PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

RADIOMETEOROLOGIA EM REGIÕES TROPICAIS E EQUATORIAIS

por

Marlene Sabino Pontes

Tese submetida como requisito parcial
para a obtenção do grau de
MESTRE EM CIÊNCIAS
DE
ENGENHARIA ELÉTRICA

Assinatura do Orientador da Tese

Rio de Janeiro, GB, Maio de 1972

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

- Prof. Mauro Soares de Assis
- Srta. Eneida A. Mendonça
- Sr. Alberto Balassiano Pedreira
- À Diretoria de Rotas Aéreas do Ministério da Aeronáutica
- À CAPES
- Aos colegas do CETUC

SUMÁRIO

Sendo a propagação das ondas radioelétricas sensivelmente influenciada pelo comportamento do índice de refração do ar atmosférico, o conhecimento deste fenômeno é necessário ao se fazer a implantação de sistemas de telecomunicações.

Este trabalho estuda o índice de refração a partir de dados diários de temperatura, pressão e umidade relativa entre o solo e 5800m de altitude, obtidos por rádio - sondagem em 8 cidades do Brasil. Através de médias mensais destes dados, obteve-se a variação da refratividade do ar atmosférico com a altura. O gradiente foi calculado a partir dos dados diários e obteve-se as distribuições de probabilidade do raio equivalente da terra e do gradiente da refratividade ao longo do ano. Foi feita a comparação do comportamento anual da refratividade no solo, do gradiente da refratividade e, ainda, da distribuição de probabilidade do gradiente entre as estações de cada região climática. Finalmente, foi analisada a correlação entre a variação anual da refratividade no solo e seu gradiente.

ABSTRACT

The radiowaves propagation is critically affected by the behavior of the refractive index of air and for this reason to install telecommunication systems the knowledge of this phenomenon is necessary.

This work is the study of the refractive index from daily data of temperature, pressure and relative humidity from the surface until 5800m. of altitude which were obtained by radiosonde in 8 cities of Brazil. After having taken the average of these data every month the refractivity of air variation with altitude was obtained. The gradient was calculated from the daily data and the probability distributions of effective earth radius and refractivity gradient throughout the year were taken. Then, a comparison of the annual behavior of refractivity near the ground, refractivity gradient and the gradient probability distribution was made among stations of each climatic regions. Finally, a correlation between the annual variation of surface refractivity and its gradient was analysed.

ÍNDICE

Introdução	1
Capítulo 1 - Elementos Básicos de Radiometeorologia	3
1.1 - Índice de Refração	3
1.2 - Trajetória da Energia em Meios Estratificados	7
1.3 - Raio Equivalente da Terra	8
Capítulo 2 - Levantamento de Dados	11
2.1 - Variação da Refratividade com a Altura	11
2.2 - Gradiente da Refratividade no Solo	12
Capítulo 3 - Discussão dos Resultados	14
3.1 - Distribuição Estatística do Raio Equivalente	14
3.2 - Definição das Regiões Rádio - Climáticas no Brasil	14
3.2.1 - Clima Equatorial	15
3.2.2 - Clima Tropical Continental	15
3.2.3 - Clima Tropical Marítimo	16
3.2.4 - Clima Sub - Tropical	16
3.3 - Aplicações a Tropo - Difusão	16
Conclusões	18
Apêndice A - Programa da Tabela de Refratividade	20
Bibliografia	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização e classificação climática das estações de rádio - sondagem	21
Tabela 2 - Expressões matemáticas das curvas de variação da refratividade com a altura, referida ao nível do mar	22
Tabela 3 - Valores mediano e mínimo de k (ultrapassado durante 0,1% do tempo) e probabilidade de ocorrência de dutos	23

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geometria para determinação da curvatura de um raio em propagação	24
Figura 2 - Comportamento da refratividade no solo	25
Figura 3 - Variação da refratividade com a altura Belém, PA	26
Figura 4 - Variação da refratividade com a altura Brasília, DF	27
Figura 5 - Variação da refratividade com a altura Campo Grande, MT	28
Figura 6 - Variação da refratividade com a altura Vilhena, RO	29
Figura 7 - Variação da refratividade com a altura Natal, RN	30
Figura 8 - Variação da refratividade com a altura Rio de Janeiro, GB	31
Figura 9 - Variação da refratividade com a altura Curitiba, PR	32
Figura 10- Variação da refratividade com a altura Porto Alegre, RS	33
Figura 11- Gradiente da refratividade a 100 m do solo em Belém	34
Figura 12- Gradiente da refratividade a 450 m do solo em Brasília, Campo Grande e Vilhena	34
Figura 13- Gradiente da refratividade a 100 m do solo - Rio de Janeiro e Natal	35
Figura 14- Gradiente da refratividade a 150 m do solo - Porto Alegre e Curitiba	35

Figura 15 - Distribuição de probabilidade do gradiente próximo do solo e do k da terra Belém	36
Figura 16 - Distribuição de probabilidade do gradiente próximo do solo e do k da terra Brasília, Campo Grande e Vilhena	37
Figura 17 - Distribuição de probabilidade do gradiente próximo do solo e do k da terra Natal e Rio de Janeiro	38
Figura 18 - Distribuição de probabilidade do gradiente próximo do solo e do k da terra Curitiba e Porto Alegre	39
Figura 19 - Análise comparativa entre valores observados em Belém e Manaus	40
Figura 20 - Análise comparativa entre os dados de Brasília, Campo Grande e Vilhena	41
Figura 21 - Comparação da umidade relativa entre Vilhena e Belém	41
Figura 22 - Análise comparativa entre os dados de Natal e Rio de Janeiro	42
Figura 23 - Comparação das diferenças de temperatura e umidade relativa entre o solo e 100 m em Natal e Rio de Janeiro	43
Figura 24 - Análise comparativa entre os dados de Curitiba e Porto Alegre	44
Figura 25 - Comparação das médias mensais de N_s e ΔN	45

INTRODUÇÃO

A propagação das ondas radiocelétricas na troposfera é substancialmente influenciada pelo comportamento do índice de refração do ar atmosférico. Este efeito é caracterizado pelas variações aleatórias da intensidade do sinal recebido, fenômeno conhecido como desvanecimento. Considerando a importância do conceito de confiabilidade no projeto de um sistema de telecomunicações, isto é, a determinação da percentagem de tempo que o sinal situa-se acima de um nível mínimo satisfatório, é imprescindível uma detalhada análise deste fenômeno. Por outro lado, o índice de refração depende das condições meteorológicas uma vez que é função da temperatura, pressão e umidade relativa do ar. Assim, um estudo radiometeorológico é necessário como suporte para o desenvolvimento de um programa de pesquisa sobre propagação troposférica.

Em regiões de clima temperado, dispõe-se atualmente de uma considerável quantidade de informação, contudo, pela importância do problema, as pesquisas continuam sendo desenvolvidas. No entanto, em regiões de clima tropical e equatorial os dados são escassos e restringem-se a algumas regiões da África. A posição geográfica do Brasil e a atual implantação de extensos sistemas de telecomunicações foram os fatores básicos que originaram o presente trabalho.

Em um estudo preliminar¹, foi feita uma análise das regiões climáticas no Brasil a partir do comportamento do índice de refração no solo. Com base nestes resultados, o presente trabalho estuda a variação do índice de refração com a altura, mediante a compilação de dados meteorológicos de estações de rádio - sondagem em altitude. Adicionalmente desenvolve-se uma análise estatística da variação do raio equivalente da terra.

Inicialmente, é apresentado um sumário dos elementos básicos de radiometeorologia a fim de facilitar a didática do texto. A seguir, descreve-se o levantamento de dados com auxílio de figuras ilustrativas

que facilitam a observação dos detalhes característicos de cada região. Finalmente, discute-se os resultados obtidos. Considerando a importância e a quantidade de dados compilados, nas conclusões finais apresenta-se uma série de estudos que permitirão a continuidade da pesquisa iniciada neste trabalho.

Capítulo 1

ELEMENTOS BÁSICOS DE RADIOMETEOROLOGIA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos de radiometeorologia necessários para o desenvolvimento do trabalho, assim como alguns dados sobre a propagação em uma atmosfera estratificada que está intimamente ligada às variações do índice de refração. Inicialmente, será introduzida a definição do índice de refração a seu relacionamento com os parâmetros meteorológicos. A seguir, é descrita sumariamente as possíveis trajetórias em um meio estratificado, finalizando com o conceito de raio equivalente da terra.

1.1. Índice de Refração

Define-se índice de refração (n) como a razão entre a velocidade de propagação da onda de rádio no vácuo e a velocidade no meio considerado,

$$n = \frac{c}{v} = \frac{1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}{1/\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (1)$$

onde,

μ_r é a permeabilidade relativa do meio e

ϵ_r é a permissividade relativa do meio.

Para o ar, a permeabilidade relativa é aproximadamente igual à unidade e a expressão (1) fica

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

Levando-se em conta que a velocidade de propagação da onda na atmosfera sofre mínima variação em relação à velocidade no vácuo, tem-se para índice de refração uma grandeza da ordem de 1,000 3. Para obter melhor precisão é conveniente utilizar a refratividade (N) em lugar do índice de refração, a qual é definida por

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (3)$$

O problema da determinação do índice de refração de um gás foi extensivamente estudado por Debye² utilizando tanto a mecânica clássica como mecânica quântica. Posteriormente, uma série de trabalhos experimentais foram desenvolvidos, procurando relacionar da melhor forma possível a refratividade com os parâmetros meteorológicos (pressão, temperatura e umidade do ar). A expressão atualmente em uso, obtida por Smith e Weintraub³, permite uma precisão de 0,5% no cálculo. Segundo estes autores, a refratividade é dada por

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810}{T} \cdot e \right) \quad (4)$$

onde,

p é a pressão atmosférica em mbar,

e é a pressão parcial de vapor d'água em mbar e

T é a temperatura absoluta em °K.

Os serviços de meteorologia fornecem normalmente os valores da pressão total (p), da temperatura (T) e da umidade relativa (u_r). Desta forma, é necessário introduzir uma relação destes valores com a pressão parcial do vapor d'água, a fim de calcular N. Isto pode ser feito através de tabelas termodinâmicas ou utilizando a relação abaixo que é uma aproximação válida na faixa de radiofrequência.

$$e = 2,67 \cdot 10^7 \cdot 10^{-\frac{2360}{T}} \cdot \frac{u_r}{T^2} \quad (5)$$

Introduzindo (5) em (4) tem-se

$$N = 77,6 \cdot \frac{P}{T} + 996 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-\frac{2360}{T}} \cdot \frac{u_r}{T^2} \quad (6)$$

Observa-se que a expressão da refratividade pode ser separada em duas parcelas

$$N = N_1 + N_2 \quad (7)$$

onde

$$N_1 = 77,6 \cdot \frac{P}{T} \quad (8)$$

e

$$N_2 = 996 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-\frac{2360}{T}} \cdot \frac{u_r}{T^2} \quad (9)$$

N_1 é denominado termo seco, função da pressão e da temperatura; N_2 , termo úmido, função da temperatura e da umidade relativa. Embora seja possível realizar o cálculo destes parâmetros através de nomogramas, para facilitar o levantamento de dados, foi elaborada no computador IBM 7044 uma tabela de refratividade, variando a pressão de 500 a 1000 mbar em intervalos de 50 mbar; a umidade relativa de 11 a 100% em intervalos de 1% e a temperatura de -15 a 30°C em intervalos de 0,5°C. O programa desta tabela encontra-se no apêndice A.

Estudos experimentais^{4,5,6} têm mostrado que a variação da refratividade com a altura segue uma lei exponencial que pode ser representada, em primeira aproximação, pela fórmula

$$N = N_0 e^{-bh} \quad (10)$$

onde,

N_0 é a refratividade referida ao nível do mar,

b é uma constante a determinar e

h é a altura, em km, do ponto em que a refratividade é N .

Com objetivo de estabelecer um critério para referência, o CCIR* definiu uma condição atmosférica média, denominada atmosfera padrão, a qual é caracterizada nas vizinhanças da terra pelos seguintes dados⁷

$$N = 289, \quad dN/dh = - 39 \text{ unidades } N/\text{km}$$

Levando estes resultados em (10),

$$N = 289 e^{-0,136h} \quad (11)$$

Pode-se ainda acrescentar que nas camadas mais baixas da troposfera, até cerca de 3 km de altitude, a variação de N é aproximadamente linear e tem para expressão

$$N = 289 - 39h \quad (12)$$

1.2. Trajetoria da Energia em Meios Estratificados

Uma onda radioeltrica, no espao livre ou em uma atmosfera homognea, propaga-se segundo uma linha reta. No entanto, se a propagao feita em uma atmosfera no homognea, o raio torna-se curvo. Na figura 1, tem-se uma frente de onda deslocando-se de AB para A'B'. A velocidade de fase ao longo de AA' v e ao longo de BB' v - dv. Considerando a velocidade angular tem-se

$$\frac{v}{\rho} = \frac{v - dv}{\rho + d\rho} \quad (13)$$

ou

$$\frac{dv}{v} = - \frac{d\rho}{\rho} \quad (14)$$

onde ρ o raio de curvatura de AA'.

Diferenciando-se (1), obtem-se

$$\frac{dv}{v} = - \frac{dn}{n} \quad (15)$$

Comparando (14) e (15), chega-se expresso da curvatura de um raio em propagao

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{n} \frac{dn}{d\rho} \quad (16)$$

Se o raio faz um ngulo θ com a superfcie de ndice de refrao constante, tem-se

$$dr = dp \cos \theta \quad (17)$$

e a expressão (16) fica

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \cos \theta \quad (18)$$

Como $r = a + h$, tem-se $dn/dr = dn/dh$ logo (18) pode ser escrita

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \cos \theta \quad (19)$$

onde dn/dh é o gradiente do índice de refração com a altura.

Raios próximos da tangente à superfície da terra ($\theta \approx 0^\circ$) têm sua curvatura dada em primeira aproximação pelo valor do gradiente do índice de refração, visto que o índice de refração é aproximadamente igual à unidade.

$$\frac{1}{p} = \frac{dn}{dh} \quad (20)$$

1.3. Raio Equivalente da Terra

O método clássico, proposto por Schelleng, Burrows e Ferrell⁸, para levar em consideração os efeitos da refração atmosférica das ondas radioelétricas, admite um raio equivalente (a_e) para a terra. Introduzindo este conceito, é possível traçar uma superfície mais ou menos extensa que a verdadeira, sobre a qual a trajetória do raio em propagação é uma reta, mantendo-se as distâncias verticais entre a trajetória e a

superfície da terra e as distâncias horizontais entre as antenas. A aproximação de tomar as distâncias verticais e horizontais é bem razoável, pois na prática a distância entre as antenas é muito grande em relação a altura das mesmas que, por sua vez, é muito pequena em relação ao raio da terra.

O raio equivalente é dado por

$$a_e = k \cdot a \quad (21)$$

onde a é o raio da terra e k é dado pela expressão,

$$k = \frac{1}{1 + \frac{a}{n} \frac{dn}{dh} \cos \theta} \quad (22)$$

Nos casos práticos em que $\theta \sim 0^\circ$, admitindo-se o índice de refração aproximadamente igual à unidade, tem-se

$$k = \frac{1}{1 + a \frac{dn}{dh}} \quad (23)$$

Para que o raio equivalente seja único em determinada ligação, é preciso que o índice de refração varie linearmente com a altura, isto é, dn/dh seja constante.

No caso da atmosfera padrão definida anteriormente, é fácil verificar que $k = 4/3$ e o raio equivalente é 8500 km. Sendo a atmosfera padrão uma condição média, as condições anormais podem ser classificadas, de acordo com os valores de dn/dh , do seguinte modo:

- a) para $dN/dh > - 39$ unidade N/km, tem-se a atmosfera subpadrão;
- b) para $- 157 < dN/dh < - 39$ unidades N/km, tem-se a atmosfera superpadrão e
- c) para $dN/dh \leq - 157$ unidades N/km, tem-se a formação de duto.

Na atmosfera subpadrão, tem-se $k < 4/3$. Então, ao considerarmos uma ligação em visibilidade na atmosfera padrão, pode ocorrer que em uma atmosfera subpadrão não seja possível visada direta para a mesma ligação. Na atmosfera subpadrão, há redução do horizonte em relação à atmosfera padrão, fenômeno este chamado sub - refração.

Na atmosfera superpadrão, tem-se $4/3 < k < \infty$. Quando k tende para infinito, o raio equivalente torna-se muito grande, permitindo alcances em visibilidade muito maiores que na atmosfera padrão, fenômeno chamado super - refração.

Para valores de $dN/dh < - 157$ unidades N/km, k assume valores negativos, isto é, a curvatura da terra passa a ser côncava e, para raios próximos à superfície, parte da energia fica presa nesta região. Devido à canalização de energia nestas camadas, diz-se que elas formam um duto. Estes valores de dN/dh são alcançados quando há uma inversão de temperatura ou um decréscimo muito acentuado na umidade relativa.

Capítulo 2

LEVANTAMENTO DE DADOS

Este capítulo apresenta os resultados do levantamento de dados feito para 8 cidades brasileiras que caracterizam 4 das regiões climáticas do Brasil - equatorial, tropical marítima, tropical continental e subtropical. Infelizmente, não se conseguiu dados que permitissem uma análise mais detalhada das duas outras regiões climáticas restantes - tropical de altitude e semi-árida. Entretanto, como os dados disponíveis cobrem uma área considerável do território brasileiro, o estudo desenvolvido é plenamente justificável.

Os dados utilizados foram provenientes da Diretoria de Rotas Aéreas (Ministério da Aeronáutica) e consistem de valores de temperatura, pressão e umidade relativa do ar atmosférico desde o solo até 5800 m, obtidos por rádio - sondagem diária feita às 11 horas GMT durante o ano de 1969. A tabela 1 apresenta a localização das estações de rádio - sondagem, enquanto que a figura 2 mostra o respectivo comportamento mensal da refratividade ao nível do solo.

2.1. Variação da Refratividade com a Altura

A partir das médias mensais dos dados diários de temperatura, pressão e umidade relativa foram calculados os valores médios mensais da refratividade e levantadas curvas de sua variação com a altura para as estações de rádio - sondagem relacionadas na tabela 1. A análise destas curvas mensais mostrou que o comportamento da refratividade é o mesmo durante as estações do ano, isto é, no período em que as condições meteorológicas oscilam em torno de um determinado valor médio, permitindo que uma única curva represente este período com um erro menor que 3%. As figuras 3 a 10 mostram a variação (exponencial) da refratividade nas estações analisadas neste trabalho.

Na figura 3, vê-se que a curva do mes de abril apresenta uma variação brusca entre 2500 e 3750 m, pois, neste intervalo, enquanto a temperatura tem aproximadamente o mesmo comportamento que os meses de janeiro, fevereiro, março e maio, a umidade relativa permanece estável.

Na figura 5, nota-se que o comportamento da refratividade é o mesmo nos meses de março a dezembro para alturas superiores a 2500 m e nos meses de julho a setembro diverge, pois, até esta altura, a umidade relativa neste período é menor que nos outros meses do ano.

A curva de variação da refratividade no mes de maio, encontrada na figura 7, apresenta uma variação brusca entre o solo e 600 m, pois, neste intervalo, há um decréscimo muito grande da umidade relativa e, para alturas acima de 600 m, o comportamento da umidade é idêntico ao dos outros meses.

Como se vê na figura 8, a curva do mes de setembro apresenta uma inversão do gradiente entre 2000 e 3200 m, devido a um decréscimo da umidade relativa muito maior que nos outros meses e, em abril, entre 2750 e 3500 m a variação brusca tem a mesma causa.

Na figura 10, em janeiro e fevereiro, para alturas superiores a 4000 m, as curvas coincidem, porque a temperatura até 4000 m é mais alta que nos outros meses.

As curvas de variação da refratividade com a altura podem ser aproximadas por exponenciais cujas equações são apresentadas na tabela 2.

2.2. Gradiente da Refratividade no Solo

O gradiente da refratividade próximo do solo foi calculado diariamente a partir de dados de temperatura, pressão e umidade relativa. O valor médio mensal do gradiente nas vizinhanças do solo para as

diversas estações é apresentado nas figuras 11 a 14. As figuras 15 a 18 mostram a distribuição estatística anual do gradiente. Observa-se que, para as estações localizadas em uma mesma região climática, as variações são idênticas.

Capítulo 3

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo pretende discutir os resultados apresentados no capítulo anterior, visando a aplicação em rádio - propagação. Infelizmente, informações sobre ligações em visibilidade nas regiões tropicais e equatoriais e o correspondente relacionamento com os parâmetros meteorológicos são bastante escassos. Entretanto, algumas informações contidas neste trabalho sobre o gradiente nas vizinhanças do solo e, conseqüentemente, sobre a variação do raio equivalente da terra terão bastante utilidade na análise de tais ligações.

3.1. Distribuição Estatística do Raio Equivalente

Embora tenha sido mostrado⁹ que a distribuição do raio equivalente da terra em um ponto nem sempre coincide com a distribuição relativa a todo percurso, o conhecimento da primeira é de utilidade em uma estimativa preliminar na análise de uma ligação radioelétrica. Principalmente no que se refere ao valor mediano, a determinação da distribuição em um ponto é importante, pois caracteriza praticamente o valor desejado.

As figuras 15 a 18 mostram a distribuição estatística do k da terra ao longo de um ano para as diversas localidades estudadas. Por outro lado, a tabela 3 resume algumas informações que podem ser úteis para ligações em visibilidade (valor mediano e valor mínimo de k , ultrapassado durante 0,1% do tempo e ainda, a probabilidade de ocorrência de dutos).

3.2. Definição das Regiões Rádio - Climáticas no Brasil

3.2.1. Clima Equatorial

Em um trabalho preliminar¹, no qual se fez um estudo das regiões climáticas baseado no comportamento do índice de refração no solo, foi escolhida a cidade de Manaus para representar esta região, por caracterizá-la melhor do que as outras cidades cujos dados eram disponíveis. Para um estudo mais completo no presente trabalho, não se dispôs de informações suficientes em Manaus, sendo então utilizados os dados da estação de Belém. A figura 19 mostra pequenas diferenças entre estas cidades, pois enquanto Belém sofre influência marítima, Manaus está situada bem no interior.

3.2.2. Clima Tropical Continental

Para representar esta região dispõe-se de três estações: Brasília, Campo Grande e Vilhena. Uma análise da figura 2.b mostra a semelhança no comportamento da refratividade no solo para estas estações. A diferença de altura entre Brasília e Campo Grande acarreta valores diferentes da refratividade. Conforme mostra a figura 20 a umidade relativa em Vilhena difere bastante da umidade relativa nas duas outras cidades, enquanto a temperatura tem o mesmo comportamento nas três estações. Os valores da umidade relativa em Vilhena aproximam-se daqueles observados no clima equatorial, conforme mostra a figura 21. A taxa de precipitação anual em Vilhena é bem maior que em Brasília e Campo Grande e aproxima-se da taxa em Manaus.

A análise do comportamento anual do gradiente da refratividade (figura 12) mostra uma vez mais a diferença em Vilhena e a distribuição estatística deste gradiente (figura 16) acha-se um pouco deslocada em relação às outras duas distribuições. Nota-se que Vilhena está situada em uma região de transição entre os climas equatorial e tropical continental. A comparação do comportamento da refratividade, gradiente e distribuição do gradiente entre Vilhena e Belém não satisfaz completamente, é necessário uma comparação com observações em Manaus,

que se acha mais próximo e é uma cidade do interior que não sofre a mesma influência marítima de Belém.

3.2.3. Clima Tropical Marítimo

Natal e Rio de Janeiro caracterizam esta região climática. A comparação do comportamento entre a refratividade no solo destas estações (figura 2.c) mostra uma diferença nos meses de abril a agosto. Esta diferença é devida ao decréscimo muito maior na temperatura do Rio de Janeiro que na de Natal e a diferença na taxa de precipitação como pode ser observado na figura 22.

O comportamento do valor médio mensal do gradiente nas vizinhanças do solo (figura 13) diverge, pois a variação mensal das diferenças de temperatura e umidade relativa a 100 m de altura é irregular conforme mostra a figura 23.

A distribuição estatística do gradiente ao longo do ano é semelhante nestas duas cidades (figura 17).

3.2.4. Clima Sub - Tropical

As estações de Curitiba e Porto Alegre, que caracterizam esta região climática, possui uma grande diferença de altura que acarreta valores diferentes da refratividade e, conseqüentemente, do seu gradiente nas vizinhanças do solo. As figuras 2.d e 18 mostram respectivamente o comportamento da refratividade no solo e a distribuição estatística do gradiente nas vizinhanças do solo destas cidades.

O gradiente da refratividade (figura 14) apresenta pequenas diferenças nos meses em que a temperatura e a umidade relativa destas estações são diferentes, conforme mostra a figura 24.

3.3. Aplicações a Tropo - Difusão

Em regiões de clima temperado, a variação mensal da atenuação na propagação por tropo - difusão apresenta um comportamento similar ao da refratividade ao nível do solo¹⁰. Entretanto, em climas do tipo equatorial ou tropical, a experiência mostra que tal não acontece^{11,12}. Por outro lado, independente do clima, existe um alto grau de correlação entre a intensidade do sinal recebido e o gradiente do índice de refração.

A observação da figura 25 confirma o que foi dito anteriormente, pois se nota que no Brasil é pequena a correlação entre N_s e ΔN , especialmente no litoral (figuras 25.a, 25.e, 25.f e 25.h). Assim, conclui-se facilmente não ser possível utilizar, no Brasil, apenas os dados relativos à refratividade no solo para extrapolar informações sobre a propagação por tropo - difusão. No entanto, os dados sobre a variação da refratividade com a altura, apresentados neste trabalho, constitui um ponto de partida para o estudo do mecanismo de propagação por tropo - difusão em função de parâmetros meteorológicos^{12,13}.

CONCLUSÕES

O presente estudo, embora não cubra completamente todo o Brasil, constitui sem dúvida uma contribuição razoável para o estudo dos fenômenos de propagação em função dos parâmetros meteorológicos. Entre as deficiências existentes podem ser citadas:

a) não foi possível obter dados para todas as regiões climáticas do Brasil;

b) o número de estações é pequeno. A extensão territorial do Brasil exigiria um número muito maior de estações e

c) os dados referem-se apenas a sondagens realizadas às 11 horas GMT (entre 7 e 8 horas local), o que impossibilita a análise de fenômenos noturnos.

Entretanto, estas deficiências não impedem que conclusões de interesse sejam tiradas do presente estudo.

Uma observação importante se refere ao valor mínimo do k da terra (valor ultrapassado durante 0,1% do tempo) a ser utilizado nos projetos de ligações em visibilidade. Conforme discutido anteriormente, seria mais rigoroso usar o valor mínimo de k ao longo do trajeto. Entretanto, para uma estimativa preliminar o valor em um ponto, apresentado na tabela 3, pode ser de utilidade. Assim, pode-se sugerir que na região do litoral seja utilizado um valor mínimo de k igual a 0,70, enquanto que no interior o valor 0,85 parece bastante razoável.

Outra conclusão interessante é a verificação da existência de dutos na região litorânea (Rio de Janeiro, Natal, Porto Alegre e Belém), cujas probabilidades de ocorrência são apresentadas na tabela 3. Uma vez mais, deve-se ressaltar que o levantamento de dados corresponde às 11 horas GMT. É possível que em outras regiões exista formação de dutos durante a noite, fato que não pôde ser verificado neste trabalho.

Por outro lado a determinação da variação do índice de refração em altura permitirá que os cálculos de propagação por tropo - difusão a partir de parâmetros meteorológicos sejam feitos com bastante precisão.

Finalmente, cumpre-se ressaltar que a continuação da pesquisa iniciada neste trabalho abordará os seguintes pontos:

- a) análise quantitativa da correlação entre ΔN e N_s ;
- b) traçado de curvas relativas ao valor de N_s e ΔN para todo território brasileiro e
- c) estudo comparativo com dados provenientes de outras regiões do globo de climas semelhantes.

Apêndice A

PROGRAMA DA TABELA DE REFRAATIVIDADE

```
$IBFTC
      INTEGER P,U,URL,VETOR(18),UR
      DIMENSION RN(18)
C** TGC=TEMP. INICIAL DA TABELA, EM GRAUS CENTÍGRADOS
      READ 1,TGC
1      FORMAT F(5.1)
C** P=PRESSÃO ATMOSFÉRICA, U=UMIDADE RELATIVA
      DO 2 P=500,1000,50
      DO 3 U=11,100,18
      PRINT 4
4      FORMAT(1H1,15X,13HREFRAATIVIDADE)
      PRINT 5,P
5      FORMAT(//15X,9HPRESSÃO =, I5,5H MBAR)
      PRINT 6
6      FORMAT(//2X,4HTEMP,25X,16HUMIDADE RELATIVA)
      URL=U
      DO 7 J=1,18
      VETOR(J)=URL
7      URL=URL+1
      PRINT 8,(VETOR(J),J=1,18)
8      FORMAT(//2X,4HGC.,I6,17I7)
      TEMP=TGC
11     UR=U
      T=TEMP+273.
      DO 9 I=1,18
      SN=77.6/T*FLOAT(P)+996.*10.**10*10.**(-2360./T)*FLOAT(UR)/T**2
      RN(I)=SN
      UR=UR+1
9      CONTINUE
      PRINT 10,TEMP,(RN(I),I=1,18)
10     FORMAT(/IX,F5.1,18(F7.1))
      TEMP=TEMP+0.5
      IF(TEMP.GT.30)GO TO 3
      GO TO 11
3      CONTINUE
2      CONTINUE
      STOP
      END
```

Cidade	Latitude (S)	Longitude (W)	Altura (m)	Clima*
Belém, PA	01° 23'	48° 29'	13	Equatorial
Brasília, DF	15° 51'	47° 56'	1061	Tropical Continental
Campo Grande, MT	20° 37'	54° 37'	559	Tropical Continental
Curitiba, PR	25° 32'	49° 11'	910	Sub - Tropical
Natal, RN	05° 55'	35° 10'	42	Tropical Marítimo
Porto Alegre, RS	30° 02'	51° 14'	4	Sub - Tropical
Rio de Janeiro,GB	22° 50'	43° 14'	42	Tropical Marítimo
Vilhena, RO	12° 44'	60° 08'	600	Tropical Continental

* Classificação climática baseada no comportamento da refratividade no solo¹.

Tabela 1 - Localização e classificação climática das estações de rádio - sondagem

Cidade	Períodos	Expressão Matemática
Belém	Janeiro a maio	$370 e^{-0,1482h}$
	Junho	$360 e^{-0,1503h}$
	Julho a dezembro	$360 e^{-0,1582h}$
Brasília	Outubro a junho	$350 e^{-0,1422h}$
	Julho a setembro	$340 e^{-0,1460h}$
Campo Grande	Janeiro e fevereiro	$360 e^{-0,1458h}$
	Março a dezembro	$350 e^{-0,1462h}$
Curitiba	Novembro a março	$370 e^{-0,1556h}$
	Abril a outubro	$355 e^{-0,1574h}$
Natal	Janeiro a agosto	$380 e^{-0,1685h}$
	Setembro a dezembro	$360 e^{-0,1579h}$
Porto Alegre	Janeiro e fevereiro	$340 e^{-0,1455h}$
	Março a dezembro	$330 e^{-0,1390h}$
Rio de Janeiro	Outubro a abril	$360 e^{-0,1540h}$
	Maió a setembro	$350 e^{-0,1540h}$
Vilhena	Dezembro a abril	$370 e^{-0,1493h}$
	Maió, junho, setembro a novembro	$360 e^{-0,1478h}$
	Julho a agosto	$350 e^{-0,1503h}$

Tabela 2 - Expressões matemáticas das curvas de variação da refratividade com a altura, referida ao nível do mar

Localidade	Valor mediano de k	Valor mínimo de k	Probabilidade de ocorrência de dutos (%)
Belém	1,468	0,859	3,1
Brasília	1,377	0,925	0,0
Campo Grande	1,342	0,853	0,0
Curitiba	1,106	0,657	0,0
Natal	1,689	0,694	15,0
Porto Alegre	1,524	0,710	3,7
Rio de Janeiro	2,469	0,685	19,0
Vilhena	1,805	1,083	0,0

Tabela 3 - Valores mediano e mínimo de k (ultrapassado durante 0,1% do tempo) e probabilidade de ocorrência de dutos

Figura 1 - Geometria para determinação da curvatura de um raio em propagação.

Figura 2 - Comportamento da refratividade no solo

Figura 3 - Variação da refratividade com a altura - Belém, PA

Figura 4 - Variação da refratividade com a altura- Brasília, DF.

Figura 5- Variação da refratividade com a altura - Campo Grande, MT.

Figura 6 - Variação da refratividade com a altura -Vilhena,RO

Figura 7 - Variação da refratividade com a altura - Natal, RN.

Figura 8 - Variação da refratividade com a altura - Rio de Janeiro, GB

Figura 9 - Variação da refratividade com a altura - Curitiba, PR.

Figura 10 - Variação da refratividade com a altura - Porto Alegre, RS.

Figura 11 - Gradiente da refratividade a 100m do solo em Belém

Figura 12 - Gradiente da refratividade a 450m do solo em Brasília, Campo Grande e Vilhena.

Figura 13 - Gradiente da refratividade a 100m do solo - Rio de Janeiro e Natal.

Figura 14 - Gradiente da refratividade a 150m do solo - Porto Alegre e Curitiba.

Figura 16 - Distribuição de probabilidade do gradiente próximo do solo e do k da terra - Brasília, Campo Grande e Vilhena.

Figura 19 - Análise comparativa entre valores observados em Belém e Manaus.

Figura 20 - Análise comparativa entre os dados de Brasília, Campo Grande e Vilhena.

Figura 21 - Comparação da umidade relativa entre Vilhena e Belém

Figura 22 - Análise comparativa entre os dados de Natal e Rio de Janeiro.

Figura 23 - Comparação das diferenças de temperatura e umidade relativa entre o solo e 100m em Natal e Rio de Janeiro

Figura 24 - Análise comparativa entre os dados de Curitiba e Porto Alegre.

Figura 25 - Comparação das médias mensais de Ns e ΔN

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Assis, Mauro S. e Marlene S. Pontes - Comportamento do Índice de refração da troposfera em regiões tropicais e equatoriais, Revista Brasileira de Tecnologia, vol. 2, dezembro (1971), pág. 175 - 180.
- 2 - Debye, P. - Polar molecules, Chemical Catalog Co, New York, (1929).
- 3 - Smith, E.K. e S. Weintraub - The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, Proc. IRE, vol. 41, agosto (1953), pág. 1035 - 1037.
- 4 - Gerson, N.C. - Variations in the index of refraction of the atmosphere, Geofis. Pura Appl., vol. 13, (1948), pág. 3 - 4.
- 5 - Bean, B.R. - The geographical and height distribution of the gradient of refractive index, Proc. IRE, vol. 41, abril (1953), pág. 549 - 550.
- 6 - Bean, B.R. - Models of the atmospheric radio refractive index, Proc. IRE, vol. 47, maio (1959), pág. 740 - 755.
- 7 - CCIR - Report 231 - 2, Doc V/1027 - E, novembro (1969).
- 8 - Schelleng, J.C., C.R. Burrows e E.B. Ferrell - Ultra - short - wave propagation, Proc. IRE, vol. 21, março(1933), pág. 427 - 463.
- 9 - Boithias, L. e J. Battesti - Protection contre les évanouissements sur les faisceaux hertziens en visibilité, Annales des Télécommunications, vol. 22, n^{os} 9 e 10, (1967).
- 10 - Bean, B.R. e F.M. Meaney - Some applications of the monthly median refractivity gradient in tropospheric propagation, Proc. IRE, vol. 43, outubro (1955), pág. 1419 - 1431.

- 11 - Boithias, L. e P. Misme - Limits d'utilisation de l'indice de réfraction au sol, Annales de Télécommunications, vol. 19, n^{os} 11 e 12, (1964), pág. 241 - 244.
- 12 - Battesti, J., L. Boithias e P. Misme - Calcul des affaiblissements en propagation transhorizon a partir des paramètres radio-météorologiques, Annales des Télécommunications, vol. 23, n^{os} 5 e 6, (1968), pág. 129 - 140.
- 13 - Battesti, J. e L. Boithias - Nouveaux éléments sur la propagation par hétérogénéités de l'atmosphère, Annales des Télécommunications, vol. 26, n^{os} 1 e 2, (1971), pág. 15 - 30.

Tese apresentada aos Professores:

Frederico B. L. L. L.

Manoel Lourenço de Almeida

Américo Figueiredo de Aguiar

Visto e permitida a impressão,

Rio de Janeiro, 23 de maio de 1972

Coordenador dos Programas de Pós-Graduação
e Pesquisas do Centro Técnico Científico.