INFLUÊNCIA DE DUTOS
TROPOSFÉRICOS NAS
LIGAÇÕES EM VISIBILIDADE

Ney Roberto Dhein

TESE DE MESTRADO

Rio de Janeiro, dezembro 1975

CENTRO DE ESTUDOS EM TELECOMUNICAÇÕES DA UNIVERSIDADE CATÓLICA
PUC - RJ

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

INFLUÊNCIA DE DUTOS TROPOSFÉRICOS
NAS LIGAÇÕES EM VISIBILIDADE

Ney Roberto Dhein

Tese submetida comorequisito parcial
para obtenção do grau

MESTRE EM CIÊNCIAS
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Assinatura do Orientador

Desejo expressar meus agradecimentos às pessoas
que de alguma maneira auxiliaram na realização deste trabalho.
Em especial:

- Aos meus pais
- À minha noiva Norma
- Ao Prof. Mauro Soares de Assis
- Ao Eng. Okura (EMBRATEL)
- Ao meu primo Nelson Dhein
- Aos Srs. Alberto Pedreira e Ernesto Mathias
Lemos Filho
- Às Srtas. Cristina e Graça Muniz
- À CAPES
- Aos colegas do CETUC.
- À Sra. Maria de Lourdes Carneiro

SUMÁRIO

Este trabalho tem por objetivo investigar o efeito de dutos troposféricos nas ligações em visibilidade. O modelo matemático desenvolvido para analisar o problema é baseado na ótica geométrica. Através desta formulação é possível estimar a influência dos parâmetros de uma ligação (distância e altura das antenas) e da estrutura dos dutos no comportamento do sinal recebido. O modelo matemático é aplicado na interpretação das medidas experimentais de um enlace onde os dados meteorológicos disponíveis indicaram uma forte evidência de formação de dutos de superfície na região. A conclusão final mais importante do trabalho é a sugestão do emprego de diversidade em espaço para aumentar a confiabilidade do sistema.

SUMMARY

This work deals with the effect of tropospheric ducts in line-of-sight links. The mathematical model used is based on the geometrical optics. Through this formulation it is possible to estimate the influence of link parameters (distance and antenna heights) and duct structure on the behaviour of the received signal. The mathematical model is applied to explain experimental data from a link where meteorological conditions have shown a strong evidence of surface duct formation. The most important final conclusion is the recommendation to use space diversity as a solution to improve system reliability.

ÍNDICE

	pag
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 - FORMAÇÃO DE DUTOS TROPOSFÉRICOS	2
1.1. Índice de Refração	2
1.2. Raio Equivalente da Terra	4
1.3. Condição para Formação de Dutos	5
CAPÍTULO 2 - FORMULAÇÃO ÓTICA	6
2.1. Modelo Multi-Linear do Índice de Refração.....	6
2.2. Tipos de Desvanecimento	8
2.3. Atenuação do Sinal	11
2.4. Emprego de Diversidade em Espaço	17
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DA LIGAÇÃO GURUPI-IMPERATRIZ	18
3.1. Análise do Desempenho da Ligação	18
3.1.1. Níveis de Ruído	18
3.1.2. Medidas Experimentais	19
3.1.3. Análise Comparativa	20
3.2. Estudo Meteorológico da Região	23
3.2.1. Dados de Superfície	23
3.2.2. Dados de Rádio-Sondagens	26
3.2.3. Considerações Finais	29
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	30
4.1. Estrutura do Duto	30
4.2. Influência dos Parâmetros do Modelo	32
4.3. Diversidade em Espaço	35
CONCLUSÕES	39
APÊNDICE 1	42
APÊNDICE 2	49
APÊNDICE 3	52
REFERÊNCIAS	41

INDICE FIGURA

	pag
FIGURA 1 - Variação multi-linear do módulo de refração	6
FIGURA 2 - Trajetória da energia dentro de uma seção linear	7
FIGURA 3 - Trajetória da energia com um perfil multi-linear	8
FIGURA 4 - Contornos das regiões de interferência e atenuação infinita conforme a posição relativa do transmissor e do duto	10
FIGURA 5 - Variação da seção transversal com a distância num meio homogêneo	12
FIGURA 6 - Variação da seção transversal com a distância com perfil M linear	13
FIGURA 7 - Transmissor acima do duto/receptor dentro da inversão	15
FIGURA 8 - Receptor acima do duto e transmissor dentro da inversão	15
FIGURA 9 - Diversidade em espaço	17
FIGURA 10 - Posição geográfica da ligação Guru-pi-Imperatriz	21
FIGURA 11 - Distribuição estatística do gradiente-Carolina-Agosto de 1974	28
FIGURA 12 - Trecho de registro (EMBRATEL)	31
FIGURA 13 - Efeito da distância	33
FIGURA 14 - Efeito da altura da antena	34
FIGURA 15 - Efeito do gradiente	34
FIGURA 16 - Efeito da altura do duto	35

INDICE TABELA

	pag
TABELA 1 - Analise estatística da ligação Gurupi Imperatriz	22
TABELA 2 - Dados meteorológicos de Carolina-Agos to de 1971.....	24
TABELA 3 - Dados radiometeorológicos de Porto Nacional - Agosto de 1971	25
TABELA 4 - Gradiente de N na estação de Caroli na - Agosto de 1974	27
TABELA 5 - Estrutura do duto,	32
TABELA 6 - Efeito de diversidade em espaço	38

INTRODUÇÃO

A existência de dutos troposféricos em um enlace radioelétrico em visibilidade pode prejudicar sensivelmente a qualidade do sinal transmitido. Em ligações deste tipo, o efeito de dutos pode ser analisado através de um modelo matemático baseado na ótica geométrica. Utilizando esta formulação, o presente trabalho pretende investigar a influência de dutos no desempenho de um sistema de micro-ondas. O modelo matemático desenvolvido será utilizado na interpretação das observações realizadas pela Empresa Brasileira de Telecomunicações (EMBRATEL) no trecho Gurupi-Imperatriz do enlace Belém-Brasília. Embora as rádio-sondagens disponíveis na região não tenham permitido um rigoroso estudo quantitativo da questão, será mostrado através dos dados meteorológicos existentes, uma forte evidência de formação de dutos na área.

Inicialmente o Capítulo I descreve resumidamente alguns aspectos meteorológicos relacionados à formação de dutos. A seguir, com base em um trabalho publicado por Ikegami¹ desenvolve-se no Capítulo II a formulação matemática do problema. O Capítulo III analisa o comportamento da ligação Gurupi-Imperatriz utilizando medidas dos testes de propagação efetuados pela EMBRATEL e dados meteorológicos do Departamento Nacional de Meteorologia, incluindo o emprego de diversidade em espaço para aumentar a confiabilidade do sistema e finalmente, no Capítulo IV são apresentados os resultados com a aplicação do modelo matemático.

As conclusões finais resumem uma série de itens que poderão ser úteis na investigação de problemas similares.

CAPÍTULO 1

FORMAÇÃO DE DUTOS TROPOSFÉRICOS

A formação de dutos depende basicamente da variação do índice de refração da troposfera com a altura. Por sua vez, este índice é uma função dos seguintes parâmetros meteorológicos: pressão, temperatura e umidade do ar. Assim, uma visão global dos aspectos meteorológicos ligados ao aparecimento de dutos em uma região constitui uma base para a análise que se pretende neste trabalho. Este é o objetivo do presente capítulo.

1.1. Índice de Refração

De acordo com Smith e Weintraub ², o índice de refração pode ser expresso em função dos parâmetros meteorológicos acima citados através de,

$$n-1 = \frac{77,6}{T} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right) \times 10^{-6} \quad (1)$$

onde

p - pressão atmosférica (mbar)

e - pressão parcial de vapor d'água (mbar)

T - temperatura (°K)

Os valores usuais de n são muito próximos da unidade. Por esta razão, é preferível utilizar o parâmetro refratividade (N), definido por

$$N = (n-1) \times 10^6$$

Por outro lado, os serviços de meteorologia fornecem normalmente o valor de umidade relativa do ar em lugar de pressão parcial do vapor d'água. Desta forma, na faixa de rádio-frequência tem-se a seguinte expressão geral para N^3 ,

$$N = 77,6 \frac{p}{T} + 966 \times 10^{(10 - \frac{2360}{T})} \frac{u_r}{T^2} \quad (2)$$

onde u_r é a umidade relativa do ar (%).

Em alguns casos é útil empregar o conceito de índice de refração modificado, o qual é definido por,

$$M = N + \frac{h}{a} 10^6 \quad \left(\frac{h}{a} \ll 1 \right) \quad (3)$$

onde

h - altura em relação ao nível do mar

a - raio da Terra

Nas medidas disponíveis para este trabalho, não havia indicações diretas do parâmetro altitude. Entretanto, na troposfera é possível estabelecer uma relação entre cada nível de pressão do ar (p) e a altitude (h) correspondente. Assim, tal situação não constituiu problema. Este relacionamento é dado por ⁴,

$$h = \frac{T_o}{A} \left[1 - (p/p_o)^{1/n} \right] \text{ metros} \quad (4)$$

onde

$$n = 5,2561$$

$$p_o = 1013,25 \text{ mbar}$$

$$A = 0,0065^\circ \text{ C/m}$$

$$T_o = 288,16^\circ \text{ K}$$

1.2. Raio Equivalente da Terra

As trajetórias das ondas radioelétricas na troposfera são definidas pelos seus raios de curvatura (ρ), ou seja,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \cos \theta \quad (5)$$

onde

$\frac{dn}{dh}$ - gradiente do índice de refração com a altura

θ - ângulo da trajetória com uma superfície de igual n .

A partir do conhecimento da trajetória de energia pode-se introduzir o conceito de raio equivalente da Terra. Este conceito, utilizado primeiramente por Scheleng, Burrows e Ferrel², consiste em modificar a curvatura da terra de modo que as trajetórias da energia sejam linhas retas. Cumpre ressaltar que este procedimento implica em manter na situação real e na equivalente as mesmas cotas entre a trajetória e a superfície da terra. O raio equivalente é dado por,

$$a_e = ka \quad (6)$$

onde

$$k = \frac{1}{1 + \frac{a}{n} \frac{dn}{dh} \cos \theta}$$

a - raio real da Terra.

Para os casos práticos θ é pequeno e como $n \sim 1$ obtém-se,

$$k \approx \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}} \quad (7)$$

1.3. Condição para Formação de Dutos

Em função de $\frac{dN}{dh}$, $\frac{dM}{dh}$ ou k , as condições atmosféricas classificam-se quanto à propagação das ondas radioelétricas em,

$$\begin{aligned} \text{ATMOSFERA SUB-PADRÃO} &- k < 4/3, \frac{dM}{dh} > 118 \text{ U.M/km}, \frac{dN}{dh} > -39 \text{ U.N/km} \\ \text{ATMOSFERA PADRÃO} &- k = 4/3, \frac{dM}{dh} = 118 \text{ U.M/km}, \frac{dN}{dh} = -39 \text{ U.N/km} \\ \text{ATMOSFERA SUPER-PADRÃO} &- k > 4/3, \frac{dM}{dh} < 118 \text{ U.M/km}, \frac{dN}{dh} < -39 \text{ U.N/km} \\ \text{DUTO TROPOSFÉRICO} &- k \leq 0, \frac{dM}{dh} \leq 0, \frac{dN}{dh} \leq -157 \text{ U.N./km} \end{aligned}$$

A denominação de duto troposférico é motivada pelo fato de em tal situação, haver possibilidade de canalização da energia em propagação no interior da camada que satisfaz a condição acima. Uma vez que a pressão decresce com a altura, conclui-se que valores $\frac{dN}{dh} < -157 \text{ U.N/km}$ ocorrem para inversões de temperatura ($\frac{dT}{dh} > 0$) e/ou decréscimos acentuados na pressão de vapor (ou umidade relativa) com a altura como evidenciado por,

$$\frac{dN}{dh} = 77,6 \left[\frac{1}{T} \frac{dp}{dh} - \left(\frac{p}{T^2} + \frac{9620}{T^3} \right) \frac{dT}{dh} + \frac{4810}{T^2} \frac{de}{dh} \right] \text{ m}^{-1} \quad (8)$$

CAPÍTULO II

FORMULAÇÃO ÓTICA

A trajetória das ondas radioelétricas na troposfera depende do comportamento do índice de refração com a altura. A utilização de conceitos da ótica geométrica, apesar de suas limitações, permite estabelecer com razoável aproximação o percurso da energia. Rigorosamente, o problema deveria ser analisado a partir da equação geral das ondas em forma vetorial ⁵. Entretanto este tratamento é mais adequado para propagação a longa distância, isto é, além do horizonte do transmissor. Nas ligações em visibilidade, os resultados obtidos através da formulação ótica mostram-se perfeitamente satisfatórios.¹

2.1. Modelo Multi-Linear do Índice de Refração

O modelo a ser desenvolvido supõe que o índice de refração varia linearmente. A forma generalizada multi-linear é apresentada na Figura 1.

Fig. 1 - Variação Multi-Linear do módulo de refração.

A variação da posição de um raio dentro de uma seção linear é determinada se conhecidos a posição e orientação iniciais. Somando-se as contribuições de todas as seções, a geometria do percurso fica definida.

Para um segmento linear do perfil, as expressões abaixo permitem a definição da trajetória¹,

$$\begin{aligned} x_i &= x_o + \frac{10^6}{\alpha} (\theta_o - \theta_i) & x_i \leq x_p & \quad [x] = \text{km} \\ x_i &= x_o + \frac{10^6}{\alpha} (\theta_i + \theta_o) & x_i \geq x_p & \quad [\alpha] = \text{U.M./km} \\ \theta_i &= \left[\theta_o - 2 (M_o - M_i) 10^{-6} \right]^{1/2} & [\theta] &= \text{radiano} \end{aligned}$$

Em x_p , $\theta = 0$, logo,

$$x_p = x_o + \frac{10^6}{\alpha} \theta_o$$

Os diversos parâmetros são definidos na figura 2.

Fig. 2 - Trajetória da energia dentro de uma seção linear.

Generalizando para um perfil de várias seções (Fig. 3),

$$x = \frac{10^6}{\alpha_{n+1}} |\theta_n - \theta| + \sum_{i=1}^n |\theta_i - \theta_{i-1}| / \alpha_i ; \alpha = \left| \frac{dM}{dH} \right|$$

$$\theta_0 = \left[\theta_0^2 - 2 (M_0 - M) 10^{-6} \right]^{1/2}$$

$$\theta_i = \left[\theta_0^2 - 2 (M_0 - M_i) 10^{-6} \right]^{1/2}$$

Fig. 3- Trajetória da energia com um perfil multi-linear.

2.2. Tipos de Desvanecimento

Uma vez que de acordo com as observações experimentais da variação do índice de refração as condições mais favoráveis à formação de dutos estão nas primeiras centenas de metros acima da superfície da terra, será aqui considerado um máximo de tres seções lineares. Dependendo da posição do transmissor e do receptor em relação ao duto, observa-se existência de dois tipos de desvanecimento:

- (a) Desvanecimento por atenuação
- (b) Desvanecimento por interferência

A figura 4 ilustra as diversas situações possíveis para um modelo com tres seções lineares ¹. Na figura 4a o transmissor está situado acima do duto. Neste caso, o raio cuja orientação inicial (θ_0) for tal que tangencie a camada superior do duto delimitará uma região de forte atenuação, denominada de atenuação infinita, porque teoricamente nenhuma energia atinge esta região. Os raios cujo ângulo de partida são superiores ao acima descrito e dirigidos para o interior, do duto podem superpor-se constituindo uma região de interferência que é delimitada, para uma dada altura, pelos raios mais próximo e mais afastado do transmissor. Os raios cujo ângulo de partida são menores ou dirigidos de tal forma a afastar-se do duto sofrem atenuação de espaço livre. Cumpre ressaltar que de acordo com a convergência ou divergência do feixe haverá regiões de fraca e moderada atenuação. Esta situação não é simples de ser caracterizada através do emprego de raios, sendo necessário introduzir o conceito divergência do feixe de energia. As figuras 4b e 4c tratam do mesmo problema, respectivamente, para os casos do transmissor situado na parte superior e na parte inferior do duto.

(a) Transmissor situado acima do duto

Região de interferência

Região de atenuação infinita

(b) Transmissor situado na parte superior do duto

(c) Transmissor situado na parte inferior do duto

Fig. 4 - Contornos das regiões de interferência e atenuação infinita conforme a posição relativa do transmissor e do duto.

A estrutura dos dutos troposféricos varia aleatoriamente no tempo. Em consequência, a intensidade do sinal recebido também varia. Quando se dispõe do comportamento da estratificação da atmosfera, em um certo intervalo de tempo, o mapeamento destas regiões dará uma indicação dos níveis recebidos neste intervalo. Para isto foi preparado um programa de computador que permite mapear todas as situações possíveis (Apêndice 1). Cumpre ressaltar que neste estudo não foi considerado o efeito da energia refletida no solo. Como na maioria dos casos práticos a rugosidade do terreno provoca uma reflexão do tipo difusa⁶, esta aproximação não introduz uma limitação significativa nos resultados aqui obtidos.

2.3. Atenuação do Sinal

A seguir é apresentado um tratamento matemático baseado no conceito de divergência e convergência de um feixe de ondas sob o efeito de variação da refratividade com a altura. Tal modelo matemático permite o cálculo da potência recebida no caso da existência de dutos em relação ao valor de espaço livre.

Considerando um feixe de ondas transmitido dentro de um ângulo $d\theta_o$ em um meio homogêneo, a sua seção transversal ($d\ell_{hom}$) a uma distância r do transmissor é dada por

$$d\ell_{hom} = r d\theta_o = [x^2 + h^2]^{1/2} d\theta_o \approx x d\theta_o \quad (h \ll x)$$

Fig. 5 - Variação da seção transversal com a distância num meio homogêneo.

Para um perfil linear na seção transversal do feixe tem-se,

$$x = \frac{10^6}{\alpha} (\theta_0 - \theta) ; \alpha = \left| \frac{dM}{dh} \right|$$

$$\theta = \left[\theta_0^2 - 2 (M_0 - M) 10^{-6} \right]^{1/2}$$

então

$$x = \frac{10^6}{\alpha} \left[\theta_0^2 - \left[\theta_0^2 - 2 (M_0 - M) 10^{-6} \right]^{1/2} \right]$$

$$d\ell = dx \cdot \sin \theta \approx \theta dx \quad (\theta \text{ pequeno})$$

$$d\ell = -x \cdot d\theta_0$$

A razão entre a potência recebida em um meio com perfil linear e a correspondente ao meio homogêneo é dada por,

Figura 6 - Variação da seção transversal com a distância com perfil M linear.

$$\frac{Pr}{Pr_{hom}} = \left| \frac{d\ell}{d\ell_{hom}} \right|$$

Substituindo, tem-se

$$\frac{Pr}{Pr_{hom}} = 1$$

Conclui-se que a propagação em um meio onde a refratividade varia linearmente com a altura é equivalente ao espaço livre.

No caso geral, multi-linear, a expressão para o cálculo da atenuação adicional ao valor de espaço livre é (ver figura 3).

$$x = 10^6 |\theta - \theta_n| / \alpha_{n+1} + 10^6 \sum_{i=1}^n |\theta_i - \theta_{i-1}| / \alpha_i$$

$$\theta_i = \left[\theta_o^2 - 2 (M_o - M_i) 10^{-6} \right]^{1/2}$$

Então tem-se que

$$\frac{P_r}{P_{ro}} = \frac{x \cdot 10^{-6}}{\left| \text{sign}(\theta - \theta_n) \frac{\theta_o}{\theta_n} (\theta_n - \theta) / \alpha_{n+1} + \sum_{i=1}^n \text{sign}(\theta_i - \theta_{i-1}) \frac{\theta_o}{\theta_i \theta_{i-1}} (\theta_{i-1} - \theta_i) / \alpha_i \right|}$$

Ressalte-se que uma especial atenção de ser dada aos casos onde o receptor situa-se na região de atenuação infinita ou em suas vizinhanças (fraca ou moderada atenuação). Desvanecimentos profundos se devem à localização do receptor nestes pontos. O desenvolvimento a seguir visa obter a expressão de P_r/P_{ro} quando o receptor encontra-se em uma destas regiões não sendo considerada a região de interferência, Tal situação não introduz nenhuma limitação, porque o modelo matemático aqui tratado será aplicado posteriormente ao caso de dutos de superfície, onde desde que a reflexão no solo seja do tipo difusa (caso mais usual), não há formação de uma região de interferência.

Para a situação mostrada na figura 7 tem-se

$$x_R = \frac{10^6}{\alpha_o} (\theta_o - \theta_1) + \frac{10^6}{\alpha_D} (\theta_R - \theta_1)$$

$$\theta_1 = \left[\theta_o^2 - 2 (M_o - M_1) 10^{-6} \right]^{1/2}$$

$$\theta_R = \left[\theta_o^2 - 2 (M_o - M_R) 10^{-6} \right]^{1/2}$$

$$\frac{P_r}{P_{ro}} = \frac{x_R \cdot 10^{-6}}{\left| \frac{\theta_R}{\theta_1} (\theta_1 - \theta_o) / \alpha_o + \frac{\theta_o}{\theta_1} (\theta_1 - \theta_R) / \alpha_D \right|}$$

Fig. 7 - Transmissor acima do duto/receptor dentro da inversão.

Quando o transmissor está localizado dentro do duto e o receptor acima (Fig. 8), a razão P_r/P_{ro} é dada por,

$$x_R = \frac{10^6}{\alpha_D} (\theta_o - \theta_1) + \frac{10^6}{\alpha_o} (\theta_R - \theta_1)$$

$$\frac{P_r}{P_{ro}} = \frac{x_R \cdot 10^{-6}}{\left| \frac{\theta_R}{\theta_1} (\theta_1 - \theta_o) / \alpha_D + \frac{\theta_o}{\theta_1} (\theta_1 - \theta_R) / \alpha_o \right|}$$

Fig. 8 - Receptor acima do duto e transmissor dentro da inversão.

O receptor sofrerá teoricamente atenuação infinita se a sua posição satisfizer as condições

$$(Z_0 - Z_2 \leq Z_R \leq Z_D + Z_1) \quad \text{e} \quad (x_R > x_p)$$

$$Z_1 = 1/2 \alpha_0 (x_R - x_p)^2 \cdot 10^{-6}$$

$$Z_2 = 1/2 \alpha_D (x_R - x_p)^2 \cdot 10^{-6}$$

A trajetória da onda radioelétrica deve ligar o transmissor ao receptor ou seja, o ângulo de partida (θ_0) deve ter um valor tal que o raio partindo do transmissor atinja o receptor. Em função da geometria da ligação e das condições atmosféricas, o raio capaz de ligar o transmissor ao receptor tem o valor de θ_0 atendendo as equações mostradas a seguir. Para a situação ilustrada na figura 7 a equação a ser satisfeita é,

$$x_R = 10^6 \left[\theta_0 / \alpha_0 - (1/\alpha_0 + 1/\alpha_D) \sqrt{\theta_0^2 - C_1} + (1/\alpha_D) \sqrt{\theta_0^2 - C_2} \right]$$

onde

$$C_1 = 2(M_0 - M_1) 10^{-6} = 2\alpha_0 (Z_T - Z_D) 10^{-6}$$

$$C_2 = 2(M_0 - M_R) 10^{-6} = 2 \left[\alpha_0 (Z_T - Z_D) 10^{-6} - \alpha_D (Z_D - Z_R) \right] 10^{-6}$$

Para a situação ilustrada na fig. 8 tem-se,

$$x_R = 10^6 \left[\theta_0 / \alpha_D - (1/\alpha_D + 1/\alpha_0) \sqrt{\theta_0^2 - C_1} + (1/\alpha_0) \sqrt{\theta_0^2 - C_2} \right]$$

onde

$$C_1 = 2 \alpha_0 (Z_D - Z_T) 10^{-6}$$

$$C_2 = 2 \left[\alpha_D (Z_D - Z_T) - \alpha_0 (Z_R - Z_D) \right] 10^{-6}$$

Este equacionamento será empregado no Capítulo IV para ilustrar a aplicação do modelo desenvolvido. Para isto foi elaborado um programa de cálculo para computador cujos detalhes são mostrados no Apêndice II.

2.4. Emprego de Diversidade em Espaço

As dimensões do duto e o gradiente de M na camada de inversão variam aleatoriamente. Conforme foi visto anteriormente, fixada uma determinada geometria, formam-se regiões onde o sinal corresponde ao valor do espaço livre e outras onde o sinal sofre atenuação ou interferência. Considerando este aspecto da questão, uma forma de reduzir o efeito de dutos é o emprego de diversidade em espaço. A figura 9 mostra duas situações possíveis.

(a) Diversidade Dupla

(b) Diversidade Quadrupla

Fig. 9 - Diversidade em espaço.

Escolhendo um espaçamento adequado, cujo detalhes serão discutidos no Capítulo IV, pode-se aumentar sensivelmente a confiabilidade da ligação. O programa descrito no Apêndice III, utilizando a formulação desenvolvida na seção anterior, permite calcular a melhoria obtida pela aplicação da diversidade em espaço com seleção ótima⁹.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DA LIGAÇÃO GURUPI-IMPERATRIZ

No trecho Gurupi-Imperatriz do enlace radioelétrico entre Belém e Brasília operando na faixa de 6 GHz, as observações realizadas pela EMBRATEL evidenciaram condições anormais de propagação durante períodos noturnos. Com base nas medidas experimentais do sinal e com dados meteorológicos da região, este capítulo investiga a possibilidade de tais condições serem provocadas pela existência sistemática de dutos troposféricos ao longo do percurso. A figura 10 mostra um esquema do trecho Gurupi-Imperatriz, assim como a localização das estações meteorológicas cujos dados foram utilizados na análise do fenômeno, Carolina (rádio -- sondagem e superfície) e Porto Nacional (superfície).

3.1. Análise do Desempenho da Ligação

A fim de evidenciar os efeitos anormais de propagação, esta seção analisa o desempenho da ligação, comparando os resultados experimentais obtidos pela EMBRATEL com as normas preconizadas pelo CCIR (Comitê Consultivo Internacional de Rádio) para enlaces em visibilidade.

3.1.1. Níveis de Ruído

De acordo com a recomendação 395 do CCIR⁷, um enlace em visibilidade de comprimento L (km) deve satisfazer as seguintes cláusulas:

- (a) A potência média de ruído ponderado em qualquer hora não deve exceder os valores:

COMPRIMENTO (KM)	RUÍDO (PW)
50 < L < 280	3L + 200
280 < L < 840	3L + 200
840 < L < 1670	3L + 400
1670 < L < 2500	3L + 600

(b) A potência média de ruído ponderado em um minuto não deve ultrapassar os valores abaixo em mais de 20% de qualquermes:

COMPRIMENTO (KM)	RUÍDO (PW)
50 < L < 280	3L + 200
280 < L < 840	3L + 200
840 < L < 1670	3L + 400
1670 < L < 2500	3L + 600

(c) Durante qualquer mês a potência média de ruído ponderado em um minuto de 47.500 pW não deve exceder as percentagens abaixo:

COMPRIMENTO (KM)	PERCENTAGEM(%)
50 < L < 280	$(280/2500) \times 0,1$
280 < L < 840	$(L/2500) \times 0,1$
840 < L < 1670	$(L/2500) \times 0,1$
1670 < L < 2500	$(L/2500) \times 0,1$

A clausula (a) é muito difícil de ser aplicada , existindo, inclusive dúvidas quanto à sua utilidade para os sistemas em visibilidade ⁷. Os registros disponíveis não cobriram a percentagem de 20%, impedindo, consequentemente, a verificação da cláusula (b). Assim no estudo que se segue, o desempenho será avaliado unicamente em função da cláusula (c).

3.1.2. Medidas Experimentais

No período entre agosto de 1971 e julho de 1972, através de um sistema de tele-sinalização, a estação de Gurupi,

recebeu as seguintes informações: registro da relação sinal ruído (RSR) e indicação dos lances onde ocorriam desvanecimentos lentos, sendo registrada variação da relação sinal-ruído entre 56,8 e 43,2 dB. Através do registro da RSR, este teste ser viu para avaliar o desempenho da ligação, porém não permitiu um estudo rigoroso de cada lance. Entretanto, admitindo-se que o ruído introduzido pelo lance em desvanecimento profundo seja preponderante em relação ao restante, foi possível uma estimativa preliminar do comportamento de cada lance individualmente.

3.1.3. Análise Comparativa

De acordo com a cláusula (c) da recomendação 395 do CCIR, sumarizada no parágrafo 3.1.1, em uma ligação de 745,3 km, durante qualquer mês a potência média de ruído ponderado em um minuto de 47.500 pW_0 não deve ultrapassar a percentagem abaixo:

$$\frac{745,3}{2500} \times 0,1 = 0,03 \%$$

Por outro lado, utilizando os registros da EMBRATEL e as indicações dos lances em desvanecimento profundo, foi possível elaborar a Tabela I, onde pode-se observar os níveis de ruído em cada lance individualmente e o desempenho global da ligação. Observar-se nesta tabela que o nível de 47.500 pW ocorreu em mais de 0,03% em quase todos os meses do ano. O lance que apresentou as piores condições de propagação foi o de Campo Alegre-Araguaína, seguindo-lhe Tiririca-N. Colina e Gurupi-Aliança do Norte. Não foram observados desvanecimentos no lance Paraíso do Norte-Barro Branco, sendo mínimo no lance Barro-Mirocema do Norte. Cumpre ressaltar ainda, que de acordo com os registros o período de ocorrência de desvanecimentos foi entre 21:30 e 7.00 horas.

Figura 10- Posição geográfica da ligação Gurupi-Imperatriz

TABELA I - Análise Estatística da Ligação Gurupi-Imperatriz

Lance	PERCENTAGEM DE UM MES EM QUE RUÍDO > 47.500 pw ₀												Média Anual
	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	
GPI/ANE		0,0015	0,0245		0,027	0,037	0,002	0,0024	0,058				0,012819
FMA/ANF				0,001	0,0265	0,0094		0,009	0,047				0,00765
FMA/PNE		0,0005	0,00475	0,0005	0,0091	0,0025	0,002	0,0015	0,003				0,00210
PNE/BBO													0,00000
BBO/MNE						0,001							0,000076
MNE/BVA					0,0103	0,0025						0,0084	0,00432
BVA/GRA		0,003		0,006	0,0325		0,0025					0,004	0,00432
GRA/TRA	0,00149				0,0016								0,000267
TRA/NCA	0,105	0,006			0,022	0,0172				0,0153	0,0075		0,01400
NCA/CAE	0,0035	0,003			0,0138	0,003			0,005			0,012	0,00336
CAE/AIA	0,148	0,011	0,0055	0,019	0,025		0,001	0,0172	0,05	0,0032		0,0015	0,02253
AIA/SJO					0,0008			0,019	0,0055	0,0082			0,00287
ETO/SJO		0,0015	0,0075	0,027	0,0095	0,004	0,019	0,0045		0,0004	0,0098		0,00746
ETO/PFO	0,001			0,0005	0,0041	0,0055		0,0035			0,00164		0,00142
PFO/PBA					0,0016	0,003		0,0168					0,00157
PBA/ITZ								0,0025					0,00019
TOTAL PARCIAL	0,25899	0,0265	0,04225	0,054	0,1573	0,085	0,0265	0,0765	0,1685	0,0271	0,01894	0,0259	
TOTAL	0,3	0,0305	0,056	0,057	0,188	0,085	0,035	0,098	0,1800	0,031	0,01894	0,027	

3.2. Estudo Meteorológico da Região

O desempenho da ligação Gurupi-Imperatriz analisado na seção anterior está ligado às condições meteorológicas da região. Desta forma, para interpretar as medidas realizadas, torna-se necessário o estudo meteorológico desta área. Apesar da quantidade de dados ser insuficiente para uma detalhada investigação do problema, será mostrado que existem condições que possibilitam a formação de dutos troposféricos.

3.2.1. Dados de Superfície

Os dados de superfície foram obtidos nas estações de Carolina e Porto Nacional. A estação de Carolina está relativamente próxima do lance Araguaina-Campo Alegre, onde foram observadas as piores condições de propagação, particularmente no mes de agosto. Por outro lado, Porto Nacional situa-se nas vizinhanças dos lances Miracema do Norte-Barro Branco e B.Branco-Paraíso do Norte, que apresentaram desempenhos satisfatórios. Assim, embora os dados de superfície não sejam adequados para caracterizar a formação de dutos em uma área, a comparação dos parâmetros meteorológicos medidos nestas estações na mesma época dos registros de intensidade do sinal permitirá obter conclusões de interesse para o estudo em questão.

As tabelas II e III mostram a variação da umidade relativa e das condições de vento nas estações de Carolina e Porto Nacional para o mes de Agosto (pior mes para o lance Araguaina-Campo Alegre). Observa-se nestas tabelas que existem acentuadas variações da umidade relativa ao longo do dia. As medidas noturnas (24 horas) mostram valores de umidade relativa sensivelmente maiores do que aqueles observados às 18 horas, o que pode ser uma indicação da formação do gradiente de umidade responsável pelo aparecimento de dutos.

Tabela 2 - Dados Meteorológicos de Carolina - Agosto 1971

(a) Umidade Relativa (%)

DIA	12h	18h	24h	DIA	12h	18h	24h
1	95	68	89	17	74	86	93
2	91	50	76	18	90	96	50
3	82	46	69	19	53	30	46
4	76	41	67	20	55	35	50
5	65	37	58	21	40	30	49
6	68	32	51	22	50	26	53
7	62	35	56	23	53	30	49
8	67	46	61	24	44	28	46
9	74	46	69	25	47	31	44
10	64	36	65	26	49	26	41
11	68	46	69	27	58	31	47
12	75	45	77	28	41	28	43
13	74	48	57	29	61	20	44
14	74	30	58	30	57	29	46
15	73	24	53	31	61	36	74
16	75	55	57				

(b) Velocidade (m/s) e Direção do Vento

DIA	12h	18h	24h	DIA	12h	18h	24h
1	CO.0	E2.0	CO.0	17	NW4.0	NW2.0	CO.0
2	CO.0	E1.0	CO.0	18	NE2.0	NE3.0	CO.0
3	CO.0	NE3.0	CO.0	19	SE8.0	SE2.0	CO.0
4	NE3.0	NE3.0	CO.0	20	SE12.0	E4.0	SE1.0
5	E3.0	E1.0	CO.0	21	E12.0	SE4.0	CO.0
6	CO.0	SE5.0	SE2.0	22	SE8.0	SE7.0	CO.0
7	CO.0	S2.0	CO.0	23	E12.0	SE4.0	CO.0
8	NE5.0	SE4.0	CO.0	24	E6.0	SE2.0	CO.0
9	E4.0	NE4.0	CO.0	25	E12.0	SE3.0	CO.0
10	CO.0	S1.0	CO.0	26	E2.0	E4.0	CO.0
11	CO.0	SE2.0	CO.0	27	NE2.0	SE1.0	CO.0
12	E3.0	NE3.0	CO.0	28	SE12.0	E4.0	CO.0
13	E4.0	SE2.0	CO.0	29	SW6.0	S6.0	CO.0
14	SE2.0	S5.0	CO.0	30	E2.0	E2.0	CO.0
15	NW2.0	E4.0	CO.0	31	SE2.0	NE1.0	CO.0
16	NE1.0	W1.0	NW2.0				

Tabela 3 - Dados Radiometeorológicos de Porto Nacional-Agosto 1971

(a) Umidade Relativa (%)

DIA	12h	18h	24h	DIA	12h	18h	24h
1	77	42	59	17	53	29	52
2	70	40	70	18	46	33	57
3	50	37	60	19	40	34	38
4	71	29	70	20	39	24	51
5	50	28	59	21	41	31	57
6	61	26	64	22	36	34	52
7	46	23	59	23	41	26	52
8	50	28	65	24	33	38	37
9	40	29	56	25	43	23	46
10	42	27	59	26	32	31	43
11	42	17	56	27	30	24	38
12	34	22	61	28	45	27	38
13	32	25	57	29	39	25	46
14	45	32	51	30	42	29	64
15	56	25	57	31	53	26	60
16	60	23	48				

(b) Velocidade (m/s) e Direção

DIA	12h	18h	24h	DIA	12h	18h	24h
1	NE1.0	NE3.0	E1.0	17	CO.0	E3.0	CO.0
2	NE1.0	NE3.0	E3.0	18	NE5.0	NE3.0	CO.0
3	NE1.0	N3.0	CO.0	19	NE3.0	SE5.0	S3.0
4	CO.0	E3.0	N1.0	20	E1.0	NE3.0	CO.0
5	CO.0	E3.0	SW1.0	21	SE5.0	NE3.0	CO.0
6	CO.0	NE1.0	CO.0	22	SE5.0	SE3.0	S1.0
7	NE1.0	NE1.0	E1.0	23	E3.0	SE3.0	CO.0
8	N1.0	E3.0	CO.0	24	E5.0	S3.0	CO.0
9	CO.0	SE3.0	CO.0	25	CO.0	NE3.0	E3.0
10	CO.0	SE3.0	E1.0	26	N5.0	CO.0	CO.0
11	E1.0	NE1.0	E1.0	27	SE7.0	NE3.0	CO.0
12	NE1.0	SE3.0	CO.0	28	CO.0	CO.0	SE3.0
13	NE1.0	E5.0	CO.0	29	NE3.0	NW3.0	CO.0
14	CO.0	S1.0	E1.0	30	CO.0	NE3.0	CO.0
15	N1.0	E3.0	CO.0	31	CO.0	E3.0	CO.0
16	CO.0	E3.0	CO.0				

Na estação de Carolina o vento é predominantemente diurno, raramente acontecendo à noite. A existência de ventos durante o dia provoca uma turbulência na troposfera, impedindo a estratificação, apesar de haver variações razoáveis da umidade relativa entre às 12h e 18 horas. Durante a noite, entretanto, a falta de vento facilita a estratificação, provocando a formação de dutos. Por outro lado, na estação de Porto Nacional, a não existência de períodos de calmaria tão pronunciados como em Carolina, indica uma troposfera mais turbulenta, sem condições de estratificação.

3.2.2. Dados de Rádio-Sondagens

Apenas no período de 14/06/74 a 25/09/74 houve disponibilidade de dados diurnos e noturnos de rádio-sondagens na estação de Carolina. Além disto, na parte da noite a rádio-sondagem foi realizada sempre às 20,30 horas. Como o fenômeno acontece entre 21,30 horas e 7 horas não foi possível estudar as condições da troposfera no período de interesse.

A Tabela IV mostra os valores do gradiente de refratividade para o mês de agosto de 1974, onde houve disponibilidade de radio-sondagens diárias (18,30 e 20,30 horas). A observação desta tabela leva às seguintes conclusões:

- (a) A condição de atmosfera sub-padrão ($\frac{dN}{dh} > -39 \text{ U.N/km}$) é praticamente inexistente. Os valores observados (38,3; 37,2 e 31,8) onde esta condição é satisfeita são bastante próximas da atmosfera padrão ($\frac{dN}{dh} = -39 \text{ U.N/km}$). Desta forma, o desenvolvimento lento verificado nos diversos lances não pode ser atribuído a efeitos de difração causado pela redução do raio equivalente da terra.
- (b) Os valores negativos elevados do gradiente são mais comuns à noite, indicando maior probabilidade de aparecimento de dutos neste período.

Tabela 4 - Gradiente de N na Estação de Carolina -Agosto 1974

GRADIENTE DE N		
DIA	HORA	
	8,30	20,30
1	-80,5	-51,4
2	-37,5	-62,9
3	-48,5	-54,9
4	-41,3	-66,1
5	-60,7	-38,3
6	-39,9	-74,4
7	-52,4	-47,4
8	-50,0	-46,4
9	-45,8	-57,2
10	-45,3	-58,6
11	-36,6	-99,3
12	-52,7	-96,2
13	-76,3	-92,1
15	-75,1	-92,1
16	-88,0	-75,9
18	-59,2	-61,9
19	-57,1	-66,6
20	-59,4	-31,8
21	-54,4	-98,9
23	-45,5	-92,4
25	-40,7	-66,7
27	-49,5	-93,1
28	-46,5	-39,2
29	-73,7	-109,9
30	-55,6	-68,0

A figura 11 mostra a distribuição estatística do gradiente no período (agosto de 1974), onde se pode verificar novamente as considerações acima. Cumpre ressaltar que, devido a forma de apresentação dos dados disponíveis, o gradiente foi calculado para camadas de 600 a 800 metros de espesura. Esta situação é muito inconveniente para a análise do problema, uma vez que idealmente o gradiente deve ser calculado em camadas da ordem de 100 a 200 metros.

3.2.3. Considerações Finais

Apesar das limitações dos dados disponíveis, a análise desenvolvida nos parágrafos anteriores indica uma forte evidência de dutos na região onde está localizada a estação de Carolina. Devido provavelmente à turbulência da troposfera, o mesmo não deve acontecer nas vizinhanças de P.Nacional. Por outro lado, os resultados de medidas realizadas pela EMBRATEL são coerentes com estas conclusões. Assim, no presente trabalho, atribuir-se-á à canalização da energia por dutos troposférico, o desvancimento lento observado em quase todos os lances da ligação Gurupi-Imperatriz.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Os dados meteorológicos disponíveis na região do enlace Gurupi-Imperatriz não permitiram uma observação dos dutos existentes na região. Entretanto, a análise conjunta das medidas experimentais do sinal recebido com os dados de Carolina e Floriano evidenciou claramente que as condições anormais de propagação verificadas pela EMBRATEL estão ligadas à forma - ção de dutos durante períodos noturnos. Por outro lado, aprovei- tando os resultados do teste efetuado pela EMBRATEL no lance Gurupi-Aliança do Norte ⁸ e utilizando o modelo matemático de- senvolvido no Capítulo II, foi possível fixar uma estrutura apro- ximada (altura e gradiente) para os dutos desta região. Este capítulo, tomando por base os valores obtidos por este procedi- mento, ilustrará a aplicação do modelo matemático, mostrando o efeito dos diversos parâmetros do problema e a melhoria que po- de ser obtida pelo uso de diversidade em espaço.

4.1. Estrutura do Duto

Idealmente a estrutura do duto deveria ser avaliado estatisticamente, isto é, fixando os valores da altura e do gradiente excedidos em uma determinada percentagem de tempo. Entretanto, conforme comentado anteriormente, os dados meteoroló- gicos disponíveis não permitiram que tal sistemática fosse a- dotada. Procedeu-se então da seguinte maneira para fixar uma estrutura aproximada para os dutos da região da ligação Gurupi- -Aliança do Norte.

A figura 12 indica os níveis recebido em cada canal de um sistema em diversidade dupla durante um período. Segundo informações, da EMBRATEL o espaçamento durante o período registrado, foi de vinte metros. Nos instantes indicados anotou-se o valor da potência recebida em relação ao espaço livre. Com esses dados foi gerado através do computador uma série de combinações altura e gradiente do duto e através do modulo apresentado associou-se a estrutura responsável pelos valores obtidos. A Tabela 5 mostra os resultados deste procedimento para os instantes assinalados.

Figura 12 - Trecho de registro (EMBRATEL)

Tabela 5 - Estrutura do duto

EVENTO	Atenuação em relação ao espaço livre (dB)		Estrutura do duto	
	Canal Principal	Canal Auxiliar	Altura (m)	Gradiente ($\frac{UM}{km}$)
1	10.0	15.0	128	- 50
2	12.5	10.0	124	- 50
3	15.0	7.5	114	- 40
4	45.0	7.5	110	- 40
5	22.5	10.0	116	- 50
6	15.0	7.5	114	- 40
7	10.0	5.0	110	- 30

4.2. Influência dos Parâmetros do Modelo

O modelo matemático desenvolvido no Capítulo II depende da distância da ligação, das alturas das antenas e da estrutura do duto (altura e gradiente). Por esta razão não é simples analisar o efeito simultâneo de todos estes parâmetros. Nesta seção pretende-se mostrar a influência de cada parâmetro separadamente, evidenciando aquelas cuja variação toma mais crítico o problema. Para caracterizar a estrutura do duto serão utilizados os resultados obtidos na seção anterior (altura do duto = 120m e gradiente de M igual a - 50 U.M./km), enquanto que admitir-se-ã para a ligação valores que correspondem aproximadamente à ligação Gurupi-Aliança do Norte:

Distância : 50 km

Altura do Transmissor : 150 m

Altura do receptor : 100 m

Fixando todos os parâmetros a exceção de um, poder-se-á observar as situações descritas no Capítulo II, ou seja, espaço livre, atenuação finita e atenuação infinita. Para os cálculos foi utilizado o programa apresentado no Apêndice II, onde se supõe atenuação infinita aquelas superiores a 100 dB.

As figuras 13 a 16 mostram, respectivamente a influência do comprimento da ligação, da altura de uma das antenas, do gradiente do duto e da altura do duto. Observa-se nas figuras 13 e 15 que o efeito da distância e do gradiente do duto são similares. No caso analisado, não foi atingido o valor de espaço livre, verificando-se um aumento de atenuação com a distância e a medida que o gradiente se torna mais negativo.

Como pode ser visto nas figuras 14 e 16, a posição das antenas e a altura do duto são parâmetros bem mais críticos pois a atenuação apresenta mudanças bruscas, passando da condição de espaço livre para a situação de atenuação infinita. Tendo em vista tal comportamento é razoável supor que o emprego da diversidade em espaço seja uma solução para atenuar o efeito de dutos em uma ligação em visibilidade. Este aspecto da questão será analisado na próxima seção.

Figura 13 - Efeito da distância

Figura 14 - Efeito da altura da antena

Figura 15 - Efeito do Gradiente

Figura 16 - Efeito da altura do duto

4.3. Diversidade em Espaço

O problema fundamental no emprego de diversidade como solução para atenuar o efeito de dutos é a determinação criteriosa do espaçamento entre as antenas. Rigorosamente o espaçamento deveria ser fixado através de um dos procedimentos abaixo;

- (a) Medidas experimentais - neste caso o aspecto mais importante é o tempo de teste necessário para a obtenção do espaçamento adequado.
- (b) Otimização teórica - a partir do conhecimento da distribuição estatística de estrutura do duto (altura e gradiente) utilizando o modelo matemático desenvolvido no Capítulo II é possível determinar um espaçamento ótimo, em função da confiabilidade desejada.

Os dados disponíveis não permitiram que estas técnicas fossem desenvolvidas. Por esta razão, o presente trabalho optou por uma solução menos rigorosa, mas que sirva como uma orientação preliminar para a definição do espaçamento entre as antenas.

Supondo diversidade dupla e os sinais escolhidos de acordo com a técnica de seleção ótima⁹, foi empregada a sistemática seguinte.

Um dos canais foi mantido fixo de acordo com os valores estabelecidos no início deste capítulo. No outro canal variou-se com o mesmo espaçamento as alturas das antenas dentro de uma faixa de ± 40 metros. O cálculo do melhor sinal recebido foi feito de acordo com o programa descrito no Apêndice III. Os resultados finais são mostrados na Tabela 6 onde as colunas de 1 a 15 correspondem às seguintes situações:

- 1: gradiente - 30 U.M./km, altura do duto 100 m
- 2: gradiente - 30 U.M./km, altura do duto 120 m
- 3: gradiente - 30 U.M./km, altura do duto 140 m
- 4: gradiente - 40 U.M./km, altura do duto 100 m
- 5: gradiente - 40 U.M./km, altura do duto 120 m
- 6: gradiente - 40 U.M./km, altura do duto 140 m
- 7: gradiente - 50 U.M./km, altura do duto 100 m
- 8: gradiente - 50 U.M./km, altura do duto 120 m
- 9: gradiente - 50 U.M./km, altura do duto 140 m
- 10: gradiente - 60 U.M./km, altura do duto 100 m
- 11: gradiente - 60 U.M./km, altura do duto 120 m
- 12: gradiente - 60 U.M./km, altura do duto 140 m
- 13: gradiente - 70 U.M./km, altura do duto 100 m
- 14: gradiente - 70 U.M./km, altura do duto 120 m
- 15: gradiente - 70 U.M./km, altura do duto 140 m

Considerando que:

- a) O espaçamento de 20 metros é bastante razoável em termos técnicos e econômicos,
- b) Esta separação é também adequada para atenuar o desvancimento rápido provocado por percursos múltiplos⁶;

c) A experiência da EMBRATEL com este espaçamento, apesar de ter sido realizada em um período curto (3 meses), constatou resultados satisfatórios.

Tomar-se-á como resultado final deste trabalho uma separação mínima de 20 metros para o uso de diversidade dupla em espaço no combate ao desenvolvimento ocasionado por dutos. Este valor foi utilizado pela EMBRATEL e, apesar da curta duração dos testes, apresentou resultados satisfatórios. Cumpre ressaltar que a formulação ótica não prevê uma dependência com a frequência. Considerando que os testes experimentais foram realizados na faixa de 6 GHz, pode-se estimar que a formulação desenvolvida seja adequada para ser empregada nos sistemas em visibilidade que operam na faixa de micro-ondas, isto é, em frequências acima de 1 GHz.

TABELA 6 - Efeito da Diversidade em Espaço

Espaça- mento (m)	E S T R U T U R A D O D U T O														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
+40	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	8,1	0,0	0,0	11,8	0,0	0,0		0,0	0,0	
+36	0,0	9,3	6,0	0,0	12,0	8,1	0,0	18,8	11,8	0,0			0,0		
+32	0,0	9,3	6,0	0,0	12,0	8,1	0,0	18,8	11,8	0,0			0,0		
+28	0,0	9,3	6,0	0,0	12,0	8,1	0,0	18,8	11,8	0,0			0,0		
+24	0,0	9,3	6,0	0,0	12,0	8,1	0,0	18,8	11,8	0,0			0,0		
+20	0,0	9,3	6,0	0,0	12,0	8,1	0,0	18,8	11,8	0,0			0,0		
+16		9,3	6,0		12,8	8,1	0,0	18,8	11,8						
+12		9,3	6,0		12,0	8,1		18,8	11,8						
+8		9,3	6,0		12,0	8,1		18,8	11,8		25,0				
+4		9,3	6,0		12,0	8,1		18,8	11,8		25,0				
0		9,3	6,0		12,0	8,1		18,8	11,8						
-4		8,4	5,3		10,6	7,7		14,7	11,8						
-8		7,7	3,9		9,7	7,3		13,1	11,8						
-12	13,2	7,1	0,0		9,1	0,0		12,2	0,0		25,0				
-16	10,7	6,5	0,0	14,6	8,5	0,0		11,8	0,0		25,0	0,0			0,0
-20	9,3	6,0	0,0	12,0	8,1	0,0	18,8	11,8	0,0			0,0			0,0
-24	8,4	5,3	0,0	10,6	7,7	0,0	14,7	12,7	0,0			0,0			0,0
-28	7,7	3,9	0,0	9,7	7,3	0,0	13,1	18,8	0,0			0,0			0,0
-32	7,1	0,0	0,0	9,1	0,0	0,0	12,2	0,0	0,0	25,0	0,0	0,0			0,0
-36	6,5	0,0	0,0	8,5	0,0	0,0	11,8	0,0	0,0	25,0	0,0	0,0		0,0	0,0
-40	6,0	0,0	0,0	8,1	0,0	0,0	11,8	0,0	0,0		0,0	0,0		0,0	0,0

Atenuação em Relação ao Espaço Livre

Obs: Sem diversidade (espaçamento zero), observa-se que das 15 situações, 9 contêm atenuação infinita. Com espaçamento de 20 metros apenas 4 casos, nos demais, o sinal sofre atenuação máxima de 20 dB.

- Atenuação infinita

CONCLUSÕES

O modelo matemático apresentado neste trabalho mostrou-se bastante razoável para estimar o efeito de dutos nas ligações em visibilidade. Os programas descritos nos Apêndices I, II e III permitem analisar o problema, uma vez fixados os parâmetros da ligação e a estrutura do duto.

Os resultados mais significativos são a seguir discutidos:

- a) Efeito da distância - quando mais longa a ligação em visibilidade mais crítico o efeito de dutos. Este resultado introduz uma limitação na separação entre as estações de um sistema situado em regiões propícias à formação de dutos.
- b) Efeito das alturas das antenas - a dependência com a geometria do problema mostra que este efeito é extremamente crítico, principalmente pelo fato de agir simultaneamente com a variação de altura do duto.
- c) Efeito do gradiente do duto - quanto mais negativo piores serão as condições de propagação, é um efeito cujo comportamento é similar ao da distância.
- d) Efeito da altura do duto - bastante crítico, conforme comentado no item (b) acima.
- e) Emprego de diversidade - é a solução mais adequada para atenuar o efeito de dutos em uma ligação em visibilidade. De acordo com os resultados aqui obtidos, recomenda-se um espaçamento mínimo entre as antenas de 20 metros. Deve ser

ressaltado que este valor é também razoável para compensar o desvanecimento rápido. Além disso cálculos não apresentados neste trabalho mostram que a diversidade quádrupla pode aumentar substancialmente a confiabilidade do sistema em relação à dupla. A decisão sobre a utilização de uma ou outra técnica dependerá dos parâmetros técnicos e econômicos envolvidos em cada caso.

Como continuação a este trabalho, conforme comentado anteriormente, sugere-se que seja feita uma simulação em computador do comportamento da estrutura do duto e assim definir um espaçamento ótimo em função da confiabilidade desejada para a ligação. Tal procedimento não foi possível aqui pelo fato de não haver disponibilidade de informação sobre a distribuição estatística da altura e do gradiente do duto. Uma vez elaborado o programa desta simulação, poderá ser utilizado o programa do Apêndice III para calcular o sinal resultante em função do espaçamento.

BIBLIOGRAFIA

1. Ikegami, F., Review of E.C.L., 15, 483-506 (1967)
2. Bean, B.R. e E.J. Dutton, "Radio Meteorology", Dover(1968).
3. Pontes, M.S., CETUC, pág 5 (1974).
4. Ministério da Aeronáutica, "Manual de Atmosfera Padrão", 1963.
5. Kerr, D.E., "Propagation of Short Radio Waves", Mc Graw-Hill Book Company (1951).
6. Assis, M.S., IEEE Eletrolatina, 6, 9 - 17 (1972).
7. Boithias, L. e J. Battesti, "Annales des Télécommunications" (1970).
8. TELEBRAS, "Reunião de Radiopropagação-Relatório Final", ja neiro de 1975.
9. Panter, P.F., "Communications Systems Design", McGraw-Hill Book Company (1951).

APÊNDICE I

O programa mostrado neste apêndice permite mapear as regiões que caracterizam os diversos tipos de desvanecimento descritos no capítulo II, em função da posição do transmissor em relação a estrutura do duto. O programa foi elaborado em linguagem PL1 e os dados de entrada são as variáveis Z_0 , Z_1 , Z_2 , Z_R , A_1 , A_2 e A_3 que devem ser perfuradas a partir da coluna 1 em um ou mais cartões obedecendo obrigatoriamente a sequência acima. O significado de cada variável é,

- A_1 - módulo do gradiente de M no meio 1 (UM/km)
- A_2 - módulo do gradiente de M no meio 2 (UM/km)
- A_3 - módulo do gradiente de M no meio 3 (UM/km)
- Z_1, Z_2 - conforme mostrado na figura
- Z_0 - altura do transmissor (km) relativa ao nível do mar
- Z_R - altura do receptor (km) relativa ao nível do mar.

Observação - se Z_1 for nulo então as variáveis Z_2 , A_2 e A_3 devem assumir o valor -1. Se Z_2 for nulo então A_3 deve assumir o valor +1.

```

FIGURA: PROCEDURE OPTIONS(MAIN);
DECLARE S(0:200),T0C(0:200),T1C(0:200),T2C(0:200),TC(0:200),C(0:200);
ON ENDFILE(SYSIN) GO TO E0;
P10C: GET LIST(ZC,Z1,Z2,ZR,A1,A2,A3);
PUT PAGE;
IF A2=0 THEN GO TO P10;
IF A2=0 THEN PUT SKIP(20) EDIT('A2=C')(X(6),A(4));
GO TO P10C;
P10: IF Z0>=Z1 THEN GO TO F1;
IF (Z0>=Z2) & (Z0<Z1) THEN GO TO F2;
IF Z0<Z2 THEN GO TO F3;
F1: TC=SQRT(2*(ZC-Z1)*A1*10**(-6));
T2=SQRT(2*A2*(Z1-Z2)*10**(-6));
SP=10**6*TC/A1;
TCM=TC*1000;
PUT SKIP EDIT('GRAD:',F', '|TC|=',TCM)(X(6),A(4),X(2),A(2),X(44) ,
A(5),COLUMN(65),F(5,2));
PUT SKIP(5);
IF ZR>Z0 THEN GO TO X1;
D=ZC/50; Z=Z0+D; GO TO W1;
X1: D=ZR/50; Z=ZF+D; GO TO W1;
W1: Z=Z-D;
IF Z<0 THEN GO TO E1;
IF Z>=Z1 THEN GO TO F1;
IF (Z>=Z2) & (Z<Z1) THEN GO TO P2;
Z2= Z2-(A2*(Z1-Z2)/A3);
IF (Z>=Z3) & (Z<Z2) THEN GO TO P3;
IF Z<Z3 THEN GO TO F0;
F1: T=SQRT(T0**2-2*A1*(Z0-Z)*10**(-6));
S1=10**6*(T0-T)/A1;
S2=2*SP-S1;
IF S1<0 THEN S1=S2;
IF Z1=0 THEN GO TO Y3;
IF Z2=0 THEN GO TO Y3;
Z3= Z2-(A2*(Z1-Z2)/A3);
IF Z3>0 THEN GO TO Y1;
IF Z3=0 THEN GO TO Y2;
IF Z3<0 THEN GO TO Y2;
Y1: SQ=SP+10**6*(T2/A2+T2/A3);
S3= 2*SQ-S1;
GO TO F5;
Y2: SQ=SP+10**6*(T2/A2+T2/A3);
S3=2*SQ-S1;
R=S1;
GO TO F4;
Y3: S3,R=S1; GO TO P4;
P5: E=A3*Z3/200;
DO K=0 TO 200;
T0C(K)=SQRT(2*(A1*(Z0-Z1)+K**E)*10**(-6));
T1C(K)=SQRT(AE5(T0C(K)**2-2*A1*(ZC-Z1)*10**(-6)));
T2C(K)=SQRT(T1C(K)**2+2*A2*(Z1-Z2)*10**(-6));
TC(K)=SQRT(T1C(K)**2+2*A1*(Z-Z1)*10**(-6));
S(K)=10**6*((T0C(K)-T1C(K))/A1+2*((T2C(K)-T1C(K))/A2)
+2*T2C(K)/A2+(TC(K)-T1C(K))/A1));
END;
R=S(0); DO K=1 TO 200; IF S(K)<R THEN R=S(K);
END;
P4: ZH=Z*1000;
PUT SKIP EDIT(A1,ZH,'|', '|', '|', '|', '|', '|', '|')(COLUMN(1),
F(10),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1<100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(S1+16.5),A);
IF S2<100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(S2+16.5),A);
IF S3<100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(S3+16.5),A);
IF R<100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(R+16.5),A);
GO TO W1;
P2: T=SQRT(ABS(T0**2-2*(A1*(ZC-Z1)-A2*(Z1-Z))*10**(-6)));
S1=SP+10**6*T/A2;
IF Z2=0 THEN GO TO Y6;
Z3= Z2-(A2*(Z1-Z2)/A3);
IF Z3>0 THEN GO TO Y4;
IF Z3=0 THEN GO TO Y5;
IF Z3<0 THEN GO TO Y6;
Y4: SQ=SP+10**6*(T2/A2+T2/A3);
S2=2*SQ-S1; GO TO F6;
Y5: SQ=SP+10**6*(T2/A2+T2/A3);
S2=2*SQ-S1; R=S1; GO TO F7;

```

```

Y6: S2=F=CJ; GC TO P7;
P6: F=A3*Z3/200;
DC K=0 TO 200;
T0C(K)=SQRT((2*(A1*(ZC-Z1)+K*E)*10**(-6)));
T1C(K)=SQRT((AES(T0C(K)*2-2*A1*(ZC-Z1)*10**(-6)));
T2C(K)=SQRT((T1C(K)*2+2*A2*(Z1-Z2)*10**(-6)));
TC(K)=SQRT((AES(T2C(K)*2-2*A2*(Z1-Z2)*10**(-6)));
S(K)=10**6*((T0C(K)-T1C(K))/A1+(T2C(K)-TC(K))/A2+
T2C(K)/A3+(T2C(K)-TC(K))/A2);
END;
R=S(0); DO K=1 TO 200; IF S(K)<R THEN R=S(K);
END;
P7: ZH=Z*1000;
PLT SKIP EDIT(' ',A2,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(7),
A,F(3),X(1),F(3),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(S1+16.5),A);
IF S2<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(S2+16.5),A);
IF R<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(R+16.5),A);
GC TO W1;
P8: T=SQRT((2*(A1*(ZC-Z1)+A2*(Z1-Z2)+A3*(Z2-Z1)*10**(-6)));
S1=SF+10**6*(T2/A2+(T2-T)/A3);
IF Z3>0 THEN GC TO Y7;
IF Z3=0 THEN GC TO Y8;
IF Z3<0 THEN GC TO Y9;
Y7: S2=2; SQ=S1; GC TO F8;
Y8: S2=2; SQ=S1; F=S1; GC TO P9;
Y9: S2=F=S1; GC TO F9;
P8: F=A3*Z3/200;
DC K=0 TO 200;
T0C(K)=SQRT((2*(A1*(ZC-Z1)+K*E)*10**(-6)));
T1C(K)=SQRT((AES(T0C(K)*2-2*A1*(ZC-Z1)*10**(-6)));
T2C(K)=SQRT((T1C(K)*2+2*A2*(Z1-Z2)*10**(-6)));
TC(K)=SQRT((2*A3*(Z-Z3)+K*E)*10**(-6));
S(K)=10**6*((T0C(K)-T1C(K))/A1+(T2C(K)-TC(K))/A2+
T2C(K)/A3+TC(K)/A3);
END;
R=S(0); DO K=1 TO 200; IF S(K)<R THEN R=S(K);
END;
P9: ZH=Z*1000;
PLT SKIP EDIT(A3,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(7),
F(10),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(S1+16.5),A);
IF S2<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(S2+16.5),A);
IF R<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(R+16.5),A);
GC TO W1;
P10: F=A3*Z/200;
DC K=0 TO 200;
T0C(K)=SQRT((2*(A1*(ZC-Z1)+A2*(Z3-Z1)+K*E)*10**(-6)));
T1C(K)=SQRT((AES(T0C(K)*2-2*A1*(ZC-Z1)*10**(-6)));
T2C(K)=SQRT((T1C(K)*2+2*A2*(Z1-Z2)*10**(-6)));
TC(K)=SQRT((2*K*E)*10**(-6));
S(K)=10**6*((T0C(K)-T1C(K))/A1+(T2C(K)-TC(K))/A2+
T2C(K)/A3+TC(K)/A3);
END;
R1=S(0);
R=S(1); DO K=2 TO 200; IF S(K)<R THEN R=S(K);
END;
ZH=Z*1000;
PLT SKIP EDIT(A3,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(10),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF R<R1 THEN GC TO P11; GC TO W1;
P11: IF R<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(R+16.5),A);
IF R1<100 THEN PLT SKIP(0) EDIT('')(COLUMN(R1+16.5),A);
GC TO W1;
F2: T0=SQRT((2*(A2*(Z1-ZC)*10**(-6)));
TC=T0*100;
PLT SKIP EDIT('CRAC','F','|TC|=',TCM)(X(6),A(4),X(2),A(2),X(44),
A(5),COLUMN(65),F(5,2));
SPA=10**6*TC/A2;
T2=SQRT((T0**2+2*A2*(Z1-Z2)*10**(-6)));
T2B=SQRT((2*A2*(ZC-Z2)*10**(-6)));
IF ZR>Z1 THEN GC TO X2;
C=Z1/50; Z=Z1+C; GC TO W2;
X2:D=ZR/50; Z=ZF+C; GC TO W2;
W2: Z=Z-D;

```

```

IF Z<0 THEN GO TO E1;
IF (Z<Z2)&(Z>Z1) THEN GO TO V;
IF (Z>=Z0) &(Z<Z1) THEN GO TO V1;
IF (Z>=Z2) &(Z<Z0) THEN GO TO V2;
IF Z<Z2 THEN GO TO V3;
V3: Z3C=Z2-A2*(ZC-Z2)/A2; Z3=Z2-A2*(Z1-Z2)/A2;
IF (Z>=Z3C)&(Z<Z2) THEN GO TO V5;
IF (Z>Z3)&(Z<Z3C) THEN GO TO V6;
IF Z<Z3 THEN GO TO VJ;
V: T=SQRT(2*(Z-Z1)*A1*10**(-6));
S1A=SPA+10**6*1/A1;
IF Z2=0 THEN GO TO M7;
Z3=Z2-A2*(Z1-Z2)/A2;
IF Z3<0 THEN GO TO M7;
SPC=10**6*((T2-T0)/A2+T2/A3);
S1C=2*SPC+S1A; GO TO LC;
M7: S1C=S1A;
L0: ZF=Z*1000;
PUT SKIP EDIT(A1,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(10),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S1C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('C')(COLUMN(S1C+16.5),A);
GO TO M2;
V1: T=SQRT(AES(T0*-2-2*A2*(Z-Z0)*10**(-6)));
S1A=10**6*(10-T)/A2;
S2A=2*SPA-S1A;
IF Z2=0 THEN GO TO M1;
Z3=Z2-A2*(Z1-Z2)/A2;
IF Z3<0 THEN GO TO M1;
SPC=10**6*((T2-T0)/A2+T2/A3);
S1C=2*SPC+S1A;
S2C=2*SPC+S2A;
S3A=2*S1C+2*SPA+S1A;
S4A=2*S3A+2*SPC+S2A;
GO TO L1;
M1: S1C,S2C,S3A,S4A=S2A;
L1: ZF=Z*1000;
PUT SKIP EDIT(' ',A2,ZF,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(7),
A,F(3),X(1),F(3),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S2A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('A')(COLUMN(S2A+16.5),A);
IF S1A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S1C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('C')(COLUMN(S1C+16.5),A);
IF S2C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('C')(COLUMN(S2C+16.5),A);
IF S3A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('A')(COLUMN(S3A+16.5),A);
IF S4A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('A')(COLUMN(S4A+16.5),A);
GO TO M2;
V2: T=SQRT(ABS(10**6-2*A2*(Z-Z0)*10**(-6)));
TF=SQRT(2*A2*(Z-Z1)*10**(-6));
S1C=10**6*(T-T0)/A2;
S1A=2*SPA+S1C;
S1B=10**6*TF/A2;
IF Z2=0 THEN GO TO M2;
Z3C=Z2-A2*(ZC-Z2)/A2; Z3=Z2-A2*(Z1-Z2)/A2;
IF Z3<0 THEN GO TO M2;
SPC=10**6*((T2-T0)/A2+T2/A3);
SPB=10**6*(T2B/A2+T2E/A2);
S2C=2*SPC-S1C;
S2A=S2C+2*SPB;
S3C=2*SPC+S1A;
S2B=2*SPB-S1B;
S3B=2*SPB+S1B;
S4B=4*SPB-S1B;
GO TO L2;
M2: IF Z3C<0 THEN GO TO M2;
S2C,S2A,S3C,S2B,S3B,S4B=S1A;
L2: ZF=Z*1000;
PUT SKIP EDIT(' ',A2,ZF,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(7),
A,F(3),X(1),F(3),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S2A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT ('A')(COLUMN(S2A+16.5),A);

```

```

IF S2C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('C')(COLUMN(S2C+16.5),A);
IF S1C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('L')(COLUMN(S1C+16.5),A);
IF S3B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('E')(COLUMN(S1B+16.5),A);
IF S2B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('B')(COLUMN(S2B+16.5),A);
IF S3C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('E')(COLUMN(S3B+16.5),A);
IF S4B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('E')(COLUMN(S4B+16.5),A);
GO TO W2;
V5:=1-SQRT(ABS(T1-1-(A2*(Z2-Z1)+A3*(Z2-Z1)-1)*(-6)));
T5:=SQRT(1-(T1-1)*(Z2-Z1)-1)*(-6);
S1C=10*A5*((T2-T1)/A2+(T2-T1)/A3);
S1A=2*SP3+S1C;
S2L=10*(T1-T2)/A2+(T1-T2)/A3;
IF 72C<=0 THEN GO TO M5;
S1C=10*(T1-T2)*(1/A2+1/A3);
S2L=10*(T1-T2)/A2+12/A3;
S2C=2*PC-S1C;
S2B=2*PC-S2L;
S3C=2*PC-S1C;
S2B=2*PC-S1C;
S3E=2*PC-S1C;
S4B=2*PC-S1C;
GO TO W2;
M4:=1; IF 72C<=0 THEN GO TO M5;
S2C=2*PC-S1C;
S2B=2*PC-S2L;
S3C=2*PC-S1C;
S4B=2*PC-S1C;
GO TO W2;
M5:=S2C, S2C, S2C, S2L, S4B=S1A;
L3:=72C-1;
PUT SKIP(1) EDIT(A,Z1,'|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1A<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S2A<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('A')(COLUMN(S2A+16.5),A);
IF S2C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('C')(COLUMN(S2C+16.5),A);
IF S1C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('C')(COLUMN(S1C+16.5),A);
IF S3C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('C')(COLUMN(S3B+16.5),A);
IF S2B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('B')(COLUMN(S2B+16.5),A);
IF S3B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('E')(COLUMN(S3B+16.5),A);
IF S4B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('E')(COLUMN(S4B+16.5),A);
GO TO W2;
V6:=1-SQRT(ABS(T2-1-(A2*(Z2-Z1)-1)*(-6)));
S1A=10*A6*((T2-T1)/A2+(T2-T1)/A3);
S1A=2*PC+S1A;
IF 72C<=0 THEN GO TO M6;
S2C=2*PC-S1C;
S2B=2*PC-S2L;
S3C=2*PC-S1C;
S4B=2*PC-S1C;
GO TO W2;
M6:=S2C, S2C, S2C, S2L, S4B;
L4:=72C-1;
PUT SKIP(1) EDIT(A,Z1,'|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1A<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S2A<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('A')(COLUMN(S2A+16.5),A);
IF S2C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('C')(COLUMN(S2C+16.5),A);
IF S1C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('C')(COLUMN(S1C+16.5),A);
IF S3C<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('C')(COLUMN(S3B+16.5),A);
IF S2B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('B')(COLUMN(S2B+16.5),A);
IF S3B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('E')(COLUMN(S3B+16.5),A);
IF S4B<=0 THEN PUT SKIP(1) EDIT ('E')(COLUMN(S4B+16.5),A);
GO TO W2;
V7:=72C-1;
PUT SKIP(1) EDIT(A,Z1,'|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
GO TO W2;
F2:=Z3-Z2-(Z1-Z2)/A2; Z3C=Z2+(Z2-Z1)*A3/A2;
IF (Z3>=Z3C) (Z3>=Z1) THEN GO TO F4;
IF (Z3<Z3C) (Z3<Z1) THEN PUT SKIP(20) EDIT('AB,IXC UN,INV')(45,A);
GO TO F4;
F40:=1-SQRT(ABS(T2-1-(A2*(Z1-Z2)-1)*(-6)));
T2:=SQRT(1-(T2-1)*(Z1-Z2)-1)*(-6);
SP2=10*(T2-T1)/A2+12/A3;
T2B=SQRT(2*A3*(Z2-Z1)-10*(-6));
T2M=T2*100C;

```

```

PUT SKIP EDIT('GRAD','H','|TC|','T(M)(X(1),A(4),X(2),A(2),X(44) ',
A(5),C(1),F(5,2));
SPB=10*PC*(T2B/A3+T2E/A2);
PUT SKIP(5);
IF Z1>Z1 THEN GO TO K3;
D=Z1/50; Z=Z1+D; GO TO K3;
X3=C=Z/50; Z=Z1+D; GO TO K3;
K3: Z=Z-D;
IF Z<0 THEN GO TO K1;
IF (Z>Z1) & (Z<=Z2) THEN GO TO K6;
IF (Z>=Z2) & (Z<=Z1) THEN GO TO K1;
IF (Z>=Z1) & (Z<Z2) THEN GO TO K2;
IF (Z>=Z2) & (Z<Z2) THEN GO TO K3;
IF (Z<Z2) & (Z>=Z2) THEN GO TO K4;
IF (Z<Z2) THEN GO TO K5;
K6: IF (Z<Z2) THEN GO TO K7; GO TO K0;
K7: E=A3*(Z2-Z1)/A2;
DO K=0 TO 20;
TIC(K)=SQRT(2*A1*(Z1-Z1)*(-6));
TIC(K)=SQRT(TIC(K)*A2+2*A2*(Z2-Z1)*(-6));
TIC(K)=SQRT(A3*(T2C(K)+2-2*A2*(Z1-Z2)*(-6));
TIC(K)=SQRT(TIC(K)*2+2*A1*(Z-Z1)*(-6));
O(K)=10*PC*(TIC(K)+T2C(K))/A3+(T2C(K)-TIC(K))/A2+(TC(K)-T1C(K))/A1;
END;
U1=C(1); B1=C(2); U=C(1); DO K=2 TO 20;
IF C(K)<U THEN U=C(K);
IF C(K)>B1 THEN B1=C(K); END;
Z1=Z-100;
PUT SKIP EDIT(A1,Z1,'|', '|', '|', '|', '|', '|', '|', '|') (C(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF (U<U1) & (U<=100) THEN PUT SKIP EDIT('U') (C(1),U+16.5,A);
IF (B>B1) & (B<=100) THEN PUT SKIP EDIT('B') (C(1),B+16.5,A);
GO TO K3;
K1: T=SQRT(2*A1*(Z-Z1)*(-6));
S1A=SP1+10*PC/A1;
IF Z<0 THEN GO TO K5;
SPC=10*PC*(T2/A3);
S1C=2*SPC+S1A; GO TO K0;
N5: S1C=S1A;
J0: Z1=Z-100;
PUT SKIP EDIT(A1,Z1,'|', '|', '|', '|', '|', '|', '|', '|') (C(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S1A<100 THEN PUT SKIP(1) EDIT('A') (C(1),S1A+16.5,A);
IF S1C<100 THEN PUT SKIP(1) EDIT('C') (C(1),S1C+16.5,A);
GO TO K3;
K1: T=SQRT(A3*(T2+2*(A2*(Z-Z2)-A3*(Z2-Z1))*(-6));
S1A=10*PC*(T2-T)/A3+(T2-T)/A2;
S2A=2*SP1-S1A;
IF Z<0 THEN GO TO K1;
SPC=10*PC*(T2/A3);
S1C=2*SPC+S1A;
S2C=2*SPC+S2A;
S3A=2*SP1+2*SPC+S1A;
GO TO K1;
N1: S1C,S2C,S3A=S1A;
J1: Z1=Z-100;
PUT SKIP EDIT('A',A2,Z1,'|', '|', '|', '|', '|', '|', '|', '|') (C(1),
A,F(3),X(1),F(3),X(1),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A,X(19),A);
IF S2A<100 THEN PUT SKIP(1) EDIT('A') (C(1),S2A+16.5,A);
IF S1C<100 THEN PUT SKIP(1) EDIT('A') (C(1),S1A+16.5,A);
IF S1C<100 THEN PUT SKIP(1) EDIT('C') (C(1),S1C+16.5,A);
IF S2C<100 THEN PUT SKIP(1) EDIT('C') (C(1),S2C+16.5,A);
IF S3A<100 THEN PUT SKIP(1) EDIT('A') (C(1),S3A+16.5,A);
GO TO K3;
K2: T=SQRT(A3*(T2+2*(A2*(Z-Z2)-A3*(Z2-Z1))*(-6));
T1=SQRT((T2+2*A2*(Z-Z2))*(-6));
S1A=10*PC*(T2-T)/A3+(T2-T)/A2;
S2A=2*SP1-S1A;
S1B=10*PC*(T2/A3+(T2-T)/A2);
S2B=2*SP1-S1B;
S3B=2*SP1+S1B;
IF Z<0 THEN GO TO K2;
S1C=10*PC*(T2/A3);
S1C=2*SPC+S1A;
S2C=2*SPC+2*SP1-S1A;

```

```

S3A=2*SPA+2*SPC+S1A;
GO TO J2;
N2: S1C,S2C,S3A=S1A;
J2: ZH=Z+100;
PUT SKIP EDIT(' ',A2,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(7),
A,F(3),X(1),F(3),X(1),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A);
IF S2A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S2A+16.5),A);
IF S1A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S1C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('C')(COLUMN(S1C+16.5),A);
IF S1B<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('B')(COLUMN(S1B+16.5),A);
IF S2C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('C')(COLUMN(S2C+16.5),A);
IF S2B<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('B')(COLUMN(S2B+16.5),A);
IF S3A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S3A+16.5),A);
IF S3B<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('B')(COLUMN(S3B+16.5),A);
GO TO W2;
K3: T=SQRT(ABS(100+Z-2*AB*(Z-2)*100*(-6)));
TB=SQRT(2*AB*(Z-20)-100*(-6));
S1A=100+6*(1-T)/AB;
S2A=2*SPA-S1A;
S1B=100+6*TB/AB;
S2B=2*SPB-S1B;
S3B=2*SPB+S1B;
IF ZB<0 THEN GO TO N3;
SPC=100+6*(1-T)/AB;
S1C=2*SPC+S1A;
S2C=2*SPC+2*SPA-S1A;
S3A=2*SPA+2*SPC+S1A;
GO TO J3;
N3: S1C,S2C,S3A=S1A;
J3: ZH=Z+100;
PUT SKIP EDIT(A3,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A);
IF S2A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S2A+16.5),A);
IF S1A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S1C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('C')(COLUMN(S1C+16.5),A);
IF S1B<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('B')(COLUMN(S1B+16.5),A);
IF S2C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('C')(COLUMN(S2C+16.5),A);
IF S2B<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('B')(COLUMN(S2B+16.5),A);
IF S3A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S3A+16.5),A);
IF S3B<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('B')(COLUMN(S3B+16.5),A);
GO TO J3;
K4: T=SQRT(ABS(T)+Z-2*AB*(Z-2)*100*(-6));
S1C=100+6*(T-1)/AB;
S1A=2*SPA+S1C;
IF ZB<0 THEN GO TO N4;
SPC=100+6*(T)/AB;
S2C=2*SPC-S1C;
S2A=2*SPA+S2C;
S2C=2*SPC+2*SPA+S1C;
GO TO J4;
N4: S2C,S2A,S3C=S1A;
J4: ZH=Z+100;
PUT SKIP EDIT(A3,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A);
IF S2A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S2A+16.5),A);
IF S1A<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('A')(COLUMN(S1A+16.5),A);
IF S1C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('C')(COLUMN(S1C+16.5),A);
IF S2C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('C')(COLUMN(S2C+16.5),A);
IF S3C<=100 THEN PUT SKIP(0) EDIT('C')(COLUMN(S3C+16.5),A);
GO TO W3;
K5: Z=ZF+1000;
PUT SKIP EDIT(A3,ZH,'|','|','|','|','|','|','|','|')(COLUMN(1),
F(1),F(4),X(1),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A,X(15),A);
GO TO W3;
E1: PUT SKIP EDIT('0','20','40','60','80','100')(COLUMN(1),X(15),A,
X(18),A(2),X(18),A(2),X(18),A(2),X(18),A(2),X(18),A);
GO TO F100;
EO: END;

```


APÊNDICE II

A influência dos parâmetros de uma ligação sujeita à influência de dutos troposféricos pode ser observada através das saídas do programa, em linguagem PL1, apresentado neste apêndice. Na saída observa-se o efeito de dutos de superfície com diversas combinações de altura e gradiente em uma ligação com variação de todos os parâmetros.

As variáveis I, J, K, N e M permitem variar o comprimento da ligação, altura do transmissor, altura do receptor, altura do duto e gradiente do duto nas expressões abaixo, respectivamente. Cada variável assume valores inteiros compreendidos entre dois limites desejados.

$SR = \text{valor inicial} + (I-1) * \text{incremento}$

$ZT = \text{valor inicial} + (J-1) * \text{incremento}$

$ZR = \text{valor inicial} + (N-1) * \text{incremento}$

$AD = M$

o valor inicial e o incremento podem ser perfurados, por exemplo, no formato DEC FIXED (9,6).

Na saída obtêm-se a impressão da distância (km), altura do transmissor (m), altura do receptor (m), altura do duto (m), gradiente do duto (UM/km) e, a atenuação relativa ao espaço livre (dB) em colunas obedecendo a sequência acima. Com isso obtêm-se as diversas combinações.

```

OUTR: 0000001 = OPTIONS (MAIN);
CON: INPAGE (SYSEINT);
DO1 (ZT, ZT, S, ZM, ZTM, T, X2, A0, AD, Z0, Z1, S2, Z1, Z2, C1, C2, X1, X3,
Z, Z1, X, T, T1, T2, 0, T0, T2) DEC FLUAT;
T0=0.00001; X3=0.17700;
AD=118;
DO J= T1 ;
DO J= T0 ;
DO K= T0 ;
DO K= T0 ;
DO M= T0 ;
ZM=Z*1000.00000;
DO M= T0 ;
IF ZT=Z0 THEN GO TO V2;
IF ZT<Z0 THEN GO TO V1;
SP=10**3*SQRT(2*(ZT-Z0)/A0);
Z1=0.50*10*(S-S2)**2*10**(-6);
Z2=0.50*10*(S-S2)**2*10**(-6);
IF (Z0<=(Z1+Z2)) & (Z0>=(Z0-Z2)) & (S2>=S2) THEN GO TO V1;
IF (Z0>=(Z1+Z2)) & (S2>S2) THEN GO TO V2;
IF (Z0>=Z0) & (S<S2) THEN GO TO V2;
C1=2*A0*(ZT-Z0)*10**(-6);
C2=2*(A0*(ZT-Z0)-A0*(Z0-Z2))*10**(-6);
X2=X3;
X1=SQRT(C1);
F2=10**5*(X2/A0-(1/A0+1/A0)*SQRT(X2*X2 -C1) +(1/A0)*
SQRT(X2*X2 -C2))-S;
DIF=X2-X1;
L1: DIF=0.5*DIF;
X=X1+DIF;
F=10**5*(X/A0-(1/A0+1/A0)*SQRT(X*X -C1) +(1/A0)*
SQRT(X*X -C2))-S;
IF ABS(DIF)<=ABS(T0*X) THEN GO TO P1;
IF SIGN(F)=0 THEN GO TO P1;
IF SIGN(F)=SIGN(T2) THEN X2=X;
ELSE X1=X;
GO TO L1;
P1: T0=X; T1=SQRT(ABS(T0**2-C1)); T2=SQRT(ABS(T0**2-C2));
T0M=T0*1000.0; T2M=T2*1000.0;
Q= LOG10(S2*10**(-6)*T1/ABS(T2*(T1-T0)/A0+T0*(T1-T2)/A0))*(-10.0);
IF Q> 99999.99 THEN GO TO V1; GO TO S0;
V1: SP=10**3*SQRT(2*(Z0-ZT)/A0);
Z1=0.50*10*(S2-S2)**2*10**(-6);
Z2=0.50*10*(S2-S2)**2*10**(-6);
IF ((Z0<=(Z1+Z2)) & (Z0>=(Z0-Z2)) & (S2>=S2) THEN GO TO V1;
IF (Z0<=(Z1+Z2)) & (S2>S2) THEN GO TO V2;
IF (Z0<=Z0) & (S2<S2) THEN GO TO V2;
C1=2*A0*(Z0-ZT)*10**(-6);
C2=2*(A0*(Z0-ZT)-A0*(Z0-Z2))*10**(-6);
X2=X3;
X1=SQRT(C1);
F2=10**5*(X2/A0-(1/A0+1/A0)*SQRT(X2*X2 -C1) +(1/A0)*
SQRT(X2*X2 -C2))-S;
DIF=X2-X1;
L2: DIF=0.5*DIF;
X=X1+DIF;
F=10**5*(X/A0-(1/A0+1/A0)*SQRT(X*X -C1) +(1/A0)*
SQRT(X*X -C2))-S;
IF ABS(DIF)<=ABS(T0*X) THEN GO TO P2;
IF SIGN(F)=0 THEN GO TO P2;
IF SIGN(F)=SIGN(T2) THEN X2=X;
ELSE X1=X;
GO TO L2;
P2: T0=X; T1=SQRT(ABS(T0**2-C1)); T2=SQRT(ABS(T0**2-C2));
T0M=T0*1000.0; T2M=T2*1000.0;
Q= LOG10(S2*10**(-6)*T1/ABS(T2*(T1-T0)/A0+T0*(T1-T2)/A0))*(-10.0);
IF Q> 99999.99 THEN GO TO V1; GO TO S0;
V1: OUT SKIP EDIT(0=, S, HT=, ZTM, H=, ZR, Z0=, ZM, AD=, AD,
AT=IN=) (COLUMN(7), A(2), F(3), COLUMN(12), A(3), F(3), COLUMN(20),
A(3), F(3), COLUMN(28), A(3), F(3), COLUMN(37), A(3), F(3), COLUMN(45), A(6));
GO TO FIM;
V2: Q=0;
OUT SKIP EDIT(0=, S, HT=, ZTM, H=, ZR, Z0=, ZM, AD=, AD,
AT=, Q) (COLUMN(7), A(2), F(3), COLUMN(12), A(3), F(3), COLUMN(20),
A(3), F(3), COLUMN(28), A(3), F(3), COLUMN(37), A(3), F(3), COLUMN(45), A(3),
F(6,2));
GO TO FIM;

```

```

SD: PUT SKIP EDIT('D=',S',HT=',ZT1,'H=',ZTM,'ZD=',ZDM,'AD=',AD,
'AT=',Q) (COLUMN(5),A(2),F(3),COLUMN(12),A(3),F(3),COLUMN(20),
A(3),F(3),COLUMN(28),A(3),F(3),COLUMN(37),A(3),F(3),COLUMN(45),A(2)
,F(6,2));
FIN:END; END; END; END; EN; EN;

```

APÊNDICE III

Com o objetivo de verificar o efeito de diversidade dupla em espaço sobre uma ligação com os parâmetros iniciais fixados, foi elaborado um programa de computador em linguagem PL1. O espaçamento é igual em ambas as torres e é experimentado os casos das antenas auxiliares estarem acima e abaixo das originais. Observa-se na saída do programa o efeito do espaçamento do sistema em diversidade para diversas situações de altura e gradiente de dutos de superfície, onde os valores de saída a serem imprimidos referem-se ao sinal mais aproveitável (menor atenuação).

As variáveis ZTI, ZRL e SR assumem os valores da altura do transmissor (km), da altura do receptor (km), e do comprimento da ligação (km). Nos cartões de dados é lida a sequência de estruturas de dutos experimentada pela ligação. Em cada cartão são perfurados, a partir da coluna 1, a altura do duto (km) e o gradiente do duto (UM/km), respectivamente separados por vírgula. A altura das antenas auxiliares é variada pela variável B cujo incremento é arbitrário. A altura do transmissor e do receptor auxiliares assumem o valor das variáveis ZT2 e ZR2, respectivamente, e cujas expressões são:

$$ZT2 = ZT2 \text{ máxima} - B/1000.000.000$$

$$ZR2 = ZR2 \text{ máxima} - B/1000.000.000$$

ZT2 e ZR2 podem ser perfurados no formato DEC FIXED (9,6) e B como inteira.

O formato de saída permite a impressão, para cada espaçamento, da altura das antenas em uma linha seguindo-se nas próxima(s) linha(s) dos valores da atenuação (dB) relativa ao espaço livre do sinal mais aproveitável.

```

DIVER: DOOCE=DOOCE+DOTIQUIS(MATH);
DCL(ZT1,ZT2,Z1,Z2,ZP1,ZP2,TOL,0,0,AMAX,AC,X3,ZT1M,ZT2M,Z1M,Z2M) DTC FLOAT;
DCL(ZT(*),Z1(*),SP(*),Z1(*),C1(*),C2(*),X2(*),X1(*),
Z2(*),A(*),ZD(*),AD(*),
Z2(*),A(*),ZD(*),AD(*),DIF(*),X(*),TO(*),T1(*),T2(*))
DEC FLOAT CTL;
GET LIST(M);
AO=118.00000; D=5.00000;
ZT1=0; ZP1=0; S=0; TOL=0.00001;
X3=0.175000000; AC=0.00000000;
ALLOCATE Z1(2,M),Z2(2,M),C1(2,M),C2(2,M),X2(2,M),X1(2,M),
Z2(2,M),A(2,M),DIF(2,M),X(2,M),TO(2,M),T1(2,M),T2(2,M),
SP(2,M),AD(2,M),ZD(M),AD(M),ZT(2),ZP(2);
DO N=1 TO M;
GET LIST(Z(N),AD(N));
END;
DO D=0 TO 100 BY 1;
ZT2=Valor Max-8/1000.000000;
ZT2M=ZT2*1000.000000; ZT1M=ZT1*1000.000000;
Z22=Valor Max-8/1000.000000;
Z22M=Z22*1000.000000; ZP1M=ZP1*1000.00000000;
PUT SKIP 1(1)ZT1M,ZT1M,ZT2M,Z1M,Z2M,ZP1M,ZP2M,ZP2M;
{COLUMN(30),A(5),F(3),X(2),A(5),F(3),X(2),A(5),F(3),X(2),A(5),F(3)};
PUT SKIP;
ZT(1)=ZT1;ZT(2)=ZT2;ZP(1)=ZP1;ZP(2)=ZP2;
DO N=1 TO 4;
AMAX=0;
DO K=1 TO 2;
DO L=1 TO 2; IF K=L THEN GO TO V0; ELSE GO TO S0;
V0: IF ZT(K)=ZD(N) THEN GO TO V2;
IF ZT(K)<ZD(N) THEN GO TO W1;
S0(K,N)=10.0**3.0*SQRT(2.0*(ZT(K)-ZD(N))/AD);
Z1(K,N)=0.5*AO*(SP-SP(K,N))*2*10**(-6);
Z2(K,N)=0.5*AO*(SP-SP(K,N))*2*10**(-6);
IF (ZP(L)<=(ZD(N)+Z1(K,N)))&(ZP(L)>=(ZD(N)-Z2(K,N)))&(SP>=SP(K,N))
THEN GO TO V1;
IF (ZP(L)>=(Z1(K,N)+ZD(N)))&(SP>SP(K,N)) THEN GO TO V2;
IF (ZP(L)>=ZD(N))&(SP<SP(K,N)) THEN GO TO V2;
C1(K,N)=2*AO*(ZT(K)-ZD(N))*10**(-6);
C2(K,L,N)=2*(AO*(ZT(K)-ZD(N))-AD(N)*(ZD(N)-ZP(L)))*10**(-6);
X2(K,N)=X3;
X1(K,N)=SQRT(C1(K,N));
Z2(K,L,N)=10**6*(X2(K,N)/AO-(1/AD(N)+1/AO)*SQRT(X2(K,N)**2-C1(K,N))
+(1/AD(N))*SQRT(X2(K,N)**2-C2(K,L,N)))-SP;
DIF(K,N)=X2(K,N)-X1(K,N);
L1: DIF(K,N)=0.5*DIF(K,N);
X(K,N)=X1(K,N)+DIF(K,N);
Z(K,L,N)=10**6*(X(K,N)/AO-(1/AD(N)+1/AO)*SQRT(X(K,N)**2-C1(K,N))
+(1/AD(N))*SQRT(X(K,N)**2-C2(K,L,N)))-SP;
IF ABS(DIF(K,N))<=ABS(TOL*X(K,N)) THEN GO TO P1;
IF SIGN(DIF(K,L,N))=0 THEN GO TO P1;
IF SIGN(DIF(K,L,N))=SIGN(DIF(K,L,N)) THEN X2(K,N)=X(K,N);
ELSE X1(K,N)=X(K,N);
GO TO L1;
P1:TO(K,N)=SQRT(ABS(TO(K,N)**2-C1(K,N)));
T2(K,L,N)=SQRT(ABS(TO(K,N)**2-C2(K,L,N)));
A(K,L,N)=(SP*10**(-6)*T1(K,N))/ABS(T2(K,L,N)*(T1(K,N)-TO(K,N))/AO
+TO(K,N)*(T1(K,N)-T2(K,L,N))/AD(N)); GO TO S1;
W1: SP(K,N)=10.0**3.0*SQRT(2.0*(ZD(N)-ZT(K))/AD(N));
Z1(K,N)=0.5*AO*(SP-SP(K,N))*2*10**(-6);
Z2(K,N)=0.5*AO*(SP-SP(K,N))*2*10**(-6);
IF (ZP(L)<=(ZD(N)+Z1(K,N)))&(ZP(L)>=(ZD(N)-Z2(K,N)))&(SP>=SP(K,N))
THEN GO TO V1;
IF (ZP(L)<=(ZD(N)-Z2(K,N)))&(SP>SP(K,N)) THEN GO TO V2;
IF (ZP(L)<=ZD(N))&(SP<SP(K,N)) THEN GO TO V2;
C1(K,N)=2*AO*(ZD(N)-ZT(K))*10**(-6);
C2(K,L,N)=2*(AO*(ZD(N)-ZT(K))-AD*(ZP(L)-ZD(N)))*10**(-6);
X2(K,N)=X3;
X1(K,N)=SQRT(C1(K,N));
Z2(K,L,N)=10**6*(X2(K,N)/AO-(1/AD(N)+1/AO)*SQRT(X2(K,N)**2-C1(K,N))
+(1/AO)*SQRT(X2(K,N)**2-C2(K,L,N)))-SP;
DIF(K,N)=X2(K,N)-X1(K,N);
L2: DIF(K,N)=0.5*DIF(K,N);
X(K,N)=X1(K,N)+DIF(K,N);
Z(K,L,N)=10**6*(X(K,N)/AO-(1/AD(N)+1/AO)*SQRT(X(K,N)**2-C1(K,N))
+(1/AO)*SQRT(X(K,N)**2-C2(K,L,N)))-SP;

```

TESE APRESENTADA AOS SENHORES

Marcio Luiz Vianna

Ricardo Furtado de Mendonça

Mauro Soares de Assis

Visto e permitida a impressão

Rio de Janeiro, ____ / ____ / ____

Coordenador dos Programas de Pós-Graduação e Pes
quisas do Centro Técnico Científico