

Ângelo Antônio Leithold

**REFLEXÃO IONOSFÉRICA
COMO A RADIOFREQUÊNCIA REFLETE NA IONOSFERA
LEI DE SNELL**

CURITIBA

1995

Quando eu estava ouvindo no rádio, em 40 metros, algumas rodadas de radioamadores, muita coisa era falada sobre propagação de RF, reflexão das ondas de rádio, etc.

Muitas das informações eram pertinentes, mas a grande maioria não passava de puro achismo, sem nenhum fundamento científico, ou mesmo prático, e, o pior, que as informações sem fundamento algum eram as que mais se 'espalhavam', principalmente em alguns grupos de Curitiba.

Num destes grupos, num curso de radioamadorismo, ouvi a explanação de um colega a jovens que seriam pretendentes ao radioamadorismo, confesso que fiquei assustado com as 'informações' e ensinamentos passadas pelo 'instrutor'.

Assim, resolvi escrever este ensaio que ficou por algum tempo 'engavetado'. Atualmente, com o advento dos sites, e da comunicação banda larga, etc, e pelos mecanismos de buscas avançados, sobretudo o Google, resolvi deixar este ensaio disponibilizado na Internet, para aqueles que precisam ter uma explanação simples (Início do presente trabalho), e também mais complexa (Parte final, somente formalismo matemático).

(c)1995 Ângelo Antônio Leithold – PY5AAL

Atenção: Esta Obra tem Direitos Autorais (c) 2010:



Como ocorre a reflexão Ionosférica

Vista do espaço, a esfera terrestre tem uma coloração azul brilhante devido efeito cromático produzido pela dispersão da luz solar sobre os gases e poeiras atmosféricos que envolvem-na em fina camada. Estes são retidos pela ação da força gravitacional e a esta camada chama-se ordinariamente de Atmosfera.

Na parte superior da Atmosfera, ou no seu topo, existe uma região ionizada partir de 50~60 Km de altitude, até uma distância indeterminada, arbitrada em torno de 550~600 Km (Dependendo do autor). Nesta existe grande quantidade de íons gerados pelas influências da radiação de partículas cósmicas e solares. As partículas carregadas eletricamente são chamadas íons, que são átomos ou moléculas de elementos gasosos que ganharam ou perderam elétrons, apresentando portanto, carga elétrica negativa (chamados ânions) ou carga elétrica positiva (chamados cátions). Levando-se em conta a distribuição e densidade iônica, esta região da atmosfera é dividida por camadas (Ou regiões) segundo propriedades físico-químicas e é sujeita a variações geográficas, temporais e à dinâmica terrestre e celeste [1]. Exerce um efeito sobre as características de propagação das ondas eletromagnéticas abaixo de si e no próprio meio, e às variações ocasionadas por anomalias diversas, em especial geomagnéticas, à exemplo da Anomalia Equatorial e da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, é uma região muito especial onde ocorrem fenômenos que afetam a todo o planeta, ela é chamada "Ionosfera". Ela se distribui desde a mesosfera até termosfera, com aproximadamente 550 km de altitude, suas separações além da natureza físico química e densidade iônica também sofrem fortes influências das marés [2].

O maior agente de ionização da Ionosfera é o Sol, cuja radiação nas bandas de raio X e ultravioleta, insere grande quantidade de elétrons livres e fótons altamente energéticos [3]. Os meteoritos e raios cósmicos também são responsáveis pela presença secundária de íons na região. A densidade de ânions, cátions e elétrons livres é variável de acordo com a hora do dia, estação do ano, e composição química da alta atmosfera. A sua formação, portanto, depende da disposição dos elementos da atmosfera neutra, da ação dos agentes ionizantes e com a posição da Terra em relação ao Sol. Assim, a densidade iônica numa determinada latitude e longitude depende da hora do dia, inclusive.

A disposição dos elementos da atmosfera neutra está relacionada com seu peso

molecular e atômico, por este motivo, acima da região de equilíbrio difusivo há uma tendência para que a ionosfera separe-se em camadas.[4]. Uma vez que a composição da atmosfera, a partir dos cem quilômetros de altitude varia, os gases estratificam-se. Por exemplo: O₂, O, N₂, N, absorvem radiações quantitativamente, uma vez que o nível de absorção varia conforme a densidade destes. A densidade de ionização varia proporcionalmente com a altura, gerando assim camadas diferentes de absorção distintas e variáveis. Nas zonas mais baixas os elétrons livres e íons desaparecem, pois sempre a recombinação prevalecerá sobre a ionização, devido à maior densidade de partículas. Nas zonas mais altas é muito baixa a densidade de gases, moléculas e átomos, a quantidade de radiação, ou seja a energia vinda do espaço é muito alta, porém, não existem gases, átomos, ou moléculas livres o suficiente para ser ionizadas, portanto só haverá ionização à medida que mergulhamos na atmosfera, até uma certa profundidade.

Comportamento da Ionosfera

O comportamento normal da Ionosfera se altera pela variação do de seu maior agente ionizador, o Sol. Quando ocorrem determinados fenômenos, como as grandes explosões solares, estas libertam plasma com muitos milhares de km de extensão e velocidades que podem atingir cerca de 2000 km por segundo. Ocorrem também emissões de raios X, elétrons e prótons, a este fenômeno se chama Ejeção de Massa Coronal. Se as explosões ocorrem em direção à Terra, a chuva de partículas atinge-na, provocando assim, fortes perturbações na ionosfera como um todo. Durante o período em que a Terra está exposta, as características das diversas camadas é alterada e severas perturbações ocorrem nos sistemas de comunicação, provocando mesmo o bloqueio total das comunicações por reflexão ionosférica.

As perturbações ionosféricas podem ser repentinas e afetam a região voltada para o Sol, tem duração limitada e atingem principalmente as frequências de entre 2 MHz e 30 MHz. Caso as perturbações sejam menos acentuadas mas com maior duração, as variações iônicas podem durar por um tempo que vai de algumas horas chegando a períodos bem mais extensos, a dias. Durante uma tempestade solar os sinais que utilizem a ionosfera para se propagar diminuem drasticamente de intensidade e podem até se extinguir por um longo tempo, este tipo de fenômeno pode atingir todo o globo.

Reflexão

A propagação de ondas eletromagnéticas no plasma ionosférico, se comporta analogamente como ondas sônicas dentro de fluidos de diferentes densidades. Ora refletindo, ora refratando, ora sem oferecer resistência alguma. Num plasma com "N" colisões elétron - partículas (íons, átomos, moléculas, elétrons, neutrinos, etc), levando-se em conta o movimento térmico dos elétrons, pode-se dizer que tem ora características fluidas, ora características sólidas, pois o plasma não é líquido, nem sólido, tampouco gasoso, portanto, comporta-se de maneira anômala. A densidade iônica pode ser definida como uma quantidade de elétrons e íons por metro cúbico, ou seja, tem uma determinada densidade. Para observar o efeito da reflexão pode-se desprezar os efeitos térmicos e gravitacionais, pois são desprezíveis para efeito dos mecanismos de reflexão ionosférica [3].

Dependendo da hora do dia ou da insolação, a quantidade de energia eletromagnética provinda do Sol, principalmente nas bandas de raios-X e ultra-violeta, conforme já visto, a ionosfera separa-se em camadas, assim, é possível ocorrer condutividade e permissividade elétrica, em alguns momentos o seu comportamento é semelhante a um condutor elétrico, por exemplo, como se fosse uma placa metálica, porém sintonizada em determinadas frequências, onde uma vez se comportando como tal, pode perfeitamente refletir determinados comprimentos de onda sem problema algum, e praticamente sem perdas, também absorver outros comprimentos de onda inutilizando totalmente a propagação destas. A reflexão ionosférica é exatamente uma das propriedades exploradas para transmissão e recepção de sinais de radiofrequência. Durante o dia o aumento de densidade é significativo e a elevação das camadas durante a noite, propicia um aumento da propagação a longa distância, pois a RF refletirá mais acima.

Existe também, durante o dia, uma atenuação maior do sinal pelo aumento da densidade e conseqüentemente a absorção, contudo, também poderá ocorrer uma reflexão maior, o que contradiz a hipótese da absorção, justamente devido à este aumento da densidade e alteração do comportamento das regiões iônicas.

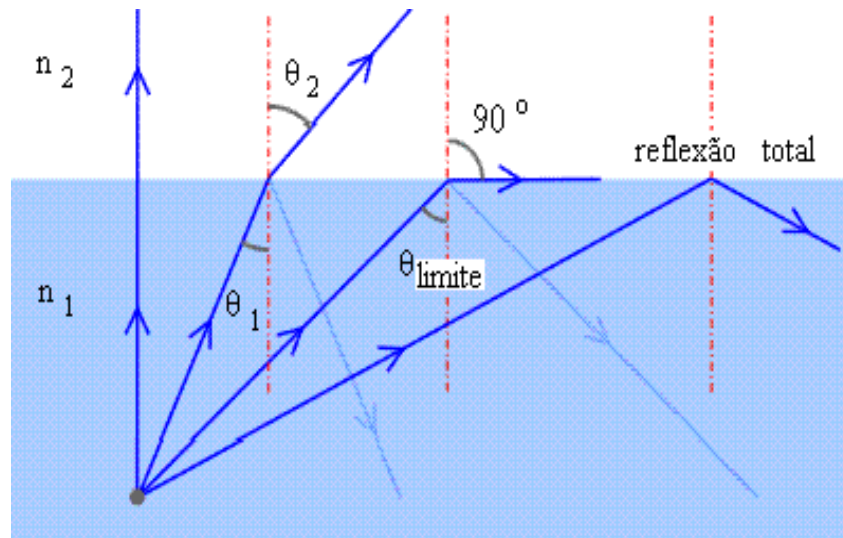
Também pode ocorrer a canalização, o espalhamento e reflexão, algumas vezes estes três fatores concorrem entre si, outras vezes se somam. A reflexão ionosférica é explorada por sistemas de radiodifusão com as antenas de transmissão em ângulo baixo. As

propriedades operacionais das ionosondas (sistemas compostos de transmissores, receptores e antenas direcionais apontadas diretamente para a ionosfera) propiciam um conhecimento do comportamento da região. O princípio da reflexão ionosférica em ângulos altos é utilizado há muitos anos para pesquisas, porém pouco utilizado nas comunicações. O efeito ocorre sobre uma faixa de alturas estreita e em baixas frequências, onde, ou os raios refratam, ou refletem. No caso da refração a distância atingida por estes é apreciável, chegando a milhares de quilômetros. No caso da reflexão direta, esta não ultrapassa a algumas centenas de quilômetros. O espalhamento fraco e incoerente de energia ocorre devido às flutuações térmicas e aleatórias da densidade eletrônica no plasma ionosférico. Este espalhamento tem sua eficiência aumentada pelas irregularidades ionosféricas e pelo aumento da densidade iônica.

Outro fenômeno interessante sobre a reflexão ionosférica é a cintilação, ocorre devido à atuação dos sinais perante as irregularidades ionosféricas que atuam como uma tela de fase variável nos sinais transionosféricos. Esta tela eletrônica dá origem à efeitos de difração com cintilação em amplitude, e variação do ângulo de chegada e fase. Portanto, num meio variável onde ocorrem densidades variáveis, ocorre o fenômeno da reflexão, refração e difração dos sinais de radiofrequência que pode ser simultâneo ou não.

FORMALISMO

A Lei de Snell



$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

$$\theta_{\text{crit}} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 \right) = \arcsin \frac{n_2}{n_1} = 48.6^\circ.$$

$$k_{x\text{Reg1}} = k_{x\text{Rreg2}}$$

$$n_1 k_0 \sin \theta_1 = n_2 k_0 \sin \theta_2$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

onde

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\omega}{c}$$

Na forma vetorial, facilmente,

$$\cos \theta_1 = \mathbf{n} \cdot (-\mathbf{l})$$

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (1 - (\cos \theta_1)^2)}$$

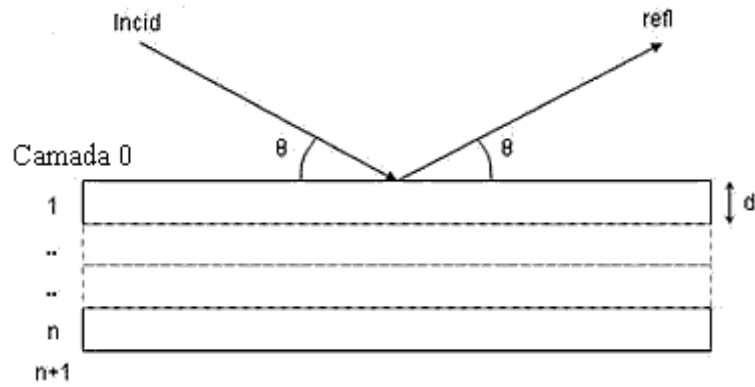
$$\mathbf{v}_{\text{reflet}} = \mathbf{l} + (2 \cos \theta_1) \mathbf{n}$$

$$\mathbf{v}_{\text{refrat}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \mathbf{l} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 - \cos \theta_2\right) \mathbf{n}$$

$$\mathbf{n} \cdot (-\mathbf{l})$$

$$\mathbf{v}_{\text{refrat}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \mathbf{l} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 + \cos \theta_2\right) \mathbf{n}.$$

Também:



$$Q_z = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta = 2k_z$$

$$k_n = \sqrt{k_z^2 - 4\pi(\rho_n - \rho_0)}$$

$$r_{n,n+1} = \frac{k_n - k_{n+1}}{k_n + k_{n+1}}$$

$$r_{n,n+1} = \frac{k_n - k_{n+1}}{k_n + k_{n+1}} \exp(-2k_n k_{n+1} \sigma_{n,n+1}^2)$$

$$\beta_0 = 0$$

$$\beta_n = ik_n d_n$$

$$i^2 = -1$$

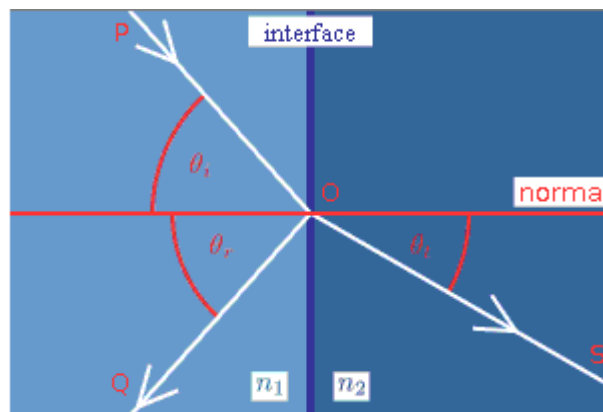
$$c_n = \begin{bmatrix} \exp(\beta_n) & r_{n,n+1} \exp(\beta_n) \\ r_{n,n+1} \exp(-\beta_n) & \exp(-\beta_n) \end{bmatrix}$$

assim

$$M = \prod_0^n c_n$$

$$R = \left| \frac{M_{10}}{M_{00}} \right|^2$$

e ainda,



$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2$$

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2$$

$$R_s = \left[\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} \right]^2$$

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2$$

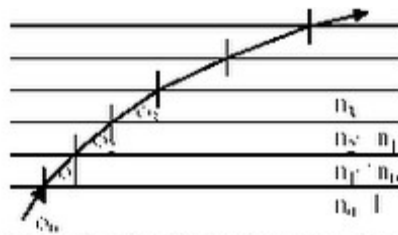
$$R_p = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right)^2$$

$$R_p = \left[\frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right]^2$$

$$T_s = 1 - R_s \quad \text{e} \quad T_p = 1 - R_p.$$

$$R = r^2 \quad \text{e} \quad T = \left(\frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right) t^2$$

Facilmente, vê-se que:



REFRAÇÃO: O índice de refração diminui com a altura, levando-se em conta um meio plasmático, com camadas paralelas de densidades semelhantes, de acordo com a Lei de Snell, um raio incidente procedente da Terra, se curvará até atingir uma trajetória horizontal.

No caso do raio ser emitido verticalmente, não haverá refração, devido à mesma Lei de Snell, haverá reflexão total em todas as camadas e em todas as direções, com o mínimo de perdas, desde que a emissão fique abaixo das frequências críticas de cada camada

E que:

Quando a incidência não é vertical, a frequência máxima de retorno de cada camada depende do ângulo de incidência ϕ_0 : $n_1 = \text{sen}(\phi_0)$

$$\text{sen}(\phi_0) = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N_{\text{max}}}{f_{\text{max}}^2}} \Rightarrow \text{MUF}_1 = f_{\text{max}1} = f_{c1} \sec(\phi_0)$$

Como o ângulo máximo de incidência na ionosfera ($\phi_{0\text{max}}$) se obtém para uma elevação $\Delta=0^\circ$ na Terra

(A), a frequência mais elevada que reflete para a Terra, corresponde a camada F2, valendo em torno de

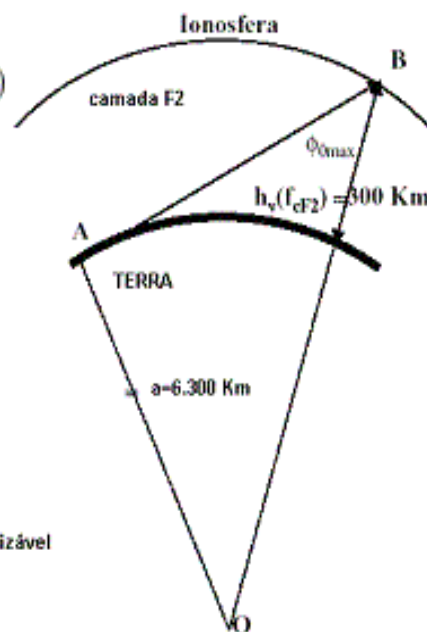
$$\text{MUF}_{F2} = f_{cF2} \sec(\phi_{0\text{max}})$$

$$\text{MUF}_{F2} = f_{cF2} \frac{a+h}{\sqrt{(a+h)^2 - a^2}}$$

$$\text{MUF}_{F2} \approx 4f_{cF2}$$

$$\text{MUF}_{F2} \approx 30 \text{ MHz}$$

obs.: MUF= Máx freq. utilizável



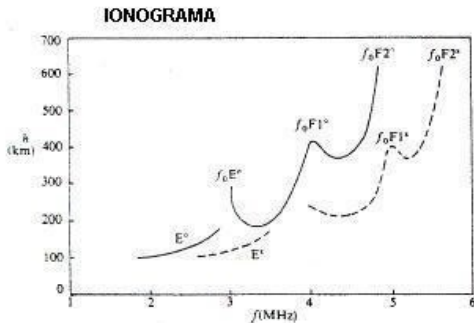
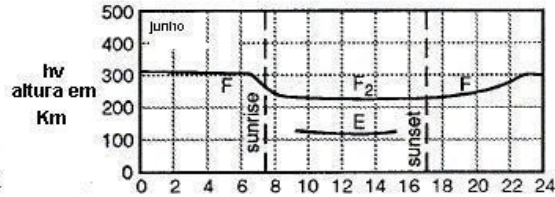
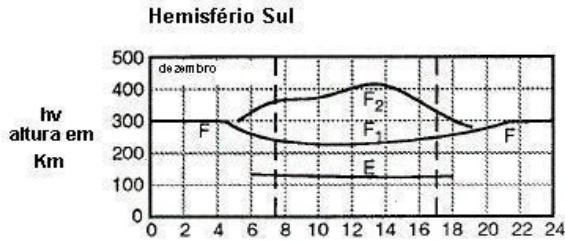
Acima: A reflexão ionosférica e a Máxima Frequência Utilizável MUF. (Fonte: Angeloleithold, disponível no site: http://www.angeloleithold.hpg.com.br/ciencia_e_educacao/6/index_int_4.html)

Logo os ionogramas:

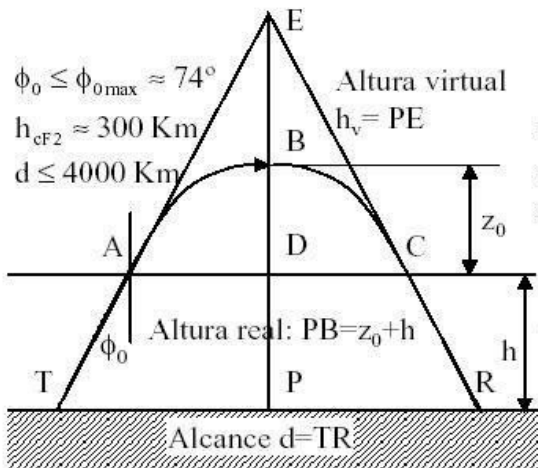
IONOGRAMAS

A altura virtual, para uma incidência vertical, define-se como (h_v) onde o ponto ideal de reflexão para o mesmo tempo de propagação com a velocidade da frente de onda, hipoteticamente, igual à velocidade da luz no vácuo medida com radares pulsados, chamados de sondas radioelétricas, cuja frequência (f), é variável, onde se mede o tempo de propagação (τ) de emissões verticais, (ida e volta)

$$h_v(f) = \frac{\tau(f)c}{2}$$



Um ionograma, representa a altura das camadas de reflexão, conforme a frequência, os desdobramentos são causados pela anisotropia imprimida pelo campo magnético terrestre na ionosfera. Notar que à medida que a frequência aumenta, os padrões se repetem, até a máxima frequência de utilização.



Lei da Secante: A altura h_v , de uma emissão de frequência f e ângulo de incidência ϕ_0 é a mesma que corresponde a da frequência f_v que incide verticalmente é dada por:

$$f = f_v \sec(\phi_0)$$

$$h_v(f, \phi_0) \equiv h_{v \text{ ionograma}}(f / \sec \phi_0)$$

$$MUF_i(\phi_0) = f_{ci} \sec(\phi_0)$$

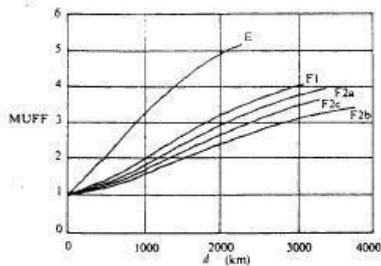
$$MUF_i(d) = f_{ci} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h_v}\right)^2}$$

Fator de Máxima Frequência Utilizável MUFF :

$$MUFF_i(d) = MUF_i(d) / f_{ci} \quad i = E, F1, F2$$

Frequência ótima de trabalho, (OWF):

$$OWF_i(d) = 0,85 \cdot MUF_i(d)$$



Acima: As camadas ionosféricas e ionogramas, a Lei da Secante e a Máxima Frequência Utilizável. (Fonte: Angeloleithold disponível em: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/IonogramasAngeloleithold1975.jpg>)

Bibliografia

1 Kelley, M. C, and Heelis, **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics**,1989.

2 Leithold, Angelo A, **A Troposfera, Ionosfera e seus componentes**, 1995, disponível no site:

http://br.geocities.com/troposfera_e_ionosfera_py5aal/index.htm

3 Leithold, Angelo A., **Fundamentos de Propagação das Ondas de Rádio**, 1987, disponível no site:

http://www.angeloleithold.hpg.ig.com.br/ciencia_e_educacao/6/index_int_3.html

4 Almeida, Pedro D. S. C., **Estudos Comparativos de Simulações Numéricas e Análises de Dados de Perfis de Densidades Eletrônicas Para a Região Brasileira**, Relatório Final I.C, PIBIC/INPE – CNPq/MCT, 2005, disponível no site: <http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m16@80/2006/08.11.18.06/doc/Pedro%20Daniel%20Almeida.pdf>

Licença e direitos autorais



Leithold, Ângelo Antônio: COMO A RADIOFREQUÊNCIA EM REFLETE NA IONOSFERA Creative Commons Atribuição-Uso Não-Comercial-
Vedada a Criação de Obras Derivadas 3.0 Brasil License