

1. Publicação nº <i>INPE-3169-PRE/539</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1984</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DGA/DOA</i>	Programa <i>IONAP</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>IONOSFERA ATMOSFERA</i> <i>OZÔNIO AERONOMIA</i>			
7. C.D.U.: <i>523.4-853</i>			
8. Título <i>INTRODUÇÃO À GEOFÍSICA DA ATMOSFERA</i>		10. Páginas: <i>15</i>	
		11. Última página: <i>13</i>	
9. Autoria <i>I.J. Kantor</i>		12. Revisada por <i>Kirchhoff</i> <i>V.W.J.H. Kirchhoff</i>	
Assinatura responsável <i>Hau Paul</i>		13. Autorizada por <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas <i>Conceitos básicos de Geofísica da Atmosfera são abordados com ênfase nos seguintes temas: influência do Sol na atmosfera terrestre; magnetosfera; ionosfera e propagação de ondas de rádio; alta, média e baixa atmosfera e camada de ozônio. São apresentadas as pesquisas em andamento em Geofísica da Atmosfera no Brasil e sua importância.</i>			
15. Observações <i>Parte do curso "Geofísica da Alta Atmosfera", patrocinado pela Sociedade Brasileira de Geofísica durante a 36ª Reunião anual da SBPC, 4-11 de julho, na Universidade de São Paulo, 1984.</i>			

INTRODUÇÃO À GEOFÍSICA DA ATMOSFERA

Ivan Jelinek Kantor

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq
12200 São José dos Campos, S.P., Brasil

RESUMO

Conceitos básicos de Geofísica da Atmosfera são abordados com ênfase nos seguintes temas: influência do Sol na atmosfera terrestre; magnetosfera; ionosfera e propagação de ondas de rádio; alta, média e baixa atmosfera e camada de ozônio. São apresentadas as pesquisas em andamento em Geofísica da Atmosfera no Brasil e sua importância.

INTRODUÇÃO À GEOFÍSICA DA ATMOSFERA

Ivan Jelinek Kantor

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq
12200 São José dos Campos, S.P., Brasil

ABSTRACT

Basic concepts of Atmospheric Geophysics are presented with emphasis on the following subjects: The sun's influence on the earth's atmosphere; magnetosphere; ionosphere and radio wave propagation; upper, middle and low atmosphere, and the ozone layer. A description of the research in Atmospheric Geophysics being developed in Brazil is presented and its importance is discussed.

INTRODUÇÃO

É apresentada uma visão geral dos tópicos principais de Geofísica da Atmosfera, não incluindo a Meteorologia. Este estudo é conhecido como Aeronomia. Aeronomia é o estudo dos processos químicos e físicos da atmosfera superior.

Ao nível do mar, a atmosfera terrestre é formada principalmente de nitrogênio, N_2 (78% em volume); oxigênio, O_2 (21%); e Argônio, Ar (1%). Apenas acima de certa altitude aparecem elementos ionizados. Subindo em altitude cai a temperatura e a densidade, porém a proporção dos componentes mantém-se constante. Isto é verdade na troposfera (altitudes até ~10km), porém, principalmente devido à radiação solar, este esquema se modifica.

O SOL E O CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

O Sol exerce grande influência na atmosfera terrestre, emitindo partículas (como elétrons, prótons) que formam o vento solar e a radiação eletromagnética numa ampla faixa de comprimentos de onda (Figura 1). Cada componente da atmosfera terrestre interage diferentemente com cada comprimento de onda. Pode haver aquecimento do componente, dissociação ou ionização.

A Terra possui também um campo magnético (Figura 2), aproximadamente dipolar. O vento solar "empurra" as linhas do campo magnético, e a região contida por estas linhas é denominada magnetosfera. O campo magnético terrestre tem influência marcante na dinâmica da atmosfera, impondo uma grande resistência ao movimento iônico transversal às linhas de campo, mas muito pouca resistência na direção paralela às linhas de força.

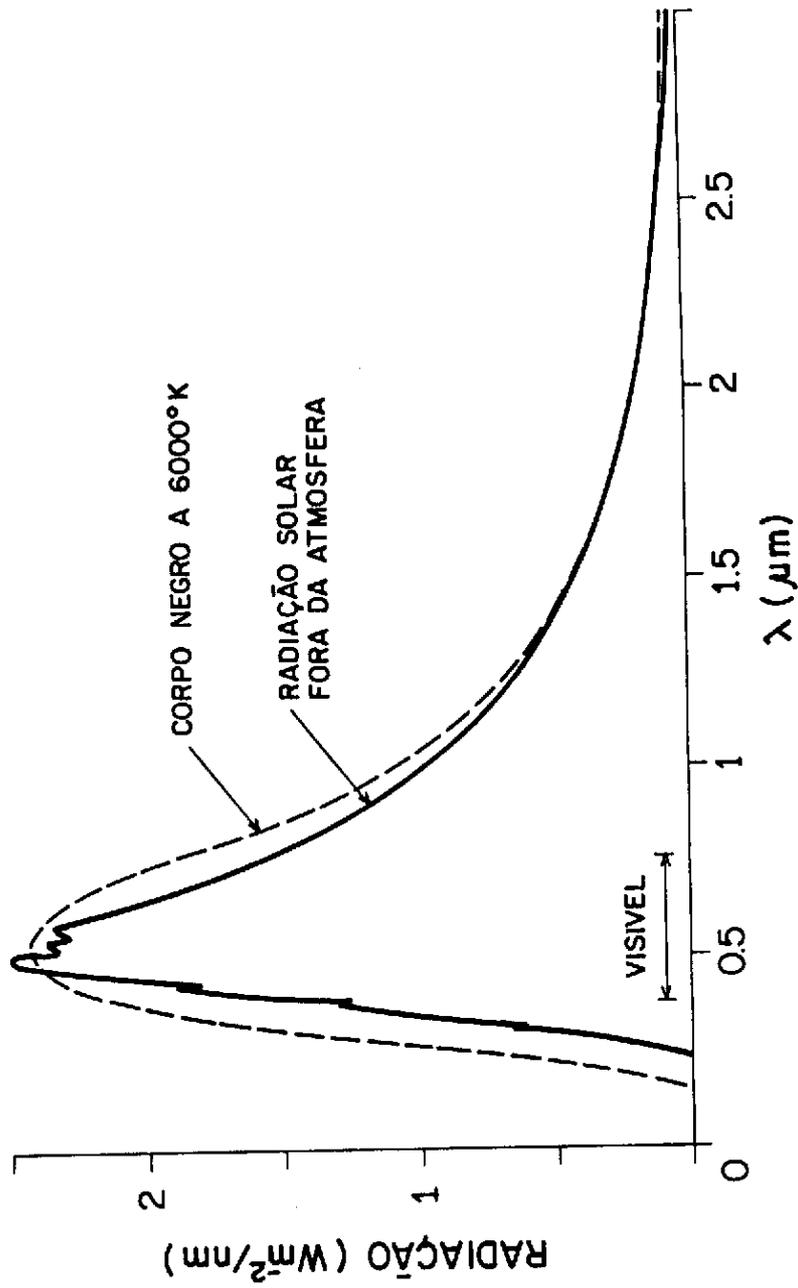


Fig. 2 - Espectro solar.

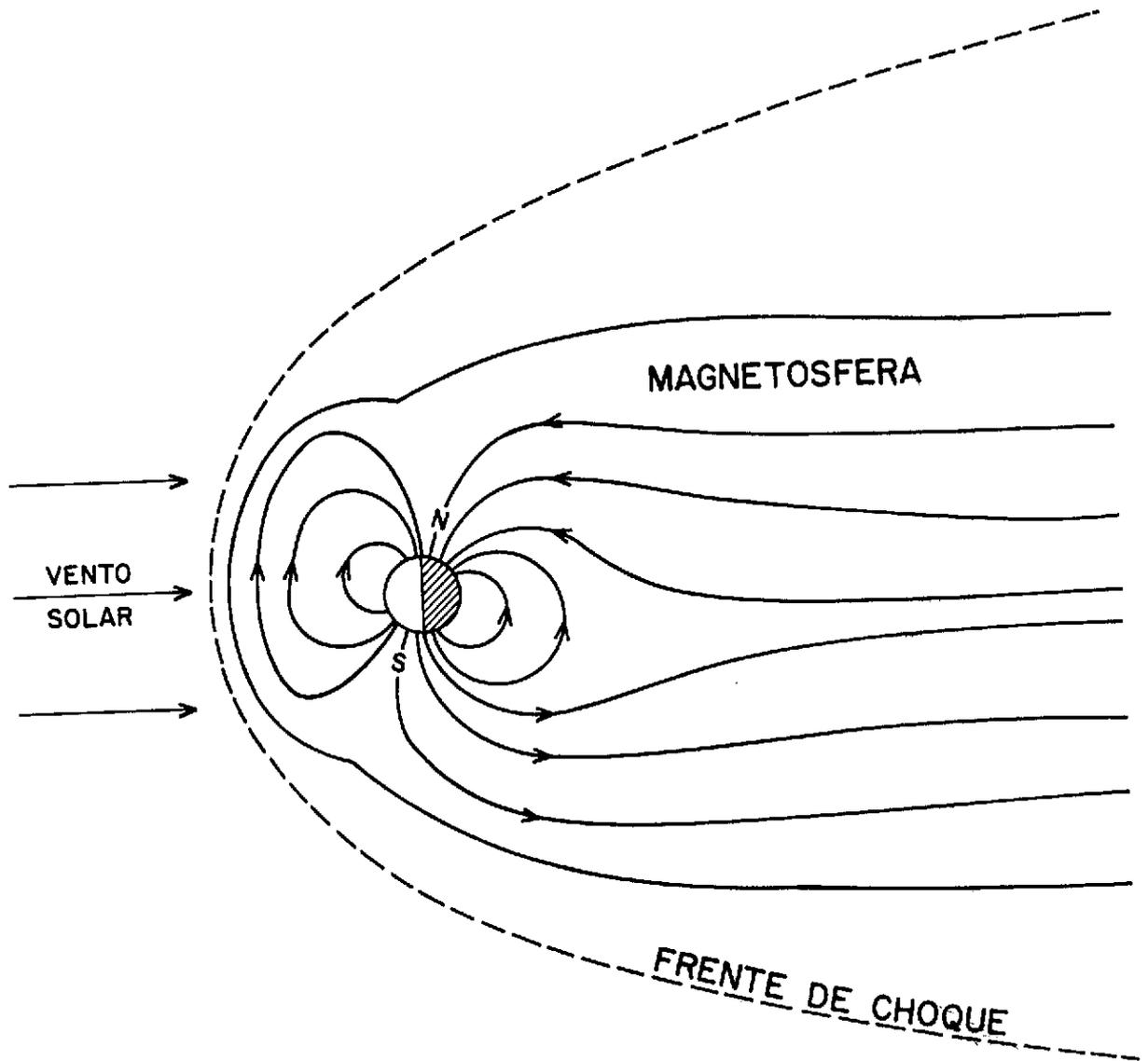


Fig. 2 - Representação esquemática da magnetosfera da Terra.

ATMOSFERA NEUTRA

A variação da densidade neutra da atmosfera com altitude é basicamente exponencial,

$$n(h) \cong n_0 \exp\left(-\frac{h}{H}\right),$$

onde n_0 é a densidade para $h = 0$, e H é a escala de altura ($H \sim 8\text{km}$ ao nível do mar). Um aumento de H na altura implica uma diminuição de $1/e = 0.37$ na densidade.

A composição mantém-se aproximadamente homogênea devido à turbulência e mistura até 100km de altitude. Acima de 100km , cada constituinte neutro encontra-se em equilíbrio difusivo e varia independentemente com a altura, tendo a escala de altura função da massa do constituinte.

Alguns dos constituintes mais importantes da atmosfera são N_2 , O_2 , Ar, O, He e H. Existem porém constituintes denominados minoritários que, apesar da pequena concentração, são bastante importantes. O constituinte minoritário mais importante é o ozônio, O_3 , pois ele absorve a radiação ultravioleta do Sol que seria fatal à vida da Terra. O ozônio encontra-se na troposfera, estratosfera e mesosfera, com um máximo de densidade a $\sim 30\text{km}$ de altitude.

A temperatura da atmosfera (Figura 3) a partir do nível do mar decresce com a altitude ($\sim 6,5^\circ/\text{km}$) até o topo da troposfera. Na estratosfera a temperatura cresce devido à presença da camada de ozônio, O_3 . Na mesosfera a temperatura novamente decresce com a altura. Na termosfera a temperatura primeiro aumenta e finalmente mantém-se quase independente da altitude (acima de $\sim 30\text{km}$) sendo aí chamada temperatura exosférica. A temperatura exosférica varia bastante com a atividade solar, entre $\sim 2000^\circ\text{K}$ (atividade máxima) e $\sim 700^\circ\text{K}$ (atividade mínima).

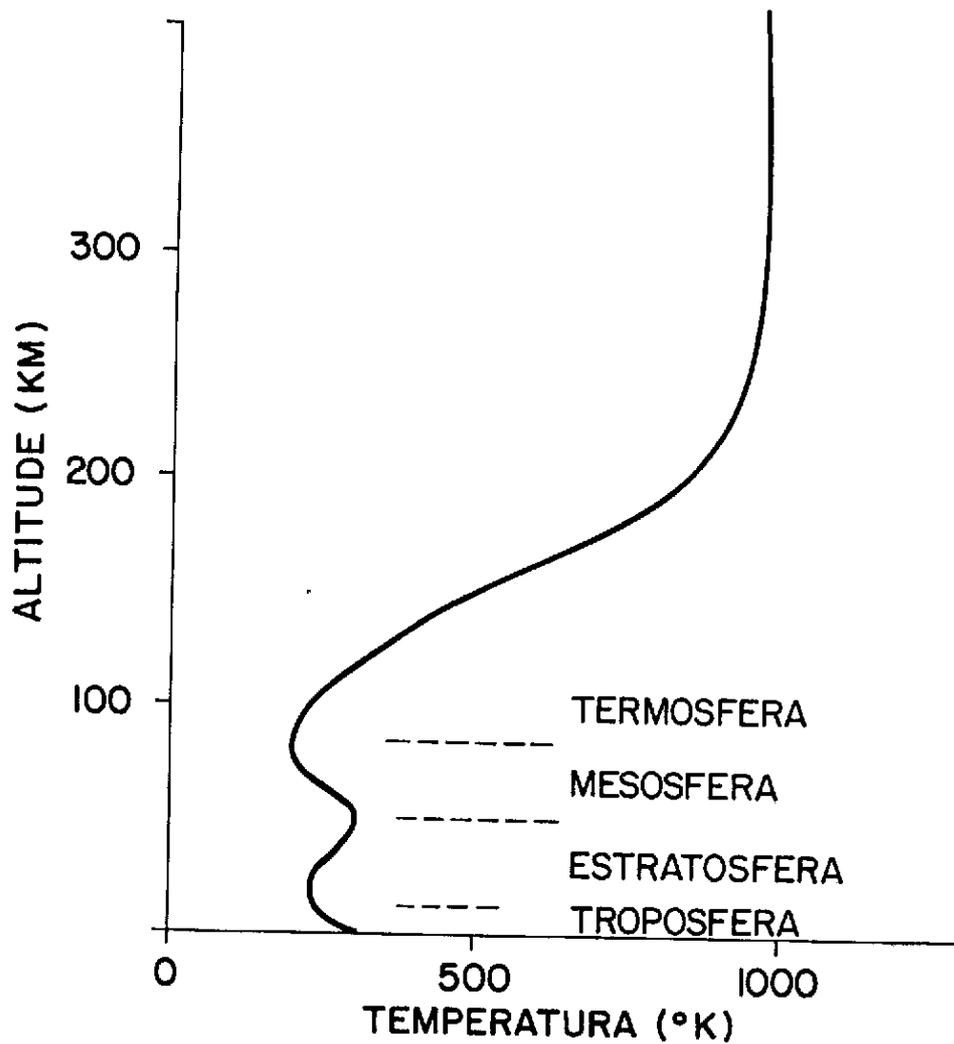


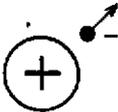
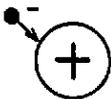
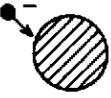
Fig. 3 - Perfil de temperatura e regiões da atmosfera.

A temperatura é dada pela energia cinética dos constituintes, e as altas temperaturas (2000°K) não implicam que nas altas altitudes exista uma grande fonte de calor, principalmente devido à baixa densidade.

ATMOSFERA IONIZADA

Na superfície terrestre os componentes atmosféricos são neutros, porém acima de 50km existem vários componentes ionizados.

Um fóton solar ao encontrar uma molécula neutra (Figura 4) pode tirar um elétron da molécula. Restará um íon positivo e um elétron, livres. Este é o processo de ionização. O elétron e o íon podem se neutralizar através de recombinação (Figura 4) com outro íon e elétron, respectivamente. Devido à baixa densidade da atmosfera superior demora algum tempo até que haja recombinação. Um gás onde existem elétrons e íons livres é denominado plasma.

	<p>IONIZAÇÃO</p> $h\nu + X \rightarrow X^+ + e^-$	
	<p>RECOMBINAÇÃO</p> $e^- + X^+ \rightarrow X$	
	<p>JUNÇÃO</p> $e^- + X \rightarrow X^-$	

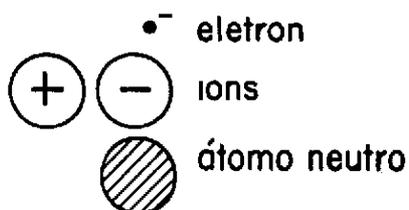


Fig. 4 - Esquema de produção e perda de elétrons e íons.

A ionosfera é definida como a região da atmosfera superior onde elétrons e íons existem em quantidades suficientes para influenciar a propagação de ondas de rádio.

O perfil de produção da ionosfera pode ser entendido através da Figura 5. A radiação solar é absorvida pela atmosfera e a densidade cai com a altitude. A razão de produção de pares elétrons-íons é proporcional ao produto da radiação e da densidade, resultando no perfil tracejado. O perfil de densidade eletrônica depende ainda dos processos de destruição dos pares elétrons-íons e dos processos de transporte de ionização; a teoria de Chapman produz um perfil bastante semelhante ao perfil da ionosfera (Figura 6).

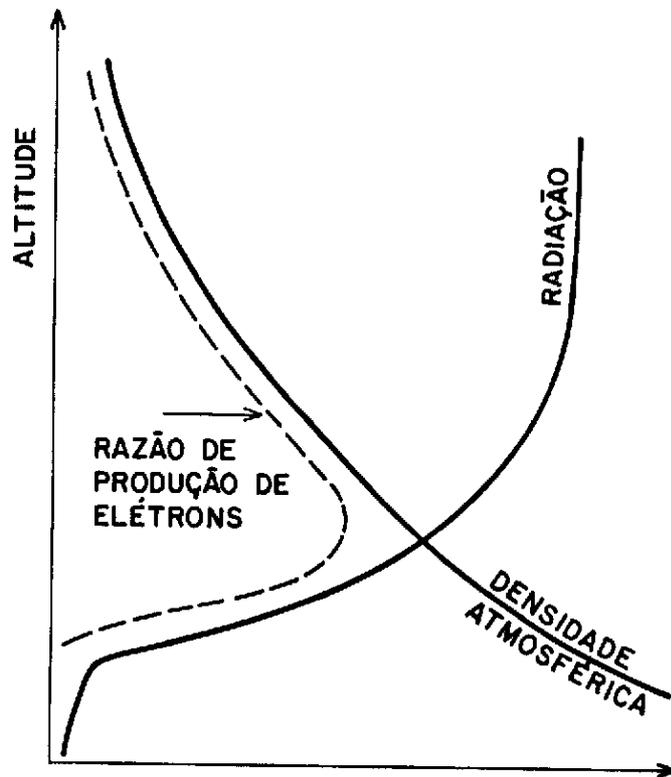


Fig. 5 - O perfil de Chapman.

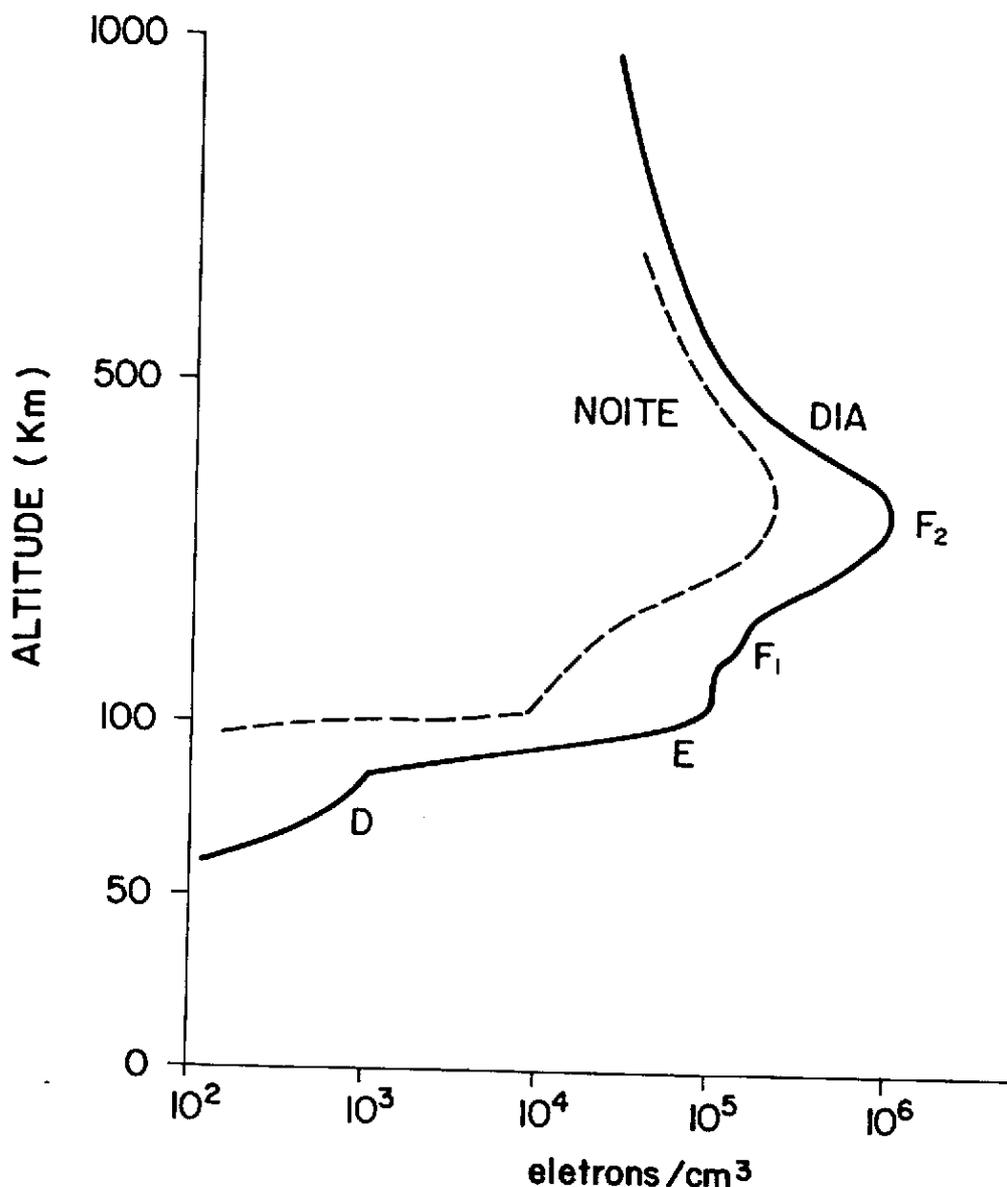


Fig. 6 - Distribuição de elétrons com a altitude e as várias camadas da ionosfera de dia (12:00 h) e de noite (zero h).

A ionosfera (Figura 6) tem um máximo em torno de 300km de altitude, apresenta várias regiões chamadas D, E, F1 e F2 que apresentam grandes variações de dia para noite. Entre os íons mais importantes na ionosfera têm-se O^+ , O_2^+ , NO^+ , He^+ e H^+ .

Muito importante para as telecomunicações é a influência da ionosfera na propagação de ondas de rádio. Um pulso de onda de rádio

(Figura 7) de frequência f , emitido verticalmente, reflete-se na altitude em que a densidade eletrônica \bar{n}

$$N = 1,24 \times 10^4 f^2,$$

onde as unidades são N (elétrons/cm³) e f (MHz). Isto permite radiocomunicação em ondas curtas (3 a 30MHz) entre locais bem distantes do globo terrestre (Figura 8), através da reflexão da onda.

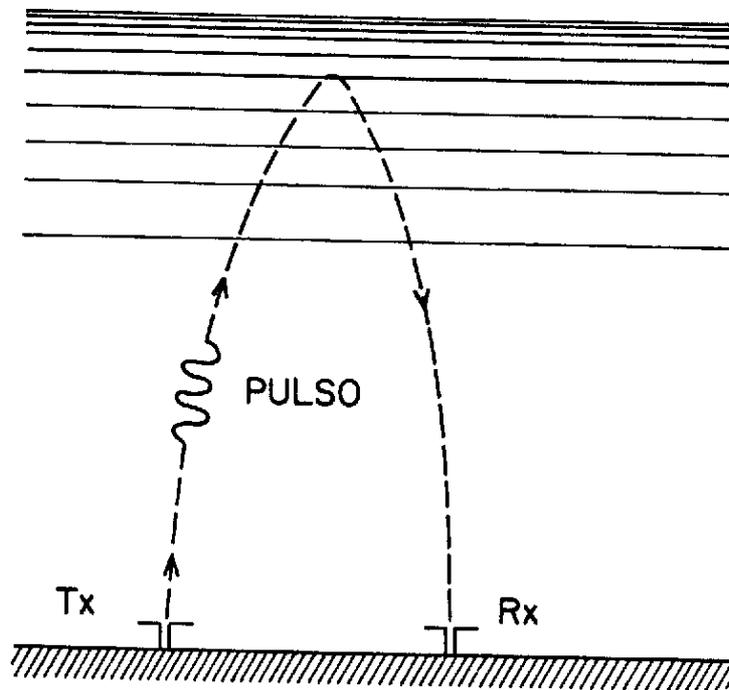


Fig. 7 - Um pulso de onda de rádio refletindo na ionosfera.

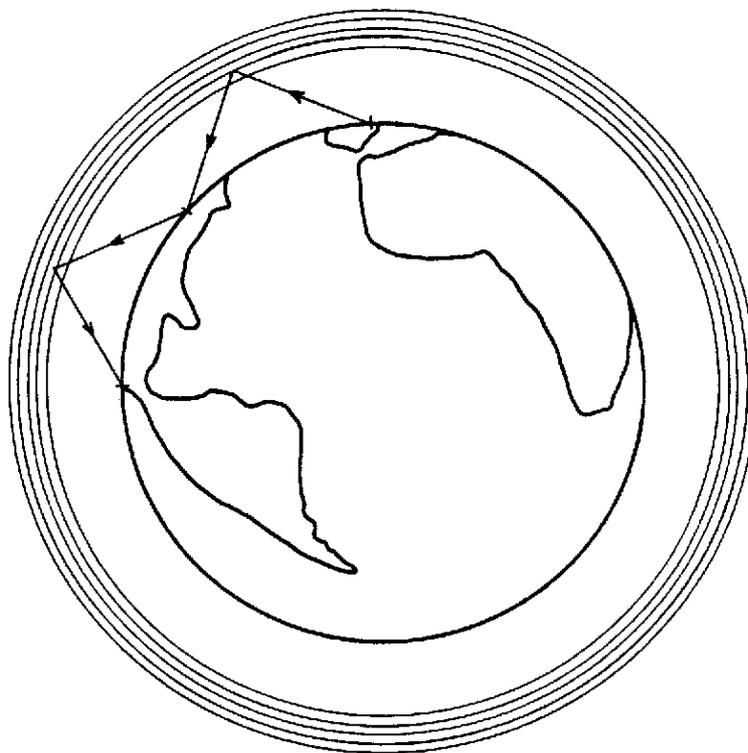


Fig. 8 - Radiocomunicação em ondas curtas.

PESQUISAS EM GEOFÍSICA DA ATMOSFERA NO BRASIL

Existem diversas características da atmosfera superior sobre o Brasil que tornam importante o seu estudo. Primeiramente, a região brasileira é pouca estudada e existe insuficiência de dados. Por exemplo, para cálculos de condições de propagação de ondas de rádio são utilizados modelos ionosféricos que não foram construídos com dados sobre o Brasil e baseiam-se principalmente em dados do Hemisfério Norte. Portanto é necessário que se façam medidas em vários locais do território brasileiro durante pelo menos um ciclo solar (11 anos) para que se conheça melhor a atmosfera superior do Brasil.

É importante conhecer a dinâmica da atmosfera de dados globais, e portanto é essencial que hajam dados da vasta extensão brasileira junto com os dados do resto do globo.

Existem várias peculiaridades na região brasileira de interesse da Geofísica da Atmosfera.

O equador magnético não coincide com o equador geográfico e sobre o Brasil eles têm a maior separação entre si. Isto tem grandes implicações na ionosfera.

A intensidade total do campo magnético terrestre tem um mínimo global sobre o Sul do Brasil (0,24 Gauss), em comparação com 0,67 Gauss, que é denominado Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul. Isto tem influência na precipitação de partículas dos cinturões de radiação de Van Allen que são as regiões de partículas energéticas que circundam o globo terrestre e alguns efeitos ionosféricos.

Existe um ramo de corrente elétrica ao longo do equador magnético a 100km de altitude, o eletrojato equatorial, que atravessa grande extensão territorial e tem grande influência na ionosfera e no campo magnético sobre o Brasil.

O Brasil cobre em latitude uma grande extensão e a ionosfera apresenta grande variação em latitude com características equatoriais e tropicais. Esta extensão é ideal para estudos relativos à Anomalia Equatorial (ou de Appleton) em que a ionosfera apresenta dois máximos de ionização em ambos os lados do equador magnético causado por efeitos dinâmicos, com um mínimo no equador magnético.

Para telecomunicações com satélites é muito importante o conhecimento das irregularidades ionosféricas, que tem um máximo ao longo do equador magnético e sobre o Brasil.

No Brasil várias organizações de pesquisa estudam a atmosfera superior.

O Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE/CNPq) conta com um grande grupo de pesquisadores que estudam a Ionosfera, Física da

Alta Atmosfera, Média e Baixa Atmosfera e Geomagnetismo. O Instituto conta com uma rede de instrumentos de pesquisa ionosférica (ionossondas, polarímetros de VHF, receptores de VLF), um radar de laser, fotômetros e aparelhos para medida de ozônio. Está desenvolvendo radares para medida de irregularidades ionosféricas e ventos na mesosfera, e também cargas úteis para medidas ionosféricas e termosféricas que serão embarcadas em foguetes lançados na Barreira do Inferno (Natal) em cooperação com o IAE/CTA. O INPE já participou de duas campanhas na Antártica fazendo medidas da ionosfera e tem participado em vários programas de cooperação internacional de pesquisa da atmosfera superior.

O Instituto de Atividades Espaciais (IAE/CTA) opera um sondador oblíquo de VLF desde 1980 para estudar as características de propagação de onda de rádio em LF/VLF na baixa ionosfera da região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) faz estudos da morfologia e dinâmica da ionosfera através de medidas de radiopropagação usando satélites que emitem em 225MHz, 244MHz e 136MHz.

O Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA/CTA) faz estudos da baixa ionosfera utilizando cargas úteis em foguetes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. V.W.J.H. Kirchhoff a revisão deste trabalho. Igualmente agradeço a Sociedade Brasileira de Geofísica o patrocínio do curso e ao Dr. Jean Flexor pelo seu apoio.

Trabalho parcialmente subvencionado pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), através do Contrato FINEP 537/CT e Processo nº 40.0956/84/GC, referente à auxílio recebido do CNPq.

LEITURAS COMPLEMENTARES

- Aeronomy. In: Encyclopaedia Britannica. Chicago, IL, 1972. V.1, p.215-216.
- Atmosfera. In: Enciclopédia Barsa. Rio de Janeiro, 1969. V.2, p.305.
- Davies, K. *Ionospheric radio propagation*. Washington, DC, NBS, 1965. (NBS Monograph 80).
- Dolukhanov, M. *Propagation of radio waves*. Moscow, Mir Publishers, 1971.
- Goody, R.M.; Walker, J.C.G. *Atmosferas planetárias*, São Paulo, Edgard Blücker, 1975.
- Ionosfera. In: Enciclopédia Barsa. Rio de Janeiro, 1969. V.8, p.52.
- Kirchhoff, V.W.J.H. *Curso de aeronomia básica*, INPE-1403-AMD/02, São José dos Campos, Dez., 1978.
- Ratcliffe, J.A. *Sun, earth and radio; An introduction to the ionosphere and magnetosphere*, New York, Mc Graw-Hill, 1970.
- Rishbeth, H., Garriott, O.K. *Introduction to ionospheric physics*, New York, Academic, 1969.
- Whitten, R.C.; Poppoff, I.G. *Fundamentals of aeronomy*, New York, John Wiley, 1971.