

Princípios Básicos em Espalhamento Incoerente e sua Contribuição para o Estudo da Física da Atmosfera Superior*

Volker W. J. H. KIRCHHOFF

*Instituto de Pesquisas Espaciais** (INPE), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), São José dos Campos SP*

Recebido em 12 de Setembro de 1977

The theory of incoherent scatter is presented from a practical point of view. Considerations on frequency of operation, spectrum, equipment and data analysis are reviewed and their contributions to the study of the upper atmosphere and ionosphere are summarized. The description stresses the physical processes rather than the mathematical treatment and thus should be useful as a guide to those with little experience on the subject.

A teoria do espalhamento incoerente é apresentada sob um ponto de vista prático. Considerações sobre frequência de operação, equipamento, espectro, e análise de dados são revistos, assim com sua contribuição para o estudo da atmosfera superior e ionosfera. Ao invés do tratamento matemático, a descrição dá ênfase aos processos físicos e, portanto, pode ser uma guia útil para aqueles com pouca experiência no assunto.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos sobre espalhamento de ondas eletromagnéticas datam de 1871, quando Lord Rayleigh estudou o caso particular do espalhamento da luz solar pelas moléculas da atmosfera. Em 1906, J.J. Thomson, o des-

* Trabalho parcialmente financiado pela FINEP, contrato 271-CT.

** Caixa Postal 515, 12200 - São José dos Campos SP.

cobridor do elétron, demonstrou também que essa partícula, atuando com um dipolo, é capaz de espalhar energia radiante, com uma secção transversal de espalhamento $\sigma_e \approx 1.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$. Reconheceu-se, a seguir, que o movimento térmico aleatório dos elétrons deveria causar um alargamento Doppler na frequência da onda eletromagnética espalhada. Devido à característica aleatória do movimento dos elétrons, chamou-se o espalhamento de "incoerente", termo que prevalece até hoje, embora investigações teóricas posteriores tenham demonstrado que a presença dos íons, na ionosfera terrestre, introduz no espalhamento um certo grau de coerência, o que tornou o termo "incoerente" pouco apropriado. Outro nome foi por isso sugerido, a saber, espalhamento Thomson, mas talvez o mais correto seja simplesmente *espalhamento de plasma*.

O desenvolvimento de teoria mais completa e exata sobre esse tipo de espalhamento somente ocorreu quando Gordon¹(1958) constatou que a tecnologia da época estava à altura de medir os fracos retornos esperados por espalhamento. Surgiram, assim, os primeiros radares de espalhamento incoerente, com suas características de frequência elevada (i.e., $f_0 > f_0 F_2$), alta potência de transmissão e antenas de alto ganho (para compensar o pequeno valor da secção de espalhamento).

2. CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS

Uma característica geral, em espalhamento, é que este provém de irregularidades (i.e., de elementos espalhantes), cujas dimensões são da ordem do comprimento de onda da radiação. Assim, a frequência mínima de operação (comprimento de onda máximo) é limitado por irregularidades de dimensões características relativamente grandes, como as que ocorrem em "spread F", e que são da ordem de dezenas de metros. O máximo comprimento de onda usado está, portanto, em torno de $\lambda_{\max} = 1 \text{ m}$.

A frequência máxima de operação é limitada pela dimensão característica do plasma (comprimento de Debye), que, em unidades MKS, é dada por $D = 69 (T_e/n)^{1/2}$, onde T_e é a temperatura e n a densidade dos elétrons. Um valor típico de D para a ionosfera é $D = 1 \text{ cm}$. Para $\lambda \ll D$, tem-se o

espalhamento "incoerente", no sentido descrito na Introdução. O espectro resultante seria Gaussiano e, com $\lambda = D = 1$ cm, a potência por unidade de comprimento de onda seria extremamente pequena, e atualmente só poderia ser detectada em plasmas de laboratório com excitadores de elevada potência (lasers). Para fins de exploração ionosférica, portanto, interessa apenas o caso $\lambda > D$ e, para medidas em alturas de até 400 km, o mínimo comprimento de onda usado está em torno de $\lambda_{\min} = 20$ cm.

Para sistemas pulsantes, o comprimento do pulso T (segundos) também é de fundamental importância, pois determina a relação sinal/ruído, e as resoluções de frequência e altura. A largura espectral do pulso emitido deverá ser menor (aproximadamente 1/5) do que a largura espectral introduzida pelo meio espalhante. Isto, por sua vez, limita a resolução em altura, i.e., a faixa de altura Δh sobre a qual o pulso está aplicado, que é dada por

$$\Delta h = cT/2 \geq 9 \times 10^8 / (4\Delta f_i) ,$$

onde c é a velocidade da luz, e Δf_i a largura Doppler do espectro devido à temperatura, T_i , dos íons; para temperaturas $T_i = 2000$ °K, $\Delta h_{\min} = 15$ km. Em geral, portanto, a resolução em altura não é boa. Pode-se diminuir Δh fazendo-se medidas a ângulos zenitais maiores que zero, usando técnicas de auto-correlação, de compressão de pulsos (i.e. códigos de Barker), ou esquemas de pulsos múltiplos. Esse ganho em resolução de altura normalmente implica em muito maior complexidade no processamento do sinal recebido.

Basicamente, o espectro de potência da energia espalhada pelo plasma tem dois componentes: eletrônico e iônico. Vimos que, para $\lambda \ll D$, a energia espalhada é devida inteiramente ao componente eletrônico e o espectro tem formato Gaussiano. Para $\lambda \gg D$, a maior parte da energia é devida ao componente iônico, estando o componente eletrônico concentrado numa faixa estreita, na frequência de plasma do meio, sendo, por isso, chamada de linha de plasma ("plasma resonance line"). O espectro não é mais Gaussiano, tendo a forma característica da Fig.1, e sua largura em comparação com o caso $\lambda \ll D$ é menor pelo fator $(m_i/m_e)^{1/2}$, onde m é massa.

A forma exata do espectro depende da razão T_e/T_i , da composição iônica do plasma, e das colisões com as partículas neutras. Assim é que o espectro fornece informações sobre T_i (através de sua largura), sobre a razão T_e/T_i e a composição (através de sua forma, que é comparada com vários exemplos teóricos, de composição iônica razoável) e velocidade dos íons (através do deslocamento do espectro como um todo, em relação à frequência central), ao passo que a potência total recebida, em função do tempo, fornece o perfil de densidade eletrônica.

A obtenção dos dados é feita através da medida do perfil de potência, o que fornecerá o perfil de densidade eletrônica, e do espectro em função da altura que fornecerá T_i , T_e/T_i , V_i , etc.

O perfil de densidade inicial é obtido tomando-se, repetidamente, uma amostragem na saída do receptor, em intervalos de tempo iguais ao longo da transmissão do pulso, e somando-se as amostras correspondentes ao mesmo intervalo de tempo durante várias varreduras. Com a integração do sinal pode ser da ordem de vários minutos, pode-se ter uma idéia da quantidade de "amostras" que devem ser armazenadas, elevadas ao quadrado, somadas etc. e, daí, a necessidade de se usar um computador durante as medidas. Além disso, o computador também é utilizado para programar a experiência como, por exemplo, comandar o posicionamento da antena, determinar a duração do pulso, o tempo da integração, etc.

O espectro é obtido de uma série de filtros, simetricamente colocados em torno da frequência de operação. Consegue-se, assim, obter um espectro a cada 0.5 milissegundos.

O equipamento básico consta de um transmissor de alta potência (3 MW de potência de pico, 120 kW de potência média, para Millstone Hill) e de um receptor, colocados próximos um ao outro (sistema monostático; nesse caso, a antena é a mesma para transmissão e recepção), ou vários receptores, afastados do transmissor (multi-estático). A antena é, em geral, de superfície parabólica, de diâmetro entre 25 e 300 m

Atualmente, existem seis radares de espalhamento incoerente em operação (um sétimo provavelmente existe na União soviética). Designação e localização são as seguintes:

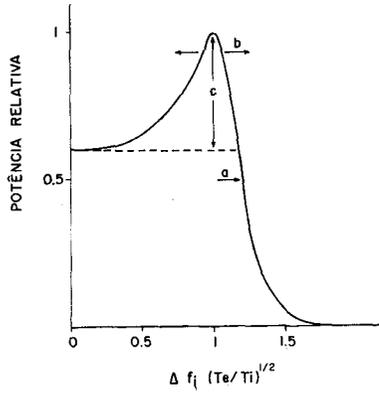


Fig. 1 - Espectro de potência normalizada em frequência, para a determinação de a) T_i , b) T_e/T_i , c) V_i .

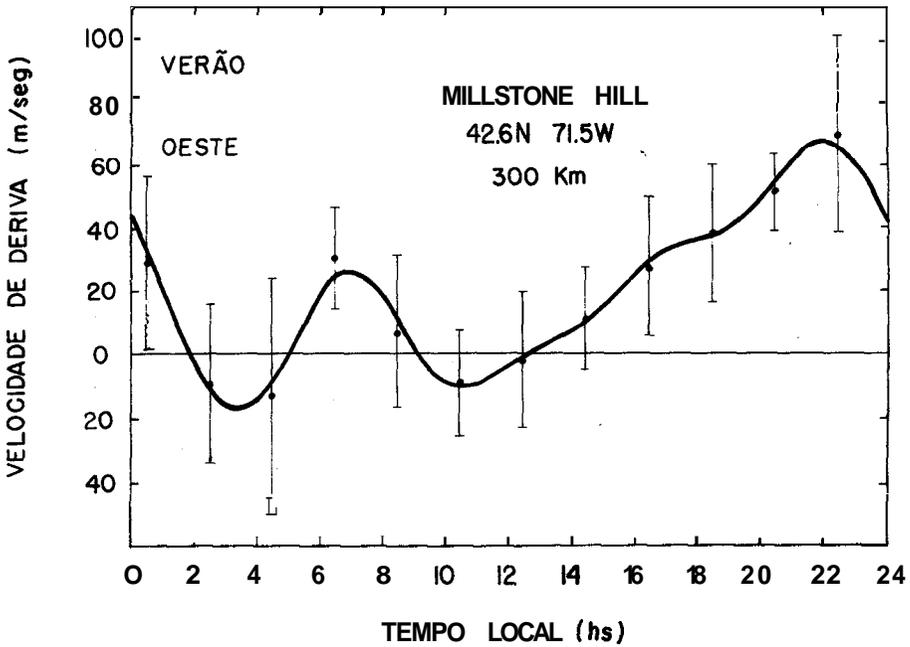


Fig. 2 - Variação diurna da velocidade de deriva, componente leste-oeste.

Millstone Hill nos EUA (42,6 N, 71,5 W), monostático, pulsado;
Chatanika, no Alaska (65,1 N, 147,5 W), monostático, pulsado;
Arecibo, em Porto Rico (18,3 N, 66,7 W), monostático, pulsado;
Malvern, na Inglaterra (52,1 N, 2,3 W), C.W.;
Jicamarca, no Peru (11,9 S, 76,9 W), monostático, pulsado;
St. Santin, na França (44,6 N, 2,2 E) biestático, C.W. .

3. CONTRIBUIÇÃO DA TÉCNICA AO ESTUDO DE PARAMETROS IONOSFERICOS

Dada a variedade de parâmetros ionosféricos que se consegue medir com essa técnica, é de se esperar que muitas foram as contribuições do &todo para estudo da física de atmosfera em geral.

No que se refere à medida da densidade eletrônica, sua contribuição específica foi a determinação do perfil acima do pico da região F, por não ser essa região acessível às ionosondas convencionais. Assim é que o radar de Jicamarca, por transmitir em $\lambda = 6 \text{ m}$ tem realizado medidas de densidade até alturas da ordem do raio terrestre ($\sim 6.000 \text{ km}$).

Medidas de T_e/T_i , e T_i , demonstraram que a falta de equilíbrio térmico, entre íons, elétrons e partículas neutras, é uma característica normal da região F. Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos mostrando que na região F durante o dia, a razão T_e/T_i está geralmente em torno de 2 ou 3 (Evans² et al., 1970).

Medidas de velocidade de deriva representam outra grande área de estudos, onde o espalhamento incoerente se destaca. Devido às características de transporte na região F, a velocidade de deriva está diretamente relacionada com o campo eletrostático aplicado, na região. Parcialmente, comprovou-se assim alguns resultados obtidos da teoria do dínamo. A variação diurna da velocidade de deriva está representada nas Figs. 2 e 3, onde as barras verticais indicam o desvio padrão da série de 11 dias de medidas (Kirchhoff and Carpenter³, 1976) durante atividade magnética moderada. Estudaram-se ainda as complicadas relações entre correntes elétricas, ventos e condutividades na região E (Brekke⁴ et al., 1974; Salah⁵ et al., 1974), variações do campo elétrico com a atividade de magnética, etc.

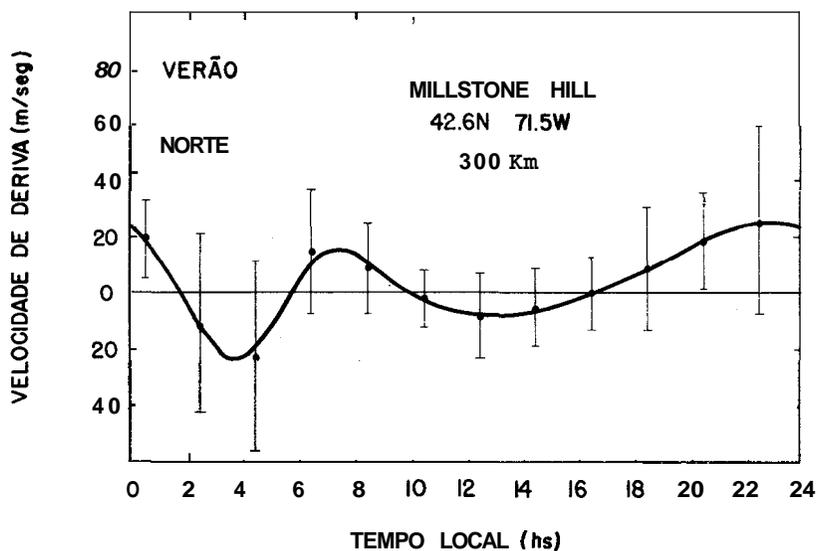


Fig.3 - Variação diurna da velocidade de deriva, componente sul-norte.

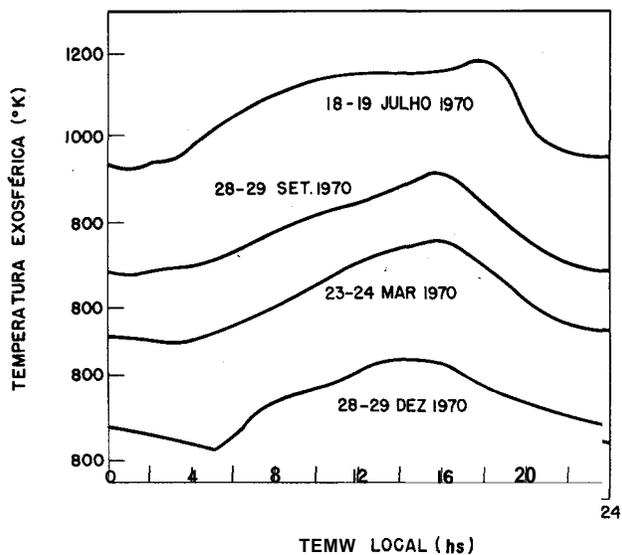


Fig.4 - Variação da temperatura exosférica em Millstone Hill.

4. CONTRIBUIÇÃO DA TÉCNICA PARA O ESTUDO DA ATMOSFERA NEUTRA

Através do espalhamento,, pode-se também obter uma série de parâmetros da atmosfera neutra. Pode-se, por exemplo, calcular a temperatura das partículas neutras, T_n , e, de posse desta, determinar a temperatura exosférica T_∞ , através da relação conhecida

$$T_n = T_\infty - (T_\infty - T_0) \exp [-s(h-h_0)],$$

onde s é o parâmetro correspondente ao inverso da escala de altura (\sim a \hat{r} âmetro de forma), e T_0 a temperatura de referência à altura h_0 .

O processo de obtenção de T_n baseia-se no conceito de equilíbrio térmico e utiliza, acima de 250 km, além de medidas pelo radar de T_e , T , e N modelos teóricos sobre as densidades dos componentes atmosféricos neutros. Os resultados obtidos deram importantes contribuições no que diz respeito à correção e melhoramento dos modelos atmosféricos baseados no fenômeno da frenagem dos satélites artificiais pela atmosfera ("satellite drag").

Para exemplificar, mostramos na Fig.4 a variação diurna da temperatura exosférica, determinada em Millstone Hill por Salah and Evans⁶, 1972. Notemos que o máximo da temperatura ocorre após as 16 hs., de março a setembro, estando próximo das 15 hs. em dezembro (inverno no hemisfério norte).

Outro parâmetro que pode ser deduzido, relativo à atmosfera neutra, a grandes altitudes, é a componente meridional do vento termosférico. Das medidas do radar, utilizam-se os dados relativos a V , N e T . A componente V_V medida na vertical, é a resultante da velocidade de difusão ambipolar, da componente norte-sul perpendicular ao campo magnético (\vec{B}) da velocidade de deriva, e da projeção da componente norte-sul do vento termosférico; este pode, portanto, ser facilmente deduzido. O vento meridional, assim determinado, está indicado na Fig. 5 (Carpenter e Kirchoff⁷, 1975), onde mostramos sua variação diurna e comparamos com resultados de outros autores. Note-se a grande magnitude do vento às 3 hs., dirigido do norte para o sul.

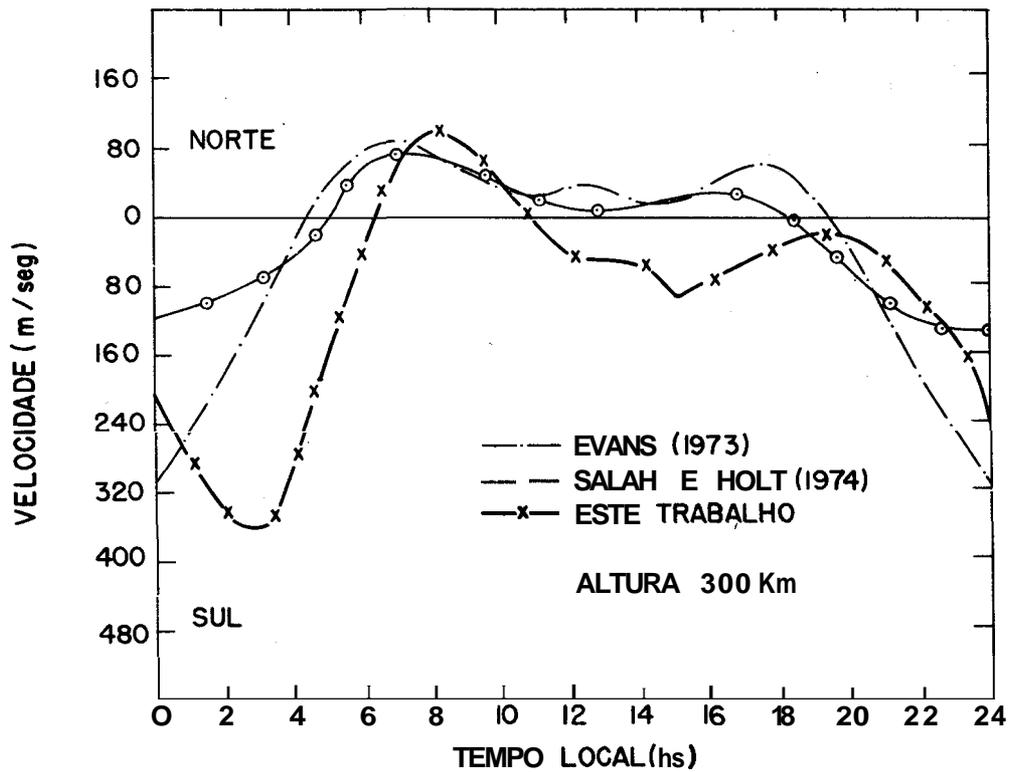


Fig.5 - Variação diurna do vento termosférico, componente sul-norte.

Durante quase todo o período noturno, a direção do vento é do norte para o sul, o que eleva o pico da camada eletrônica para alturas maiores, onde a perda é menor, contribuindo assim para a manutenção noturna de densidades eletrônicas apreciáveis.

A região da baixa atmosfera (100-130 km) é de grande interesse para a aplicação do espalhamento incoerente na determinação de parâmetros neutros. Devido às grandes densidades das partículas neutras, em comparação com as partículas ionizadas, deve-se modificar consideravelmente a técnica de obtenção de dados. Técnicas especiais de emissão de pulsos múltiplos, de curta duração, ou emissão de pulsos codificados, permitem a obtenção de dados com resolução em altura de apenas seiscentos metros. Na Fig. 6 mostramos a variação diurna da temperatura neutra, a várias alturas, e a curva teórica ajustada, com período de 12 hs. (Salah⁸, 1973). Essas medidas deram origem a intensos trabalhos de estudo das marés atmosféricas permitindo, assim, uma comparação com os modelos teóricos (Salah et al.⁹, 1975). Para Millstone Hill, obtém-se a predominância do modo semidiurno^{2,4}, válido para alturas de 100 a 130 km. Ainda na baixa atmosfera, pode-se conseguir medidas da frequência de colisão entre íons e partículas neutras. Assumindo equilíbrio térmico, pode-se converter o resultado para a densidade das partículas neutras. Na Fig. 7 mostramos alguns dados obtidos por Salah⁸ (1973) e sua comparação com modelos teóricos.

5. CONCLUSÕES

A contribuição do espalhamento incoerente para o progresso científico não apenas se limita ao estudo da ionosfera e atmosfera neutra superior, mas abrange vários outros campos como computação e processamento digital de dados, engenharia de transmissores de alta potência, programação, etc. Em todos estes, é grande a produção de artigos científicos, assim como teses de mestrado e de doutoramento. A técnica do espalhamento incoerente é uma das mais férteis no que se refere à obtenção de dados, o que, somado ao fato de vários parâmetros serem medidos simultaneamente, lhe confere um lugar de destaque entre outras técnicas utilizadas.

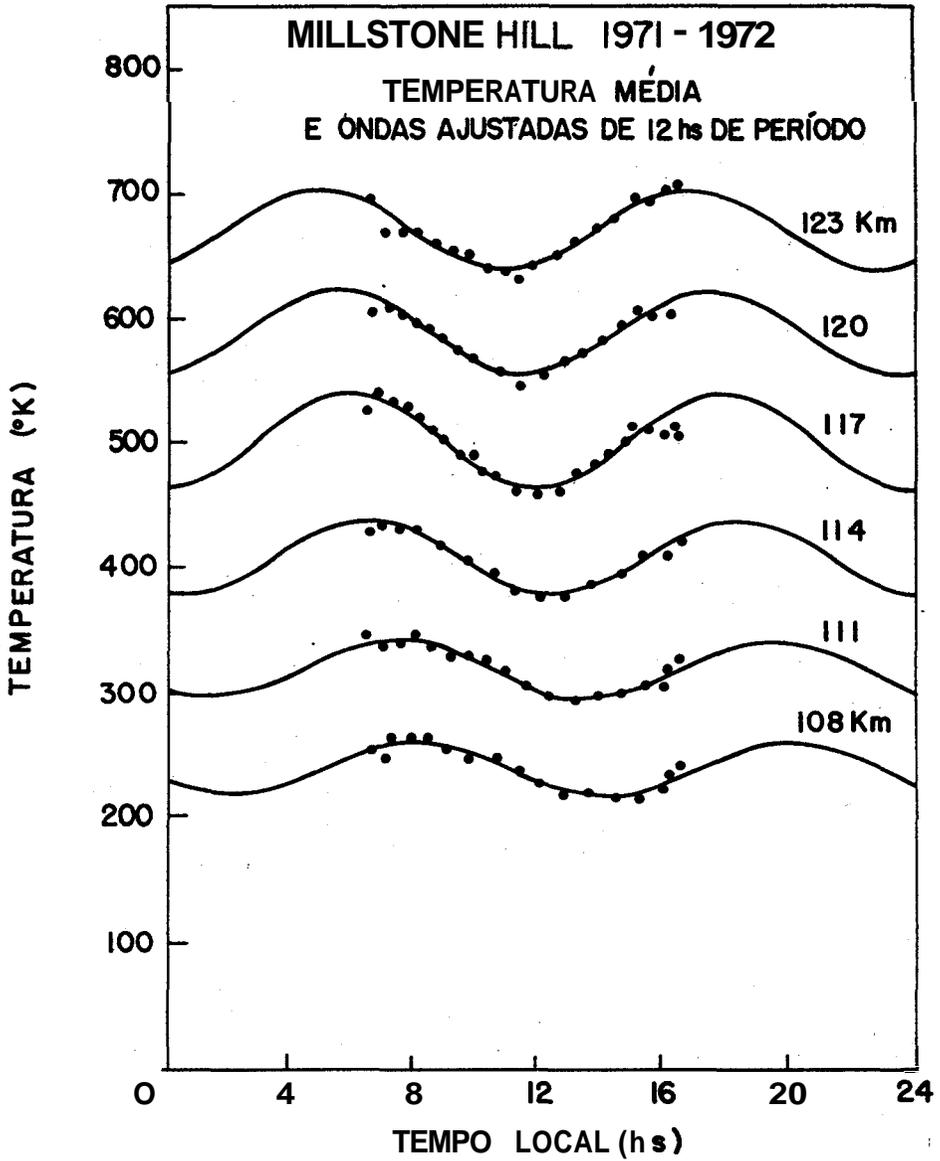


Fig.6 - Variação diurna da temperatura em várias altitudes.

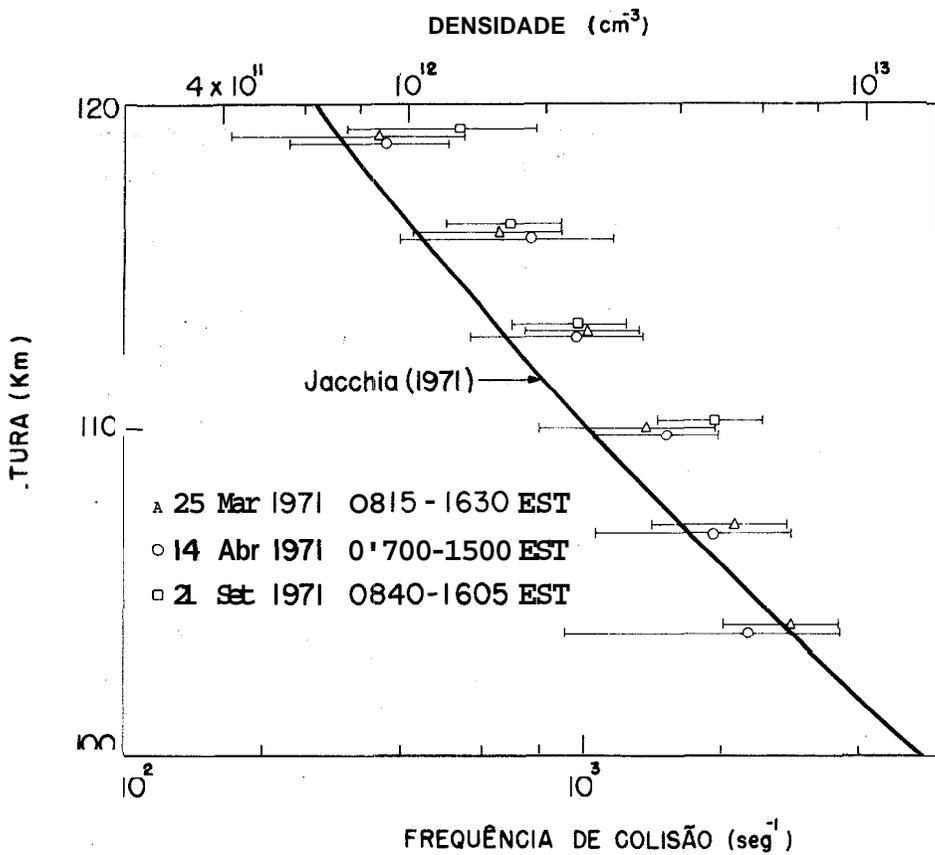


Fig.7 - Valores médios da frequência de colisão durante o dia, e perfis de densidade das partículas neutras.

REFERÊNCIAS

1. WE Gordon, "Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radars", Proc. IRE, 46, 1824-1829 (1958).
2. J.V. Evans, R.F. Julian and WA. Reid, "Incoherent scatter measurements of F-Region density, temperatures and vertical velocity at Millstone Hill", Lincoln Lab. Tech. Report 477 (1970).
3. VW. J.H. Kirchhoff and L.A. Carpenter, "The day-to-day variability in ionospheric electric fields and currents, J. Geophys. Res., 81 (16): 2737-2742 (1976).
4. A. Brekke, J.R. Doupnik and PM. Banks, "Incoherent scatter measurements of E-region conductivities and currents in the auroral zone", J. Geophys. Res. 79, 3773-3790 (1974).
5. J.R. Salah, R.H. Ward and J.M. Holt, "On the generation of daytime electric fields at midlatitudes"; paper presented at AGU, Fall, São Francisco (1974).
6. J.E. Salah and J.V. Evans, "Measurements of Thermospheric temperatures by incoherent scatter radar"; paper presented at the XV Cospar meeting, Spain (1972).
7. L.A. Carpenter and V.W.J.H. Kirchhoff, "Nighttime electric fields and meridional neutral winds at midlatitudes"; *The Pennsylvania State University* (PSU-IRL. IR.49), 1975.
8. J.E. Salah, "Daily oscillations of the midlatitude thermosphere"; paper presented at IAGA, Kyoto, Japan (1973).
9. J.E. Salah, R.H. Ward and J.V. Evans, "Tidal effects in the E-region from incoherent scatter radar observations", Radio Sci. 10, 347-355 (1975).
10. J.V. Evans, "The causes of stormtime increases of the F-layer at midlatitudes", J. Atmosph. Terr. Phys. 35, 593-616 (1973).
11. J.E. Salah and J.M. Holt, "Midlatitude thermospheric wind from incoherent scatter radar and theory", Radio Sci. 9, 301-313 (1974).