

ATENUAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO NA BAIXA IONOSFERA.

Coutinho, Alexandre Mateus. ; Carrijo, Gilberto Arantes
Faculdade de Engenharia Elétrica/Elétrica, Uberlândia – MG, acmateus@eletrica.ufu.br

Resumo - O objetivo deste trabalho é de mostrar o cálculo da intensidade de campo na baixa ionosfera. Para isso foi utilizados modelo linear e bilinear de densidade eletrônica linear, bilinear sendo comparadas com aproximação obtidas através do banco de dados do IRI(International Reference Ionosphere).

Palavras-Chave - Intensidade de campo, ionosfera, linear, bilinear, densidade eletrônica, frequência de colisão.

CALCULATION FIELD INTENSITY AT LOW IONOSPHERE

Abstract - This work aim to the calculation of the field intensity at low ionosphere.

It has been utilized the model for linear, bilinear, parabolic and real value electronic density, obtained from rockets and IRI International Reference Ionosphere) site.

Keywords - field intensity , ionosphere, linear, bilinear, electronic density, frequency of collisions.

I. INTRODUÇÃO

A ionosfera é uma camada que se estende aproximadamente a uma altura de 60 a 600 Km acima da superfície da terra. Desde que a ionosfera é parte da atmosfera superior da terra, parece lógico começar o estudo pela constituição da mesma, tais como densidade eletrônica, gradiente de temperatura, constituição gasosa e variação da pressão com a altura. Estes parâmetros podem ser medidos de maneira direta ou indireta. Para a área de propagação de ondas na ionosfera o parâmetro mais importante é a densidade eletrônica da ionosfera.

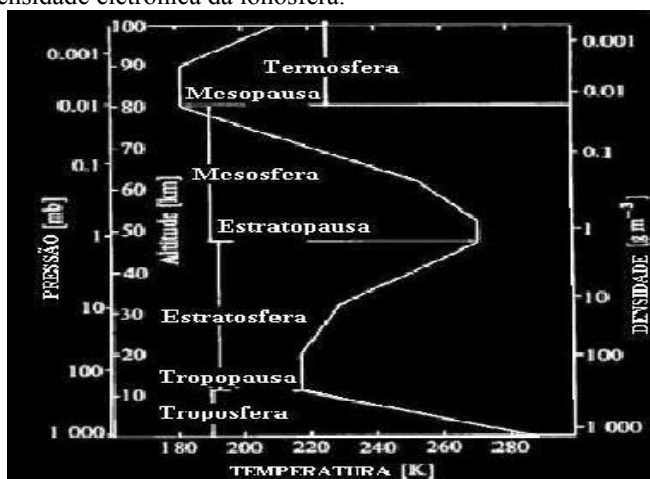


Fig. 1 –Camadas da ionosfera.

Nota de rodapé na página inicial será utilizada apenas pelo professor avaliador para indicar o andamento do processo de revisão. Não suprima esta nota de rodapé quando editar seu artigo.

A densidade eletrônica da ionosfera N [elétrons/cm³] mostra a concentração de elétrons livres por unidade de volume em cada ponto da atmosfera terrestre podendo ser distribuída por camadas em função da altura. A densidade eletrônica surge de um processo de ionização dos gases atmosféricos quanto as radiações solares atingem a superfície da terra. Como a intensidade de radiação varia durante o dia, a densidade eletrônica também varia ao longo do dia. A determinação da densidade eletrônica N da ionosfera pode ser feita usando técnica de raio sondagens, foguetes e até satélites.

A densidade eletrônica da ionosfera pode variar com a hora do dia e estações do ano, pois ela está diretamente ligada a radiação solar. Vários estudos têm sido feitos para determinar e calcular a densidade eletrônica da ionosfera; e foi considerado neste trabalho.

II. MODELOS DE DENSIDADE

O modelo de *Chapman* [1], foi uma das maiores contribuições do assunto que representa o modelo teórico da ionosfera e é o mais comum na literatura. Nele o valor da densidade N , varia de forma exponencial, como é mostrado na figura 2 abaixo, os graus são referente ao ângulo entre uma perpendicular da superfície da terra com a posição do sol e pode ser demonstrada pela equação 1. Outros modelos simplificados também são considerados, tais como, o modelo linear e bilinear dentre outros. Com o objetivo de simplificar o cálculo da intensidade de campo ao longo da ionosfera utilizaremos o modelo linear, onde a densidade eletrônica varia linearmente com a altura.

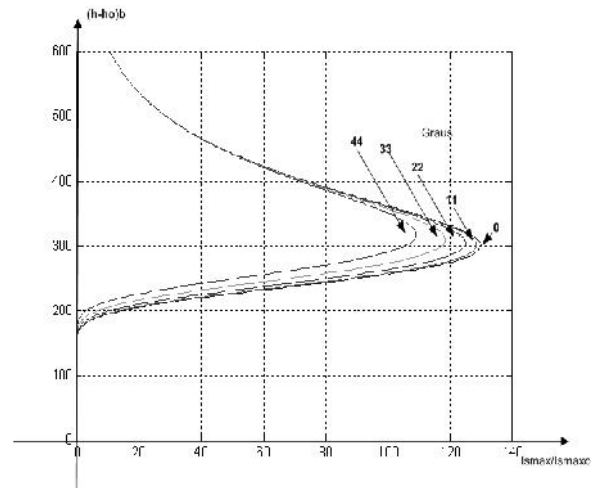


Fig. 2 Densidade eletrônica de uma ionosfera real.

A determinação da densidade eletrônica $N(z)$ da ionosfera tem sido alvo de grandes estudos teóricos e práticos. Devido as grandes variações sofridas por ela o cálculo da densidade N se torna difícil. Dependendo da função N , chegaremos à equações diferenciais compostas e de difíceis soluções

Após vários cálculos chegou-se a um modelo que leva o seu nome; “o modelo de Chapman”[1], onde N será dado por:

$$N(z) = N_m \exp\left(\frac{1 - \xi - \sec(\chi) e^{-\xi}}{2}\right) \quad (1)$$

Vários outros modelos tem sido sugerido, todos visando a obtenção de equações diferenciais conhecidas. O modelo parabólico nos dará equações diferenciais para os campos. Com o modelo linear chegaremos à equação de Stokes[3], e o exponencial à equação de Bessel[3]. O que acabamos de dizer é válido quando não consideramos a ação do campo magnético terrestre, mas quando este é incluído chegaremos a equações diferenciais muito complicadas, mesmo para o caso do modelo de densidade linear e bilinear. Grande parte do nosso trabalho será baseada e linear, onde a densidade varia linearmente com a altura conforme figura 5.

A pressão ao longo da ionosfera varia de acordo com a expressão abaixo:

$$p_h = p_o - \frac{Mg}{R} \int_0^h \frac{dh}{T(h)} \quad \text{N/m}^2 \quad (2)$$

Onde,

p_h = pressão na altura h, N/m²

g= aceleração da gravidade, m/s²

R= constante universal dos gases (joules/kg-mole °C)

T(h)= função da temperatura com a altura

M= massa de um quilograma-mol

h= altura onde se calcula a pressão;

p_o = pressão na superfície da terra.

Quando a altura acima do nível do mar é acrescida do incremento da derivada dz, a pressão do ar decresce segundo a equação 3.

$$pv = NkT = RT \quad (3)$$

onde:

p= pressão em função da altura

N= densidade eletrônica

K= constante

R= constante universal dos gases

A figura 4 mostra como varia a pressão em função da altura observa-se que até uma determinada altura há um aumento da pressão se estabilizando por um certo tempo e diminuindo cada vez mais na altura da baixa ionosfera.

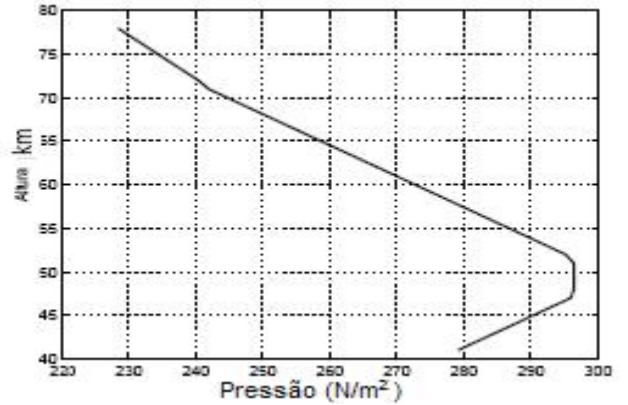


Fig. 3 Variação da Pressão com a altura

Verifica que a temperatura aumenta com a altitude e o mesmo não acontece com a pressão onde ocorre uma diminuição de seu valor.

III. DENSIDADE ELETRÔNICA PARA O PERFIL LINEAR

O campo magnético terrestre na ionosfera é de grande importância na propagação de ondas, um estudo neste meio deve-se considerar o campo magnético terrestre \vec{B} em consideração, com a ionosfera torna-se um meio anisotrópico. A figura 5 mostra como se comporta a variação da densidade eletrônica em função da altura. Para este trabalho adotaremos o perfil linear, onde a densidade varia linearmente com a altura conforme a figura 5.

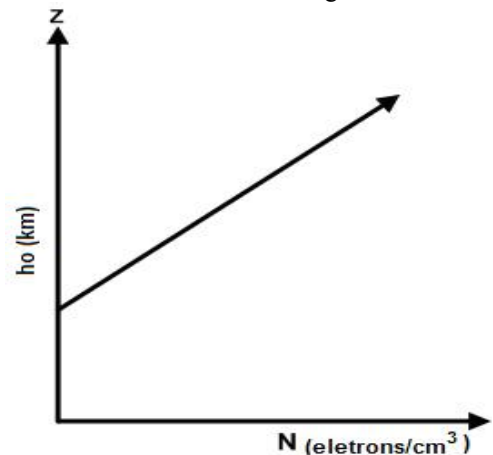


Fig. 4 Variação da densidade para o perfil Linear

A equação do perfil linear para o campo elétrico perpendicular no plano de incidência e considerando $\vec{B}_o = 0, \vec{y} = 0$, então temos

$$n^2 = 1 - \frac{x}{1 - iZ} = 1 - \frac{x}{U} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + k^2_o [n^2 - s^2] E_y = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + k^2_o q^2 E_y = 0 \quad (6)$$

Quando consideramos N variando linearmente com a altura chegaremos à equação de Stokes como veremos abaixo:

$$N = \alpha_1 (z - h_o) \rightarrow z \geq h_o \quad (7)$$

$$N = 0 \rightarrow z < 0 \quad (8)$$

A quantidade X será dada por :

$$X = \alpha (z - h_o) \rightarrow z \geq h_o \quad (9)$$

$$X = 0 \rightarrow z < h_o \quad (10)$$

$$\alpha = \left(\frac{8,0610\alpha_1 10^7}{f^2} \right) \quad (11)$$

$$n^2 = 1 - \frac{\alpha}{1 - iZ} (z - h_o) \rightarrow z \geq h_o \quad (12)$$

$$n^2 = 1 \rightarrow z < h_o \quad (13)$$

Para o cálculo do campo elétrico teremos

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} = r E_y \quad (14)$$

$$r = \left(\frac{k^2_o \alpha}{1 - iZ} \right)^{1/3} \left[z - h_o - (1 - iz) \frac{C^2}{\alpha} \right] \quad (15)$$

A equação acima como já disse apresenta duas soluções independentes A_i e B_i . A solução B_i cresce exponencialmente com r (r positivo), não podemos ser solução para os campos na ionosfera, restando então a solução A_i :

Então a solução de (2-1-4) será:

$$E_y = K A_i(r) \rightarrow z > h_o \quad z > h_o \quad (16)$$

$$H_x = \frac{1}{ik_o} \cdot \frac{dE_y}{dz} \quad (17)$$

$$H_x = - \left(\frac{k^2_o \alpha}{1 - iZ} \right)^{1/3} \frac{i}{k_o} A_i(r) \rightarrow z > h_o \quad (18)$$

onde K é uma constante.

Abaixo da ionosfera como já dissemos as duas soluções

são: $e^{-ik_o Cz}$ que representa uma onda ascendente e $e^{ik_o Cz}$

que representa a onda descendente.

Então abaixo da ionosfera

$$E_y = e^{-ik_o Cz} + R e^{ik_o Cz} \quad (19)$$

$$H_x = -C e^{-ik_o Cz} + R C e^{ik_o Cz} \quad (20)$$

onde R é o coeficiente de reflexão total da onda na ionosfera.

Pelas condições de contorno, chegaremos aos resultados

$$R = \frac{C A_i(r_o) - i P A_i(r_o)}{C A_i(r_o) + i P A_i(r_o)} \quad (21)$$

$$K = \frac{e^{-ik_o Ch_o} + R e^{ik_o Ch_o}}{A_i(r_o)} \quad (22)$$

onde

$$P = \left(\frac{\alpha}{K_o (1 - iZ)} \right)^{1/3} \quad (23)$$

$$r_o = - \left(\frac{k^2_o \alpha}{1 - iZ} \right)^{1/3} \left((1 - iz) \frac{C^2}{\alpha} \right) \quad (24)$$

Outro fator que se deve considerar é o índice de refração; temos então dois modos de propagação, que são chamados de ordinário (0) e extraordinário (X) que é mostrada na figura 6, onde possuem uma fraca dependência de propagação para quase toda ionosfera. Quando a frequência aumenta, a influência do número de colisões no cálculo do índice de refração diminui, assim como seus efeitos no cálculo dos campos.

Temos então dois índices de refração para a ionosfera, ou melhor dois modos de propagação. O sinal positivo corresponderá ao modo ordinário, enquanto o negativo do modo extraordinário. Para o caso em que o campo magnético terrestre é perpendicular ou paralelo ao sentido de propagação da onda, estes dois modos se propagam independentemente. Mas quando o campo magnético terrestre faz um ângulo qualquer com a direção de propagação, os dois modos se interagem quebrando a independência. Este efeito de interação como acoplamento das ondas. Será visto que a região onde as ondas se interagem, ou melhor, a região de acoplamento entre as ondas ordinárias e extraordinárias será relativamente pequena comparada com o restante da ionosfera

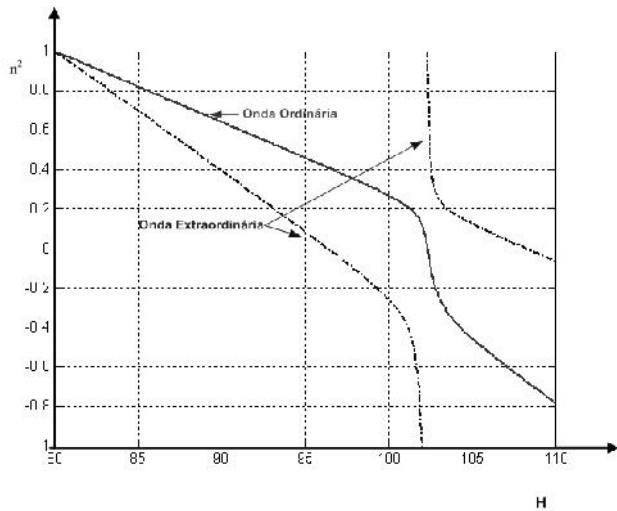


Fig. 5 Índice de refração Apple Hartree

IV. CÁLCULO DA DENSIDADE ELETRÔNICA MODELO REAL

O IRI (*International Reference Ionosphere*) possui um site <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/iri.html> [4], onde obteremos o valor aproximado da densidade eletrônica para qualquer ponto na superfície da terra em função das coordenadas geográficas, do dia do mês e ano onde será chamado "modelo IRI"[4]. Para os gráficos abaixo adotaremos duas coordenadas conforme a tabela 1, para coordenada do ponto A temos o Equador e para o ponto B temos um ponto no Brasil e será usado valores de densidade extraído do modelo IRI [4].

TABELA I

Ponto	Latitude	Longitude
A	0°	50°
B	-20°	50°

Com isso teremos o gráfico da densidade em função da altura para o mês de janeiro para os pontos A e B mostrado na figura 8 onde e (quantidade elétrons). Pegaremos valores para as 8h dos meses de janeiro, abril e junho do ano de 2007.

Para o mês de janeiro temos:

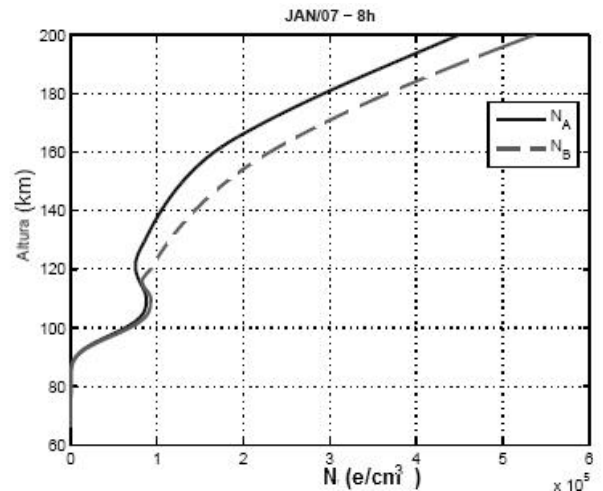


Fig.6 Densidade Eletrônica modelo IRI, para os pontos A e B às 8h do mês de janeiro/07.

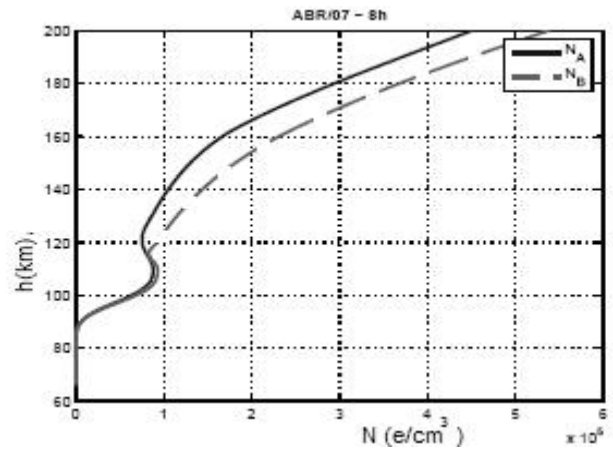


Fig. 7 Densidade Eletrônica modelo IRI, para os pontos A e B às 8h do mês de abril/07.

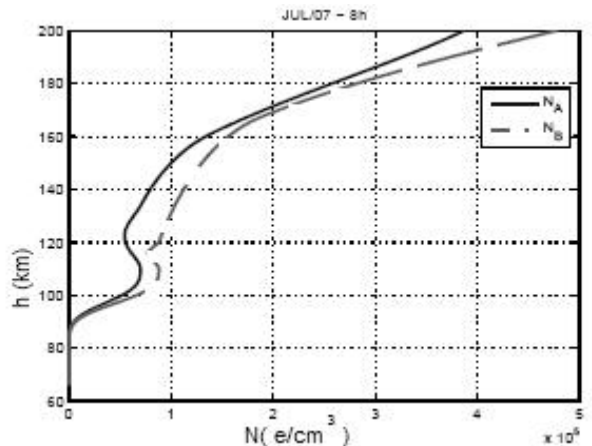


Fig. 8 Densidade Eletrônica modelo IRI, para os pontos A e B às 8h do mês de julho/07.

As figuras 8, 9 e 10 mostram o comportamento da densidade eletrônica N em função da altura para vários períodos do ano, observa-se que temos que observar as coordenadas geográficas.

V. CÁLCULO CAMPO ELÉTRICO

Temos que para o modelo linear a equação diferencial que rege os campos na ionosfera é justamente a equação de Stokes[2], cujas as soluções são funções de Airy[3]. Para uma onda incidente na ionosfera e polarizada podemos obter do conjunto às soluções para o campo E_y dadas pela equação 3.

$$E_y = e^{-ik_0cz} + \text{Re}^{ik_0z}, z < h_0 \quad (25)$$

$$E_y = K_1 A_i(r_1), z > h_0 \quad (26)$$

onde:

E_y -campo elétrico

h_0 altura na base da ionosfera

k_0 - constante de propagação espaço livre

R – coeficiente de reflexão

$A_i(r_1)$ – soluções de Airy[3]

Podemos observar nas figuras de 9 a 11; o comportamento do campo elétrico E_{y1} ao entrar na baixa ionosfera, e sua atenuação, nela foi considerado o modelo de densidade eletrônica linear e frequência de colisão v .

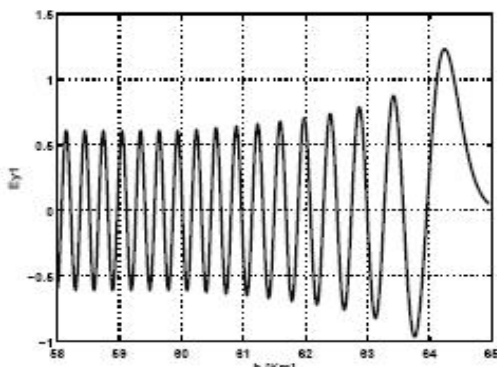


Fig. 9 Envolvória do Campo Elétrico para o modelo Linear para $f=2\text{Mhz}$ e $v=0$ hz.

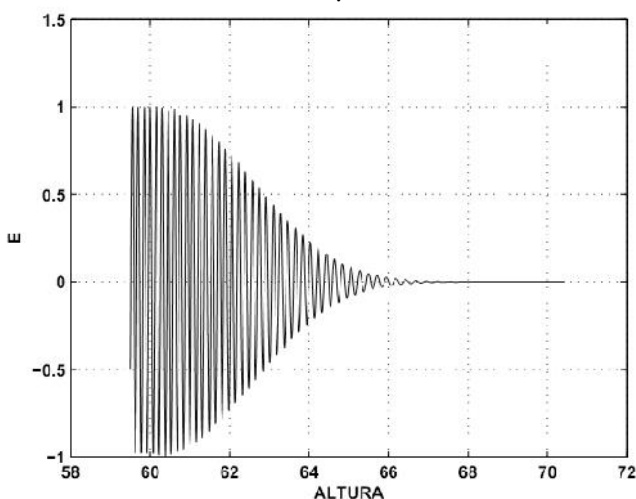


Fig.10 Envolvória do Campo Elétrico para o modelo Linear $f=2\text{Mhz}$ e $v=10^5$ hz

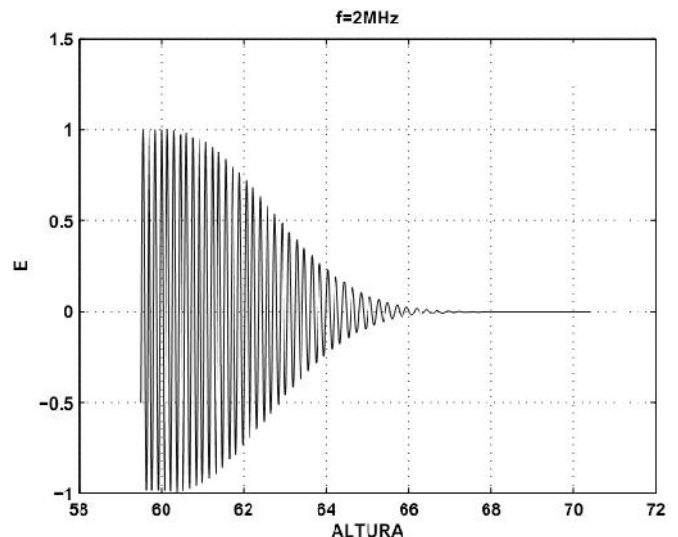


Fig. 11 Envolvória do Campo Elétrico para o modelo Linear $f=2\text{Mhz}$ e $v=10^6$ hz.

Observa que com o aumento da frequência de colisão maior é a atenuação do campo ao entrar na ionosfera.

Para o caso da propagação longitudinal, duas ondas que se propagam independentemente, possuindo dois índices de refração diferentes, ou melhor não existe união ou nenhum acoplamento entre as ondas (0) e (X) conforme figura 7 que nos mostra o ponto de reflexão onde do índice de refração n^2 .

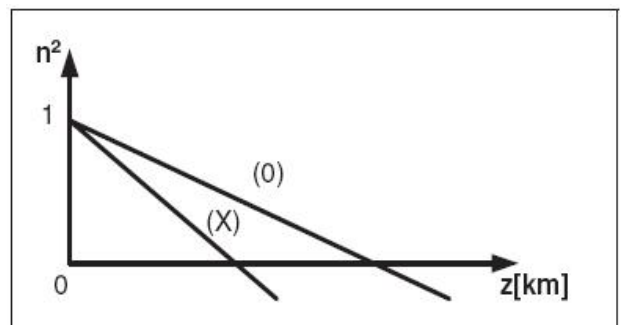


Fig. 12 Ondas ordinária e extraordinária para o modelo Linear

Para a figura 7 observa-se que o ponto de reflexão da onda ordinária (0) será em uma altura maior que da onda ordinária.

VI. CONCLUSÕES

Diversos fatores influenciam na propagação do sinal, assim como o aumento da temperatura e uma diminuição pressão em função da altura conforme as figuras 3 e 4. Apresentamos algumas equações básicas para a baixa ionosfera onde foi mostramos graficamente modelos de densidade linear onde a densidade varia linearmente com a altura conforme figura 5 e o modelo IRI, modelo próximo do real, para esse consideramos dois pontos conforme tabela I com latitudes diferentes.

O processo de reflexão na ionosfera se efetua continuamente até o ponto de reflexão conforme mostrado na figura 7 para a onda ordinária e extraordinária, enfim para este trabalho foi considerado a densidade para um modelo teórico e um modelo real e não foram considerados a frequência de colisão onde é responsável nas perdas quando o campo elétrico entra na ionosfera. Este trabalho tem o

objetivo de mostrar alguns métodos de estudo de fatores que influenciam o comportamento do campo elétrico na baixa ionosfera assim como sua atenuação e para isso considera o comportamento da densidade eletrônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chapman, S., The production of ionization by monochromatic radiation incident upon a rotating atmosphere. Part I e II. Proc. Phys. Soc., vol 43, pg.26, pg. 483.
- [2] Dolukhanov, M., Propagation of Radio Waves Translated from russiam by Boris Kuznetsov, 1971.
- [3] Abramowitz, M. and Segun I.A.. Handbook of Mathematical functions. Dover publications, Inc., New York.
- [4] IRI, International Reference Ionosphere - IRI-2001, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html> 2001.
- [5] CARRIJO, G. A. Determinação da Densidade Eletrônica da Ionosfera usando Foguete. Dissertação (Doutorado) | Instituto Tecnológico da Aeronáutica, ITA, Brasil, 1983. Orientador: Prof. Fernando Walter.