(1 - \cos \frac{1}{2} \beta h_k \right) \frac{\partial w_{kix}(h_k/2)}{\partial d_k} \right] \quad x = U, D, V \quad (A.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{kidx}^h}{\partial d_k} = (1 - \delta_{ki}) \Delta_2^{-1} \left[\left(1 - \cos \beta h_k \right) \frac{\partial w_{kix}(h_k/2)}{\partial d_k} \right. \\ \left. - \left(\cos \frac{1}{2} \beta h_k - \cos \beta h_k \right) \frac{\partial w_{kix}(0)}{\partial d_k} \right] \quad x = U, D, V \quad (A.4) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial w_{kix}(t)}{\partial d_k} = \frac{\partial \psi_{kix}(t)}{\partial d_k} - \frac{\partial \psi_{kix}(h_k)}{\partial d_k} \quad x = U, D, V \quad (A.5)$$

- A.2 -

$$\frac{\partial \psi_{kix}(t)}{\partial d_k} = - (1 - \delta_{ki}) b_{ki} \int_{-h_i}^{h_i} \left(j\beta + \frac{1}{R_{ki}} \right) S_m(h_i, z') \frac{K_{ki}}{R_{ki}} dz' \quad x = U, D, V$$

(A.6)

$$K_{ki} = \frac{e^{-R_{ki}}}{R_{ki}}$$

$$R_{ki} = \sqrt{(t-z')^2 + b_{ki}^2}$$

$$S_1(h_i, z') = M_{0zi}(z') = \sin \beta (h_i - |z'|)$$

$$S_2(h_i, z') = F_{0zi}(z') = \cos \beta z' - \cos \beta h_i$$

$$S_3(h_i, z') = H_{0zi}(z') = \cos \frac{1}{2} \beta z' - \cos \frac{1}{2} \beta h_i$$

APÊNDICE B

EXPRESSÕES DE $[P_U]$ E $[P_D]$ (OTIMIZAÇÃO DOS ESPAÇAMENTOS)

$$\begin{aligned}
 [P_U]_{kk} = & \left[(1 - \delta_{k2}) \frac{\partial \psi_{k2dV}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k - \frac{\partial \psi_{k2V}(h_k)}{\partial d_k} \right] A_2 + \\
 & \sum_{i=1}^N (1 - \delta_{ki}) \left\{ B_i \left[\frac{\partial \psi_{kidU}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k - \frac{\partial \psi_{kiU}(h_k)}{\partial d_k} \right] + \right. \\
 & \left. D_i \left[\frac{\partial \psi_{kidD}}{\partial d_k} \cos \beta h_k - \frac{\partial \psi_{kiD}(h_k)}{\partial d_k} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

$$\begin{aligned}
 [P_U]_{ki} = & B_i \left[\frac{\partial \psi_{kiU}(h_k)}{\partial d_k} - \frac{\partial \psi_{kidU}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k \right] + \\
 & D_i \left[\frac{\partial \psi_{kiD}(h_k)}{\partial d_k} - \frac{\partial \psi_{kidD}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k \right] \quad k \neq i, i \neq 2
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

$$\begin{aligned}
 [P_U]_{k2} = & A_2 \left[\frac{\partial \psi_{k2V}(h_k)}{\partial d_k} - \frac{\partial \psi_{k2dV}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k \right] + \\
 & B_2 \left[\frac{\partial \psi_{k2U}(h_k)}{\partial d_k} - \frac{\partial \psi_{kidU}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k \right] +
 \end{aligned}$$

- B.2 -

$$D_2 \left[\frac{\partial \psi_{k2D}(h_k)}{\partial d_k} - \frac{\partial \psi_{k2dD}^f}{\partial d_k} \cos \beta h_k \right] \quad k \neq 2 \quad (B.3)$$

$$[P_D]_{kk} = - A_2 (1 - \delta_{k2}) \frac{\partial \psi_{k2dV}^h}{\partial d_k} - \sum_{i=1}^N (1 - \delta_{ki}) (B_i \frac{\partial \psi_{kidU}^h}{\partial d_k} + D_i \frac{\partial \psi_{kidD}^h}{\partial d_k}) \quad (B.4)$$

$$[P_D]_{ki} = \delta_{i2} A_2 \frac{\partial \psi_{kidV}^h}{\partial d_k} + B_i \frac{\partial \psi_{kidU}^h}{\partial d_k} + D_i \frac{\partial \psi_{kidD}^h}{\partial d_k} \quad k \neq i \quad (B.5)$$

APÊNDICE C

EXPRESSÕES DE $\frac{\partial \phi_x}{\partial h_i}, \frac{\partial \psi_{dx}^h}{\partial h_i}, \frac{\partial \phi_x}{\partial h_k}, \frac{\partial \psi_{dx}^h}{\partial h_k}$

Devido à frequência com que aparecem, adotaremos os seguintes símbolos para as expressões abaixo:

$$\tau_1 = 1 - \cos \beta h_k; \quad \lambda_1 = \cos \frac{1}{2} \beta h_k - \cos \beta h_k; \quad \gamma_1 = \sin \beta h_k - \frac{1}{2} \beta h_k$$

$$\tau_2 = 1 - \cos \frac{1}{2} \beta h_k; \quad \lambda_2 = \cos \frac{1}{4} \beta h_k - \cos \frac{1}{2} \beta h_k; \quad \gamma_2 = \frac{1}{2} \sin \frac{1}{2} \beta h_k - \frac{1}{4} \sin \frac{1}{4} \beta h_k$$

Hã dois tipos de derivadas, uma em relação a h_i e outra relativa a h_k . Cabe ressaltar que:

$$\left. \frac{\partial I}{\partial h_i} \right|_{i=j} \neq \left. \frac{\partial I}{\partial h_k} \right|_{k=j} \quad \text{sendo} \quad I = \int_{-h_i}^{h_i} S_m(h_i, z') K_{ki} dz'$$

Aparente contradição resulta do fato de tratarmos h_i e h_k como variáveis independentes. Essa abordagem é conveniente pois simplifica as deduções das expressões para derivadas. De acordo com esse tratamento tem-se:

- C.2 -

$$\frac{\partial I_{kk}}{\partial h_j} = \frac{\partial I_{ki}}{\partial h_i} \Delta h_i \Big|_{i=j} + \frac{\partial I_{ki}}{\partial h_k} \Delta h_k \Big|_{k=j}$$

DERIVADAS $\frac{\partial}{\partial h_i}$

$$\frac{\partial \psi_{kix}}{\partial h_i}(t) = \int_{-h_i}^{h_i} K_{ki} \frac{\partial S_m}{\partial h_i} dz' \quad x = U, D, V \quad (C.1)$$

$$\frac{\partial W_{kix}}{\partial h_i}(t) = \frac{\partial \psi_{kix}}{\partial h_i}(t) - \frac{\partial \psi_{kix}}{\partial h_i}(h_k) \quad (C.2)$$

$$\frac{\partial \psi_{kidx}^f}{\partial h_i} = \Delta_2^{-1} \left\{ \lambda_2 \frac{\partial W_{kix}(0)}{\partial h_i} - \tau_2 \frac{\partial W_{kix}(h_k/2)}{\partial h_i} \right\} \quad x = U, D, V \quad (C.3)$$

$$\frac{\partial \phi_{kix}}{\partial h_i} = \frac{\partial \psi_{kix}(h_k/2)}{\partial h_i} - \cos \beta h_k \frac{\partial \psi_{kidx}^f}{\partial h_i} \quad x = U, D \quad (C.4)$$

$$\frac{\partial \psi_{kidx}^h}{\partial h_i} = \Delta_2^{-1} \left\{ \tau_1 \frac{\partial W_{kix}(h_k/2)}{\partial h_i} - \lambda_1 \frac{\partial W_{kix}(0)}{\partial h_i} \right\} \quad x = U, D \quad (C.5)$$

$$\frac{\partial \phi_{k2V}}{\partial h_i} = \frac{\partial \psi_{kix}(h_k/2)}{\partial h_i} \Big|_{i=2} - (1 - \delta_{k2}) \cos \beta h_k \frac{\partial \psi_{kidx}^f}{\partial h_i} \Big|_{i=2} \quad (C.6)$$

$$\frac{\partial \psi_{k2dV}^h}{\partial h_i} = \Delta_2^{-1} \left\{ \tau_1 \frac{\partial W_{kiV}(h_k/2)}{\partial h_i} \Big|_{i=2} - \lambda_1 \frac{\partial W_{kiV}(0)}{\partial h_i} \Big|_{i=2} \right\} \quad k \neq 2 \quad (C.7)$$

$$\frac{\partial \psi_{22dV}^h}{\partial h_i} = \Delta_1^{-1} \left\{ \text{sen} \beta h_k \frac{\partial W_{2iV}(h_k/2)}{\partial h_i} \Big|_{i=2} - \text{sen} \frac{1}{2} \beta h_k \frac{\partial W_{2iV}(0)}{\partial h_i} \Big|_{i=2} \right\} \quad (C.8)$$

DERIVADAS $\frac{\partial}{\partial h_k}$

$$\frac{\partial \psi_{kix}}{\partial h_k} (\sigma h_k) = -\sigma \int_{-h_i}^{h_i} (\sigma h_k - z') (j\beta + \frac{1}{R_{ki}}) S_m(h_i, z') \frac{K_{ki}}{R_{ki}} dz' \quad x=U,D,V \quad (C.9)$$

$$\frac{\partial W_{kix}}{\partial h_k} (t) = \frac{\partial \psi_{kix}}{\partial h_k} (t) - \frac{\partial \psi_{kix}}{\partial h_k} (h_k) \quad x=U,D,V \quad (C.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{kidx}^f}{\partial h_k} = \Delta_2^{-1} \left\{ \beta \left[\gamma_2 W_{kix}(0) - \frac{1}{2} \text{sen} \frac{1}{2} \beta h_k W_{kix}(h_k/2) \right] - \psi_{kidx}^f \frac{\partial}{\partial h_k} \Delta_2 + \right. \\ \left. + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial h_k} W_{kix}(0) - \tau_2 \frac{\partial}{\partial h_k} W_{kix}(h_k/2) \right\} \quad x=U,D,V \quad (C.11) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \phi_{kix}}{\partial h_k} = \frac{\partial \psi_{kix}(h_k)}{\partial h_k} - \cos \beta h_k \frac{\partial \psi_{kidx}^f}{\partial h_k} + \beta \text{sen} \beta h_k \psi_{kidx}^f \quad x=U,D \quad (C.12)$$

- C.4 -

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{kix}^h}{\partial h_k} = \Delta_2^{-1} \left\{ \beta \left[\text{sen} \beta h_k W_{kix}(h_k/2) - \gamma_1 W_{kix}(0) \right] - \psi_{kix}^h \frac{\partial \Delta_2}{\partial h_k} + \right. \\ \left. + \tau_1 \frac{\partial W_{kix}(h_k/2)}{\partial h_k} - \lambda_1 \frac{\partial W_{kix}(0)}{\partial h_k} \right\} \quad x=U,D \end{aligned} \quad (C.13)$$

$$\frac{\partial \phi_{k2V}}{\partial h_k} = \frac{\partial \psi_{k2V}(h_k)}{\partial h_k} - (1 - \delta_{k2}) (\cos \beta h_k \frac{\partial \psi_{k2V}^f}{\partial h_k} - \beta \text{sen} \beta h_k \psi_{k2V}^f) \quad (C.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{k2dV}^h}{\partial h_k} = \Delta_2^{-1} \left\{ \beta \left[\text{sen} \beta h_k W_{k2V}(h_k/2) - \gamma_1 W_{k2V}(0) \right] - \psi_{k2dV}^h \frac{\partial \Delta_2}{\partial h_k} + \right. \\ \left. + \tau_1 \frac{\partial W_{k2V}}{\partial h_k} - \lambda_1 \frac{\partial W_{k2V}(0)}{\partial h_k} \right\} \quad k \neq 2 \end{aligned} \quad (C.15)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \psi_{22dV}^h}{\partial h_k} \right|_{k=2} = \Delta_2^{-1} \left\{ \beta \left[\cos \beta h_k W_{22V}(h_k/2) - \frac{1}{2} \cos \frac{1}{2} \beta h_k W_{22V}(0) \right] - \right. \\ \left. - \psi_{22dV}^h \frac{\partial \Delta_1}{\partial h_k} + \text{sen} \beta h_k \frac{\partial W_{k2V}(h_k/2)}{\partial h_k} \right|_{k=2} - \\ \left. - \text{sen} \frac{1}{2} \beta h_k \frac{\partial W_{k2V}(0)}{\partial h_k} \right|_{k=2} \end{aligned} \quad (C.16)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Psi_{22dV}^m}{\partial h_k} = \Delta_1^{-1} \left\{ \beta \left[\gamma_2 W_{22V}(0) - \frac{1}{2} \operatorname{sen} \frac{1}{2} \beta h_k W_{22V}(h_k/2) \right] - \Psi_{22dV}^m \frac{\partial \Delta_1}{\partial h_2} + \right. \\
 \left. + \lambda_2 \left[\frac{\partial W_{2iV}(0)}{\partial h_i} \Big|_{i=2} + \frac{\partial W_{k2V}(0)}{\partial h_k} \Big|_{k=2} \right] - \right. \\
 \left. + \tau_2 \left[\frac{\partial W_{2iV}(h_k/2)}{\partial h_i} \Big|_{i=2} + \frac{\partial W_{k2V}(h_k/2)}{\partial h_k} \Big|_{k=2} \right] \right\} \quad (C.17)
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial h_2} = A_2 \left\{ \beta \tan \beta h - \frac{1}{\Psi_{22dV}^m} \frac{\partial}{\partial h_2} \Psi_{22dV}^m \right\} \quad (C.18)$$

$$\frac{\partial \Delta_1}{\partial h_k} = \beta (\lambda_2 \cos \beta h_k + \gamma_2 \operatorname{sen} \beta h_k - \frac{1}{2} \cos \frac{1}{2} \beta h_k + \frac{1}{2} \cos \beta h_k) \quad (C.19)$$

$$\frac{\partial \Delta_2}{\partial h_k} = \beta (\lambda_2 \operatorname{sen} \beta h_k + \tau_1 \gamma_2 - \frac{1}{2} \lambda_1 \operatorname{sen} \frac{1}{2} \beta h_k - \tau_2 \gamma_1) \quad (C.20)$$

APÊNDICE D

EXPRESSÕES DE $[P_U]$ E $[P_D]$ (OTIMIZAÇÃO DAS ALTURAS)

$$\begin{aligned}
 [P_U]_{kk} = - \left\{ \sum_{\ell=1}^N (B_{\ell} \frac{\partial \phi_{k\ell U}}{\partial h_k} + D_{\ell} \frac{\partial \phi_{k\ell D}}{\partial h_k}) + B_k \frac{\partial \phi_{ki U}}{\partial h_i} \Big|_{i=k} + \right. \\
 \left. + D_k \frac{\partial \phi_{ki D}}{\partial h_D} \Big|_{i=k} + A_2 \frac{\partial \phi_{k2V}}{\partial h_k} + \delta_{k2} (A_2 \frac{\partial \phi_{ki V}}{\partial h_i} \Big|_{i=2} + \right. \\
 \left. + \phi_{k2V} \frac{\partial A_2}{\partial h_2} \right\} \quad (D.1)
 \end{aligned}$$

$$[P_U]_{ki} = - \left\{ B_i \frac{\partial \phi_{ki U}}{\partial h_i} + D_i \frac{\partial \phi_{ki D}}{\partial h_i} + \delta_{i2} (A_2 \frac{\partial \phi_{ki V}}{\partial h_i} + \phi_{k2V} \frac{\partial A_2}{\partial h_2}) \right\} \quad (D.2)$$

$$\begin{aligned}
 [P_D]_{kk} = - \left\{ \sum_{\ell=1}^N (B_{\ell} \frac{\partial \psi_{k\ell dU}^h}{\partial h_k} + D_{\ell} \frac{\partial \psi_{k\ell dD}^h}{\partial h_k}) + B_k \frac{\partial \psi_{kidU}^h}{\partial h_i} \Big|_{i=k} + \right. \\
 \left. + A_2 \frac{\partial \psi_{k2dV}^h}{\partial h_k} + \delta_{k2} (A_2 \frac{\partial \psi_{kidV}^h}{\partial h_i} \Big|_{i=2} + \psi_{k2dV}^h \frac{\partial A_2}{\partial h_2}) + \right. \\
 \left. + D_k \frac{\partial \psi_{kidD}^h}{\partial h_i} \Big|_{i=k} \right\} \quad (D.3)
 \end{aligned}$$

$$[P_D]_{ki} = - \left\{ B_i \psi_{kidU}^h + D_i \psi_{kidD}^h + \delta_{i2} \left(A_2 \frac{\partial \psi_{kidV}^h}{\partial h_i} + \psi_{k2dV}^h \frac{\partial A_2}{\partial h_2} \right) \right\} \quad (D.4)$$

- E.1 -

APÊNDICE E

LISTAGEM DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA A OTIMIZAÇÃO DA ANTENA YAGI-UDA

- E.2 -

```

SUBROUTINE OTIMI(N,A,B,H,LAMBDA,NP,NESP,NDIAG,MDIF)
C*****
C  ESTA SUBROTINA DETERMINA :
C      1. A DIRETIVIDADE DA ANTENA YAGI
C      2. OPCIONALMENTE O DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO
C      3. OPCIONALMENTE A OTIMIZAÇÃO DOS ESPACAMENTOS
C      4. OPCIONALMENTE A OTIMIZAÇÃO DAS ALTURAS DOS ELEMENTOS
C*****
C  N...NUMERO DE ELEMENTOS DA ANTENA YAGI,NO MAXIMO 10
C  A...RAIO DAS HASTES
C  B(J)...ABSCISSA DA J-ESIMA HASTE
C  B(2)...ABSCISSA DA HASTE EXCITADORA
C  H(J)...ALTURA DA J-ESIMA HASTE
C  H(2)...ALTURA DA HASTE EXCITADORA
C  LAMBDA ... COMPRIMENTO DE ONDA
C  NP...NUMERO DE PERTURBAÇÕES
C      SE NP=0, A SUBROTINA APENAS FORNECE AS CARACTERISTICAS DA
C      ANTENA YAGI
C  NESP...SE NESP.EQ.1, A SUBROTINA OTIMIZA ESPACAMENTO
C      SE NESP.NE.1, A SUBROTINA OTIMIZA AS ALTURAS
C  NDIAG...SE NDIAG=1,A SUBROTINA FORNECE O DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO
C  MDIF...NUMERO DE INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO
C*****
C  COMPLEX A2,PSIM,X(20),E,EX,FVN,AX(30,60),TCIR(4),CA1,CCOSA,UCCSS,
C  CCS1,RL(4),R1(4),INTEG(4,4),PSID,WZ,W2,PSIU,WZ,W2,PSIFD,PSIFU,
C  CPSIFU,FID,PSIH,FID,PSIV2,WVZ,WV2,PSIFV2,PSIHV2,FIV2,BX(20),RLZ(4)
C  C,CCOZA,CCOZS,RLZ(4),TOTRZ(4),INTEGZ(4,4),FIDZ(10,10),WDZZ,W2ZZ,WU
C  CZZ,WUZZ,PSIHJ(10,10),PSIHUJ(10,10),PSIHJZ(10,10),PSIHUZ(10,10),F
C  CIUZ(10,10),PSHV2P(10),WVZZ,PSHV2J(10),PSHVZZ(10),PSIHDX(10),PS
C  CIHUX(10),FIDJ(10),FIUX(10),FIV2X,PSHV2X,P2(20,10),P2K,P3K,C2(10,10
C  C),Q3(10,10),DKK,DI(10),DK(10),GCCN,GCCN,WVZZ,ZVN
C  COMPLEX PSIDJ,PSIUJ,W2J,WUJ,WUJ,PSIV2J,WVZJ,WVZJ,PSIFUJ,PSIFDJ,
C  CPSFV2J,PSIMJ,FIV2J(10),FIDJ(10,10),FIUJ(10,10),WUJ
C  COMPLEX PSIDZ,PSIUZ,PSIV2Z,PSIFUZ,PSIFDZ,PSFV2Z,PSIMZ,FIV2Z(10)
C  COMPLEX XAPA1,XAPA2,XAPA3,XAPA4,ZAPA1,ZAPA2,ZAPA3,ZAPA4,DPSIM,DA2,
C  CFIV2P(10)
C  COMPLEX ACCZ,SCCZ,ACZ(3),ASZ(3),ACCN(3),SCCN(3),DSS(3),DAS(3)
C  COMPLEX WW,WS,WA,CAZ
C  COMPLEX AW,SW,WP
C  REAL LAMBDA,MO,LGA,LGS
C  DIMENSION H( 1),H( 1),FM(4),ZK(3),CNL1(10),CNL2(10),SNL1(10),SNL2(
C  C10),BETAL(10),GMLZ(10),DMLZ(10),CNL4(10),GAMHO(20),HB(10),ALFX(10)
C  C,ALFZ(10),AGX(10),AGZ(10),DALTA2(10),DL(10),DB(10),BD(10),SNL4(10)
C  DIMENSION CAMPL(2,91),PT(20,2),YLIMS(10,2)
C  DIMENSION DFM(4),RRA(3),ZA1(3),RRS(3),ZS1(3)
C  COMMON AX
C  B1 = B(1)
C  DO 813 KM=1,N
C  R(KM) = B(KM) - B1
813 CONTINUE
C  WRITE(6,25)A,LAMBDA,N
25  FORMAT(/,/,A=,F10.7,5X,/,LAMBDA =,F10.7,5X,/,N =,I4)
C  WRITE(6,26)(H(J),J=1,N)
26  FORMAT(/,/,ALTURAS,/,10F7.4)
C  WRITE(6,27)(B(J),J=1,N)
27  FORMAT(/,/,ESPACAMENTO,/,10F7.3)
C  IF(NESP.EQ.1)ALVO = .16
C  IF(NESP.NE.1)ALVO = .02
C  A2 = 2*A

```

```

C
C      MIG...NUMERO DE INTERVALOS DE INTEGRACAO PARA J=K
C      MDIF...NUMERO DE INTERVALOS DE INTEGRACAO PARA J.NE.K
C
      MIG = 10*MDIF
C
      V02 = 1.
      PI = 3.14159265
      BETA = 2.*PI/LAMBDA
      NITER = NP
      IF(NP.EQ.0)NITER=1
      ILOP = 1
      GANAN = 0.
3. CONTINUE
      DO 11 K=1,N
      P = BETA*P(K)
      BETAL(K) = P
      CNL4(K) = COS(P/4.)
      CNL2(K) = 2*CNL4(K)*CNL4(K)-1
      CNL1(K) = 2*CNL2(K)*CNL2(K)-1
      IF(K.EQ.2)COSH2 = CNL1(2)
      SNL4(K) = SIN(P/4)
      SNL2(K) = 2*SNL4(K)*CNL4(K)
      SNL1(K) = 2.*SNL2(K)*CNL2(K)
      ALFX(K) = CNL4(K) - CNL2(K)
      ALFZ(K) = 1. - CNL2(K)
      AGX(K) = 1. - CNL1(K)
      AGZ(K) = CNL2(K) - CNL1(K)
      DALIA2(K) = AGX(K)*ALFX(K) - AGZ(K)*ALFZ(K)
      GMLZ(K) = SNL1(K) - BETAL(K)*CNL1(K)
11  CNL2(K) = 2.*SNL2(K) - BETAL(K)*CNL2(K)
      BJH2 = BETAL(2)
      SENP2 = SNL1(2)
      COSH2 = CNL1(2)
      FX = 1. - COSH2
C
C      INICIO DA MALHA K; DETERMINACAO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ FI,PSIHU
C
51  DO 12 K=1,N
      P = BETAL(K)
      ACOSP = CNL1(K)
      ACOSP2 = CNL2(K)
      ACOSP4 = CNL4(K)
      ASENK = SNL1(K)
      ASENK2 = SNL2(K)
      ALFK = ALFX(K)
      ALFS = ALFZ(K)
      LGA = AGX(K)
      LGS = AGZ(K)
      DELTA2 = DALIA2(K)
      IF(NESP.NE.1)GAMA1 = ASENK - ASENK2/2
      IF(NESP.NE.1)GAMA2 = ASENK2/2 - SNL4(K)/4
      IF(NESP.NE.1)DDL2 = ASENK*ALFK+LGA*GAMA2-ASENK2*LGS/2-ALFS*GAMA1
      ZK(1) = 0.0
      ZK(2) = P/2.0
      ZK(3) = P
C
C      INICIO DA MALHA J; CALCULOS DOS ELEMENTOS DA MATRIZ FI,PSIHU
C
      DO 32 J=1,N
      BETJ = BETAL(J)

```

```

      BETJ2 = BETJ/2.
      COSA1 = CNL1(J)
      COSA2 = CNL2(J)
      SENA1 = SNL1(J)
      IF (K-J)14,15,14
14  BE = BETA*(R(K)-R(J))
      M = MDIF
      GO TO 16
15  BE = BETA*A
      M = MIG
16  DYZE = BETJ/M
      BE2 = BE*BE
      MX = M + 1

C
C      CALCULO DOS INTEGRAIS FIMS E PSIMS
C      OS INTEGRAIS SAO CALCULADOS POR SIMPSON ** POLINOMIU DE
C      SEXTO GRAU
C      VAVA ... PESO CORRESPONDENTE A APROXIMACAO POR SIMPSON
C
      IF(NESP.NE.1.OR.J.NE.K)GO TO 65
      IF(ILOP.NE.1)GO TO 71
65  IQ = 1
      DO 74 JK=1,3
      DO 74 JW=1,4
      INTEG(JW,JK) = (0.,0.)
74  INTEGZ(JW,JK) = (0.,0.)
      DO 36 L=1,MX

C
C      ASSINALACAO DOS PESOS DE SIMPSON DE SEXTO GRAU
C
      VC = 1
      IF(L.EQ.MX)VC=-1.
      IF(IQ.EQ.1)VAVA = 14
      IF(IQ.EQ.2)VAVA=16
      IF(L.EQ.1)VAVA=7
      IF(L.EQ.MX)VAVA=7
      IQ = IQ + 1
      IF(IQ.GT.2)IQ=1

C
      ZYL = (L-1)*DYZE
      DO 17 JK=1,3
      ZKA1 = ZYL +ZK(JK)
      GRA1 = BE2 + ZKA1*ZKA1
      RA1 = SQRT(GRA1)
      CA1 = COS(RA1) + (0.,-1.)*SIN(RA1)
      DCOSA = CA1/RA1
      IF(JK.EQ.1)GO TO 99
      ZKS1 = ZYL-ZK(JK)
      QRS1 = BE2 + ZKS1*ZKS1
      RS1 = SQRT(QRS1)
      CS1 = COS(RS1) + (0.,-1.)*SIN(RS1)
      DCOSS = CS1/RS1
      GO TO 100
99  ZKS1 = ZKA1
      RS1 = RA1
      QRS1 = GRA1
      DCOSS = DCOSA
100 CONTINUE
      IF(K.EQ.J.AND.NESP.EQ.1.AND.L.NE.1.AND.L.NE.MX)GO TO 17
      IF(NP.EQ.0.AND.L.NE.1.AND.L.NE.MX)GO TO 17
      IF(JK.EQ.1.AND.NESP.NE.1.AND.L.NE.1.AND.L.NE.MX)GO TO 17

```

```

GCON = DCOSA/RA1
DIA = 1./RA1
ACQZ = DIA + (0.,1.)
DCQZA = GCON*ACQZ
IF(NESP.NE.1)DCQZA = DCQZA*ZKA1
DCON = DCOSS/RS1
DIS = 1./RS1
SCQZ = DIS + (0.,1.)
DCQZS = DCON*SCQZ
IF(NESP.NE.1)DCQZS = -DCQZS*ZKS1
IF(L.NE.1.AND.L.NE.MX)GO TO 90
RRA(JK) = RA1
ZA1(JK) = ZKA1
RRS(JK) = RS1
ZS1(JK) = ZKS1
ACZ(JK) = ACQZ
ASZ(JK) = SCQZ
CAS(JK) = DCOSA
DSS(JK) = DCOSS
ACON(JK) = GCON
SCON(JK) = DCON
90 CONTINUE
RLZ(JK) = DCQZA + DCQZS
17 RL(JK) = DCOSA + DCOSS
COZ2 = COS(ZYL/2)
COZ1 = 2*COZ2*COZ2-1
FM(1) = COZ1
FM(2) = COZ2
FM(3) = 1.
IF(J.EQ.2)FM(4) = SIN(ZYL)
IF(L.NE.1.AND.L.NE.MX)GO TO 50
DFM(2) = -SIN(ZYL/2)/2
DFM(1) = 4*DFM(2)*COZ2
DFM(3) = 0.
DFM(4) = COZ2
50 CONTINUE
DO 36 JK=1,3
DO 36 JW=1,4
E = FM(JW)*RL(JK)
INTEG(JW,JK) = INTEG(JW,JK) + E*VAVA
IF(NP.EQ.0)GO TO 36
EX = FM(JW)*RLZ(JK)
INTEGZ(JW,JK) = INTEGZ(JW,JK) + EX*VAVA
IF(L.EQ.1.OR.L.EQ.MX)INTEG(JW,JK)=INTEG(JW,JK)+VC*DYZE*(DFM(JW)*(D
CAS(JK)+DSS(JK))-FM(JW)*(ZA1(JK)*ACZ(JK)+ACON(JK)+ZS1(JK)*ASZ(JK)*S
CCON(JK)))
IF(L.NE.1.AND.L.NE.MX)GO TO 36
AW = ACON(JK)*ACZ(JK)
SW = SCON(JK)*ASZ(JK)
WW = AW + SW
WA = ACON(JK)*ZA1(JK)*(-1+3*ACZ(JK)/RRA(JK))/RRA(JK)
WS = SCON(JK)*ZS1(JK)*(-1+3*ASZ(JK)/RRS(JK))/RRS(JK)
WP = DFM(JW)*WW - FM(JW)*(WA+WS)
IF(NESP.NE.1)GO TO 70
INTEGZ(JW,JK) = INTEGZ(JW,JK)+VC*DYZE*WP
GO TO 36
70 INTEGZ(JW,JK) = INTEGZ(JW,JK)+VC*DYZE*(FM(JW)*(AW-SW)+ZK(JK)*WP+ZY
CL*(DFM(JW)*(AW-SW)-FM(JW)*(WA+WS)))
36 CONTINUE
HE = BETA*(H(K)-R(J))
DO 37 JK=1,3

```

```

IF(NESP.NE.1)HE=(JK-1)/2.
DO 37 JW=1,4
INTEG(JW,JK)=INTEG(JW,JK)+DYZE/15
INTEGZ(JW,JK)=-INTEGZ(JW,JK)+BETA*HE*DYZE/15
37 CONTINUE
IF(NP.EQ.0)GO TO 47
IF(NESP.EQ.1)GO TO 47
BSL2=BETA*SNL2(J)/2
BSL1=BETA*SNL1(J)
BCL1=BETA*CNL1(J)
PSIDJ=BSL2*INTEG(3,3)
PSIUJ=BSL1*INTEG(3,3)
WDZJ=BSL2*INTEG(3,1)-PSIDJ
WD2J=BSL2*INTEG(3,2)-PSIDJ
WUZJ=BSL1*INTEG(3,1)-PSIUJ
WU2J=BSL1*INTEG(3,2)-PSIUJ
IF(J.NE.2)GO TO 47
PSIV2J=BCL1*INTEG(1,3)+BSL1*INTEG(4,3)
WV2J=BCL1*INTEG(1,2)+BSL1*INTEG(4,2)-PSIV2J
WVZJ=BCL1*INTEG(1,1)+BSL1*INTEG(4,1)-PSIV2J
47 DO 13 JK=1,3
XAPA1=INTEG(1,JK)
XAPA2=INTEG(2,JK)
XAPA3=INTEG(3,JK)
XAPA4=INTEG(4,JK)
INTEG(1,JK)=XAPA2-COSA2*XAPA3
INTEG(2,JK)=XAPA1-COSA1*XAPA3
INTEG(3,JK)=SENA1*XAPA1-COSA1*XAPA4
IF(NP.EQ.0)GO TO 13
ZAPA1=INTEGZ(1,JK)
ZAPA2=INTEGZ(2,JK)
ZAPA3=INTEGZ(3,JK)
ZAPA4=INTEGZ(4,JK)
INTEGZ(1,JK)=ZAPA2-COSA2*ZAPA3
INTEGZ(2,JK)=ZAPA1-COSA1*ZAPA3
INTEGZ(3,JK)=SENA1*ZAPA1-COSA1*ZAPA4
13 CONTINUE
PSID=INTEG(1,3)
WDZ=INTEG(1,1)-PSID
WD2=INTEG(1,2)-PSID
PSIU=INTEG(2,3)
WUZ=INTEG(2,1)-PSIU
WU2=INTEG(2,2)-PSIU
PSIFU=(WDZ*ALFK-WD2*ALFS)/DELTA2
PSIFU=(WUZ*ALFK-WU2*ALFS)/DELTA2
PSIFD=(WD2*LGA-WDZ*LGS)/DELTA2
PSIFD=(WU2*LGA-WUZ*LGS)/DELTA2
FID=PSID-PSIFD*ACOSP
FIU=PSIU-PSIFU*ACOSP
IF(NP.EQ.0)GO TO 28
PSIDZ=INTEGZ(1,3)
WDZ2=INTEGZ(1,1)-PSIDZ
WD22=INTEGZ(1,2)-PSIDZ
PSIUZ=INTEGZ(2,3)
WUZ2=INTEGZ(2,1)-PSIUZ
WU22=INTEGZ(2,2)-PSIUZ
PSIFDZ=(WDZ2*ALFK-WD22*ALFS)/DELTA2
PSIFUZ=(WUZ2*ALFK-WU22*ALFS)/DELTA2
PSIFDZ(K,J)=(WDZ2*LGA-WD22*LGS)/DELTA2
PSIFUZ(K,J)=(WU22*LGA-WUZ2*LGS)/DELTA2
FIDZ(K,J)=PSIDZ-PSIFDZ*ACOSP

```

- E.7. -

```

FIUZ(K,J) = PSIUZ - PSIFUZ*ACOSP
IF(NESP,NE.1)GO TO 49
IF(J,NE,K,OR,ILOP,GT,1)GO TO 28
PSIHDX(J) = PSIHU
PSIHUX(J) = PSIHU
FIDX(J) = FID
FIUX(J) = FIU
GO TO 28
49 PSIFDJ = (WDZJ*ALFK-WDZJ*ALFS)/DELTA2
PSIFUJ = (WUZJ*ALFK - WUZJ*ALFS)/DELTA2
PSIHUJ(K,J) = (WDZJ*LGA - WDZJ*LGS)/DELTA2
PSIFUJ(K,J) = (WUZJ*LGA - WUZJ*LGS)/DELTA2
FIDJ(K,J) = PSIDJ - PSIFDJ*ACOSP
FIUJ(K,J) = PSIUJ - PSIFUJ*ACOSP
PSIHUJ(K,J) = PSIHUJ(K,J) + BETA*(WDZ*ASENP-WDZ*GAMA1-PSIHU*DDL2)/
CDELTA2
PSIHUJ(K,J) = PSIHUJ(K,J) + BETA*(WUZ*ASENP-WUZ*GAMA1-PSIHU*DDL2)/
CDELTA2
FIDZ(K,J) = FIDZ(K,J)-ACOSP*BETA*(WDZ*GAMA2-ASENP2*WDZ/2-PSIFD*DDL
C2)/DELTA2 + BETA*PSIFD*ASENP
FIUZ(K,J) = FIUZ(K,J)-ACOSP*BETA*(WUZ*GAMA2-ASENP2*WUZ/2-PSIFU*DDL
C2)/DELTA2 + BETA*PSIFU*ASENP
28 IF (J-2)19,21,19
21 PSIV2 = INTEG(3,3)
PSIV2Z = INTEGZ(3,3)
WVZ = INTEG(3,1) - PSIV2
WVZZ = INTEGZ(3,1) - PSIV2Z
WV2 = INTEG(3,2) - PSIV2
WV2Z = INTEGZ(3,2) - PSIV2Z
PSIFV2 = (WVZ*ALFK - WVZ*ALFS)/DELTA2
IF(NESP,NE.1)PSFV2J = (WVZJ*ALFK - WVZJ*ALFS)/DELTA2
PSFV2Z = (WVZZ*ALFK - WV2Z*ALFS)/DELTA2
IF (K-2)22,23,22
23 DELTA1 = ASENP*ALFK - ASENP2*ALFS
PSIM = (WVZ*ALFK - WVZ*ALFS)/DELTA1
A2 = (0.,-1.)*VDZ/(60.*PSIM)
A2 = -A2/COSH2
PSIFV2 = (WVZ*ASENP-WVZ*ASENP2)/DELTA1
DEL=1.0
IF(NP,EQ.0)GO TO 24
DDL1 = ACOSP*(ALFK+0.5)+GAMA2*ASENP-ACOSP2/2
IF(NESP,NE.1)PSHV2J(K) = (WVZJ*ASENP-WVZJ*ASENP2)/DELTA1
IF(NESP,NE.1)PSHV2Z(K) = (WVZZ*ASENP-WVZZ*ASENP2+BETA*(ACOSP*WVZ-W
CVZ*ACOSP2/2-PSIHV2*DDL1))/DELTA1
IF(NESP,EQ.1)GO TO 24
DPSIM = ((WVZZ+WVZJ)*ALFK-(WV2Z+WV2J)*ALFS+BETA*(GAMA2*WVZ-ASENP2*
CWVZ/2-PSIM*DDL1))/DELTA1
DA2 = A2*(BETA*SENH2/COSH2-DPSIM/PSIM)
GO TO 24
22 DEL = 0.
PSIFV2 = (WVZ*LGA-WVZ*LGS)/DELTA2
IF(NP,EQ.0)GO TO 24
PSHV2Z(K) = (WVZZ*LGA - WVZZ*LGS)/DELTA2
IF(NESP,NE.1)PSHV2Z(K)=PSHV2Z(K)+BETA*(WVZ*ASENP-WVZ*GAMA1-PSIHV2*
CDDL2)/DELTA2
IF(NESP,NE.1)PSHV2J(K)= (WVZJ*LGA+WVZJ*LGS)/DELTA2
24 FIV2 = PSIV2 - (1.0-DEL)*PSIFV2*ACOSP
FIV2Z(K) = PSIV2Z-(1-DEL)*PSFV2Z*ACOSP
FIV2F(K) = FIV2
PSHV2P(K) =PSIHV2
IF(NP,EQ.0)GO TO 19

```

```

IF(K.NE.2.AND.NESP.NE.1)FIV2Z(K)=FIV2Z(K)-ACOSP*BETA*(WVZ+GAMA2-AS.
CENP2+WV2/2-PSIFV2*DDL2)/DELTA2+BETA*PSIFV2*ASENP
IF(NESP.NE.1)FIV2J(K) = PSIV2J -(1-DEL)*PSFV2J*ACOSP
IF(NESP.NE.1)GO TO 19
IF(K.NE.2.OR.ILOP.GT.1)GO TO 19
FIV2X = FIV2
PSHV2X = PSIHV2
C
C
C
C
MONTAGEM DOS COEFICIENTES DO SISTEMA DE EQUACOES
19 AX(K,J)= FIU
AX(K,J+N) = FID
AX(K+N,J) = PSIHU
AX(K+N,J+N) = PSIH0
IF(NP.EQ.0)GO TO 32
IF(NESP.NE.1.OR.J.NE.K)GO TO 32
71 AX(K,K) = FIUX(K)
AX(K,K+N) = FIDX(K)
AX(K+N,K) = PSIHUX(K)
AX(K+N,K+N) = PSIHDX(K)
32 CONTINUE
IF(NP.EQ.0)GO TO 142
IF(K.NE.2.OR.NESP.NE.1)GO TO 142
FIV2 = FIV2X
PSIHV2 = PSHV2X
142 BX(K) = -FIV2
BX(K+N) = -PSIHV2
12 CONTINUE
DO 33 K=1,N
BX(K) = BX(K)*A2
33 BX(K+N) = BX(K+N)*A2
C
C
C
C
INVERSÃO DA MATRIZ FI,PSIH0
CALL INMCO(N2,TOL)
C
C
C
C
DETERMINAÇÃO DOS COEF. DE DISTRIB. DE CORRENTES
X(1) A X(N)...ELEMENTOS DA MATRIZ COLUNA ≥B2
X(N+1) A X(2N)...ELEMENTOS DA MATRIZ COLUNA ≥B2
C
DO 94 IT=1,N2
X(IT) = (0.,0.)
DO 94 JT=1,N2
JZ = JT + N2
94 X(JT) = X(IT) + AX(IT,JZ)*BX(JT)
C
C
C
C
CÁLCULO DA DIRETIVIDADE
E = (0.,0.)
CAZ = (0.,0.)
DO 41 K=1,N
DIK = ( B(K) - B(2) )*BETA
DI(K) = COS(DIK) + (0.,1.)*SIN(DIK)
E = E + DI(K)*(GMLZ(K)*X(K) + DMLZ(K)*X(K+N))
CAZ = CAZ +CONJG(DI(K))*(GMLZ(K)*X(K)+DMLZ(K)*X(K+N))
41 CONTINUE
E = E + FX*A2

```

```

E = 60*E*(0.,1.)
CAZ = CAZ + FX*A2
CAZ = CAZ*60
FBR = CABS(E/CAZ)
DFBR = 20*ALOG10(FBR)
WRITE(6,38)DFBR
38 FORMAT(/,≥ FBR = ≥.E10,4)
EX = A2*SNL1(2) + X(2)*(1.-CNL1(2)) + X(N+2)*(1.-CNL2(2))
PQT = VQ2+REAL(EX)/2.
GANHO(ILQP) = (CABS(E))*2/(60.*PQT)
WRITE(6,59)GANHO(ILQP)
59 FORMAT( /,≥ GANHO = ≥.E10,4)
GDB = 10.*ALOG10(GANHO(ILQP))
WRITE(6,189)GDB
189 FORMAT( /,≥ GANHO EM DB ≥.E10,4)

C
C
IF(NP.EQ.0)GO TO 111
DO 54 K=1,N
IF(NESP.EQ.1)GO TO 18

C
C
CALCULOS DE PU=P2 E PD=P3 ( OTIMIZACAO DAS ALTURAS )

DO 54 M=1,N
DELJ2 = 0.
IF(M.EQ.2)DELJ2=1.
P2(K,M) = -(FIUJ(K,M)*X(M)+FIDJ(K,M)*X(N+M)+DELJ2*(FIV2P(K)*DA2+FI
CV2J(K)*A2))
P2(K+N,M) = -(PSIHUJ(K,M)*X(M)+PSIHJ(K,M)*X(N+M)+DELJ2*(PSHV2P(K)*D
CA2+PSHV2J(K)*A2))
IF(K.NE.M)GO TO 54
P2K = (0.,0.)
P3K = (0.,0.)
DO 48 IV=1,N
P2K = P2K-FIUZ(K,IV)*X(IV)-FIDZ(K,IV)*X(N+IV)
48 P3K = P3K - PSIHUZ(K,IV)*X(IV) - PSIHJ(K,IV)*X(N+IV)
P2(K,K) = P2(K,K)+P2K-FIV2Z(K)*A2
P2(K+N,K) = P2(K+N,K) + P3K - PSHV2Z(K)*A2
GO TO 54

C
C
CALCULOS DE PU=P2 E PD=P3 ( OTIMIZACAO DOS ESPACAMENTOS )

18 DO 54 J=1,N
IF(K.EQ.J)GO TO 55
P2(K,J) = FIUZ(K,J)*X(J)+FIDZ(K,J)*X(N+J)
P2(K+N,J) = PSIHUZ(K,J)*X(J) + PSIHJ(K,J)*X(J+N)
IF(J.NE.2)GO TO 54
P2(K,2) = P2(K,2)+FIV2Z(K)*A2
P2(K+N,2) = P2(K+N,2) + PSHV2Z(K)*A2
GO TO 54
55 P2K = (0.,0.)
P3K = (0.,0.)
DO 57 IX=1,N
DELKI = 0.
IF(IX.EQ.K)DELKI=1.
P2K = P2K-(1-DELKI)*(FIUZ(K,IX)*X(IX)+FIDZ(K,IX)*X(N+IX))
57 P3K = P3K + (1.-DELKI)*(PSIHUZ(K,IX)*X(IX) + PSIHJ(K,IX)*X(IX+N
C))
P2(K,K) = P2K-FIV2Z(K)*A2

```


P2(K+N,K) = -PSHV2Z(K)*(1,-DELK2)*A2 = P3K
54 CONTINUE

C
C
C
C

CALCULO DE Q1=Q2 E Q3=Q3

DO 34 I=1,N
DO 34 K=1,N
Q2(K,I) = (0.,0.)
Q3(K,I) = (0.,0.)
DO 34 LX = 1,N2
JX = LX + N2
Q2(K,I) = Q2(K,I) + AX(K,JX)*P2(LX,I)
34 Q3(K,I) = Q3(K,I) + AX(K+N,JX)*P2(LX,I)

C
C
C
C

CALCULO DE ETETL(K) = DK(K)

DO 35 K=1,N
DELK2 = 0.
IF(K.EQ.2)DELK2=1.
DKK = (0.,0.)
DO 31 I=1,N
31 DKK = DKK + DI(I)*(GMLZ(I)*Q2(I,K) + DMLZ(I)*Q3(I,K))
IF(NESP.EQ.1)GO TO 39
IF(K.EQ.2)DKK = DKK+DA2*FX+A2*BETA*SNL1(2)
DK(K) = (0.,1.)*60*(BETA*BETAL(K)*DI(K)*(X(K)*SNL1(K)+X(N+K)*SNL2(K)/2)+DKK)
GO TO 35
39 DK(K) = (0.,1.)*60*((0.,1.)*DI(K)*BETA*(GMLZ(K)*X(K) + DMLZ(K)*X(CK+N) + FX*A2*DELK2) + DKK)
35 CONTINUE

C
C
C
C
C

DETERMINACAO DAS NOVAS ALTURAS SE NESP.NE.1, OU DOS NOVOS ESPACAMENTOS SE NESP=1

DIZ = GANHO(ILOP) - GANAN
IF(DIZ.LT.0)GO TO 88
IF(DIZ.GT.0)GANAN = GANHO(ILOP)
BOCA = 0.
DO 29 K=1,N
DCON = E*CONJG(DK(K))
QCON = Q2(2,K)*(1.-CNL1(2)) + Q3(2,K)*(1.-CNL2(2))
IF(NESP.NE.1.AND.K.EQ.2)QCON = QCON+BETA*(X(2)*SNL1(2)+X(N+2)*SNL2(2)/2+A2*CNL1(2))+DA2*SNL1(2)
R1 = REAL(QCON)
R2 = VC2*REAL(QCON)/2.
BB(K) = 2.*R1 - 60.*GANHO(ILOP)*R2
DB(K) = R(K)
IF(NESP.NE.1)DB(K) = H(K)
BD(K) = DB(K)
IF(ILOP.EQ.1)BOCA = BOCA + BB(K)*.2
29 CONTINUE
88 CONTINUE
IF(DIZ.LT.0)ALFA = ALFA/2
IF(ILOP.EQ.1)ALFA = ALVO/SQRT(BOCA)
WRITE(6,883)ALFA
883 FORPAT(/,> ALFA = >,E10.4,//////)
DO 192 K=1,N
DL(K) = ALFA*RB(K)

```

      IF(DIZ.LT.0)DB(K) = BD(K)
      DB(K) = DB(K) + DL(K)
      IF(NESP.EQ.1)B(K) = DB(K)
      IF(NESP.NE.1)H(K) = DB(K)
192  CONTINUE
      B1 = B(1)
      DO 914 JB=1,N
      B(JB) = B(JB) - B1
914  CONTINUE
      IF(ILOP.GT.NITER)GO TO 111
      WRITE(6,884)ILOP
884  FORMAT(/,2 PERTURBACAO 2,13)
      IF(NESP.EQ.1)GO TO 42
      WRITE(6,43)(H(J),J=1,N)
43  FORMAT(/,2 ALTURAS 2,10F8.4)
      GO TO 44
42  CONTINUE
      WRITE(6,52)(B(J),J=1,N)
52  FORMAT(/,2 COORDENADS 2,10F8.4)
44  ILOP = ILOP + 1
      IF(NESP.NE.1)GO TO 3
      GO TO 51
111 CONTINUE
      WRITE(6,444)
444  FORMAT(1H1)
      IF(NDIAG.NE.1)GO TO 45
C
C
C  OBTENCAO DE DIAGRAMA DE IRRADIACAO
C
      CALL DIARD(N,B,H,A2,X,CAMPL,LAMBDA,90)
      CALL RPLOT(2,91,YLIMS,2,0,CAMPL,2,NPT,PT,0)
45  CONTINUE
      RETURN
      END

```

B6700/B7700 F O R T R A N C C P P I L A T I O N M A R K 2.6.000 WEDN

		FORMAT
FILE	S=TETA	
	SUBROUTINE RPL0T(NCURV,NPTOS,YLIMS,PASSO,XIN,Y,JJ,NPT,PT,KK)	
C	*****	
C	NCURV...NUMERO DE CURVAS QUE SE DESEJA TRACAR - NO MAXIMO 10	002
C	NPTOS...NUMERO DE PONTOS EM CADA CURVA - NO MAXIMO 131	003
C	YLIMS...VALORES EXTREMOS DE CADA CURVA-NECESSARIO FORNECER SE JJ=0	
C	PASSO...DIFERENCA ENTRE AS ABSCISSAS DE DOIS PONTOS SUCESSIVOS	005
C	XIN.....ABSCISSA INICIAL	006
C	Y.....MATRIZ DOS VALORES DAS FUNCES	007
C	JJ.....SE JJ=0 O USUARIO DEVE FORNECER YLIMS**SE JJ=1 A SUBROTINA	008
C	TOMA PARA CADA CURVA VALORES ADEQUADOS**SE JJ=2 A SUBROTINA TOMA	
C	UMA UNICA ESCALA PARA TODAS AS CURVAS**SE JJ=3 A SUBROTINA TOMA	010
C	UMA UNICA ESCALA E TRACA O EIXO DAS ABSCISSAS PASSANDO PELA ORDE-	011
C	NADA ZERO	012
C	NPT.....NUMERO DE PONTOS QUE SE DESEJA PLOTAR - NO MAXIMO 20	013
C	PT.....MATRIZ DOS PONTOS-UM VALORES DE MOD0 QUE PT(I+1,1)>PT(I,1)	014
C	E PT(1,1) MAIOR OU IGUAL A XIN	015
C	KK.....SE KK=1 OBRIGATORIAMENTE DEVE-SE FAZER JJ=2 OU JJ=3**SE	016
C	KK=0 A SUBROTINA TRACA SOMENTE AS CURVAS	017
C	*****	
	DIMENSION YLIMS(10,2),Y(NCURV,NPTOS),PT(20,2)	
	DIMENSION YS(6),ESC(10)	02
	DIMENSION IUSADO(10)	022
	REAL LINHA(102),NDS(10)	023
	REAL MA,MJ	023
	DATA NDS/1H1,1H2,1H3,1H4,1H5,1H6,1H7,1H8,1H9,1H0/	024
	DATA BCO/1H /,ARR/1H*,AST/1H*/ ,PLUS/1H*/	025
	IF(KK.EQ.1) IF(JJ=2)10,30,30	026
	GO TO 30	027
10	WRITE(6,20)	028
20	FORMAT(1H ,44HCOM KK=1 E OBRIGATORIO O USO DE JJ=2 OU JJ=3)	029
	GO TO 340	030
30	IX=0 ; CCNT=0	031
	K=1 ; INDIC=0	032
	DO 40 I=1,102	033
40	LINHA(I)=BCO	034
	IF (JJ.EQ.0) GO TO 100	035
	DO 50 I=1,NCURV	036
	YLIMS(I,2)=Y(I,1)	037
	YLIMS(I,1)=Y(I,1)	038
	DO 50 J=2,NPTOS	039
	YLIMS(I,2)=AMAX1(Y(I,J),YLIMS(I,2))	040
50	YLIMS(I,1)=AMIN1(Y(I,J),YLIMS(I,1))	041
	IF(JJ.EQ.1) GO TO 100	042
	MA=YLIMS(1,2)	043
	MJ=YLIMS(1,1)	044
	DO 60 I=1,NCURV	045
	MA=AMAX1(YLIMS(I,2),MA)	04
60	MJ=AMIN1(YLIMS(I,1),MJ)	047
	IF(KK.NE.1) GO TO 80	048
	DO 70 I=1,NPT	049
	MA=AMAX1(MA,PT(I,2))	050
70	MJ=AMIN1(MJ,PT(I,2))	051
80	DO 90 I=1,NCURV	052
	YLIMS(I,2)=MA	053

90	YLIMS(I,1)=MI	054
100	DO 140 I=1,NCURV	055
	ACRESC=(YLIMS(I,2)-YLIMS(I,1))/5	056
	YS(1)=YLIMS(I,1)	057
	DO 110 J=1,5	058
110	YS(J+1)=YS(J)+ACRESC	059
	IF(YLIMS(I,2).NE.YLIMS(I,1)) GO TO 130	060
	WRITE(6,120)	061
120	FORMAT(1H ,19X,75HA EXECUCAO FOI INTERROMPIDA DEVIDO A IMPOSSIBILI	062
	COADE DE SE TRACAR AS CURVAS,/,1X,113HSE JJ=1 UMA DAS CURVAS E UMA	063
	C REIA HORIZONTAL SE JJ=2 OU JJ=3 TODAS AS CURVAS SAO RETAS HORIZ	064
	CONTAIS COINCIDENTES)	065
	GO TO 340	066
130	ESC(I)=100/(YLIMS(I,2)-YLIMS(I,1))	
140	WRITE(6,150)NOS(I),YS	068
150	FORMAT(7H CURVA ,A1,4H,....,6E20,8)	069
160	X=XIN+IX*PASSO	070
	WRITE(6,170)X	071
170	FORMAT(18X,610,3,2X,51(2H-))	072
180	IX=IX+1 ; CONT=CONT+1	073
	DO 190 I=1,NCURV	074
	J=IFIX((Y(I,IX)-YLIMS(I,1))*ESC(I)+1.5)	075
	IF(J.GT.101) LINHA(101)=ARR	076
	IF(J.LT.1) LINHA(1)=ARR	077
	IF(J.GT.101.OR.J.LT.1) INDIC=1	078
	IF(J.LE.101.AND.J.GE.1) IUSADO(I)=J	079
	IF(J.LE.101.AND.J.GE.1) LINHA(J)=NOS(I)	080
190	CONTINUE	081
	IF(KK.NE.1) GO TO 200	082
	JP=0	083
	IF(IFIX((PT(K,1)-XIN)/PASSO+1.5).NE.IX) GO TO 200	084
	JP=IFIX((PT(K,2)-YLIMS(1,1))*ESC(1)+1.5)	085
	LINHA(JP)=PLUS	086
	K=K+1	087
200	IF(JJ.NE.3) GO TO 230	088
	J=IFIX(-YLIMS(1,1)*ESC(1)+1.5)	089
	IF(J.LE.101.AND.J.GE.1) GO TO 220	090
	WRITE(6,210)	91
210	FORMAT(1H ,86HA EXECUCAO FOI INTERROMPIDA DEVIDO A IMPOSSIBILIDADE	092
	C DE SE TRACAR O EIXO DAS ABSCISSAS)	093
	GO TO 340	094
220	LINHA(J)=AST	095
230	WRITE(6,240)LINHA	096
240	FORMAT(1H+,29X,102A1)	097
	DO 250 I=1,NCURV	098
250	LINHA(IUSADO(I))=BCO	09
	IF(JP.NE.0) LINHA(JP)=RCO	100
	IF(INDIC.NE.1) GO TO 260	101
	LINHA(1)=BCO	102
	LINHA(101)=RCO	103
260	IF(IX.EQ.NPTOS) GO TO 310	104
	IF(CONT.EQ.10) GO TO 300	105
	IF(IX.EQ.NPTOS-1) GO TO 280	106
	WRITE(6,270)	107
270	FORMAT(11X,6(19X,1H,))	108
	GO TO 180	109
280	WRITE(6,290)	110
290	FORMAT(1H ,29X,51(2H-))	111
	GO TO 180	112
300	CONT=0	113
	GO TO 160	114

- E.14 -

310	IF(INDIC.NE.1) GO TO 340	115
	WRITE(6,320)	116
320	FORMAT(1H ,///,105HDS VALORES DE YLIMS FORNECIDOS NAO PERMITEM A C	117
	COLOCACAO DAS CURVAS *** USE AS OPCOES JJ=1 OU JJ=2 OU JJ=3)	118
	WRITE(6,330)	119
330	FORMAT(1H ,///,30X,45H0 SIMBOLO 0 SIGNIFICA UM PONTO FORA DA ESCALA	120
	C)	121
340	WRITE(6,350)	122
350	FORMAT(1H1)	123
	RETURN	124
	END	125
		FORMAT
		SEG

- E.15 -

```

SUBROUTINE DIARQ(N,B,H,A2,X,CAMPL,LAMBDA,MZ)
*****
C  ESTA SUBROTINA CALCULA O CAMPO NO PLANO HORIZONTAL E VERTICAL DE
C  UMA ANTENA YAGI, DADOS OS COEFICIENTES DE DISTRIBUICAO DE
C  CORRENTES NOS ELEMENTOS
C  *****
C  N...NUMEROS DE ELEMENTOS DA REDE YAGI
C  B...VETOR DAS COORDENADAS DOS ELEMENTOS
C  H...VETOR DAS ALTURAS DOS ELEMENTOS
C  A2...COEF. DE DIST. DE CORRENTE ADICIONAL DO ELEM. EXCITADOR
C  X...VETOR DOS COEFIC. DE DISTRIBUICAO DAS CORRENTES
C  CAMPL(1,IFI)...CAMPO VERTICAL AO QUADRADO (PLANO H)
C  CAMPL(2,IFI)...CAMPO HORIZONTAL AO QUADRADO (PLANO E)
C  LAMBDA...COMPRIMENTO DE ONDA
C  MZ...NUMERO DE PONTOS EM TETA E FI, DE ZERO A 180 GRAUS, NO MAXIMO
C  90; TOMAR SEMPRE UM MULTIPLO DE 6
C  *****
C  COMPLEX CAMPO,TV,TZ,COA,EX,FVN,X(1),A2
C  DIMENSION BETAL(12),SNL1(12),SNL2(12),CNL1(12),CNL2(12),CNL4(12),
C  CB( 1),CAMPL(2,91),H( 1)
C  REAL LAMBDA
C  FI = 3.1415926535
C  BETA = 2*3.1415926535/LAMBDA
C  DO 11 K=1,N
C  P = BETA*H(K)
C  BETAL(K) = P
C  CNL4(K) = COS(P/4)
C  CNL2(K) = 2*CNL4(K)*CNL4(K) - 1
C  CNL1(K) = 2*CNL2(K)*CNL2(K) - 1
C  SNL2(K) = SIN(P/2)
11 SNL1(K) = 2*SNL2(K)*CNL2(K)
C  DISC = ABS(H(2)/LAMBDA - .25) - .1E-3
C
C  CAMPO VERTICAL
C
C  IF(DISC)75,75,76
75 HM = 1. - PI/2
C  SECBH = 1.
C  GO TO 77
76 HM = 1. - CNL1(2)
C  SECBH = 1./CNL1(2)
77 MZ1 = MZ+1
C  DEFI = PI/MZ
C  WRITE(6,78)
78 FORMAT(1H1,/////,8X,3HPHI,9X,2E**2,20X,4HTETA,9X,4HE**2,/)
C  DO 86 IFI=1,MZ1
C  FI = (IFI-1)*DEFI
C  COSFI = COS(FI)
C  CAMPO = (0.,0.)
C  DO 61 I=1,N
C  RI = B(2) - B(1)
C  GM = SNL1(I) - BETAL(I)*CNL1(I)
C  DM = 2.*SNL2(I) - BETAL(I)*CNL2(I)
C  TV = X(I)/A2
C  TZ = X(I+N)/A2
C  RI = RI*COSFI
C  CB = BETA*RI
C  EX = COS(CB) - (0.,1.)*SIN(CB)

```

```

61 CAMPO = CAMPO + (TV*GM + TZ*DM)*EX
   FVN = (HM + CAMPO)*SECRH
   FVEN = CABS(FVN)
   IF (IFI.EQ.1) ARSO = FVEN
   FVNW = FVEN/ARSO
   FVNW = FVNW+FVNW
   CAMPL(1,IFI) = 10*ALOG10(FVNW)
86 CONTINUE

C
C
C
C
CAMPO HORIZONTAL

M22 = (M2+2)/2
DETETA = PI/M2
DO 87 ITET=1,M21
  TETA = PI/2 - (ITET-1)*DETETA
  COST = COS(TETA)
  SENT = SIN(TETA)
  IF(ITET.NE.1)GO TO 12
  HM = 1. -PI/2
  FM = 1. - CNL1(2)
  GO TO 13
12 CONTINUE
14 CONTINUE
  IF(ITET.NE.M21)GO TO 15
  HM = PI/2 - 1.
  FM = CNL1(2) - 1.
  GO TO 13
15 CONTINUE
  IF(ITET.EQ.M22)GO TO 13
  FM = (COS(BETAL(2)*COST)-CNL1(2))/SENT
  IF(DISC.LT.0)HM=(COST - SIN(PI*COST/2))/(SENT*COST)
13 CAMPO = (0.,0.)
  DO 20 I=1,N
    TV = X(1)/A2
    TZ = X(I+N)/A2 -
    RI = B(2) - B(1)
    BETCO = BETAL(I)*COST
    COSBT = COS(BETCO)
    SENBT = SIN(BETCO)
    IF(ITET.NE.1)GO TO 21
    GM = SNL1(I) - BETAL(I)*CNL1(I)
    DM = 2.*SNL2(I) - BETAL(I)*CNL2(I)
    GO TO 22
21 CONTINUE
    IF(ITET.NE.M21)GO TO 24
    GM = BETAL(I)*CNL1(I) - SNL1(I)
    DM = BETAL(I)*CNL2(I) - 2.*SNL2(I)
24 CONTINUE
    IF(ITET.EQ.M22)GO TO 22
    GM = (SNL1(I)*COSBT*COST - CNL1(I)*SENB)/(SENT*COST)
    ABA = .001 + (ITET-1)*180/M2
    IK8 = IFIX(ABA)
    IF(IK8.EQ.30.OR.IK8.EQ.150)GO TO 33
    DM = SENT*((2*COSBT*SNL2(I)-4*SENB*CNL2(I)*COST)/(1-4*COST**2) -
    C(SENB*CNL2(I))/COST)
    GO TO 22
33 DM = SENT*(BETAL(I) - SNL1(I))/2.
22 RI = RI*SENT
   CB = BETA*RI

```

- E.17 -

```

      EX = COS(CB) - (0.1)*SIN(CB)
20  CAMPO = CAMPO + (TV*GM + TZ*DM)*EX
      IF(DISC)30,30,31
30  SECBH = 1.
      GO TO 32
31  HM = FM
      SECBH = 1/CNL1(2)
32  FVN = (HM + CAMPO)*SECBH
      FVEN = CABS(FVN)
      FVNW = FVEN/ARSO
      FVNW = FVNW*FVNW
      CAMPL(2,ITET) = 10*ALOG10(FVNW)
      IF(ITET.EQ.MZ2)CAMPL(2,ITET) = CAMPL(2,ITET*1)
87  CONTINUE
      DO 25 IVK=1,91,2
      ZTET = (IVK-1)*180/MZ
25  WRITE(6,73)ZTET,CAMPL(1,IVK),ZTET,CAMPL(2,IVK)
73  FORMAT(6X,F6.2,E16.6,13X,F6.2,E16.6)
      WRITE(6,90)
90  FORMAT(1H1)
      WRITE(6,46)
46  FORMAT(5(/),20X,20S PONTOS 2 E 1 NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
      CS2,/,35X,2ND PLANO E(HORIZONTAL) E PLANO H(VERTICAL) RESPECTIVAMENTE,///)
      CTE2,///)
      RETURN
      END

```

FORMAT
FORMAT
SEG


```

SUBROUTINE INMACO(N,TOL)
C *****
C ESTA SUBROTINA INVERTE A MATRIZ, PELO METODO DE PIVOTAMENTO
C A MATRIZ A SER INVERTIDA E SUPRIDA PELO COMMON A
C A MATRIZ INICIAL E PERDIDA, PORTANTO CASO NECESSITE DESSA MATRIZ
C   ARMAZENE-A
C *****
C N ... DIMENSÃO DA MATRIZ QUE SE DESEJA INVERTER, NO MÁXIMO 20
C TOL ... SE O ELEMENTO DA MATRIZ POSSUI VALOR ABSOLUTO INFERIOR A
C   TOL É CONSIDERADO COMO ZERO
C *****
COMPLEX A(30,60),TEMP,PIV,DIVA
COMMON A
C FORMACAO MATRIZ UNITARIA.
N1 = N+1
NZ = 2*N
DO 3 I=1,N
DO 3 J=1,N
NJ= N+J
A(I,NJ) = (0.,0.)
IF(I.EQ.J)A(I,NJ)=(1.,0.)
3 CONTINUE
NX = N+1
M = 0
C GERACAO PIVOT, VERIFICAR SE COLUNA DIFERENTE DE ZERO
DO 23 L=1,N
LX = L+1
MX = 0
DO 13 I=L,N
IF(CABS(A(I,L))-TOL)13,13,11
11 MX = 1
13 CONTINUE
IF(MX)15,37,15
C TESTE MAIOR ELEMENTO COLUNA
15 DO 19 I=LX,N
IF(CABS(A(L,L))-CABS(A(I,L)))17,19,19
C TROCA DE LINHAS
17 DO 19 JX=L,NZ
TEMP = A(L,JX)
A(L,JX) = A(I,JX)
A(I,JX) = TEMP
19 CONTINUE
C FAZER PIVOT IGUAL A 1
PIV = A(L,L)
DO 21 JX=L,NZ
A(L,JX) = A(L,JX)/PIV
21 CONTINUE
C ALGORITMO GAUSS JORDAN
DO 23 K=1,N
I=K
IF(I=N)190,18,190
18 I=I+1
IF(I=N)190,190,23
190 M=0
DIVA = A(I,L)
DO 210 J=L,NZ
A(I,J) = A(I,J) - A(L,J)*DIVA
C VERIFICAR SE LINHA DIFERENTE DE ZERO
IF (I=L)20,20,189
189 IF(J=N)191,191,210

```

- E.19 -

```
191 IF(CABS(A(I,J))-TOL)210,210,20
20 M=M+1
210 CONTINUE
    IF(M)23,37,23
23 CONTINUE
    RETURN
37 WRITE(6,775)
775 FORMAT(/,27X,28H MATRIZ INVERSA NAO DEFINIDA)
    RETURN
    END
```

FORMAT
SEG

APÊNDICE F

TABELAS DA DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI COM ALTURAS
E ESPAÇAMENTOS DOS DIRETORES UNIFORMES

Neste apêndice são apresentadas as tabelas de diretividade e RFC de antenas YAGI com as alturas e os espaçamentos dos diretores uniformes.

As alturas do refletor e do excitador são $0,51\lambda$ e $0,49\lambda$ respectivamente, e a distância entre os elementos referidos é $0,25\lambda$.

O parâmetro d/λ é a distância normalizada (em relação ao comprimento de onda) entre os diretores enquanto h/λ é a altura normalizada dos diretores. Cabe observar que em cada quadro o valor superior corresponde à diretividade (em dB) enquanto o valor inferior é a RFC (em dB) da antena.

TABELA F.1
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 3 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

N = 3 A = 0.0033690 H(1) = 0.255 H(2) = 0.245 D(1) = 0.000 D(2) = 0.250

$\frac{d}{\lambda} \backslash \frac{h}{\lambda}$	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	6.1 14.3	6.3 15.6	6.5 16.7	6.7 17.1	6.9 16.6	7.1 15.5	7.2 14.1	7.3 12.9	7.4 11.7	7.4 10.7	7.4 9.9	7.3 9.2	7.2 8.7	7.1 8.2	6.9 7.9	6.8 7.7	6.6 7.5	6.5 7.5	6.3 7.5	6.2 7.7	6.1 7.9
0.205	6.2 15.7	6.5 17.5	6.7 18.9	7.0 18.9	7.2 17.5	7.4 15.7	7.6 13.9	7.7 12.4	7.7 11.2	7.7 10.2	7.6 9.3	7.5 8.7	7.4 8.1	7.2 7.7	7.1 7.4	6.9 7.2	6.7 7.1	6.5 7.1	6.4 7.2	6.2 7.4	6.1 7.7
0.210	6.4 17.7	6.7 20.7	7.1 22.4	7.4 20.5	7.6 17.5	7.8 15.0	8.0 13.0	8.1 11.5	8.1 10.3	8.0 9.3	7.9 8.5	7.7 7.9	7.5 7.4	7.3 7.1	7.1 6.8	6.9 6.7	6.7 6.6	6.5 6.7	6.3 6.9	6.2 7.1	6.0 7.5
0.215	6.7 21.5	7.1 27.9	7.5 24.9	7.8 19.2	8.1 15.7	8.3 13.2	8.4 11.4	8.4 10.1	8.4 9.0	8.2 8.1	8.0 7.5	7.8 7.0	7.5 6.6	7.3 6.3	7.0 6.1	6.8 6.0	6.5 6.1	6.3 6.2	6.1 6.5	6.0 6.8	5.9 7.3
0.220	7.1 30.8	7.5 27.8	8.0 19.3	8.3 15.2	8.6 12.6	8.7 10.7	8.7 9.3	8.6 8.2	8.4 7.4	8.2 6.7	7.9 6.2	7.6 5.8	7.3 5.5	6.9 5.3	6.7 5.3	6.4 5.3	6.2 5.4	5.9 5.7	5.8 6.0	5.6 6.5	5.5 7.1
0.225	7.6 22.8	8.1 17.1	8.6 13.5	8.9 11.1	9.0 9.3	8.9 8.0	8.7 7.0	8.4 6.2	8.1 5.6	7.7 5.1	7.3 4.8	6.9 4.5	6.6 4.4	6.3 4.3	6.0 4.4	5.7 4.5	5.5 4.8	5.3 5.1	5.2 5.6	5.1 6.2	5.0 7.0

TABELA F.2
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 4 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

N = 4 A = 0.0033690 H(1) = 0.255 H(2) = 0.245 D(1) = 0.000 D(2) = 0.250

$\begin{matrix} d/\lambda \\ h/\lambda \end{matrix}$	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	7.6 19.4	7.9 15.4	8.1 13.0	8.1 11.5	8.1 10.7	8.0 10.5	7.9 10.9	7.8 11.7	7.9 13.2	8.0 15.0	8.1 16.4	8.3 15.5	8.4 13.2	8.5 10.9	8.4 9.1	8.2 7.8	7.9 6.9	7.6 6.4	7.2 6.2	6.9 6.4	6.6 6.6
0.205	7.9 18.2	8.2 14.3	8.4 12.1	8.4 10.9	8.3 10.4	8.2 10.4	8.1 11.1	8.2 12.5	8.3 14.7	8.4 17.5	8.7 18.4	8.9 15.3	9.0 12.1	9.0 9.7	8.8 8.0	8.4 6.8	8.0 6.1	7.6 5.7	7.2 5.6	6.8 5.9	6.5 6.5
0.210	8.3 15.9	8.6 12.8	8.7 11.0	8.6 10.2	8.5 10.0	8.4 10.5	8.4 11.7	8.5 13.9	8.8 17.8	9.1 22.3	9.4 18.0	9.6 13.1	9.6 9.9	9.4 7.8	8.9 6.4	8.4 5.5	7.8 5.0	7.3 4.8	6.9 4.9	6.5 5.4	6.2 6.2
0.215	8.6 13.3	8.8 11.1	8.8 9.9	8.7 9.5	8.7 9.8	8.6 10.9	8.8 13.0	9.1 17.4	9.5 29.0	9.9 20.0	10.2 13.0	10.2 9.3	9.8 7.0	9.2 5.5	8.5 4.5	7.8 4.0	7.1 3.7	6.6 3.8	6.2 4.1	5.9 4.8	5.7 5.8
0.220	8.9 10.9	9.0 9.5	8.9 8.9	8.8 9.1	8.8 10.1	9.0 12.3	9.4 16.9	9.9 29.2	10.4 16.9	10.7 10.7	10.4 7.3	9.6 5.2	8.7 3.8	7.8 3.0	7.0 2.5	6.3 2.3	5.8 2.4	5.4 2.8	5.1 3.4	5.0 4.3	4.9 5.6
0.225	9.0 8.9	8.9 8.2	8.9 8.4	8.9 9.5	9.2 12.0	9.7 17.3	10.3 17.8	10.6 10.5	10.2 6.3	9.1 3.8	7.9 2.3	6.6 1.3	6.0 0.8	5.3 0.6	4.8 0.6	4.4 0.8	4.1 1.2	3.9 1.8	3.8 2.7	3.8 3.9	3.9 5.5

TABELA F.3
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 5 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

N = 5 A = 0.0033690 H(1) = 0.255 H(2) = 0.245 D(1) = 0.000 D(2) = 0.250

$\frac{d}{\lambda} \backslash \frac{h}{\lambda}$	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	8.5	8.5	8.4	8.4	8.5	8.8	9.0	9.1	9.1	9.0	8.9	8.8	8.9	9.1	9.3	9.3	9.0	8.6	8.0	7.4	6.9
	12.0	10.9	11.0	12.4	15.3	18.9	17.9	14.3	11.9	10.9	11.1	12.5	15.3	17.1	13.7	10.0	7.5	6.0	5.3	5.3	6.0
0.205	8.7	8.7	8.6	8.7	8.9	9.3	9.6	9.7	9.6	9.4	9.3	9.3	9.5	9.8	10.0	9.8	9.3	8.5	7.7	7.1	6.7
	11.1	10.5	11.2	13.4	17.3	22.8	17.2	13.1	11.1	10.6	11.4	14.0	18.9	17.5	11.6	8.0	5.9	4.8	4.4	4.6	5.6
0.210	8.9	8.8	8.8	9.1	9.4	9.9	10.1	10.1	9.9	9.7	9.7	10.0	10.4	10.8	10.6	9.9	8.8	7.8	7.0	6.5	6.1
	10.2	10.2	11.7	15.2	24.2	22.0	14.5	11.3	10.1	10.4	12.5	17.9	23.9	13.1	8.2	5.5	4.0	3.3	3.3	3.9	5.2
0.215	9.0	8.9	9.1	9.5	10.1	10.5	10.5	10.3	10.1	10.1	10.4	11.1	11.5	11.1	9.8	8.4	7.2	6.3	5.7	5.4	5.2
	9.5	10.3	12.9	19.4	28.1	15.3	11.2	9.5	9.4	11.1	16.3	30.6	12.4	6.9	4.1	2.5	1.8	1.7	2.2	3.2	4.8
0.220	9.0	9.1	9.5	10.1	10.6	10.6	10.4	10.1	10.3	10.9	11.7	11.6	9.9	7.9	6.4	5.4	4.7	4.3	4.0	4.0	4.1
	9.2	11.1	15.8	22.8	14.4	10.1	8.4	8.3	10.2	15.8	17.4	7.9	3.5	1.2	0.1	-0.3	-0.2	0.3	1.2	2.6	4.6
0.225	9.0	9.4	9.9	10.2	10.1	9.8	9.8	10.3	11.1	9.9	6.8	4.7	3.5	2.9	2.6	2.4	2.3	2.3	2.4	2.7	3.0
	9.7	13.8	17.8	11.7	8.0	6.8	7.4	10.7	16.0	5.8	0.4	-1.8	-2.6	-2.8	-2.7	-2.3	-1.6	-0.7	0.6	2.3	4.6

TABELA F.4
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 6 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

N = 6 $\Lambda = 0.0033690$ $H(1) = 0.255$ $H(2) = 0.245$ $D(1) = 0.000$ $D(2) = 0.250$

$\frac{h}{\lambda} \backslash \frac{d}{\lambda}$	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	8.7	8.8	9.1	9.5	9.7	9.7	9.5	9.4	9.5	9.8	9.9	9.8	9.6	9.5	9.7	9.9	10.0	9.5	8.6	7.8	7.1
	10.9	13.1	18.8	21.7	14.9	12.1	11.7	13.3	17.2	18.3	13.9	11.4	11.0	12.9	17.3	14.9	9.3	6.2	4.7	4.4	5.3
0.205	8.8	9.0	9.5	10.0	10.2	10.0	9.9	9.9	10.2	10.5	10.5	10.3	10.1	10.2	10.6	10.9	10.5	9.4	8.2	7.2	6.6
	11.0	14.5	25.1	19.4	13.2	11.3	11.8	14.9	21.8	17.6	12.4	10.6	11.2	15.3	21.4	11.7	6.7	4.3	3.4	3.6	4.8
0.210	9.0	9.4	10.0	10.5	10.5	10.3	10.2	10.5	10.9	11.2	11.0	10.7	10.7	11.2	11.8	11.3	9.8	8.1	6.9	6.2	5.8
	11.5	17.1	31.3	15.1	11.3	10.6	12.5	18.7	25.2	13.9	10.4	10.0	12.6	25.3	13.9	6.7	3.5	2.1	1.9	2.7	4.4
0.215	9.2	9.9	10.5	10.7	10.5	10.4	10.7	11.3	11.7	11.4	11.0	11.0	11.7	12.5	11.2	8.8	6.8	5.6	4.9	4.7	4.7
	12.7	22.2	17.0	11.3	9.7	10.6	15.0	31.2	14.5	9.8	8.7	10.7	20.5	12.4	4.8	1.5	0.1	-0.1	0.5	1.8	4.1
0.220	9.5	10.2	10.5	10.3	10.3	10.6	11.3	11.6	11.2	10.7	11.1	12.3	11.0	7.3	4.9	3.7	3.1	2.9	2.9	3.1	3.5
	15.6	17.4	10.9	8.7	9.1	12.8	21.1	12.3	8.0	7.2	9.9	17.5	5.2	-0.2	-2.2	-2.8	-2.6	-1.8	-0.6	1.2	3.9
0.225	9.6	9.7	9.5	9.6	10.2	10.6	9.9	9.2	9.6	10.4	4.1	-0.5	-0.6	-0.2	0.1	0.4	0.6	0.9	1.3	1.7	2.3
	16.2	9.8	7.4	8.0	12.4	15.6	7.8	6.2	6.6	16.1	-1.4	-6.8	-6.8	-6.0	-5.3	-4.5	-3.7	-2.6	-1.1	1.0	4.1

TABELA F.5
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 7 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

$N = 7$ $A = 0.0033690$ $H(1) = 0.255$ $H(2) = 0.245$ $D(1) = 0.000$ $D(2) = 0.250$

d/λ h/λ	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	9.1 15.2	9.7 28.7	10.1 15.7	10.1 12.0	9.9 12.3	10.0 16.2	10.3 21.5	10.4 15.0	10.3 12.1	10.1 12.6	10.2 16.6	10.4 18.4	10.4 13.0	10.3 10.9	10.1 12.3	10.3 18.2	10.6 13.0	10.4 6.9	9.3 4.3	8.0 3.7	7.2 4.7
0.205	9.4 17.9	10.2 23.7	10.5 13.3	10.3 11.2	10.2 12.9	10.5 20.1	10.9 20.8	11.0 13.2	10.8 11.5	10.7 13.6	10.9 21.6	11.2 16.8	11.1 11.3	10.8 10.5	10.9 14.5	11.4 21.2	11.5 8.7	10.3 4.2	8.5 2.5	7.2 2.6	6.5 4.2
0.210	9.8 23.1	10.5 16.2	10.6 11.1	10.4 10.8	10.6 14.6	11.2 42.2	11.5 15.3	11.4 11.1	11.1 11.4	11.3 16.7	11.8 25.1	12.0 12.3	11.5 9.5	11.4 11.3	12.0 28.3	12.6 9.9	10.7 3.5	8.2 1.1	6.6 0.6	5.7 1.5	5.4 3.8
0.215	10.2 20.1	10.6 11.5	10.4 9.5	10.5 11.3	11.1 19.7	11.7 17.1	11.6 10.7	11.3 9.7	11.5 13.1	12.2 26.8	12.5 12.1	11.8 8.2	11.6 9.1	12.6 19.5	12.7 7.2	8.9 0.8	6.0 -1.5	4.6 -1.8	4.0 -1.1	3.9 0.6	4.2 3.5
0.220	10.1 12.3	10.0 8.6	10.1 9.3	10.7 14.8	11.3 16.2	11.1 9.4	10.8 8.1	11.2 11.1	12.0 19.1	11.8 9.1	10.8 6.0	11.2 8.5	12.1 11.0	5.8 -1.8	2.3 -5.0	1.5 -5.2	1.4 -4.6	1.5 -3.6	1.8 -2.1	2.3 0.1	2.9 3.5
0.225	8.9 7.8	9.1 7.9	9.7 13.5	9.6 13.2	8.9 6.9	9.1 6.7	9.9 12.9	9.1 10.1	7.2 3.4	8.1 5.8	2.3 -1.1	-12.2 -18.2	-4.5 -10.4	-2.5 -8.2	-1.6 -7.0	-1.0 -6.0	-0.6 -5.0	-0.1 -3.8	0.4 -2.2	1.1 0.1	1.8 3.7

TABELA F.6
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 8 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

$N = 8$ $A = 0.0033690$ $H(1) = 0.255$ $H(2) = 0.245$ $D(1) = 0.000$ $D(2) = 0.250$

d/λ h/λ	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	10.0 29.6	10.4 13.6	10.3 11.7	10.3 15.0	10.7 25.1	10.9 15.1	10.7 12.3	10.6 14.5	10.8 21.3	11.0 15.2	10.8 12.1	10.7 14.0	10.8 19.9	11.0 13.8	10.8 10.6	10.6 13.1	11.0 19.2	11.1 5.4	9.9 4.0	8.2 3.0	7.2 4.3
0.205	10.4 19.5	10.6 11.7	10.4 11.6	10.7 17.9	11.3 22.4	11.4 12.9	11.1 12.0	11.2 17.1	11.6 22.7	11.6 13.1	11.4 11.8	11.4 16.6	11.8 20.6	11.8 11.5	11.4 10.4	11.6 17.5	12.3 12.8	11.2 4.4	8.7 1.7	7.0 1.7	6.3 3.7
0.210	10.6 13.9	10.6 10.2	10.6 12.3	11.2 25.9	11.7 15.1	11.7 11.0	11.4 12.7	11.9 26.1	12.3 15.6	12.0 10.8	11.8 12.4	12.3 29.5	12.7 13.2	12.1 9.0	12.0 11.9	13.2 17.9	11.7 4.0	8.2 0.1	6.1 -0.6	5.2 0.5	5.1 3.3
0.215	10.4 10.2	10.3 9.6	10.8 15.2	11.5 17.9	11.5 10.4	11.3 10.1	11.8 16.3	12.5 17.6	12.2 10.0	11.9 9.9	12.5 18.0	13.1 13.2	12.2 7.4	12.1 9.3	13.6 13.1	8.8 0.3	4.9 -3.1	3.4 -3.5	3.1 -2.5	3.2 -0.4	3.7 3.1
0.220	9.6 8.2	10.0 11.1	10.7 18.2	10.6 9.6	10.4 8.3	11.1 13.0	11.7 15.6	11.0 8.1	10.9 8.0	12.0 16.3	11.5 8.5	10.0 4.7	11.6 12.7	-3.2 -3.9	-1.4 -8.6	-0.8 -7.5	-0.2 -6.3	0.4 -5.0	0.9 -3.3	1.6 -0.8	2.5 3.1
0.225	8.7 9.1	8.8 18.4	8.0 8.0	8.2 7.0	9.1 14.5	8.0 9.8	7.1 4.9	8.4 9.9	6.5 7.5	3.5 0.4	5.9 5.4	-4.7 -10.7	-4.1 -10.0	-3.1 -8.7	-2.4 -7.7	-1.9 -6.7	-1.4 -5.8	-0.8 -4.6	-0.2 -3.0	0.5 -0.6	1.5 3.4

- F.7 -

TABELA F.7
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 9 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

N = 9 A = 0.0033690 H(1) = 0.255 H(2) = 0.245 D(1) = 0.000 D(2) = 0.250

$\frac{d/\lambda}{h/\lambda}$	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	10.6	10.4	10.6	11.2	11.2	11.0	11.2	11.4	11.2	11.2	11.4	11.4	11.1	11.3	11.4	11.2	11.3	11.7	10.5	8.4	7.1
	13.5	11.6	17.7	20.5	12.8	13.8	23.0	15.5	12.7	16.6	19.1	12.7	13.4	20.4	12.9	10.7	17.5	10.9	4.0	2.4	3.9
0.205	10.7	10.6	11.1	11.6	11.4	11.4	11.9	12.0	11.7	11.9	12.2	12.0	11.9	12.3	12.2	11.9	12.6	12.0	8.9	6.8	6.1
	11.4	11.8	24.1	15.6	11.7	15.5	25.9	13.2	12.7	22.2	16.0	11.6	15.5	20.1	10.5	11.3	23.5	5.1	1.1	0.9	3.3
0.210	10.5	10.7	11.5	11.7	11.5	12.0	12.5	12.2	12.2	12.8	12.7	12.4	12.9	13.2	12.4	13.1	12.8	7.9	5.4	4.6	4.7
	9.9	13.2	23.4	11.7	11.4	21.0	15.9	11.1	14.4	25.4	11.6	11.4	27.2	11.6	9.5	19.1	5.3	-0.8	-1.8	-0.5	2.9
0.215	10.1	10.8	11.3	11.1	11.5	12.3	12.0	11.9	12.7	12.8	12.2	12.9	13.3	11.9	13.3	8.6	3.3	2.1	2.1	2.6	3.3
	9.4	17.3	13.0	9.4	13.3	19.1	10.2	10.7	22.4	11.4	8.9	16.4	10.8	6.3	15.1	-0.0	-4.9	-5.0	-3.7	-1.4	2.8
0.220	9.7	10.1	9.7	10.2	11.0	10.5	10.5	11.6	10.9	10.4	11.7	9.6	9.3	-0.1	-5.8	-2.6	-1.4	-0.6	0.2	1.1	2.1
	11.4	15.0	8.1	10.2	18.7	8.7	8.5	18.4	8.7	6.8	17.0	5.0	5.1	-6.5	-12.9	-9.2	-7.4	-5.9	-4.2	-1.5	2.9
0.225	7.8	6.8	7.8	7.5	6.2	7.4	6.8	4.7	7.1	2.8	8.2	-0.7	-2.8	-3.0	-2.7	-2.3	-1.9	-1.3	-0.7	0.1	1.2
	18.8	7.0	9.6	17.1	5.8	9.4	12.0	3.4	17.1	0.2	19.4	-7.0	-8.8	-8.6	-8.0	-7.1	-6.2	-5.1	-3.6	-1.2	3.2

TABELA F.8
DIRETIVIDADE E RFC DE ANTENAS YAGI DE 10 ELEMENTOS COM
ESPAÇAMENTOS E ALTURA DOS DIRETORES IGUAIS

N = 10 A = 0.0033690 H(1) = 0.255 H(2) = 0.245 D(1) = 0.000 D(2) = 0.250

$\frac{d}{\lambda} \backslash \frac{h}{\lambda}$	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0.200	10.5	10.8	11.5	11.4	11.3	11.8	11.7	11.5	11.8	11.8	11.6	11.8	11.8	11.6	11.8	11.8	11.5	12.2	11.1	8.4	7.0
	11.2	17.5	18.7	12.3	16.4	21.2	13.1	15.5	21.6	13.3	14.8	20.9	12.8	13.9	19.9	11.0	12.7	15.1	4.1	1.8	3.5
0.205	10.6	11.2	11.7	11.5	11.9	12.3	12.0	12.2	12.6	12.3	12.3	12.7	12.4	12.5	12.9	12.4	12.7	12.9	8.9	6.5	5.8
	11.1	23.4	14.0	11.8	21.4	16.1	12.2	19.3	17.4	12.2	18.0	17.4	11.5	17.5	15.0	9.4	19.9	6.4	0.5	0.1	3.0
0.210	10.6	11.5	11.5	11.5	12.3	12.4	12.2	12.9	12.9	12.6	13.2	13.2	12.8	13.6	13.2	12.9	13.8	7.5	4.7	4.0	4.4
	12.0	20.9	10.8	12.6	25.7	11.8	12.5	32.2	12.2	12.2	34.9	11.5	11.5	25.5	8.6	10.6	7.5	-1.5	-2.9	-1.4	2.6
0.215	10.5	10.9	10.7	11.5	11.9	11.6	12.3	12.7	12.2	12.9	13.1	12.4	13.5	12.5	12.3	8.3	1.2	0.8	1.3	2.0	3.0
	15.5	12.0	9.3	17.2	12.6	9.6	17.4	12.8	9.4	17.7	11.3	8.6	19.5	6.7	8.1	-0.0	-7.0	-6.4	-4.8	-2.1	2.5
0.220	9.4	9.0	9.8	9.9	9.5	10.5	10.4	9.9	11.1	10.0	9.8	10.1	5.5	0.1	-6.9	-3.4	-2.1	-1.2	-0.4	0.6	1.9
	15.8	7.8	12.1	13.1	7.5	13.6	11.2	7.2	16.3	7.5	5.7	11.6	1.4	-5.9	-13.9	-10.0	-8.1	-6.6	-4.8	-2.1	2.7
0.225	5.8	7.1	5.9	5.6	7.0	4.7	6.1	5.7	4.5	7.0	7.7	-0.3	-2.5	-2.9	-2.9	-2.6	-2.2	-1.7	-1.1	-0.2	1.0
	7.4	11.9	11.4	6.8	27.3	5.7	9.9	7.2	4.9	4.9	9.2	-6.8	-8.5	-8.5	-8.1	-7.4	-6.5	-5.5	-4.0	-1.6	3.1

APÊNDICE G

ALGUNS VALORES RELATIVOS A CONFIGURAÇÕES OTIMIZADAS DE ANTENAS

YAGI DE 3 ATÉ 10 ELEMENTOS

Neste apêndice são apresentadas algumas configurações otimizadas de antenas Yagi de 3 até 10 elementos, com os diagramas de irradiação e as diretividades respectivas, além das configurações iniciais a partir das quais foram otimizadas.

Quanto aos diagramas de irradiação cabe observar que no eixo horizontal estão assinalados os módulos do vetor de Poynting (em dB) normalizados em relação ao valor máximo, enquanto no eixo vertical estão indicados os ângulos polares.

APÊNDICE H

COMENTÁRIOS SOBRE DESENVOLVIMENTO TEÓRICO EFETUADO POR KING

Na obra de King et al. (1968) há um desenvolvimento teórico específico no caso em que o excitador é ressonante, ou seja $h_2 = \lambda/4$, pois nesse caso certas fórmulas apresentadas nesse texto resultam em in determinações da forma 0/0.

As otimizações realizadas para as alturas por Chen e Cheng (1975) porém comprovaram que a altura do excitador não precisa ser ressonante para satisfazer a condição de diretividade máxima. Desta forma foi omitida deliberadamente a formulação para o caso do excitador ressonante.

Existem no livro de King (1968) na parte relativa ã ante na Yagi, algumas fórmulas com erros tipográficos. Apresentamos abaixo essas fórmulas escritas corretamente:

Página 192

$$A_2 \int_{-h_2}^{h_2} M_{0z'_2} K_{22d}(z_2, z'_2) dz'_2 + \sum_{i=1}^N B_i \int_{-h_i}^{h_i} F_{0zi} K_{2id}(z_2, z'_i) dz'_i +$$

$$\sum_{i=1}^N D_i \int_{-h_i}^{h_i} H_{0zi} K_{2id}(z_2, z'_i) dz'_i =$$

$$= \frac{j4k}{\tau_0 \cos \beta_0 h_2} \left[\frac{1}{2} Voz Moz_2 + U_2 Foz_2 \right] \quad (6.25)$$

$$\begin{aligned} A_2 \int_{-h_2}^{h_2} Moz'_2 Kk_{2d}(z_k, z'_2) dz'_2 + \sum_{i=1}^N B_i \int_{-h_i}^{h_i} Foz_i Kk_{id}(z_k, z'_i) dz'_i + \\ + \sum_{i=1}^N D_i \int_{-h_i}^{h_i} Hoz_i Kk_{id}(z_k, z'_i) dz'_i = \\ = \frac{j4k}{\tau_0 \cos \beta_0 h_k} U_k Foz_k \quad k = 1, 3, 4 \dots N \end{aligned} \quad (6.26)$$

Página 193

$$R_{kih} = \sqrt{(h_k - z'_i)^2 + b_{ik}^2} \quad (6.35)$$

Página 199

$$[\psi_{dU}^h] \{B'\} + [\psi_{dD}^h] \{D\} - \{\psi_{2dU}^h\} A'_2 \quad (6.74)$$

$$\{\psi_{2dV}^h\} = \begin{Bmatrix} \psi_{12dU}^h \\ \vdots \\ \psi_{N2dU}^h \end{Bmatrix} \quad (6.75)$$

Página 200

$$\begin{aligned} \Psi_{22dV}^h = & \frac{1 - \sqrt{2}}{\Delta_2^2} \left\{ \left[C_a(h_2, \frac{h_2}{2}) - C_a(h_2, h_2) \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right] - \left[C_a(h_2, 0) - C_a(h_2, h_2) \right] \cdot \right. \\ & \cdot \left[\cos \frac{\pi}{8} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right] + \frac{1}{\Delta_2} \left\{ \left[-S_a(h_2, \frac{h_2}{2}) + S_a(h_2, h_2) + E_a(h_2, \frac{h_2}{2}) - \right. \right. \\ & \left. \left. - E_a(h_2, h_2) \right] + \frac{1}{\sqrt{2}} \left[S_a(h_2, 0) - S_a(h_2, h_2) - E_a(h_2, 0) + E_a(h_2, h_2) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.76c)$$

Página 205

$$\left| S_R(R_2, \theta, \phi) \right| = \frac{P_{2N} \zeta_0}{4\pi^2 R_2^2 G_{2N}} \frac{\cos^2 \beta_0 h_2 |A_2|^2}{|V_{02}|^2} |F_{vN}(\theta, \phi)|^2 \quad (6.93b)$$

$$G_{2N} = \frac{\zeta_0}{4\pi^2} \frac{\cos^2 \beta h_2}{|V_{02}|^2} |A_2|^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F_{vN}(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (6.95b)$$

$$P_{N_{\text{omni}}} = \frac{P_{2N} \zeta_0}{\pi G_{2N}} \cos^2 \beta_0 h_2 \frac{|A_2|^2}{|V_{02}|^2} |F_{vN}(\theta, \phi)|^2 \quad (6.76)$$

Página 206

$$D_N \left(\frac{\pi}{2}, 0 \right) = \frac{\zeta_0}{\pi G_{2N}} \frac{\cos^2 \beta_0 h_2 |A_2|^2}{|V_{02}|^2} |F_{VN}(\theta, \phi)|^2 \quad (6.97)$$

APÊNDICE G.1

ALGUNS VALORES RELATIVOS A CONFIGURAÇÕES OTIMIZADAS DE ANTENAS

YAGI DE 3 ATÉ 10 ELEMENTOS

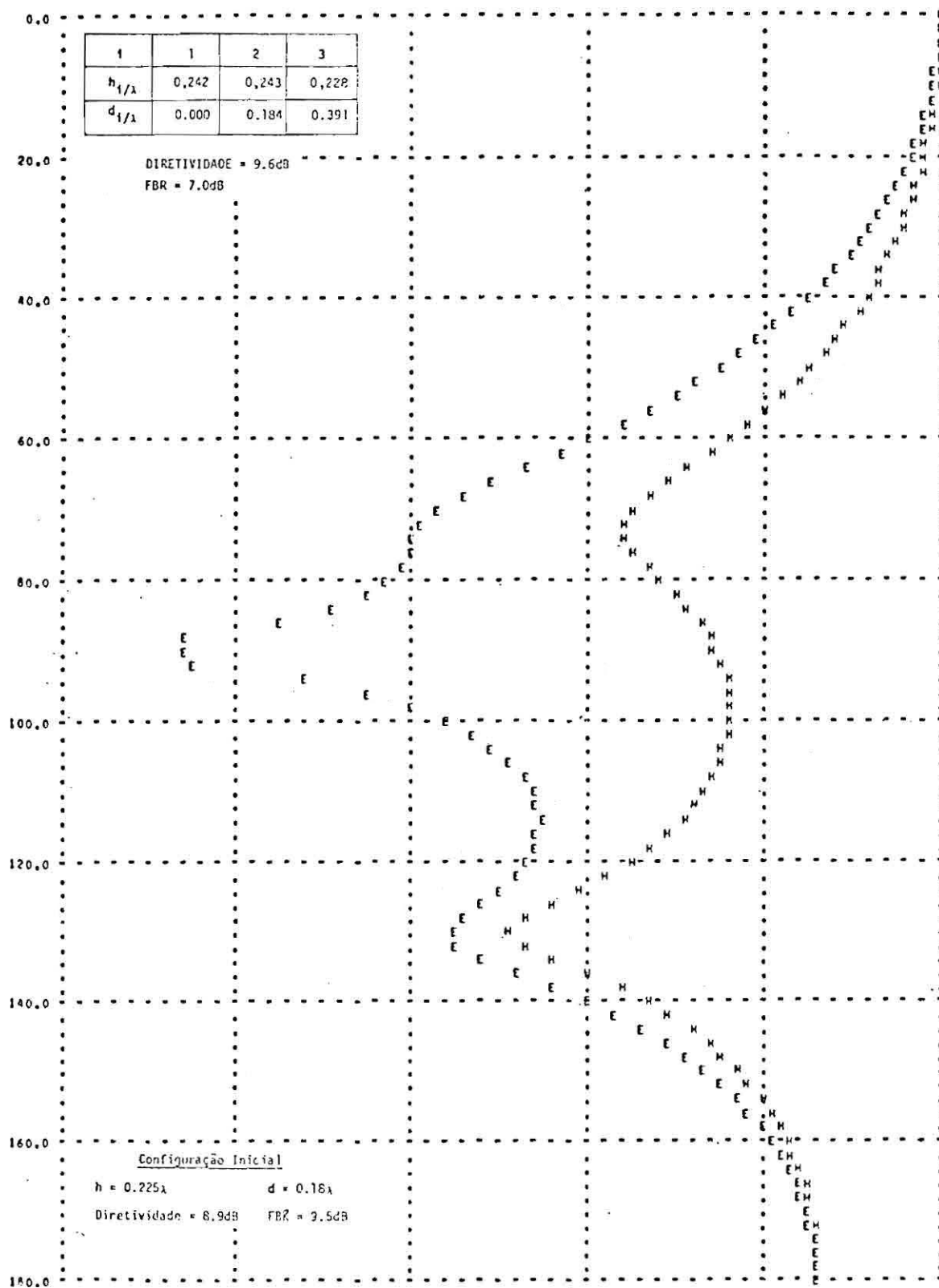
Neste apêndice são apresentadas algumas configurações otimizadas de antenas Yagi de 3 até 10 elementos, com os diagramas de irradiação e as diretividades respectivas, além das configurações iniciais a partir das quais foram otimizadas.

Quanto aos diagramas de irradiação cabe observar que no eixo horizontal estão assinalados os módulos do vetor de Poynting (em dB) normalizados em relação ao valor máximo, enquanto no eixo vertical estão indicados os ângulos polares.

- G.2 -

OS PONTOS E E H NO GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

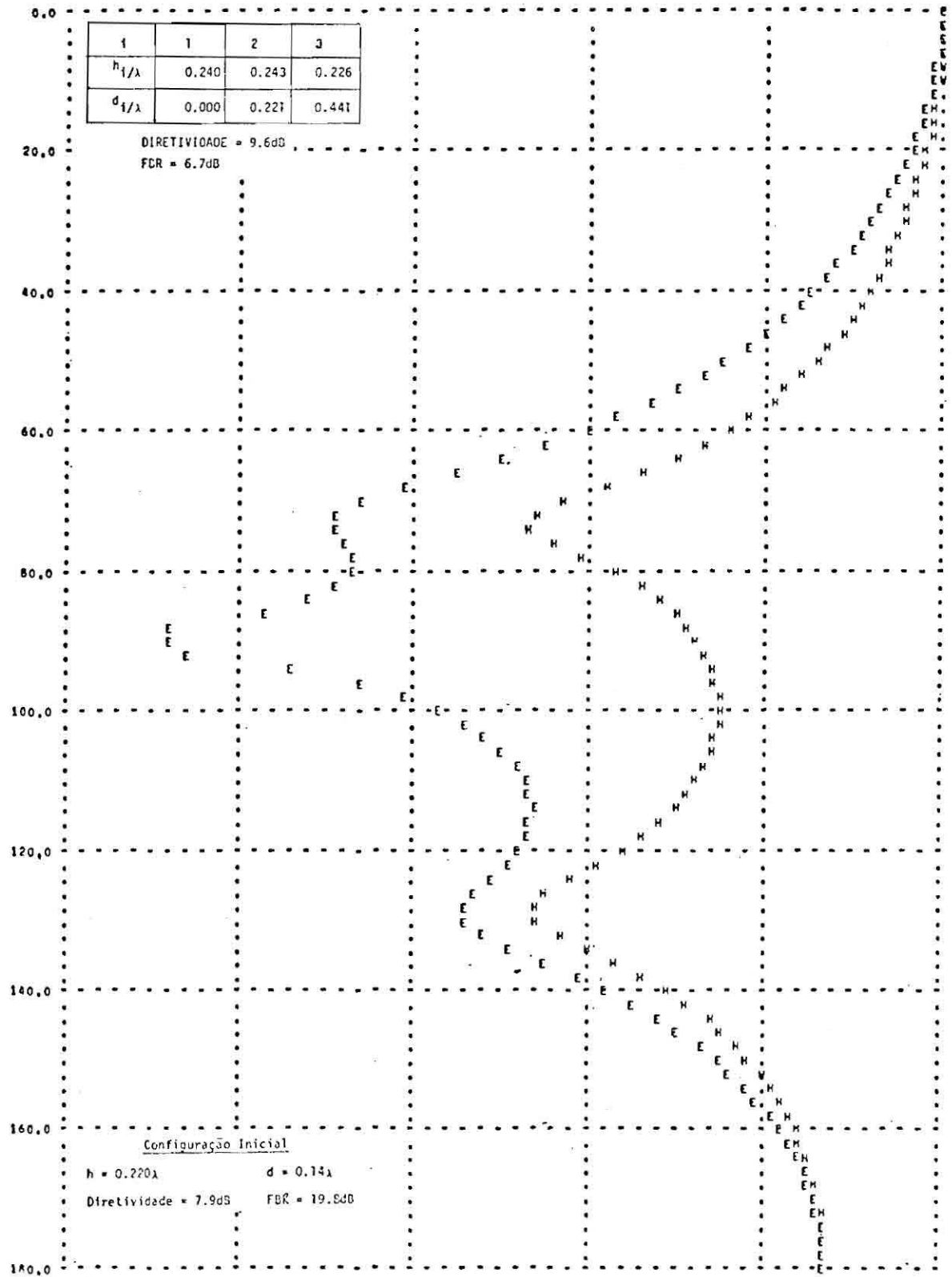
CURVA H..... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E..... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



- G.3 -

OS PONTOS E E H NO GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

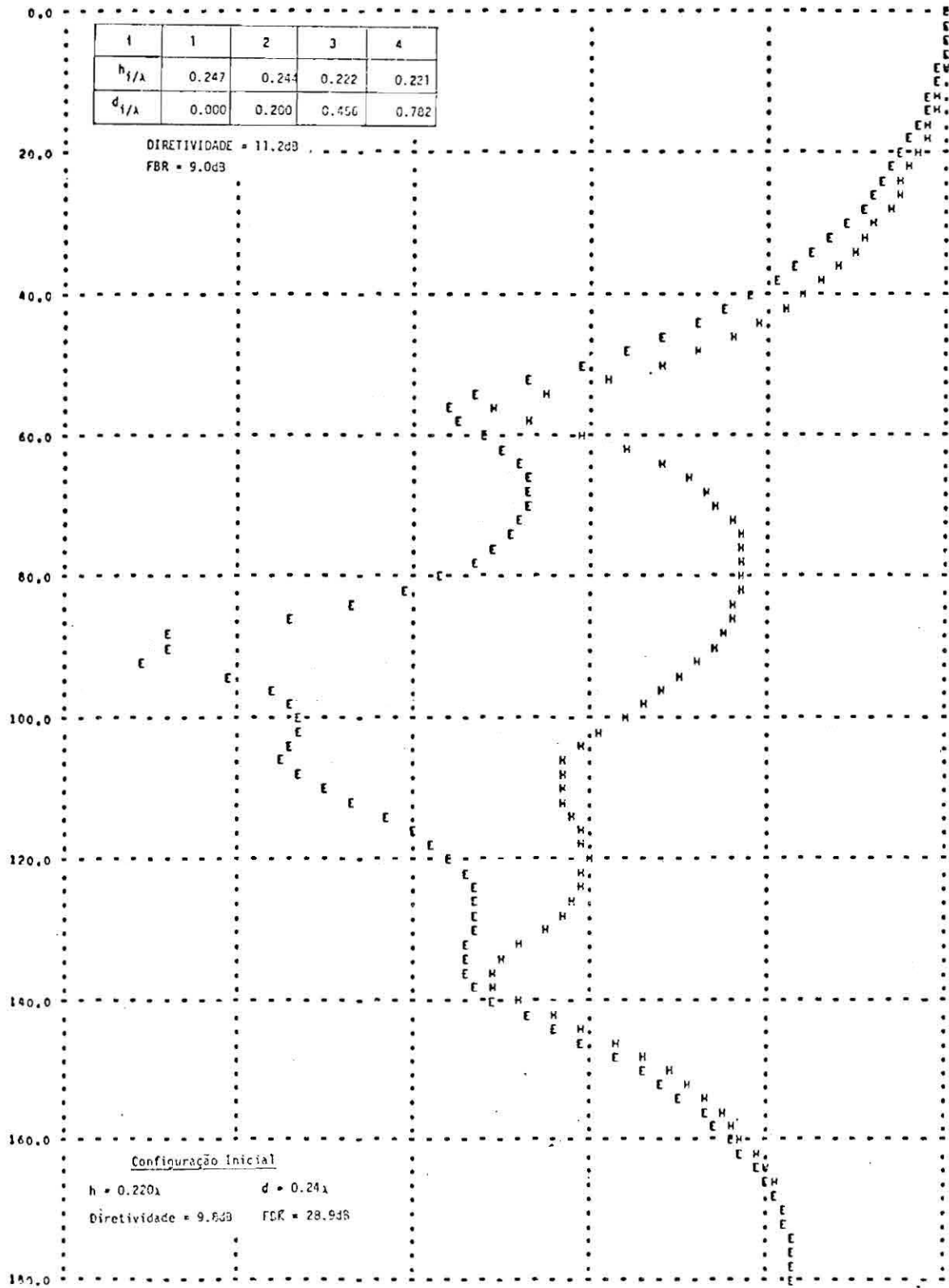
CURVA H..... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E..... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



- G.4 -

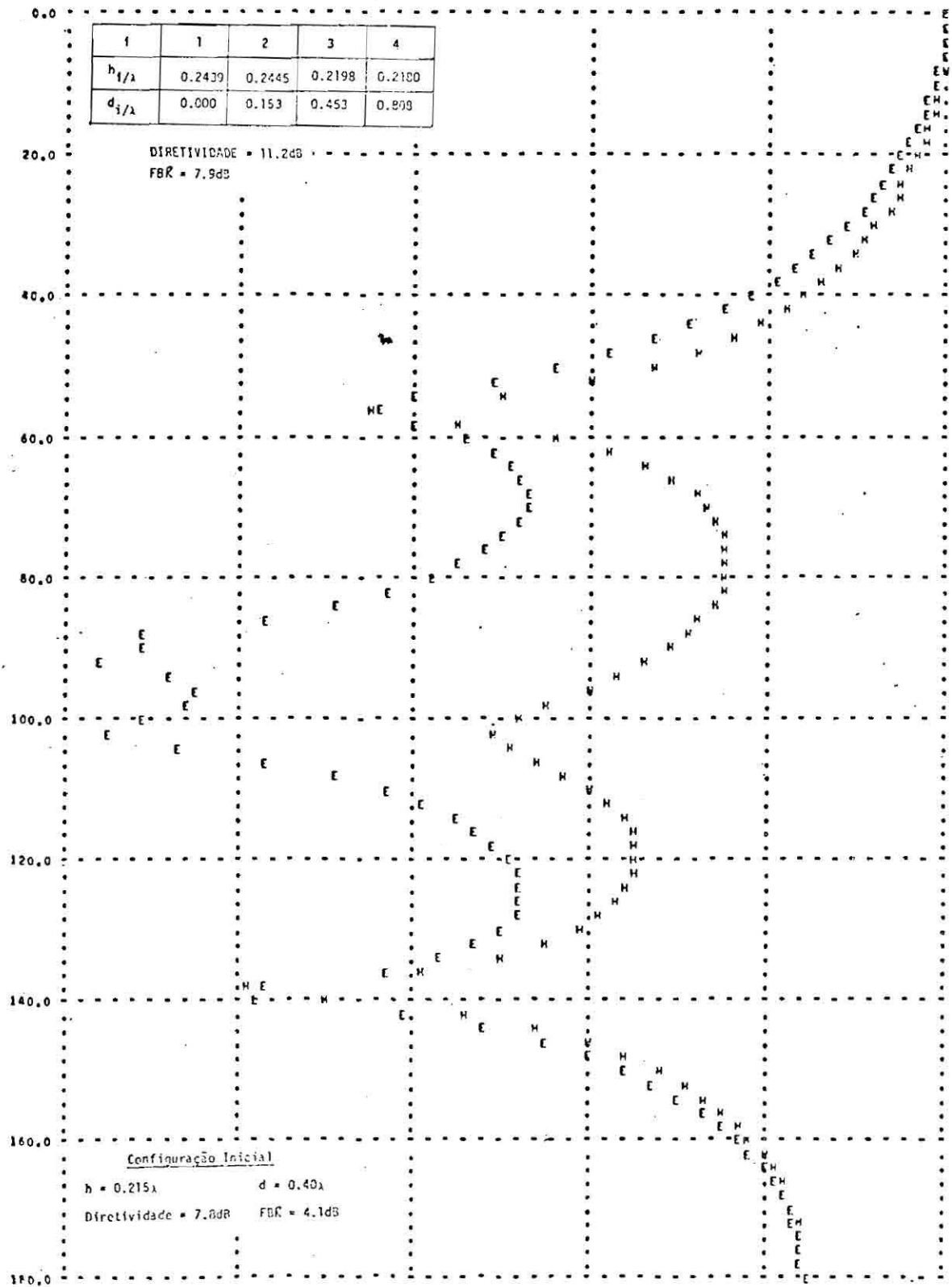
OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL), E PLANO H (VERTICAL), RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -30,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



OS PONTOS E E H AO GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

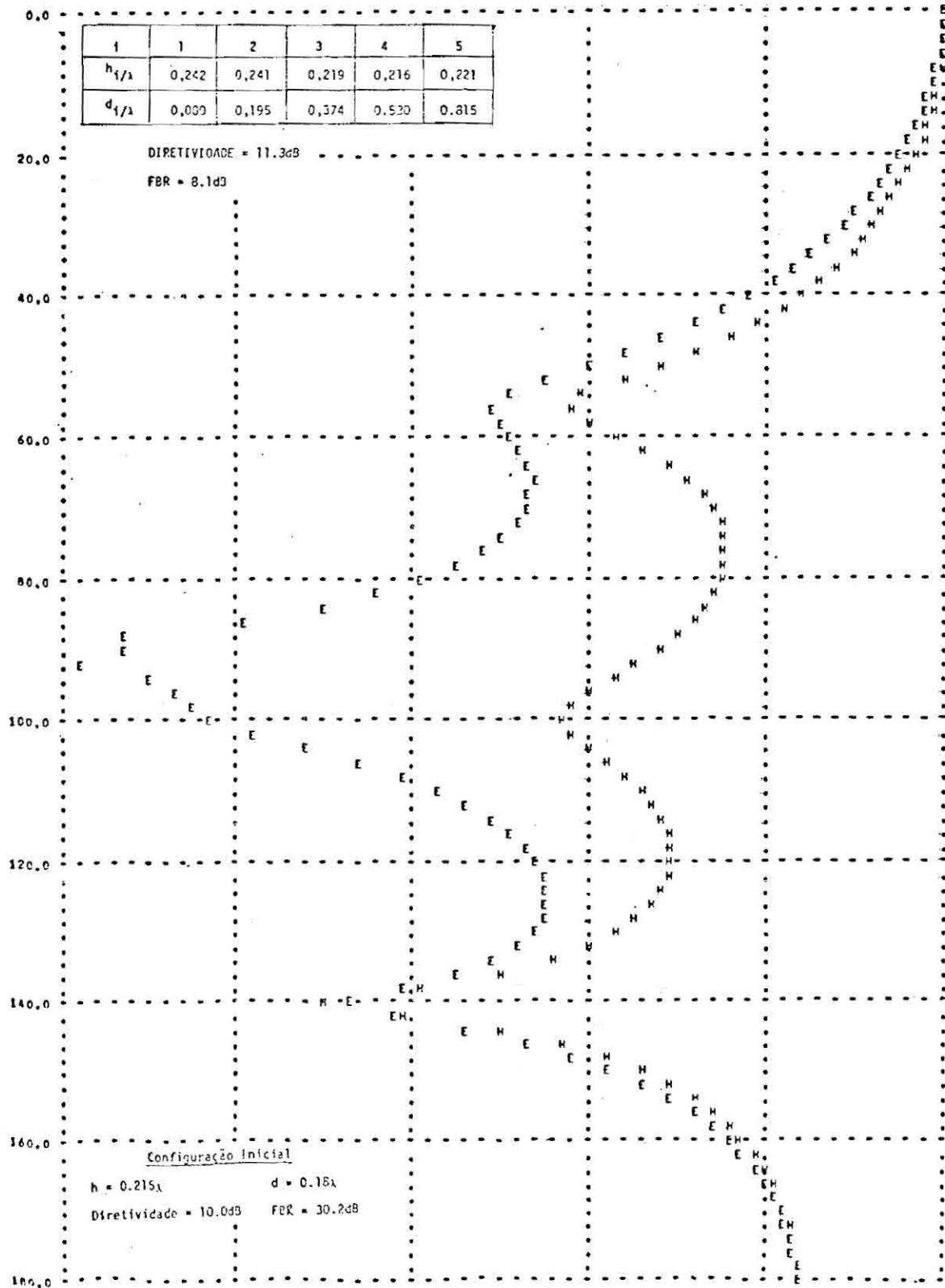
CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



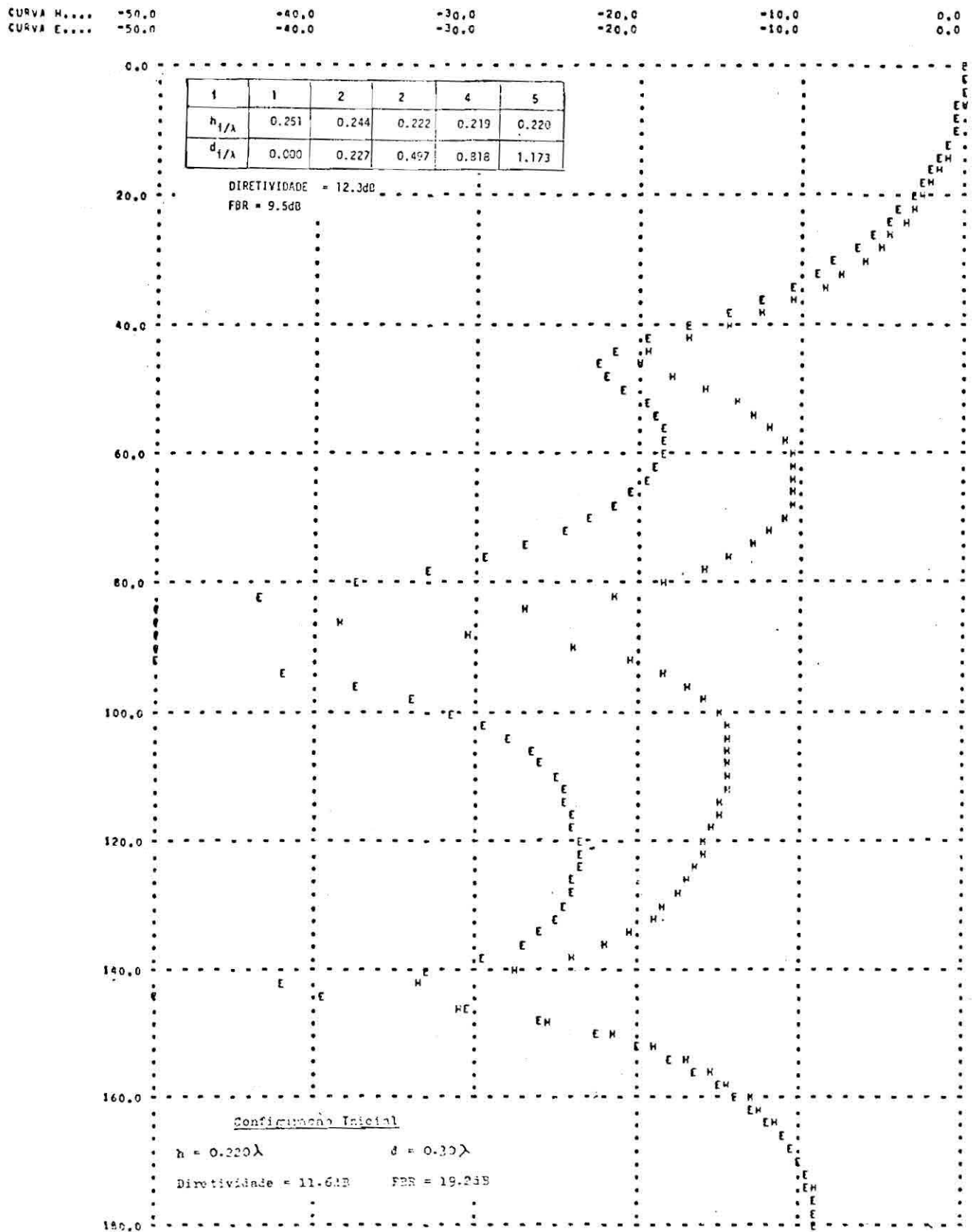
- G.6 -

OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

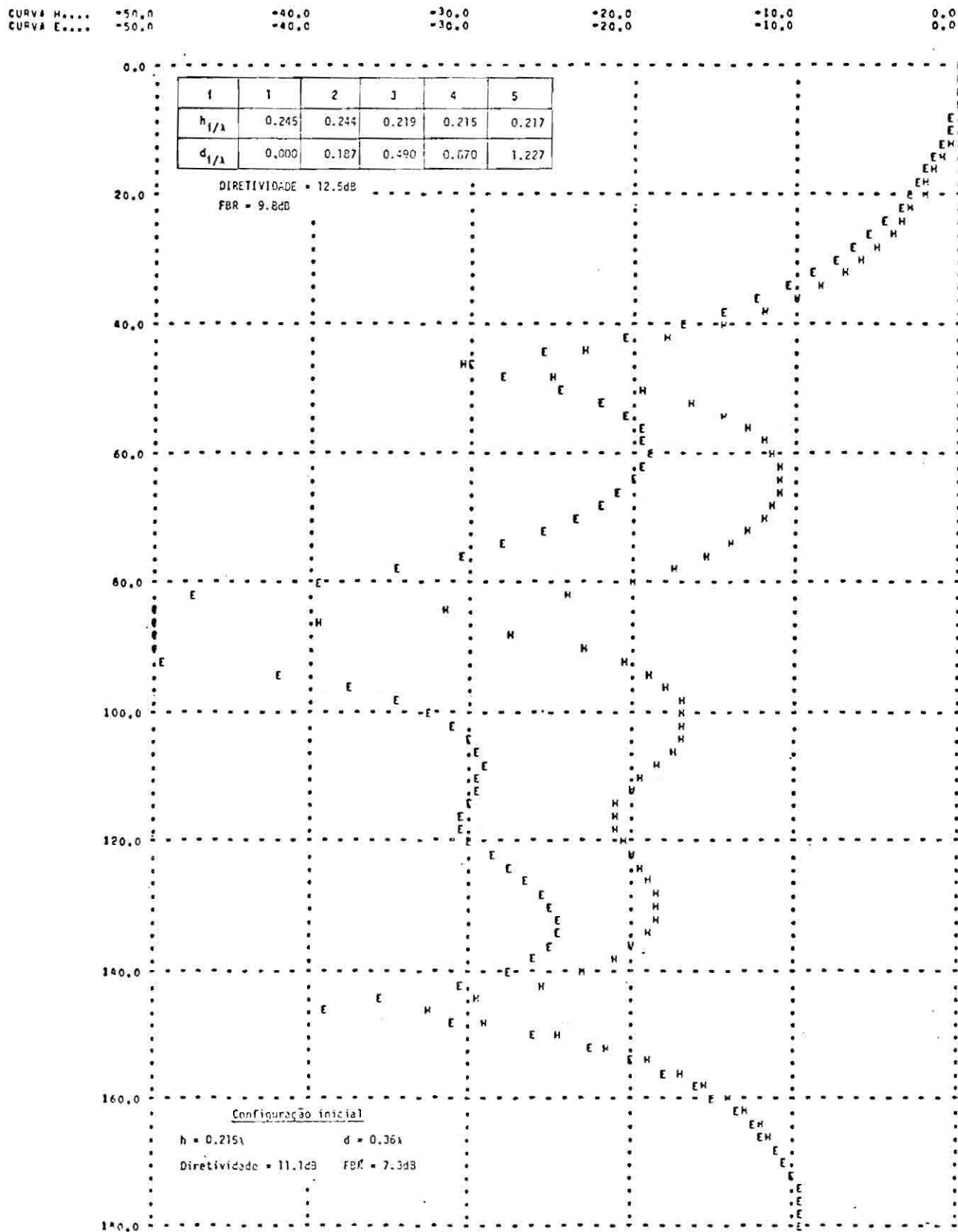
CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



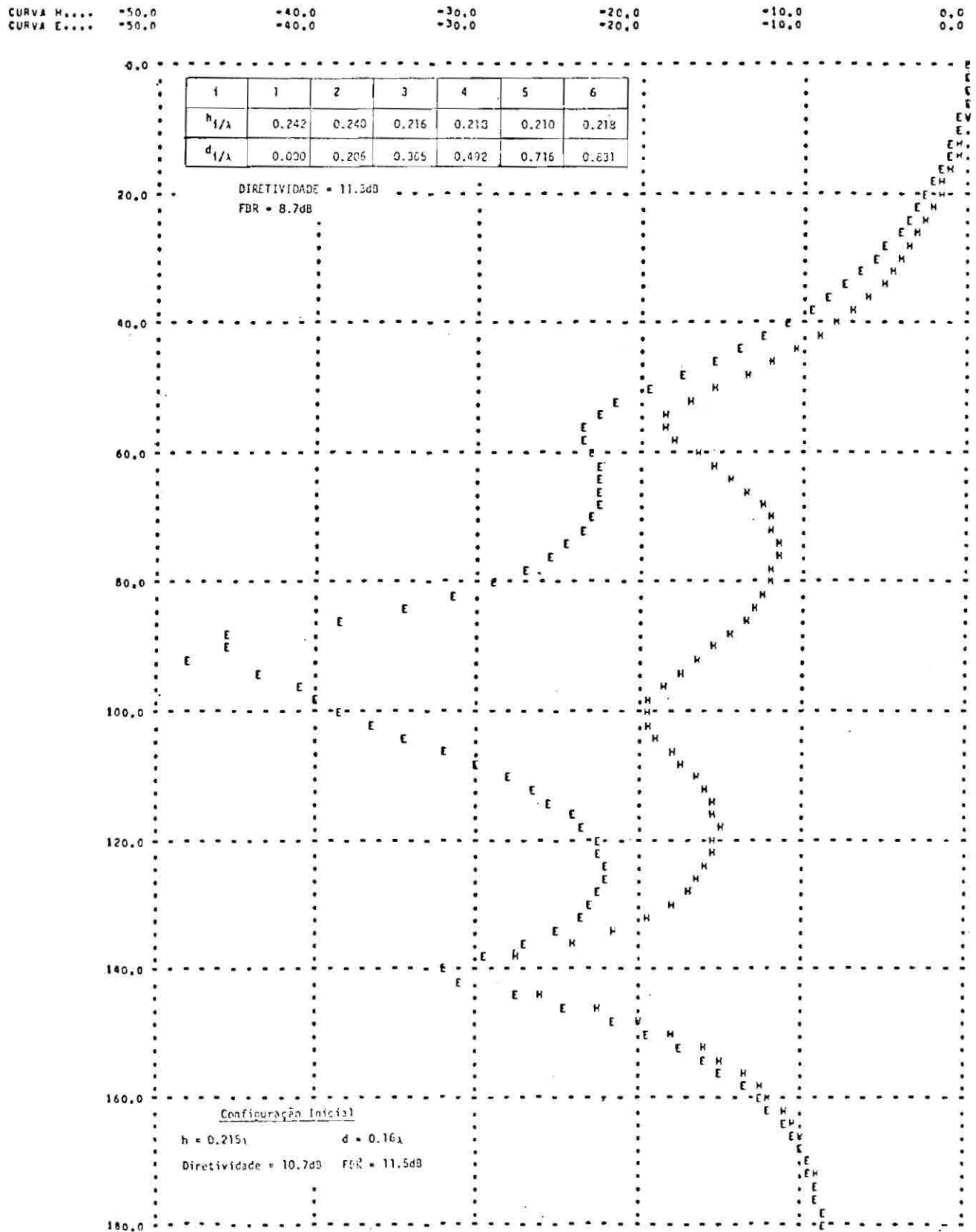
OS PONTOS E E H NO GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE



OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

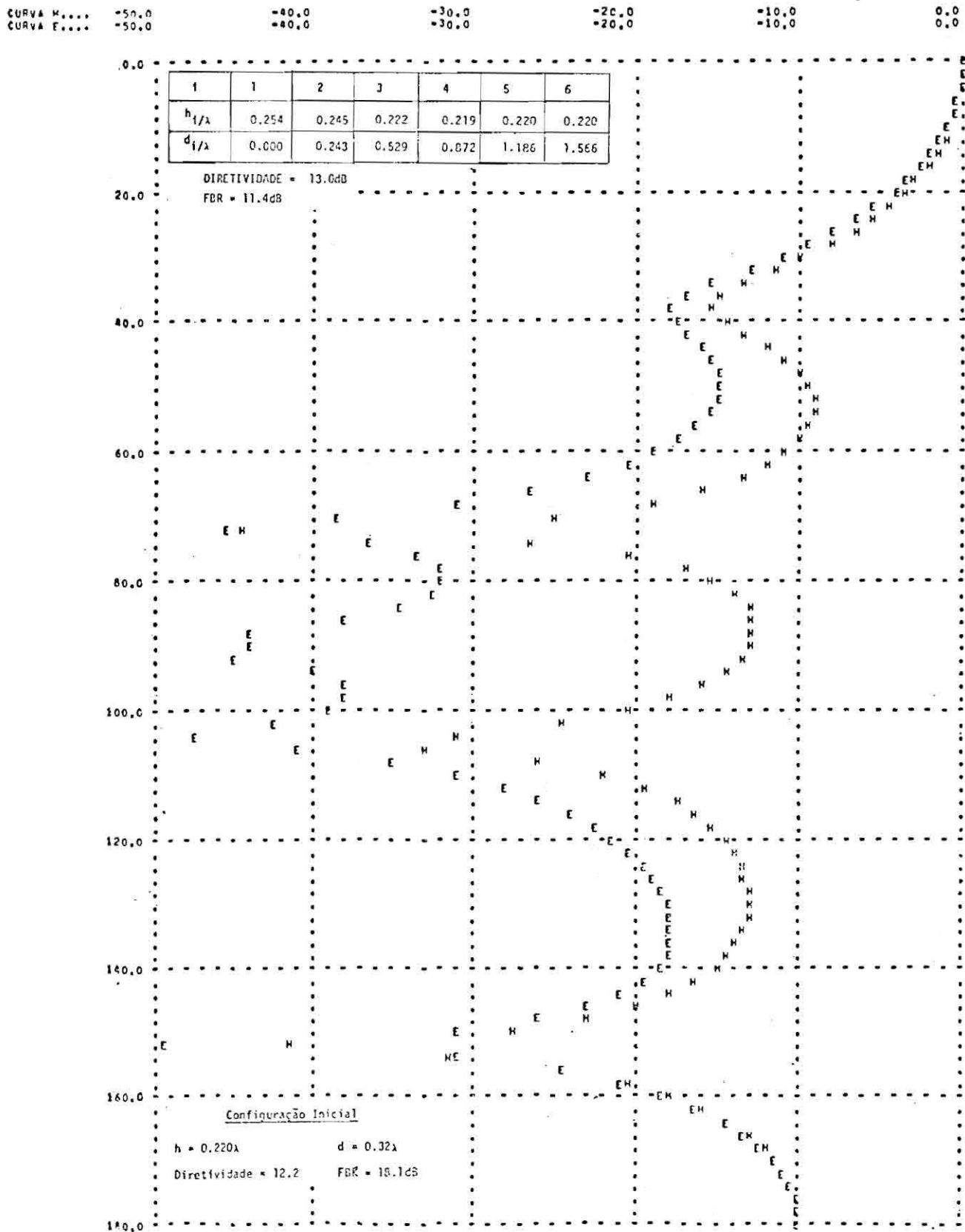


OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE



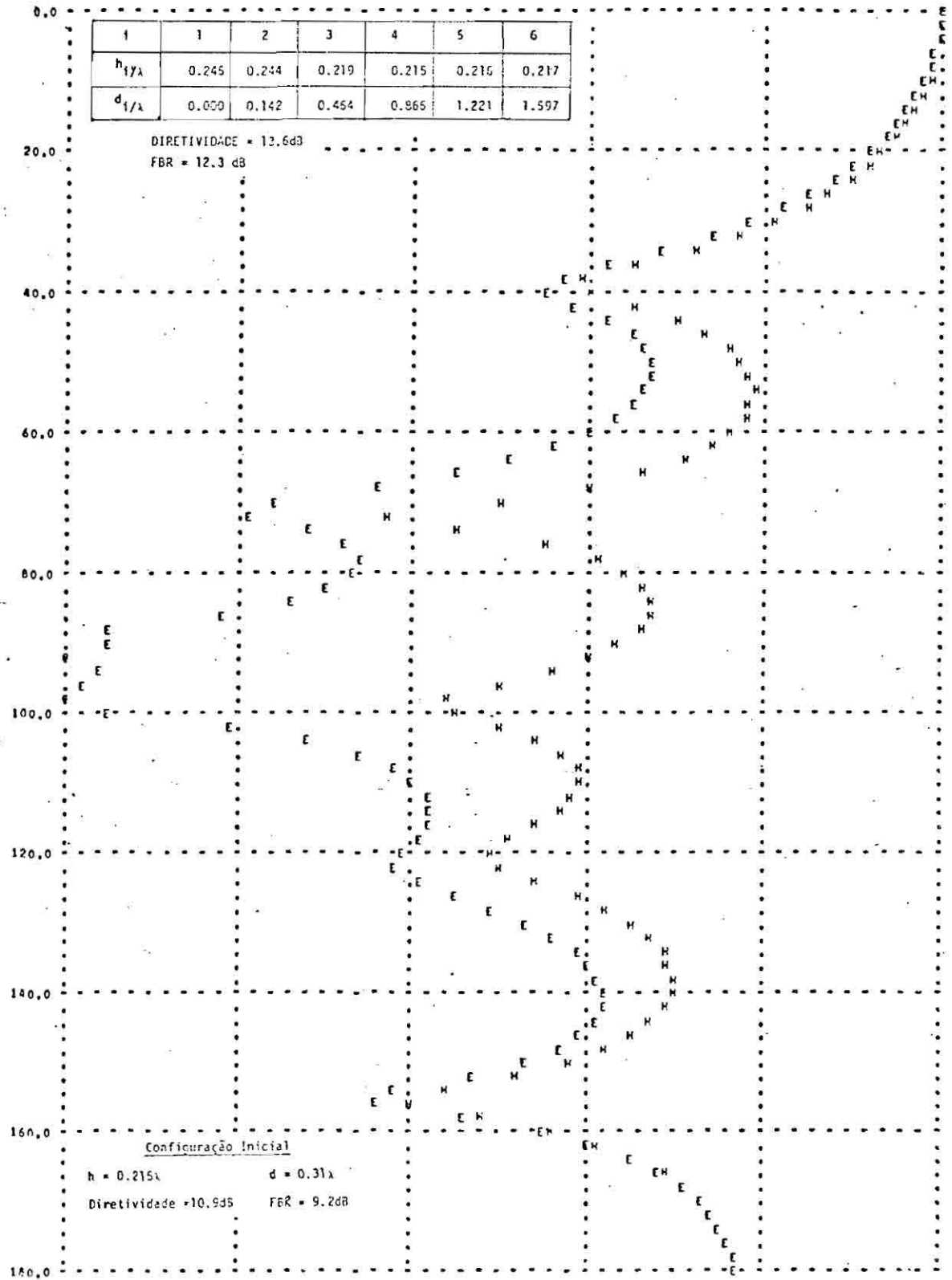
- G.10 -

OS PONTOS E E H AC GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE



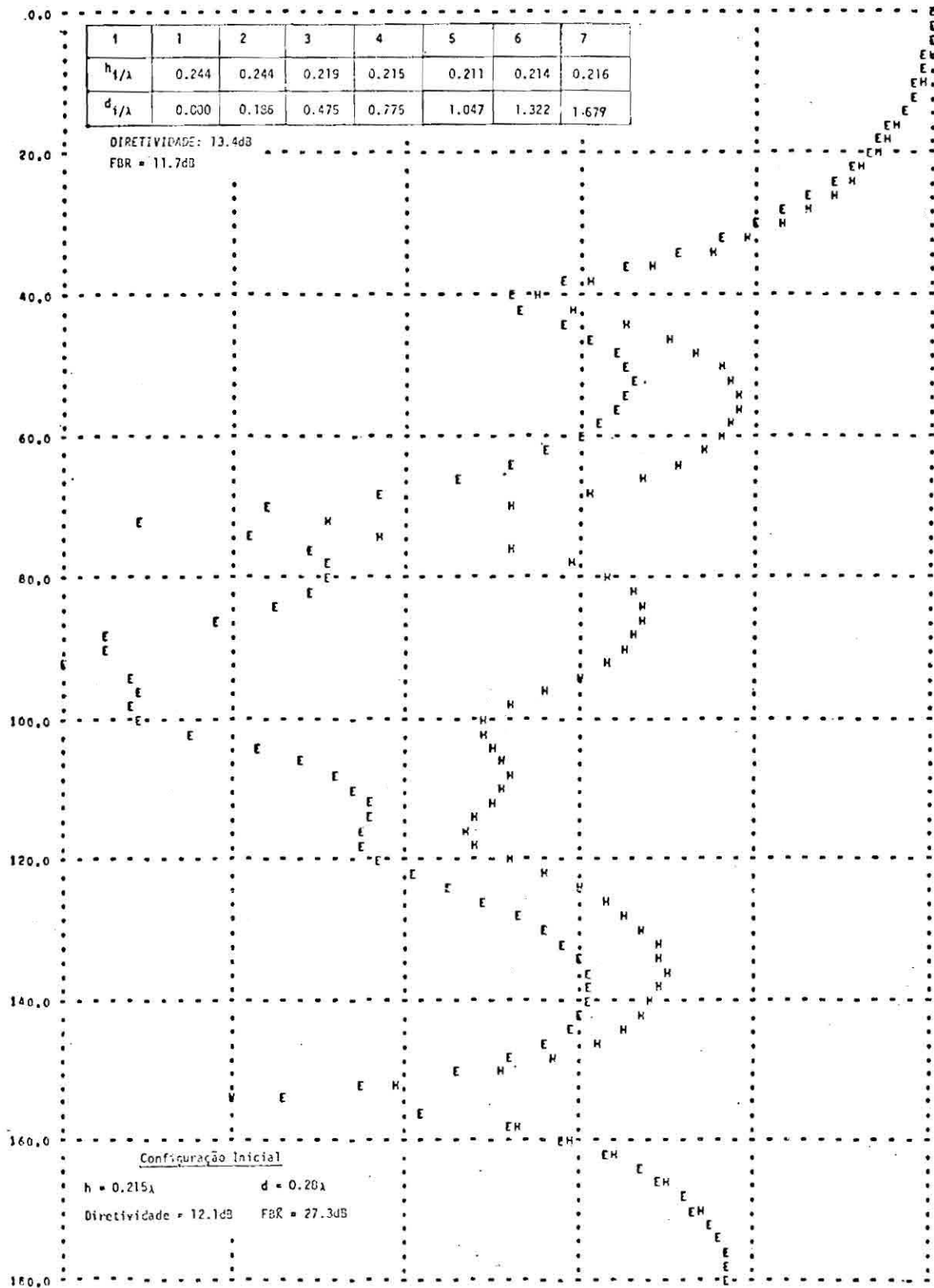
OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



OS PONTOS E E H NO GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

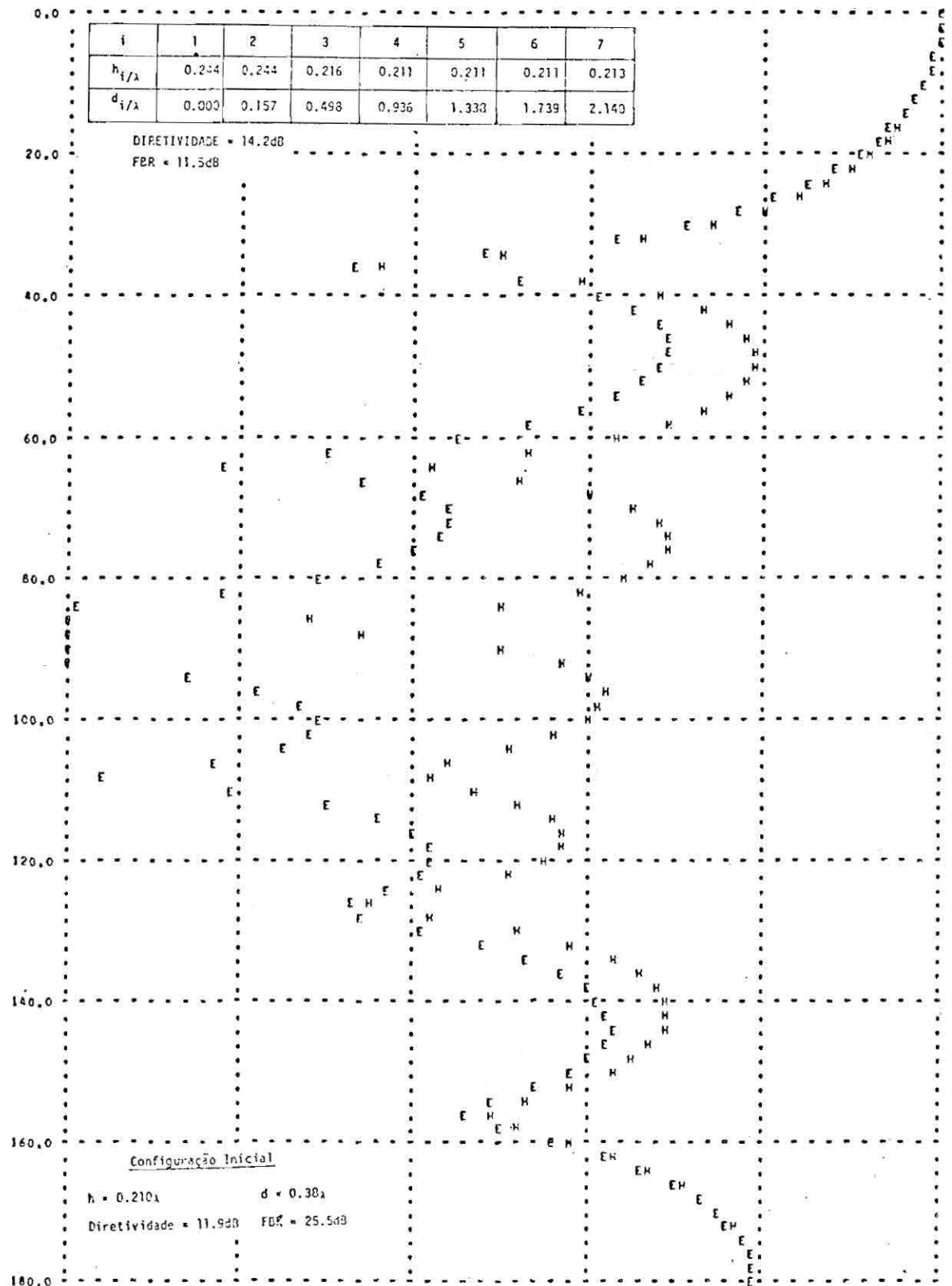
CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



- G.13 -

OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



f	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_{1/\lambda}$	0.243	0.239	0.215	0.212	0.207	0.211	0.206	0.213
$d_{1/\lambda}$	0.000	0.196	0.334	0.497	0.726	0.854	1.132	1.278

DIRETIVIDADE = 12.5dB
FBR = 10.1dB

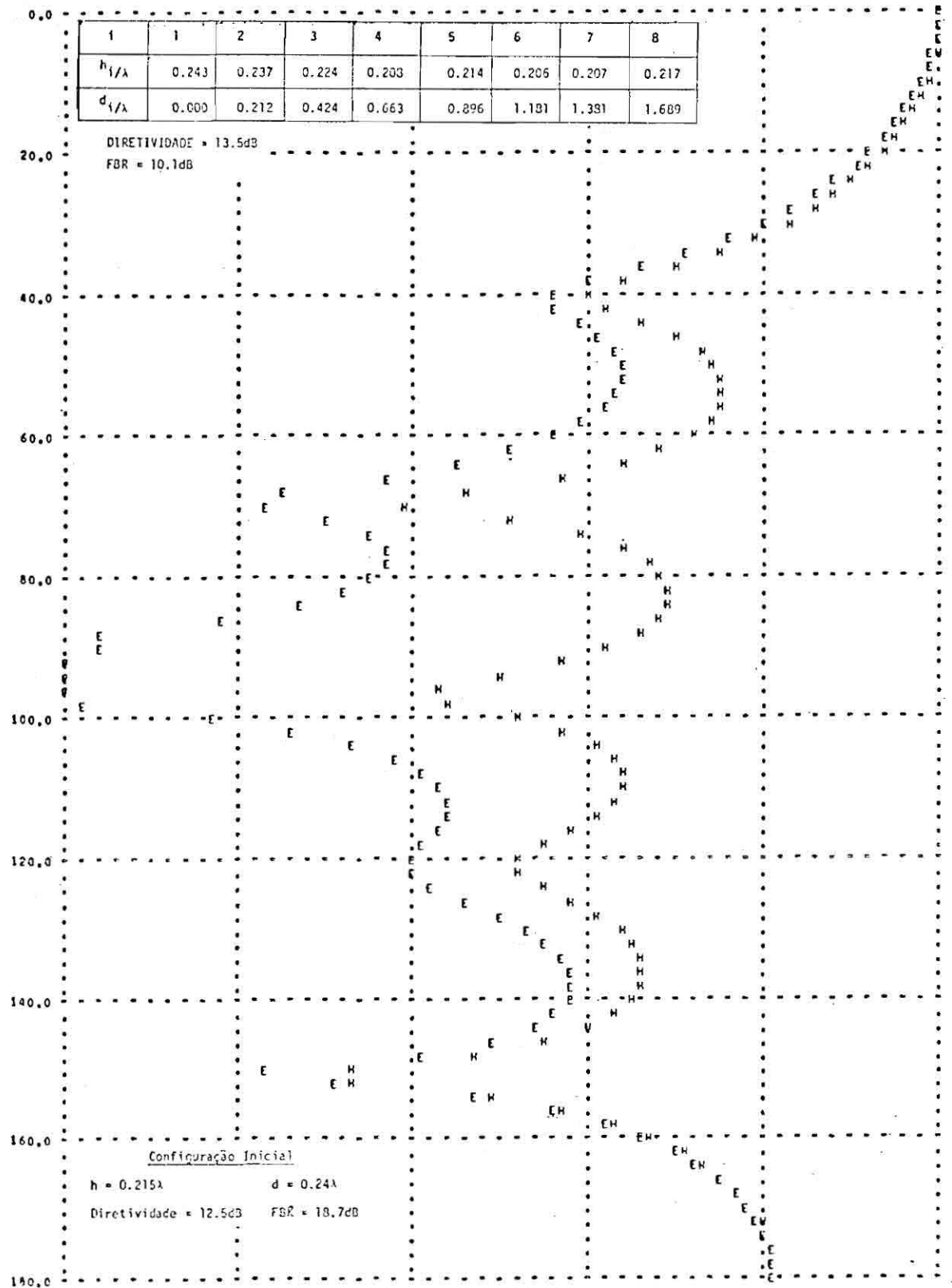
Configuração Inicial

$h = 0.210\lambda$ $d = 0.18\lambda$
Diretividade = 11.7dB FBR = 15.5dB

- 0.15 -

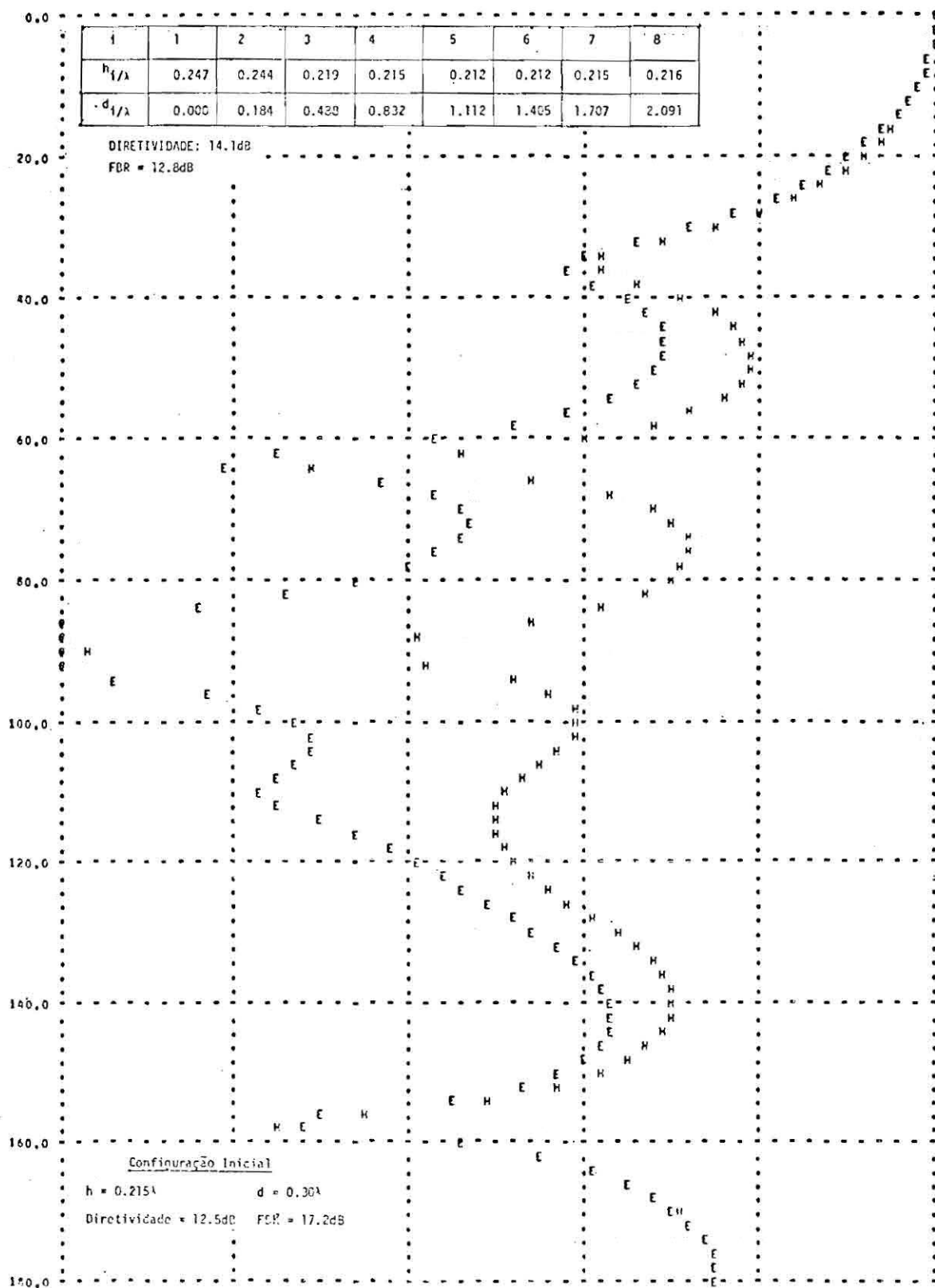
OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



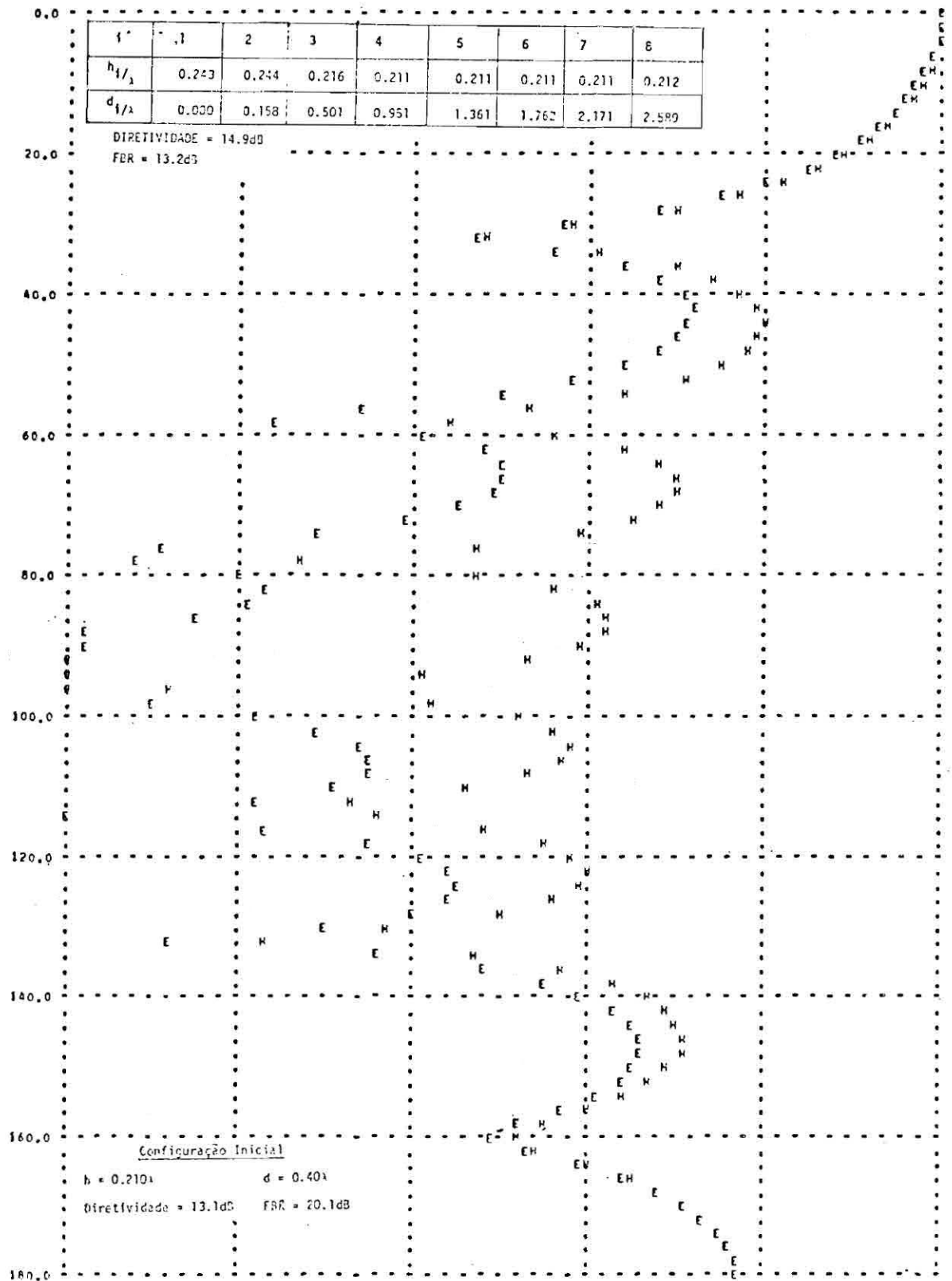
OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



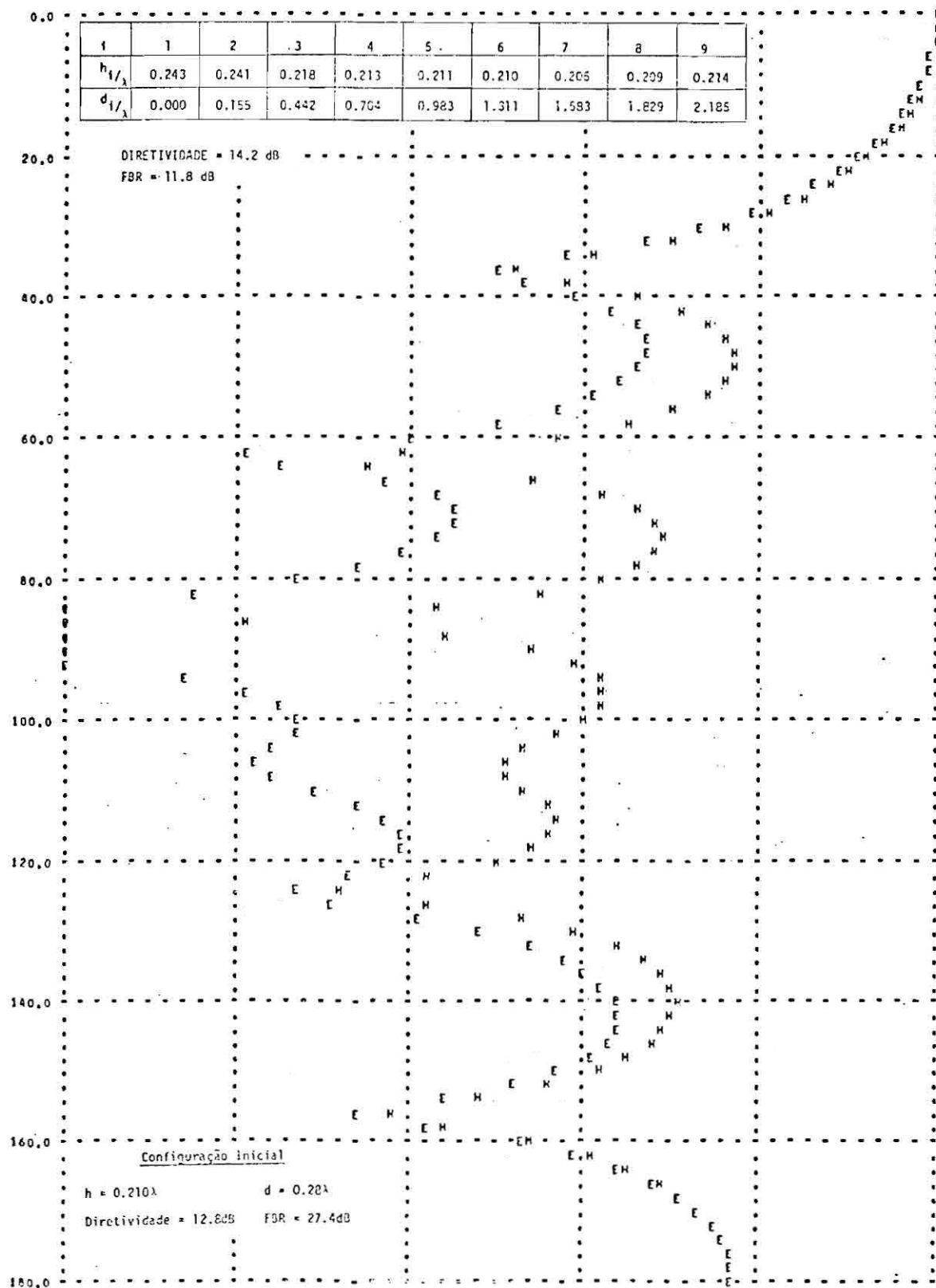
OS PUNTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PUNTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0

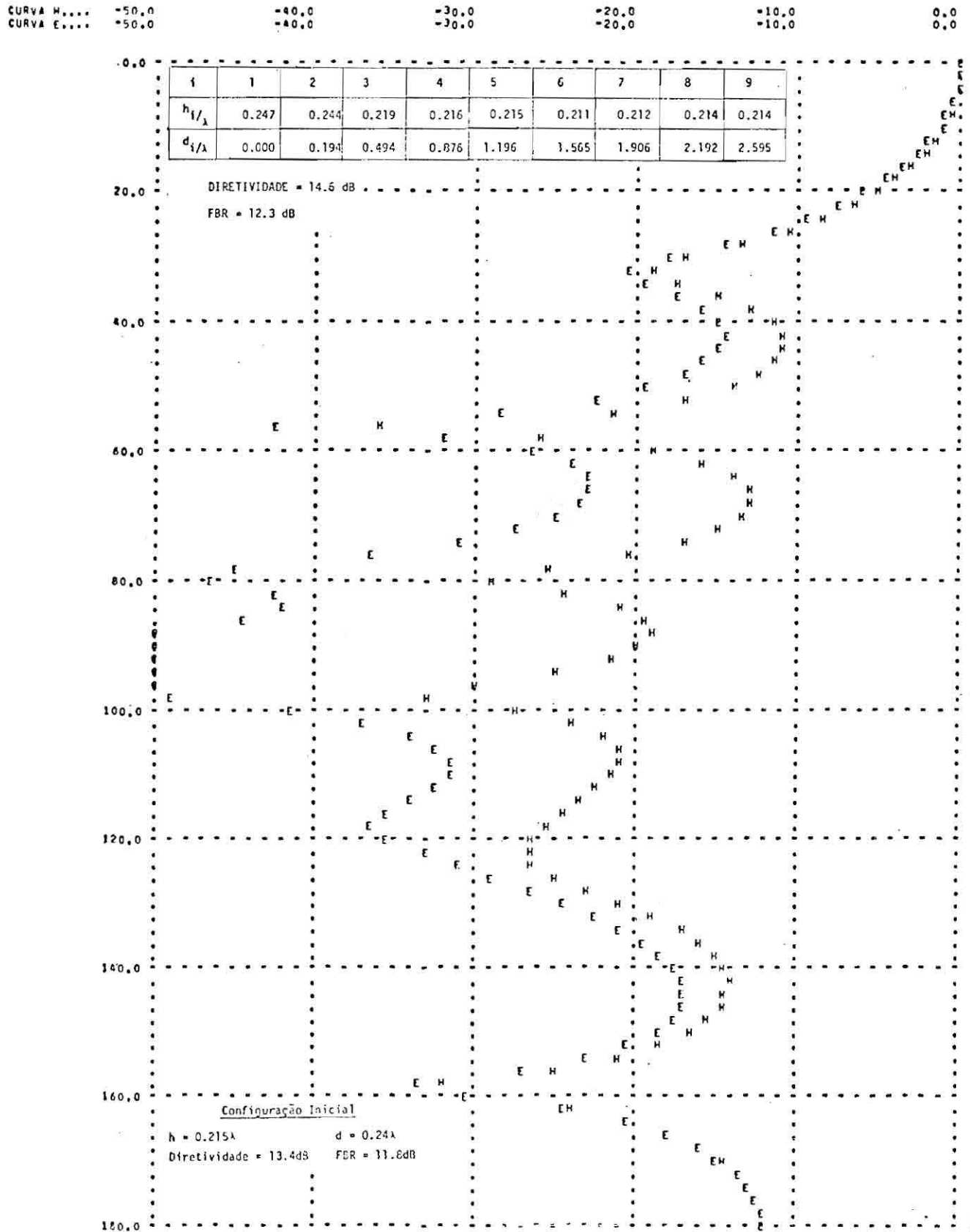


OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0

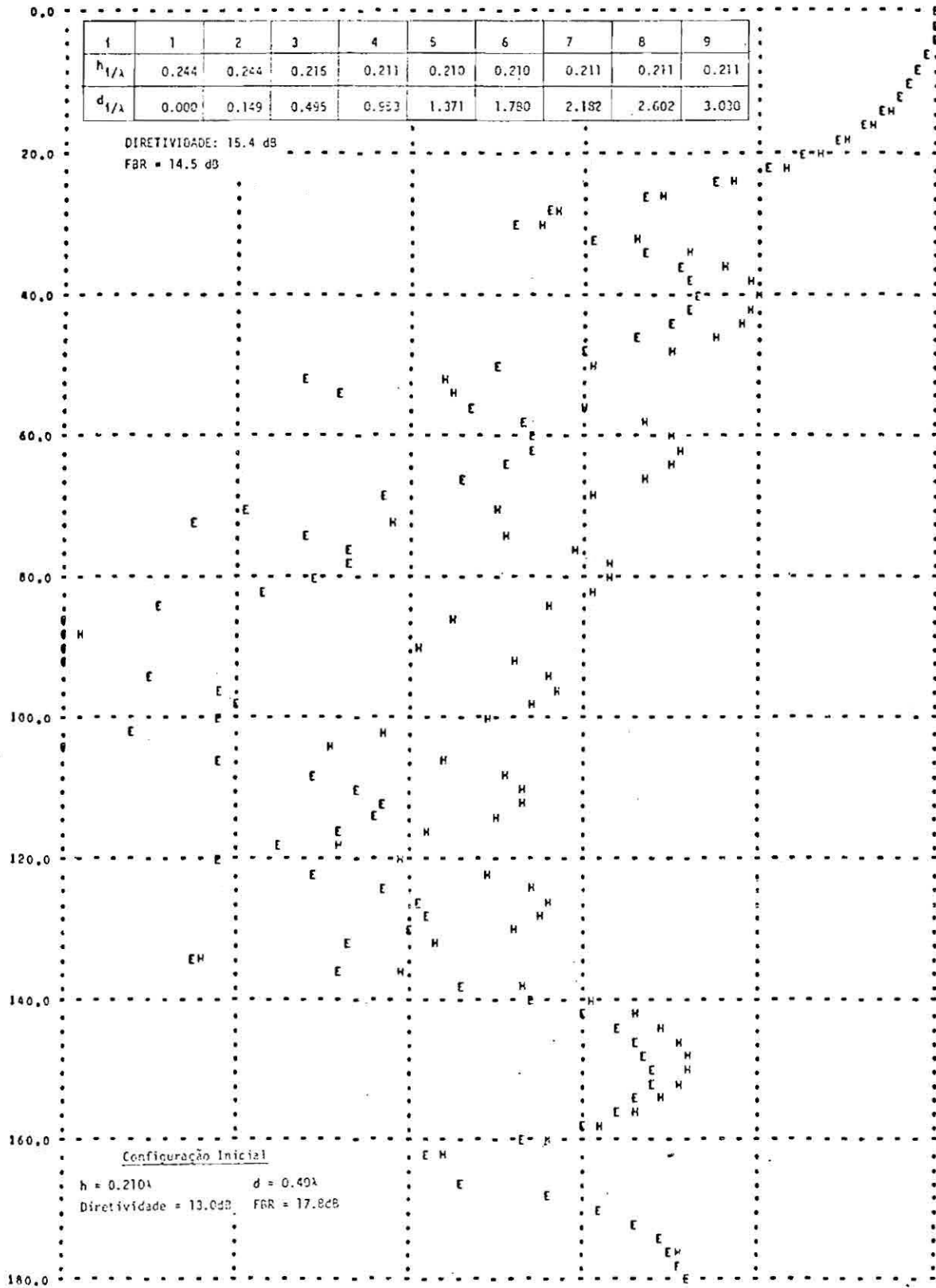


OS PONTOS E E H NO GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE



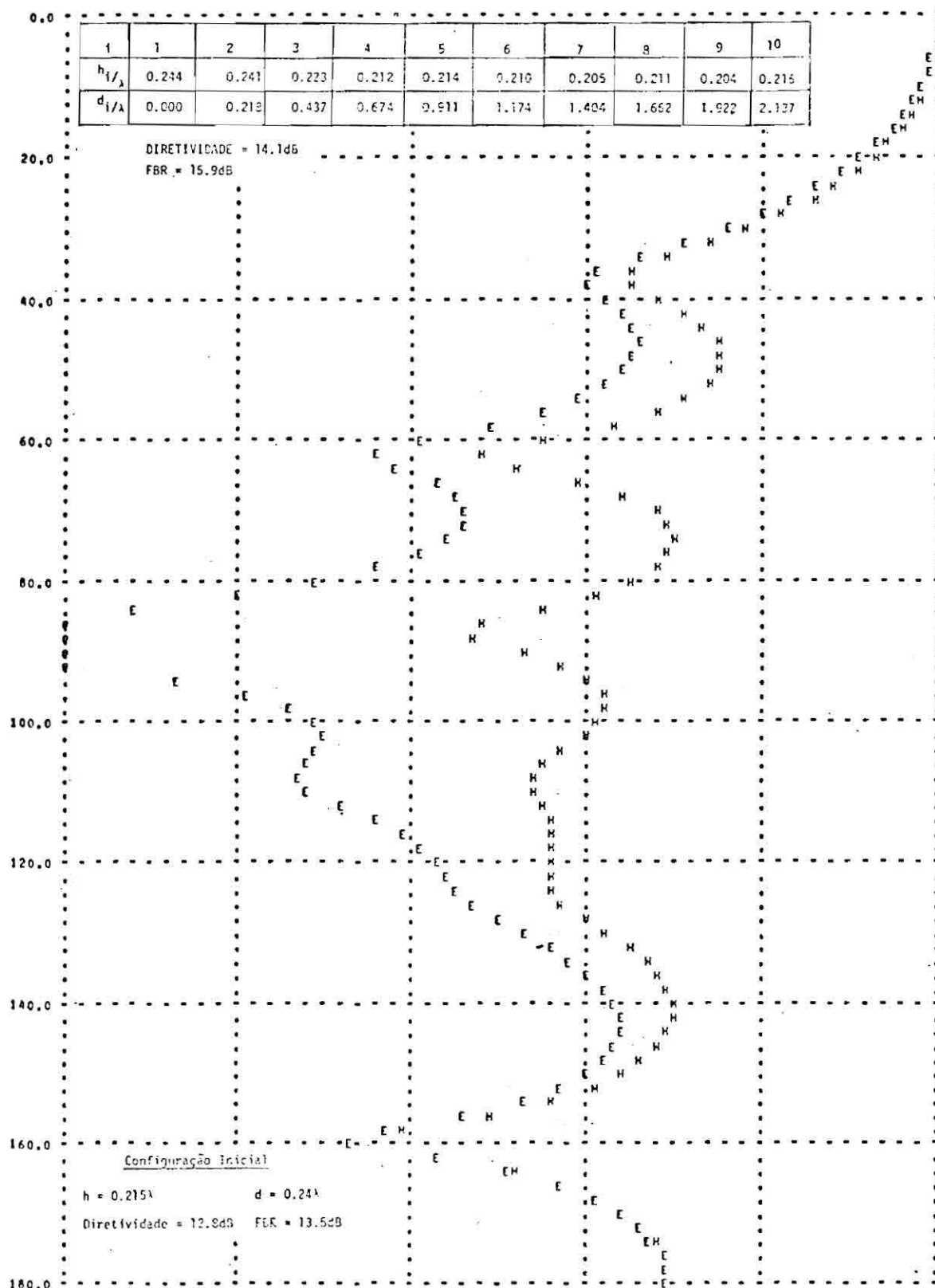
OS PONTOS E E H AC GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... ~50,0 ~40,0 ~30,0 ~20,0 ~10,0 0,0
CURVA E.... ~50,0 ~40,0 ~30,0 ~20,0 ~10,0 0,0



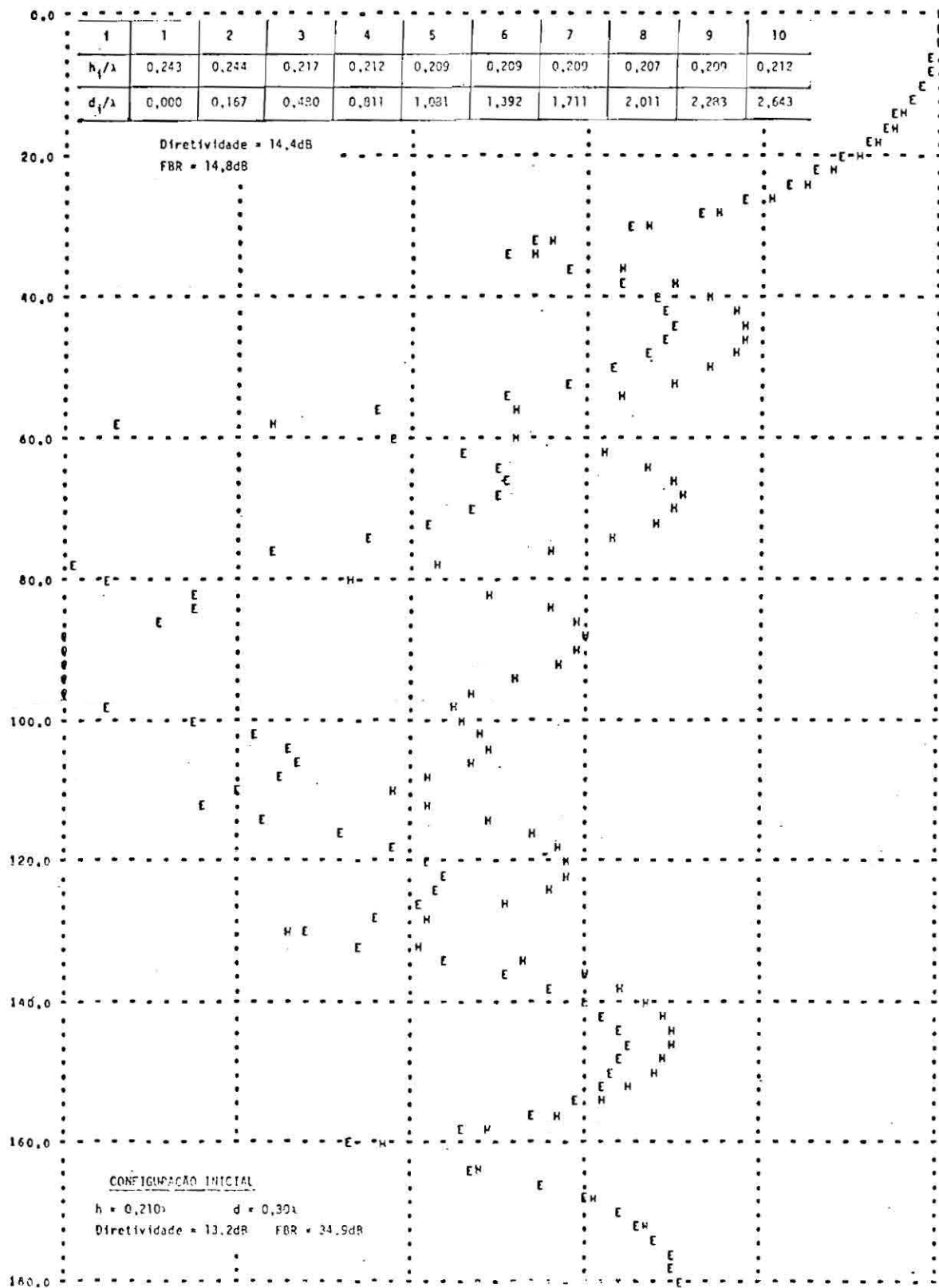
OS PONTOS E E H NO GRÁFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



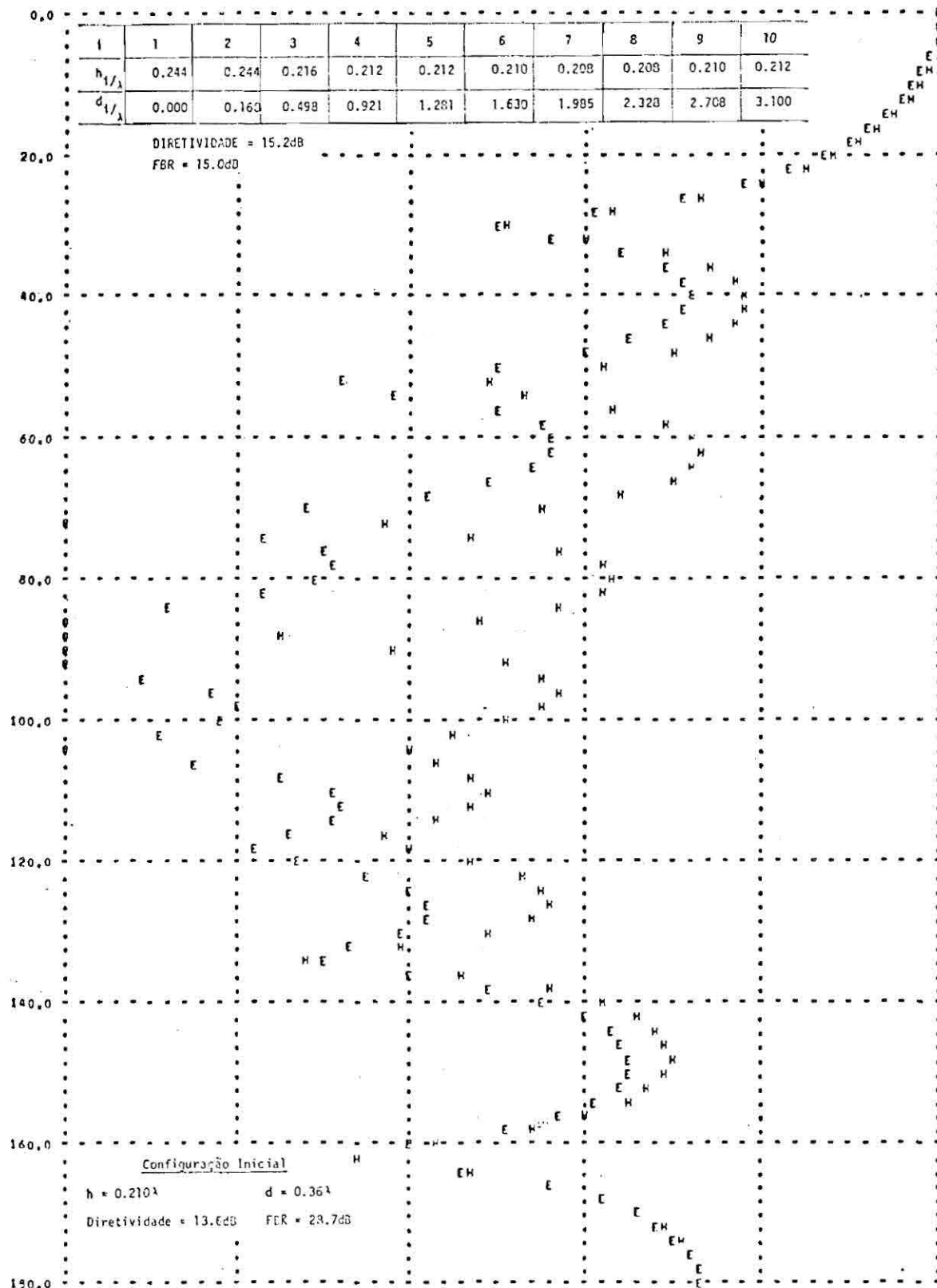
OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... +30,0 +40,0 +30,0 +20,0 +10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



OS PONTOS E E H AC GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0



- G.24 -

OS PONTOS E E H NO GRAFICO CORRESPONDEM AOS PONTOS
NO PLANO E (HORIZONTAL) E PLANO H (VERTICAL) RESPECTIVAMENTE

CURVA H.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0
CURVA E.... -50,0 -40,0 -30,0 -20,0 -10,0 0,0

