Palestra Técnica

RADIOPROPAGACÃO

PY5BSQ – A.H.Cardoso

ARPA – Associação de Radioamadores do Paraná
Setembro/2009

CAPÍTULO I – CARACTERÍSTICAS DO SOL

1. ASPECTOS GERAIS

O Sol nunca deve ser olhado diretamente ou com instrumento a olho nu, pois pode provocar cegueira por queima da retina. O Sol é considerada uma estrela média típica.

Entre os dados conhecidos temos:

- Paralaxe: 8",794
- Distância média 1 UA ou 149.597,893 Km
- Amplitude da oscilação da distância 4.827.000 Km (3%)
- Massa 33.400 Mt ou 1,99 x 10 exp30 Kg
- Diâmetro da fotosfera 109,3 Dt ou 1,39 x 10 exp6 Km
- Densidade média 1,41 g/cm3
- Aceleração da gravidade na superfície 27,9 gt ou 273 m/s2
- Luminosidade 3,8 x 10 exp33 erg/s ou 3,8 x 10exp26Watts
- Magnitude absoluta + 4,7
- Período de rotação equatorial 24d 16h
- Inclinação do eixo em relação ao plano da eclíptica 7°10',5

Do Sol só conseguimos ver a atmosfera, que é dividida em camadas com distintas propriedades físicas: A Fotosfera, a Cromosfera e a Coroa.

a) **A Fotosfera:** é a camada que delimita visualmente o Sol. Sua espessura é de 256 Km aproximadamente e emite toda a radiação solar. Entretanto em seu bojo também ocorrem absorções e reemissões complexas. Veja a tabela 1 abaixo:

Profundidade Km	% de luz emergente	Temperatura K	Pressão atm. 10exp-2	Densidade 10exp-8 g/cm3
0	100	4500	1,0	2,8
137	82	5300	3,8	8,7
256	13	6800	11,2	20,0

Na composição química da fotosfera foram detectadas mais de 60 substâncias através do espectro. Os elementos não detectados são muito raros na Terra de forma que não se poderia esperar que fossem detectadas no Sol, pressupostas a origem comum dos componentes do sistema solar. A maioria dos elementos está na forma atômica, contudo, 18 moléculas foram identificadas nas regiões mais frias, como nas manchas solares.

A massa solar e composta de (60 a 80)% de H e de (96 a 99)% de H + He, o restante é constituído de matéria mais pesada: Ne, O, Ni, C, Mg, Ar, Si, S, Cl, etc.

b) **A Cromosfera:** começa onde a densidade de H ionizado negativamente não produz mais absorção significativa. É uma região transparente á maior parte da radiação e tem uma espessura irregular de uma 2000 Km.

A primeira observação espectral da cromosfera foi feita em 1868, quando se descobriu um gás desconhecido, o Helium, antes de ser identificado na Terra (1895).

A cromosfera é constituída de uma floresta de finos jatos chamados de espículos, o que dificulta sua delimitação mais precisa. O nome deriva do termo grego Cromos (vermelho) devido ao aspecto avermelhado produzido pela raia Ha fortíssima.

Se na base da cromosfera a temperatura é de 4.500K, em sua parte superior chega a 100.000K

c) **A Coroa (Corona):** já era conhecida por Plutarco e por Kepler. Ela emite a metade da luz emitida pela cromosfera ou aproximadamente metade da luz emitida pela Lua Cheia. Ela é transparente para a luz, mas absorve ondas E-M com comprimentos maiores do que 5m.

Portanto, observar o Sol em ondas E-M maiores do que 5m nos dá informação sobre a alta corona. A corona se estende até a Terra, mas é pouco densa e não contribui para a massa solar.

A coroa é dividida em duas, a interna chamada coroa K (Real) e apresenta o espectro solar continuo espalhado pelos elétrons e a coroa externa ou coroa F (Fraunhoffer), que apresenta o mesmo espectro que o Sol (reflexão em partículas).

Além destes espectros contínuos a coroa emite umas 20 linhas brilhantes emitidas por ions da coroa quente aonde o Fe, o Ni e o Ca podem aparecer com perdas de 13 elétrons; só possível com temperaturas da ordem de um milhão de K.

O mecanismo provável de produção destas temperaturas deve estar na dissipação das ondas de choques mecânicos da zona convectiva, A maior parte do ultravioleta extremo do Sol provém da cromosfera e da coroa K.

2) FENOMENOLOGIA DA ATMOSFERA SOLAR

As propriedades do Sol são estatisticamente muito estáveis apesar das grandes variações locais na estrutura fina. A variação anual de fluxo energético é de 3% devido à excentricidade da órbita terrestre.

Entre os eventos estruturais mais finos temos:

a) **A granulação fotosférica** cujas estruturas podem atingir 1000 Km de diâmetro, sendo as menores da ordem de 300 Km. Os grãos são regiões brilhantes limitadas por estreitas faixas mais escuras. Os centros dos grãos são as cabeças de correntes convectívas ascendentes, visíveis através da fotosfera, e a diferença de temperatura entre o centro e a periferia é da ordem de 70K. A velocidade ascendente é da ordem de 3 Km/s e a vida de um grão é da ordem de 8 minutos.

A granulação apresenta superdominios com diâmetros de 300 000 Km. Alem das correntes verticais existem oscilações verticais em regiões com aproximadamente 5.000 Km de diâmetro e com período aproximado de 5 minutos e velocidades de 300m/s

b) **As manchas solares**, visíveis a olho desarmado (devidamente protegido), já eram comentadas por Galileu e já foram submetidas as mais estranhas teorias.

O famoso Herschel, por exemplo, achava que as manchas mostravam que o interior do Sol era mais frio, mas não admitia que seu interior fosse habitado como alguns defendiam.

Hoje sabemos que as manchas não são buracos, mas regiões com temperaturas 1500K menor do que a vizinhança. Sua aparência escura é uma questão de contraste.

A vida média de uma mancha varia entre horas e meses. A maioria desaparece em 24 horas e algumas atingem 1.600 000 Km de diâmetro.

Formam-se em grupos de duas a vinte, mas quase sempre distingue-se um par principal, alinhado Leste-Oeste, sendo a maior a Leste. Movem-se lentamente na superfície.

Na mancha à nível da fotosfera os gases deslocam-se horizontalmente para fora, enquanto na cromosfera o movimento é inverso com velocidades da ordem de 1 Km/s.

Em 1851 Heinrich Swabe descobriu uma periodicidade nas manchas, cujo valor médio hoje é de 11,1 anos. O maior período observado foi de 16 anos e o menor de 8 anos. Na condição de Sol ativo pode-se observar até 100 manchas e na condição de Sol calmo, a ausência.

c) **O campo magnético** terrestre médio é de 0,5 Gauss. O campo magnético solar médio é da ordem de alguns Gauss (fraco para o tamanho do Sol). Contudo, nas manchas a intensidade fica entre (100 e 400)G numa extensão de milhares de quilômetros, persistindo mesmo depois das manchas terem desaparecidas

A mancha Leste é o pólo norte magnético no hemisfério norte do Sol e obviamente a mancha oeste é então o pólo sul magnético. Esta ordem se inverte no hemisfério sul do Sol.

A ordem acima se inverte a cada ciclo de 11 anos, de forma que assim temos um período de 22 anos nestes fenômenos.

Na fotosfera o campo magnético não é dominante como acontece na cromosfera e na coroa, aonde os gases ionizados são guiados pelas linhas de força. Eventualmente a energia cinética dos gases é maior do que a energia do campo local, então o plasma arrasta até a Terra as “linhas de campo” congeladas no plasma (tempestades magnéticas na Terra).

d) **Fáculas** (Flóculos) são regiões brilhantes nas vizinhanças das manchas solares e também são conhecidas como plages (praias). O Ca e o H são dominantemente exitados nestas regiões

e) **Spículos** são finos jatos de gás à 30 Km/s, atingindo 20.000 Km de altura, e se originam nas divisas dos supergrãos. Sua vida média é de 10 minutos e constituem um poderoso transporte de matéria para a coroa

f) **Protuberâncias** (Proeminências) são projeções de gases na coroa com vida média de horas. Protuberâncias quiescentes são projeções estáveis que atingem dezenas de milhares de quilômetros de altura. Protuberâncias eruptivas, mais raras, lançam matéria ao espaço com velocidades de 700 Km/s a alturas de 1.600.000 Km. O retomo da matéria se dá geralmente em forma de arco, indicando que é eletricamente ativa e está presa nas linhas magnéticas.

g) **Fulgores** (Fleres) são brilhos incomuns nas raias do Ca ionizado e do H em pequenas regiões (10.000 Km) na cromosfera. Podem durar minutos a horas. Um flere pode emitir mais U.V. do que toda a superfície do Sol.

Um flere também emite R-X e átomos altamente ionizados com velocidades de 700 Km/s, provocando Rádio-Blackout na Terra. Acontecem alguns por ano nas regiões das manchas solares mais complexas.

3) ROTAÇÃO DO SOL

No equador o Sol gira num período de 24 d e 16 h. Na latitude de 30° o período é de 33 d e nos pólos é de 35d. O sentido de rotação é o mesmo que a da Terra, de Oeste para Leste. O achatamento nos pólos é de apenas 1/10.000.

4) O SOL COMO RÁDIOFONTE

Cada comprimento de onda observado se origina dominantemente numa camada da atmosfera solar. Assim, ondas de 1 cm que emergem da base da cromosfera podem se observadas.

Para comprimentos de onda maiores a coroa é crescentemente opaca (Fig. 1 B)

Os comprimentos de onda de 15m podem, contudo ser observados, pois se originam na alta coroa. Com Sol quieto os sinais de rádio são semelhantes ao do corpo negro.

Podem ocorrer super explosões em rádio por curtos períodos que estão associados à fleres. As demais estrelas, semelhantes ao Sol, têm o mesmo comportamento, contudo não são detectáveis em rádio devido a grande distância.

Rádio-fontes espaciais não tem origem em estrelas vistas como corpos negros mas, tem origem em fenômenos físicos espaciais com alta eficiência de geração de RF como o efeito sincrotrônico que pode ocorrer na transferência de plasma de uma estrela para outra muito próxima em presença de campo magnético.

5) O SOL COMO FONTE DE PARTÍCULAS

O Sol irradia partículas, comumente prótons e elétrons. Esta emissão contínua constitui o vento solar. O Sol ativo emite muito mais partículas e por ocasião de um flere pode ocorrer um super fluxo que chega à Terra um dia após com velocidades supersônicas da ordem de 1.000.000 Km/h.

A Terra está protegida deste bombardeio pelo campo magnético, o qual captura parte dessas partículas, cuja presença é visualizada nas auroras. O fluxo de partículas solares pode comprimir o campo magnético terrestre deformando-o (tempestade magnética).

Prótons com energia maior do que 10 Kev (comprimento de onda associada < 1,2 A°) são raios cósmicos e são a principal fonte de ionização da camada D da ionosfera terrestre

6) ANÁLISE DO ESPECTRO SOLAR

O espectro solar se aproxima do espectro de um corpo negro a 5.000K, com exceção dos extremos (Fig. l A). O (R-X) e a (RF) envolvem mecanismos de emissão nem sempre térmicos e ocorrem em regiões restritas, geralmente com temperaturas mais elevadas do que a temperatura média do Sol na superfície (fotosfera). Se esses extremos forem vistos como emissões térmicas, então a temperatura solar é bem maior

As emissões dos extremos do espectro geralmente ocorrem na cromosfera e na coroa que realmente são mais quentes. Pela figura 1B vemos que a onda de 25 cm tem brilhância máxima associada a superfície do Sol.

Na figura 1A temos o espectro solar em dois segmentos casados no centro: No segmento à esquerda temos o fluxo de fótons no tempo e o comprimento de onda em A° (1 Angstrõm = 10 exp-10 m) enquanto à direita temos o fluxo de potência espectral onde o comprimento de onda é medido em metros. Isto se deve a conveniência de se tratar a radiação curta como fótons e a radiação longa (RF) em potência e comprimento de onda.

Voltamos a ressaltar que o Sol varia muito pouco na região espectral entre 100 A° e 1 cm, ao passar da condição de Sol calmo para Sol ativo, contudo os extremos espectrais variam simultaneamente de forma proporcional e não satisfazem as leis de irradiação do corpo negro.

Entre outros processos estas radiações são produzidas pela aceleração de cargas.

Os fleres podem provocar variações de 10.000 vezes na energia dos R-X, como indica a figura 1A em 10 A°. Esta figura também mostra algumas raias espectrais na região U.V., pois abaixo de 1220 A° o espectro solar é essencialmente descontínuo e a representação gráfica contínua é fruto da integração no intervalo de 50 A°.

O conhecimento mais preciso de certas raias espectrais solares é de suma importância para o estudo do equilíbrio dos gases em nossa atmosfera e ionosfera. Assim, a fotodissociação do O2 se dá pela equações: $O_2 + h\nu(2424)\ (5{,}11\ eV) = O(3p) + O(3p)$ e

$$O_2 + h\nu(1750) = O(3p) + O(1d)$$

enquanto para o ozônio temos

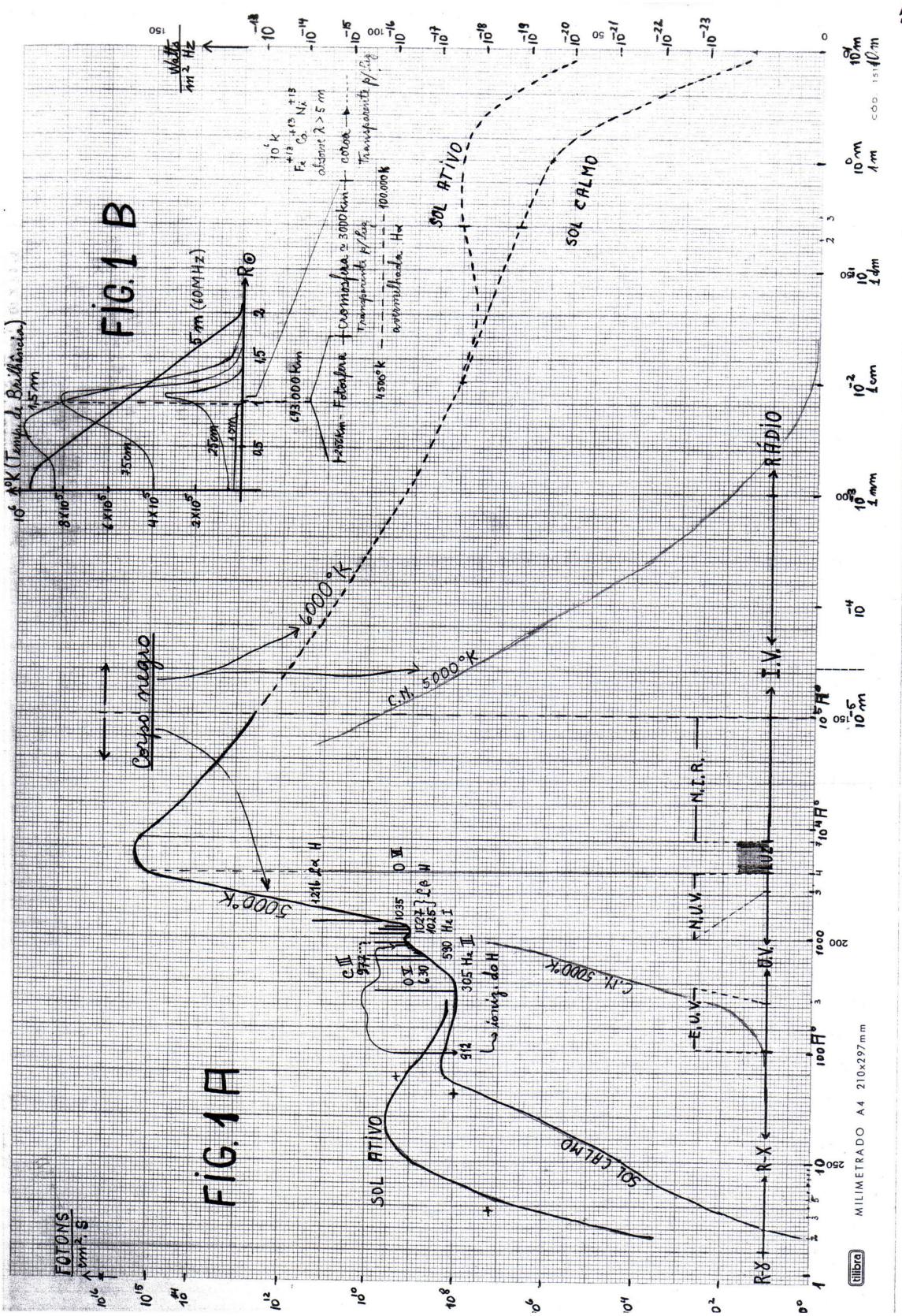
$$O_3 + h\nu(11{,}843)(1{,}05eV) = O_2 + O$$

A foto dissociação não é nosso objetivo direto, mas ela está presente na formação das camadas da ionosfera e faz parte de seu histórico foto-químico, por isto é conveniente citá-la aqui. Por outro lado, a produção do ozônio só ocorre se existe oxigênio atômico presente, assim se não existir O a partir de O2, não existe O3 pela equação.

$$O_2 + O + (catalisador) = O_3$$

Finalizamos alocando algumas linhas extremas. Nas proximidades de 1,9 Aº as raias parecem corresponder às do Fe(XXV), Fe(XXlV) e ao Ca(XX) com fleres presentes.

Entre (5 e 8)A° os fótons provém do Si(XIV). Al(XI), Al(XII) e Na(Xl)


5
FIG. 1 B
FIG. 1 A
SOL ATIVO
SOL CALMO
Corpo negro
6000°K
5000°K
C.N. 5000°K
RÁDIO
I.V.
N.I.R.
N.U.V.
E.U.V.
R-X
R-Y
FOTONS
MILIMETRADO A4 210x297mm

CAPÍTULO II - CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA TERRESTRE

Aeronomia é a ciência que estuda a composição, movimento e equilíbrio térmico das atmosferas planetárias. A figura 2 resume os aspectos básicos da atmosfera terrestre e expõe a nomenclatura usual das regiões com características próprias.

A **troposfera** é a camada atmosférica mais baixa e é a região aonde o gradiente térmico é negativo, ou seja, a temperatura diminui com a altura devido a transferência radiativa vertical do calor produzido junto a superfície terrestre pela radiação solar luminosa e I. V.

Esta camada é o principal objeto de estudo dos meteorologistas.

A tropopausa é a altura em que a temperatura atinge um mínimo e apresenta variações de ~5 Km em função da latitude e das variações de pressão atmosférica.

A **estratosfera** se caracteriza pelo gradiente de temperatura positivo atingindo 270K na estratopausa a 50 Km de altura. A estratosfera tem ventos horizontais e turbulências verticais, sendo a sede da ozonosfera. O ozônio pode ser considerado como um gás estranho minoritário na composição da atmosfera nesta região, e é citado porque ele aí é produzido e mesmo sendo minoritário é muito eficiente em absorver radiações solares menores do que 2900 Aº que são letais à vida.

A absorção de U. V. pela ozonosfera é a principal fonte térmica da estratosfera e mesosfera.

A **mesosfera** inicia na estratopausa e tem novo gradiente térmico negativo, com o maior mínimo da atmosfera a 85 Km. É a região quimicamente mais complexa devido à penetração de U. V. que produz foto-dissociações e recombinações.

A turbopausa limita superiormente a **homosfera**, assim denominada porque até os 100 Km de altura a atmosfera se mantém bastante homogénea quanto à sua massa molecular média (vide figura 3) (<M>).

O conteúdo da homosfera é o seguinte:

Tabela 2

Constituinte	Massa Molecular	Composição volumétrica		Átomo	Razão volumétrica		Molécula	Razão volumétrica
N2	28,02	78,08%		He	5,24 x 10(E-6)		CO2	3,0 x 10(E-4)
O2	32,01	20,95%		Ne	1,82 x 10(E-5)		H2O	10(E-2)-10(E-3)
Ar	39,96	0,93%		Ar	9,34 x 10(E-3)		CH4	1,5 x 10(E-4)
CO2	44,02	0,03%		Kr	1,14 x 10(E-6)		N2O	2,5 x 10(E-7)
Total	<28,97>	100,00%		Xe	8,70 x 10(E-8)		H2	5,0 x 10(E-7)
							O3	10(E-7)
							CO	10(E-7)
							NO2	10(E-9)

A **termosfera** é caracterizada por um novo gradiente térmico positivo e a fonte térmica é a radiação U. V. mais curta que aí é absorvida em foto-dissociações e foto-ionizacões.

Chegamos ao centro da ionosfera, um vasto e complexo campo de estudo e experimentação. Formada por quatro camadas clássicas (D, E, F1 e F2) e mais uma eventual a E esporádica. A ionosfera pode estender-se dos 50 aos 600 quilômetros de altura.

A termopausa é a fronteira que define o fim do gradiente térmico, acima da qual a temperatura não varia mais significativamente devido a eficientes mecanismos de condução do calor. Assim na **Exosfera** as partículas rarefeitas e parcialmente ionizadas e "quentes" deslocam-se com grandes velocidades e percorrem grandes distâncias (mais de 100 Km) antes de colidirem espalhando a energia e homogeneizando a temperatura.

Na **heterosfera** dominam os processos de fotodissociação, de difusão e a procura do equilíbrio hidrostático em função da densidade de cada gás, o que nunca é atingido, devido a contínua difusão fotodissociação e recombinaçâo. A figura 3 mostra a distribuição diurna de íons e alguns outros dados em função da altura.

No intervalo entre 85 e 150 Km de altura, coincidindo com as camadas da ionosfera E e F1, temos uma região aonde ocorrem muitas reações químicas e por isto é também chamada de **quimiosfera**. Agora, comparando as figuras 2 e 3, já podemos visualizar a camada E da ionosfera como formada principalmente pelos íons O2+ e NO+ e a camada F pelos íons NO+ e O+ e respectiva nuvem eletrônica.

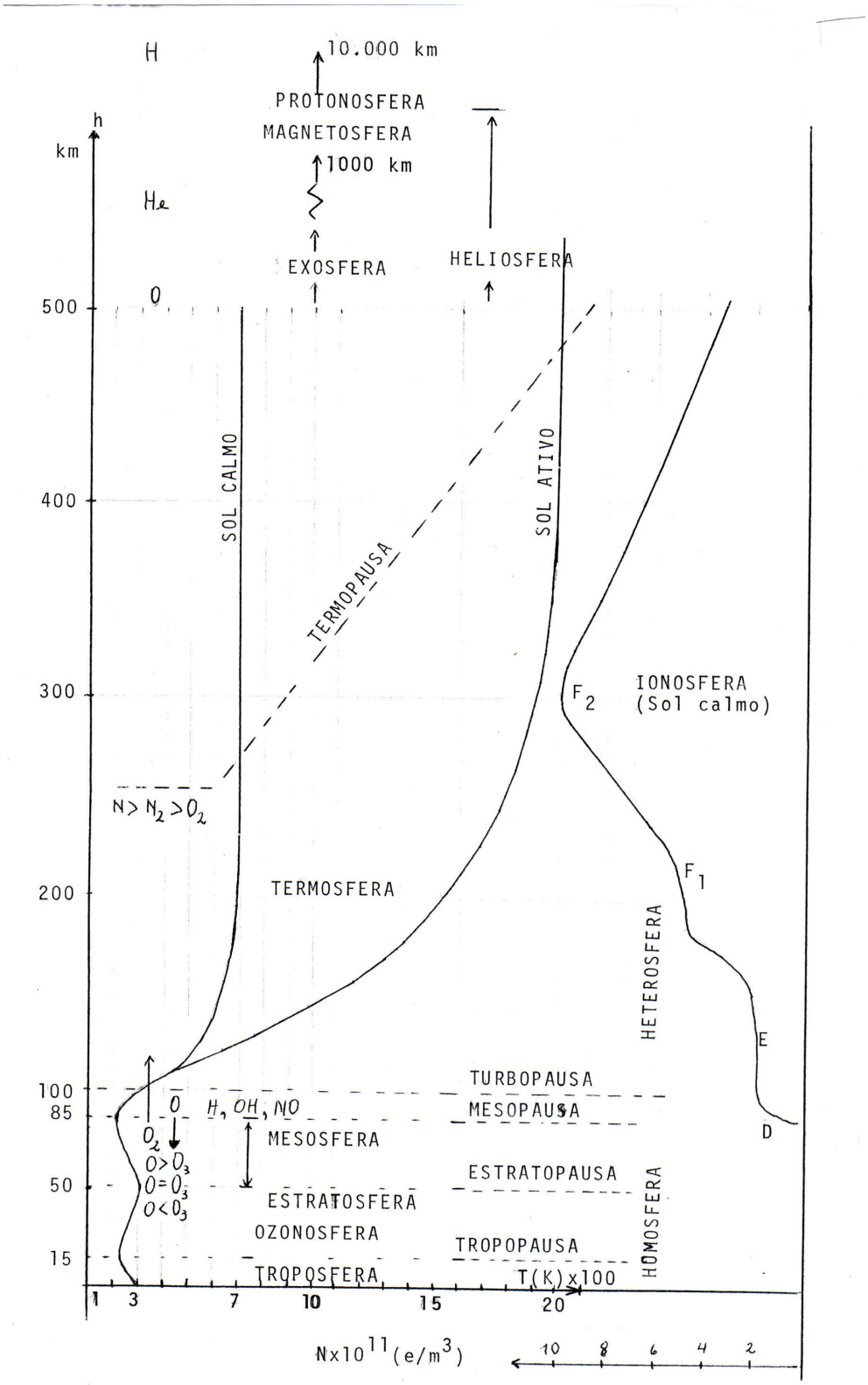

H
10.000 km
PROTONOSFERA
MAGNETOSFERA
1000 km
h
km
He
EXOSFERA
HELIOSFERA
O
500
400
300
200
100
85
50
15
SOL CALMO
SOL ATIVO
TERMOPAUSA
F2
IONOSFERA
(Sol calmo)
N > N2 > O2
TERMOSFERA
F1
HETEROSFERA
E
D
TURBOPAUSA
O
H, OH, NO
MESOPAUSA
O2
O > O3
O = O3
O < O3
MESOSFERA
ESTRATOPAUSA
ESTRATOSFERA
OZONOSFERA
HOMOSFERA
TROPOPAUSA
TROPOSFERA
T(K) x100
1
3
7
10
15
20
Nx10^11 (e/m^3)
10
8
6
4
2

FIG. 2

massa molar em função da altura.
Distribuição diurna de ions. 8

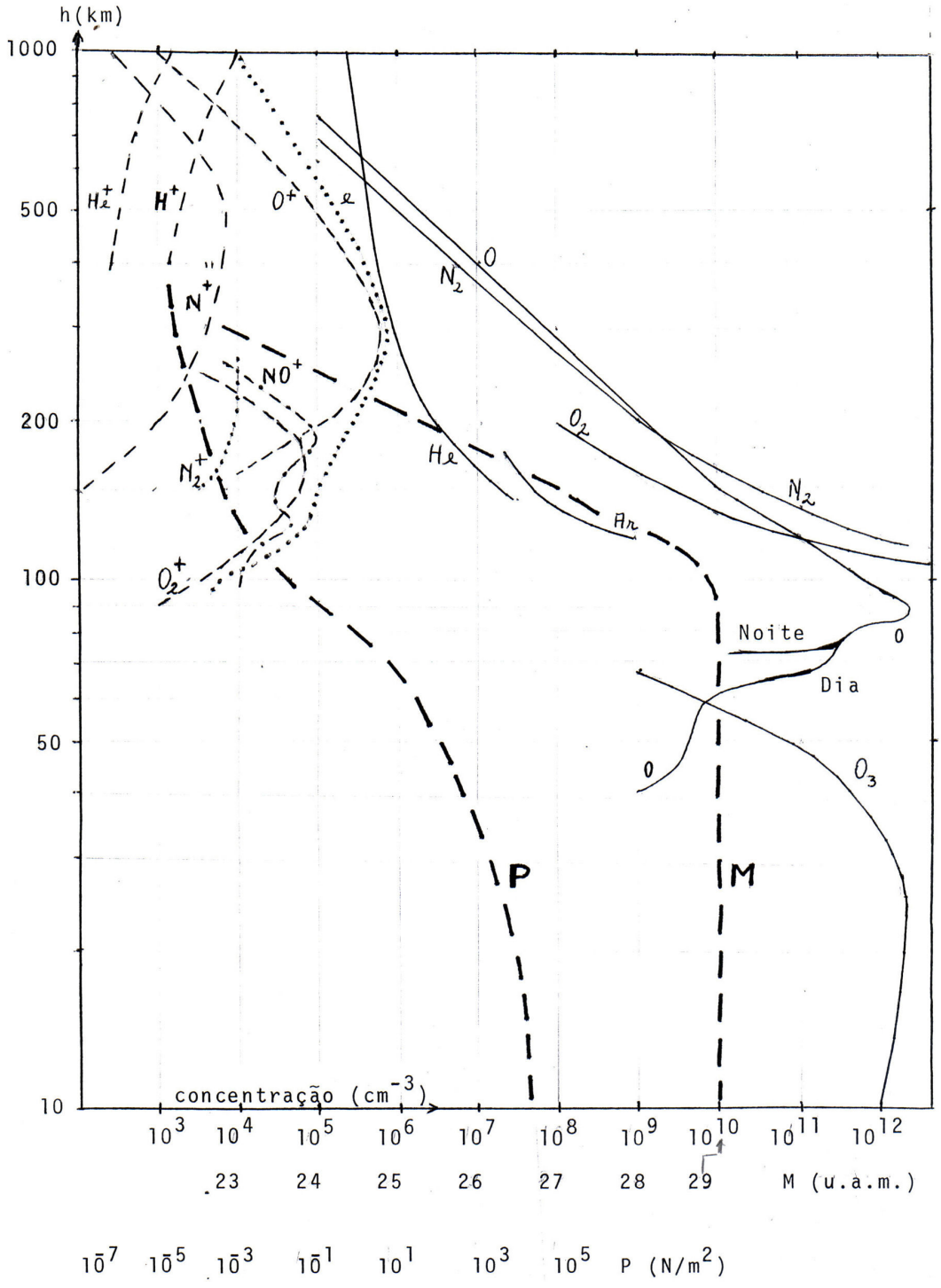


Fig 3

CAPÍTULO III - A FORMAÇÃO DA IONOSFERA

1) A Formação de uma camada iônica.

Pela figura 3 vemos que o íon NO+ é o mais significativo na região E e F1 apesar de ser uma molécula minoritária. É minoritária porque na tabela 2 a molécula NO2, do qual se origina por fotodissociação, é minoritária. Portanto deve ficar claro que, não é só o gás mais presente, nem a maior molécula, nem a mais pesada que contribui dominantemente para a formação de uma camada iônica. O mecanismo é mais sutil porque depende também da presença da radiação solar ionizante adequada.

Assim, a formação de uma camada iônica clássica em certa altura depende: da altura (densidade), da composição química (fotodissociações, recombinações, reações, difusões), da radiação solar e da taxa de recombinação ion-elétron.

Além destes fenômenos podem ocorrer na termosfera ionizações por colisões entre partículas de alta energia (solares ou não) com a atmosfera neutra e à noite, na camada E, ocorre a formação de íons negativos pela agregação de elétrons às moléculas.

É possível equacionar uma camada iônica numa situação ideal com um gás (j) e uma radiação monocromática (L) que tem o aspecto: (Camada de Chapman)

Oj = nj(L). Nj. Jj(L). e(Exp-U(L)) (Equação 1), onde

(Q) é o número de elétrons, (n) a secção transversal da molécula j, (N) a concentração da molécula j, (J) o coeficiente de ionização da molécula j, (e) é a constante 2,72 e (U) é a profundidade ótica da radiação (L).

U por sua vez, depende do ângulo de incidência solar (X), da altura (z) medida em termos da escala de altura (H) e (A) secção transversal de absorção do gás (j) pela radiação de comprimento de onda (L).

U(L) =Nj . Hj . Aj(L) . sec X (Equação 2)

A ionosfera real poderia ser obtida somando todas as camadas de Chapman de todos os gases e de todas as radiações solares, entretanto ainda assim, não estariam incluídos o campo magnético, os ventos, os campos elétricos e a ionização por colisões.

Por isto confiamos mais nos dados experimentais que hoje são confortavelmente obtidos com balões, foguetes e satélites. A figura 3 mostra dados experimentais diurnos para um certo dia, hora e latitude. A concentração do Oxigênio atômico termina em dois ramos, mostrando valores diurnos e noturnos.

As camadas D, E e F1 são camadas de Chapman para um ou mais processos dominantes de ionização e neutralização.

2) A formação da camada D

A camada D é a mais espessa e a mais complicada quimicamente falando. Ela se estende entre 50 km e 90 km.

Sua ionização é bem mais fraca do que a das camadas E e F e provem durante o dia de principalmente três fontes: Dos R-X extremos (1 a 10)A°, da radiação La (1216 A°) sobre o NO(10exp7/cm3) e dos raios cósmicos em latitudes maiores do que 65°.

Uma quarta fonte não desprezível é o intervalo de radiação entre 10 e 100A° quando o Sol se torna ativo (veja fig. 1A). A figura.4 mostra nas linhas contínuas a produção iônica com a variação da atividade solar. As linhas tracejadas mostram três outras situações isoladas independentes.

Ressaltamos aqui que a radiação La dissocia o O2 e por isto é fortemente absorvida acima dos 90 km, mas ainda sobra para ionizar o NO abaixo dos 90 km.

A presença de NO abaixo dos 90 km não se deve tanto a fotodissociação, mas às colisões. O limite superior da camada D em 85 km é bem definido com a presença de O2+(Lβ 1027A° e Ciii 977A°) e N2+(716Aº à 1027A°).

À noite a ionização da camada D é menor e é comum encontrar moléculas pesadas ionizadas: H3O+, H5O+, NO3-, CO4-, HCO3-, etc.

Os íons negativos são rapidamente destruídos com os primeiros raios solares do amanhecer. É fácil entender que a ionização noturna D é mais fraca do que a diurna.

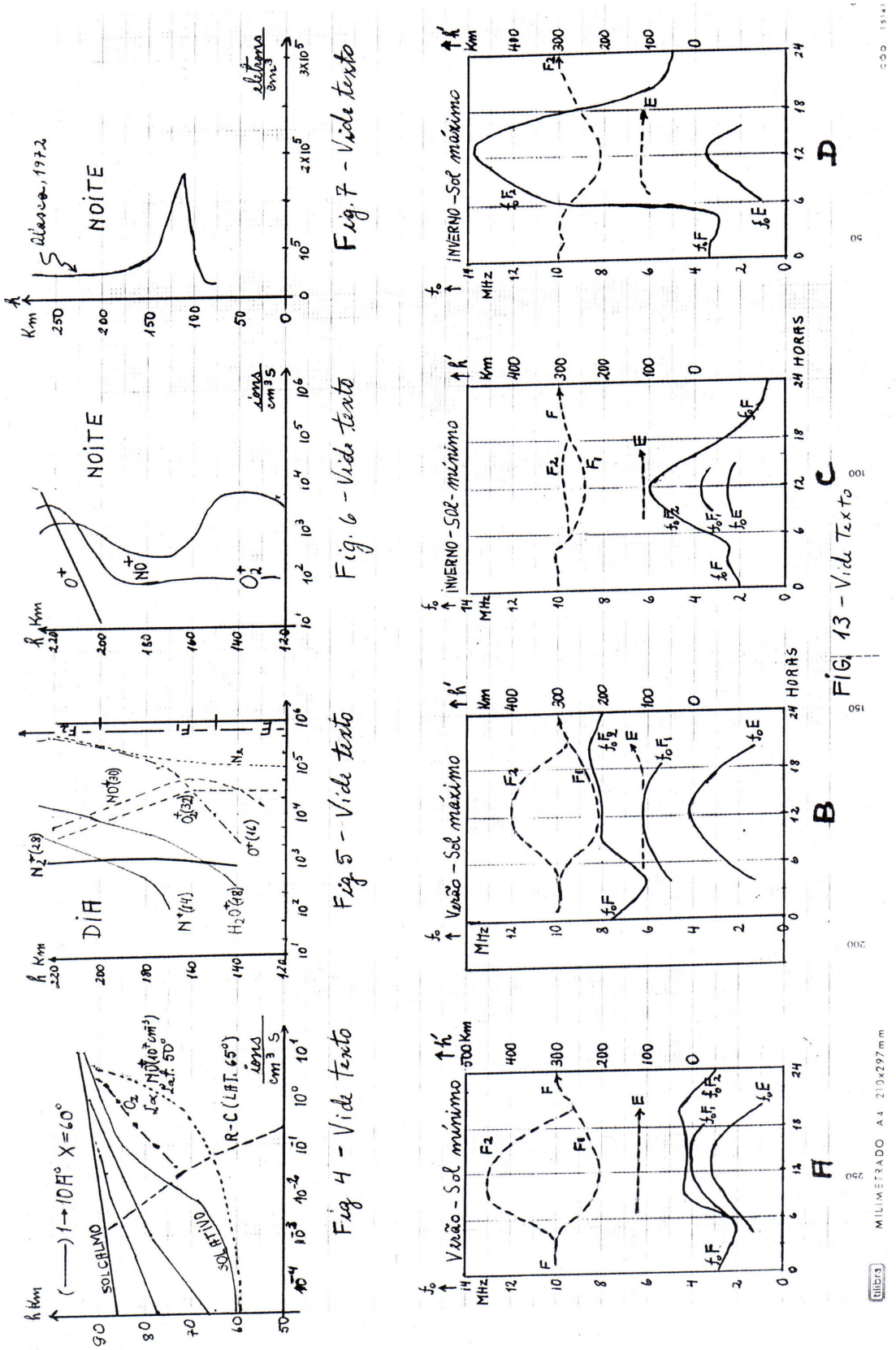


Fig. 4 - Vide texto

Fig 5 - Vide texto

Fig. 6 - Vide texto

Fig. 7 - Vide texto

FIG. 13 - Vide Texto

3) A formação das camadas E e F

A camada E apresenta a ionização máxima entre 100 e 150 quilômetros de altura e sua composição iônica é semelhante à camada F1, cujo pico pode estar entre 150 e 200 quilômetros. O componente principal da camada E é o O2+(31 à 100A° e Lβ 1026 A°) , enquanto na camada F1 os componentes principais são o NO+ e O+ , mesmo sendo minoritários na atmosfera neutra.

A figura 5 mostra as características básicas medidas no Novo México em 15/02/1963 às 9:30h , X= 60°. Ela deve ser vista como um modelo que pode variar com a latitude, campo magnético e atividade solar.

Se a radiação solar Lα(1216 A°) , que é forte, está presente na camada D, então também nas camadas E e F1 que também ai ionizam o NO.

As radiações entre 400 e 700 A° são as que são mais absorvidas acima dos 160 Km e contribuem assim para o aquecimento desta região e para a ionização do N2 (796 A°).

A camada F2, geralmente acima dos 200 Km, costuma apresentar um pico entre 300 e 500 Km tem forte contribuição do O+ (911 A°), mas não é considerada uma camada de Chapman porque outros processos estão envolvidos em sua formação, principalmente a difusão vertical.

4) A ionosfera noturna

À noite as camadas Fl e F2 se unem na camada F.

A manutenção de uma ionosfera noturna é feita por vários processos em que o Sol continua sendo o agente principal. A existência de ionosfera noturna deve-se pelos (a) processos de transporte, (b) pela constante de tempo de recombinacão na periferia do amanhecer e anoitecer e pela ressonância do H na exosfera.

O fluxo de Lα noturno computado é de ordem de 10exp9 fótons/cm2.s, o de Lβ é de 7 x 10exp6 fótons/cm2.s e o de Heiii (304 A°) são de 10exp9 fótons/cm2.s .

Este último produz um pico de produção iônica em 140 Km (camada F) e o Lβ um pico em 115 Km (camada E). No período noturno a ionização por raios cósmicos e outras partículas solares ou não, passam a ser fontes importantes de ionização em latitudes crescentes. Nas regiões aurorais, com uma pequena precipitação de partículas, o constituinte importante NO (10exp6/cm3) se ioniza dominantemente por colisões.

A figura 6 mostra o perfil de alguns íons noturnos também no Novo México.

A figura 7 mostra o perfil da camada E para o Alasca em 14/02/1972.

A figura 8 mostra três perfis de densidades eletrônicas noturnas para três condições de atividade magnética (dadas pelos índices Kp). Entre 95 e 105 Km as variações são desprezíveis.

5) Camadas E esporádicas (Es)

A camada Es não é uma camada de Chapman, ocorre a uns 100 Km de altura e apresenta uma espessura de apenas uns 2 Km. Ocorre com maior freqüência próximo do equador durante o dia e próximo dos pólos durante a noite.

Em latitudes médias pode ocorrer de dia e de noite, com um máximo durante o verão. Cachoeira Paulista-SP apresenta um pico de aparecimento às 6:00 h e outro às 16:00 h.

Sua aparição se deve a ventos estratificados contíguos e em sentidos opostos na presença de campo magnético e alguma precipitação de partículas.

Um plasma é caracterizado por vários parâmetros: Temperatura, pressão, densidade, freqüência de colisões e pela freqüência do plasma. Se o plasma tiver mais constituintes (sempre tem no mínimo dois), então tem várias freqüências.

$(Wp)^2 = (2 \pi fp)^2 = N. q^2 / Єo.m$ (2) ou para détrons

$fp = 8,98 . 10exp-3 . (N)$ (3) ou

$N = 1,24 . 10exp4 . (fp)^2$ (4) onde

Wp é a girofrequência do plasma

fp a freqüência do plasma

(N) a concentração em partículas/cm²

(q) a carga da partícula (para o elétron 1.6 x 10exp-19 C)

(m) a massa da partícula (para o elétron 9,1 x 10exp-31 Kg)

(Єo) a constante dielétrica do meio (8,85 x 10exp-12) Farad/m.

A freqüência crítica (fc) da camada Es está entre 2 e 4 MHz podendo ir a 6 ou 7 MHz e excepcionalmente a 12 MHz e representa a freqüência mais alta que um plasma pode refletir. A freqüência de blanketing fb é a freqüência em que a camada iônica começa a se tornar transparente apesar de ainda refletir (fig. 10).

A Es pode coincidir em altura com a camada E, o que dificulta sua identificação com uma ionosonda.

Pela equação (2) vemos que a fp é inversamente proporcional à massa da partícula (m). Assim, sendo os íons mais massudos apresentam freqüências fp bem menores do que a dos elétrons.

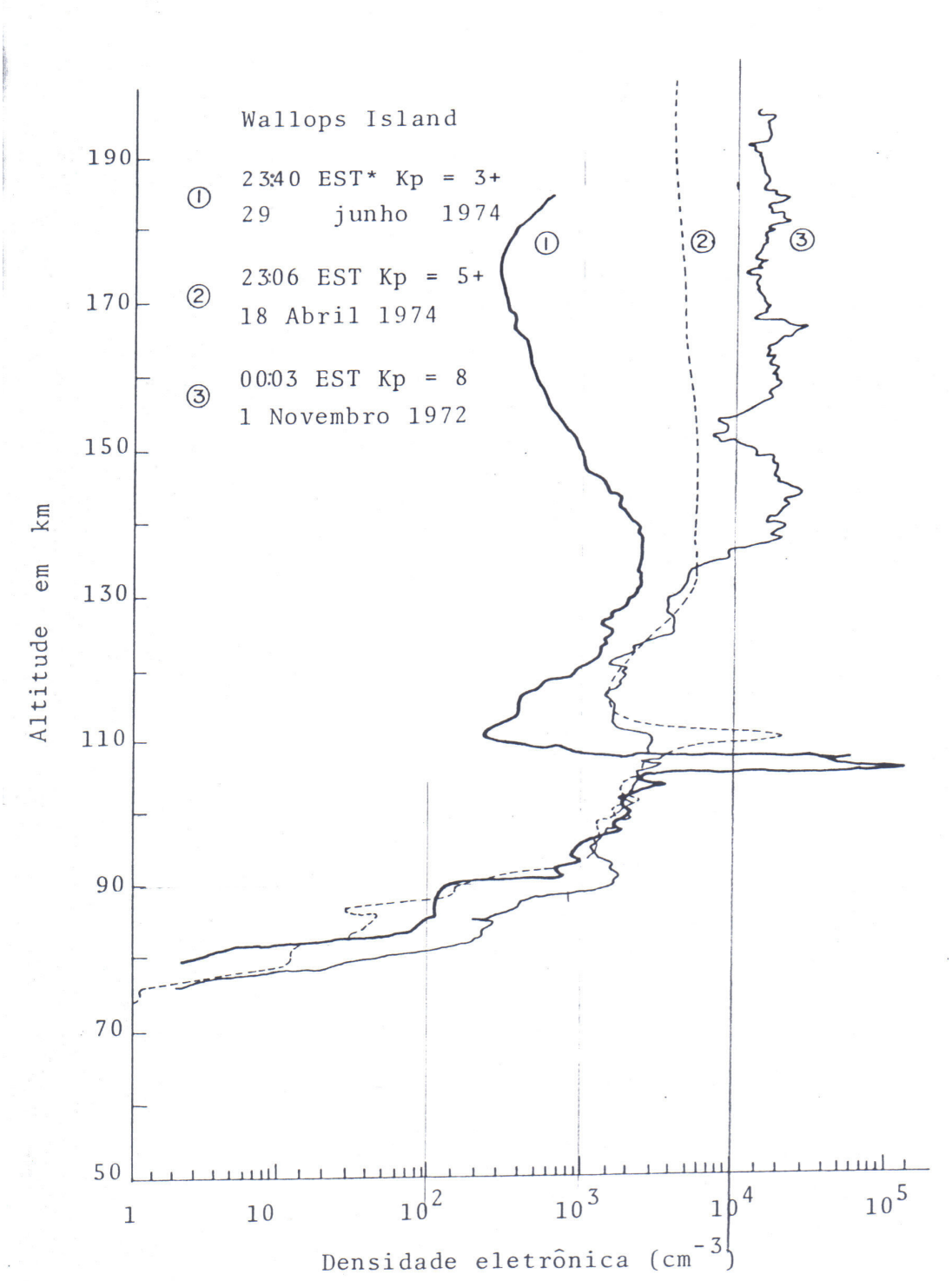


FIG 8 – Densidade eletrônica para três diferentes valores de Kp com respeito a Wallops Island (EST – Eastern Standard Time, é o tempo local de Wallops Island)

6) A Ionosonda (Radar ionosférico)

A ionosonda é um equipamento constituído de um transmissor e um receptor acoplados entre si. O transmissor de largo espectro (300 kHz a 30 MHz) emite pulsos de curta duração e o receptor é ativado depois de cada pulso para receber o eco, numa seqüência em que cada pulso a freqüência de transmissão é aumentada de certo valor. A intensidade do sinal recebido é apresentada na tela de um tubo de raios catódicos de forma que quanto maior o atraso do sinal, maior é a altura ou a distância de reflexão. A figura assim obtida é um perfil completo da ionosfera e é conhecida como ionograma. A cópia do ionograma é obtida mediante um equipamento fotográfico.

A ionosonda pode ser usada de três maneiras:

a) **Na sondagem vertical**, que tem um interesse mais científico e pode dispensar o relógio atômico (dispendioso);

b) **Na sondagem oblíqua**, em que o transmissor e receptor estão fisicamente separados e acoplados por dois relógios atômicos sincronizados. Este processo dá informações completas a respeito das condições de propagação entre dois pontos;

c) **Na sondagem oblíqua usando o retro-espalhamento da superfície terrestre**, que assim inclui a reflexo terrestre e exige mais cuidados na interpretação dos resultados.

A freqüência mais alta de um traço do ionograma é a freqüência critica ou freqüência do plasma de elétrons. Portanto vemos aqui através da equação (4) que, conhecida a freqüência de plasma no ionograma, temos diretamente a concentração de elétrons e vice-versa na equação (3).

Eis um exemplo do valor de um pouco de teoria.

As figuras 9 e 10 mostram ionogramas obtidos pela ionosonda de Gaspar-SC às 07:00 h e às 20:00 h indicando um comportamento típico de ionosfera noturna pela presença da camada F e não F1 e F2. Por outro lado, na figura 10 a camada E está ausente e em seu lugar vemos apenas a camada Es. A figura 11 esquematiza as camadas iônicas e as respectivas freqüências críticas fo para a freqüência crítica da onda ordinária e fx para a freqüência crítica da onda extraordinária.

A presença do duplo traço nos ionogramas das figuras 9.10 e 11 se devem a presença do campo magnético terrestre na ionosfera. O duplo traço significa que ao incidir uma onda num plasma com campo magnético (onda ordinária), este reflete duas ondas, a onda ordinária e a onda extraordinária. A onda extraordinária é formada a partir do movimento dos elétrons criado pela onda ordinária.

7) Interpretação dos ionogramas

Nas figuras 9, 10,11 e 12 temos ionogramas. No eixo vertical as alturas são virtuais, ou seja, não correspondem à realidade física. Isto porque num plasma a velocidade de propagação da onda é menor do que a do vácuo (ou do ar) e assim o tempo de retorno é maior dando como resultado alturas artificialmente maiores.

A onda ordinária ao incidir num plasma fica sujeita à refração que pode provocar uma reflexão se o gradiente de concentração eletrônica com a altura for suficientemente alto e se a freqüência incidente igualar a freqüência de plasma.

$W = WP$ ou $f = fp$ ..... (c)

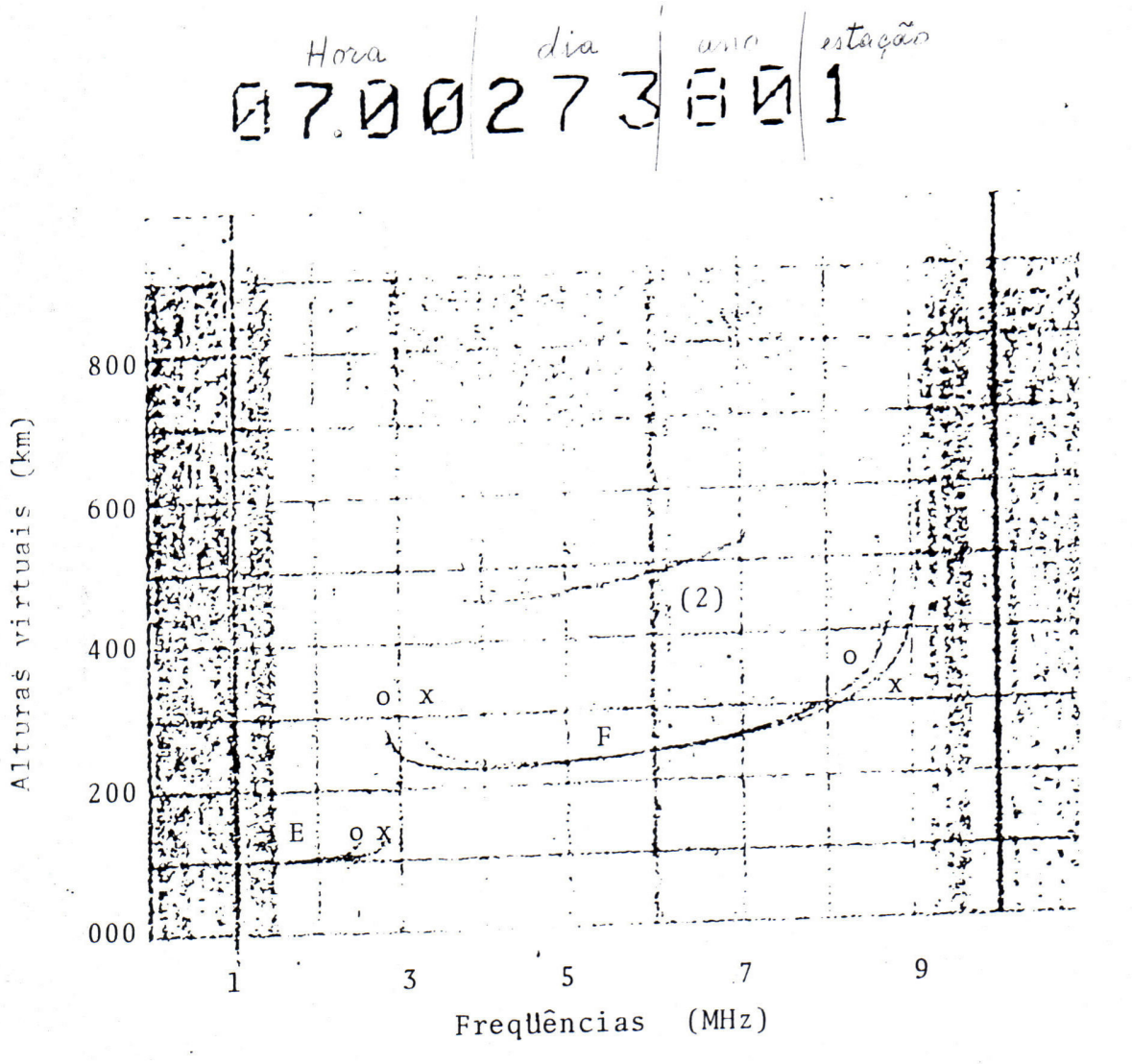


FIG. 9 Fotocópia de um ionograma obtido da ionosonda localizada na região pesquisada em questão. Acrescentamos sobre o mesmo as seguintes indicações:

o = raio ordinário

x = raio extraordinário

(2) = segundo eco

E e F são as camadas da ionosfera localizadas as sete horas aproximadamente a cem (100) km e 240 km, respectivamente, em termos de alturas virtuais.

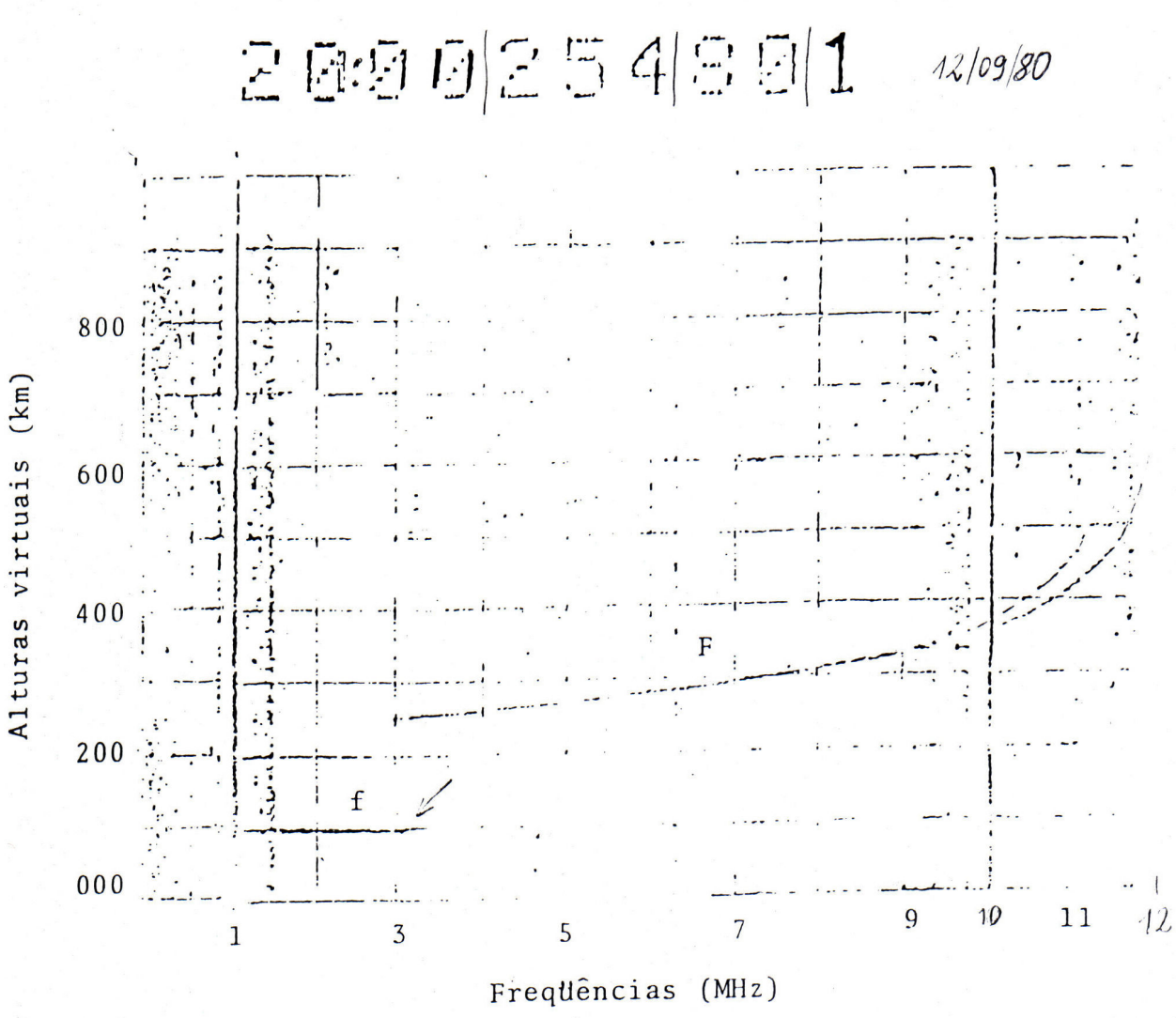


FIG. 10 – Camada esporádica do tipo (f) com: fbEs = 2,9MHz, h´Es = 95Km.

Acima da camada esporádica do tipo (f) , à direita, vemos o registro referente a camada (F)

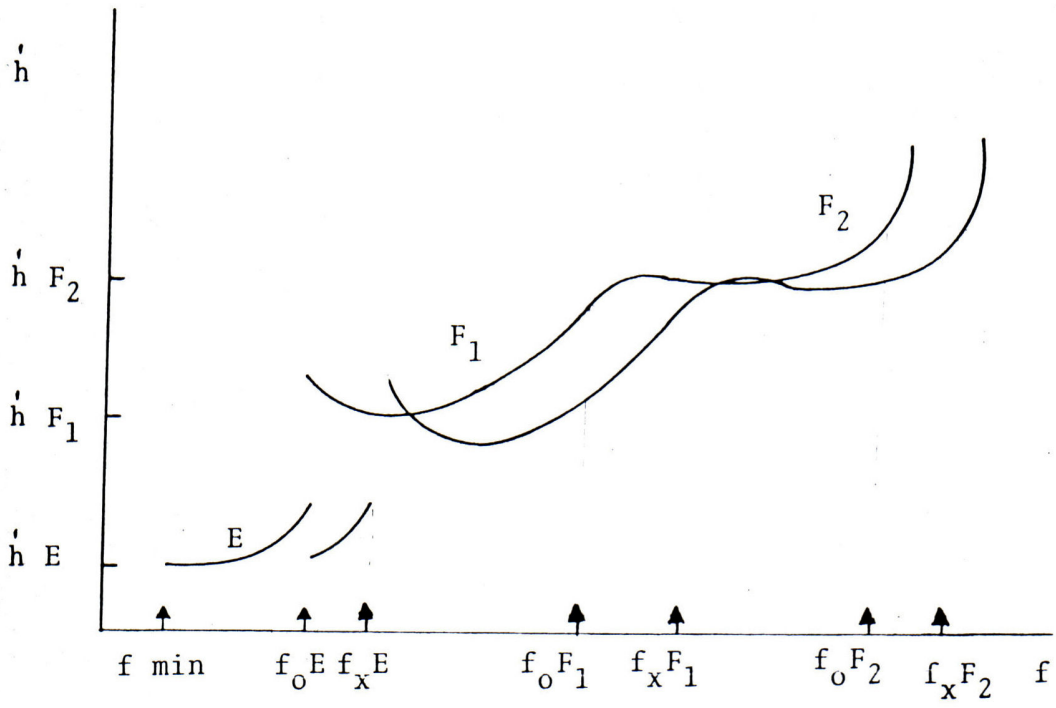


FIG. 11 - Alturas virtuais e freqüências críticas.

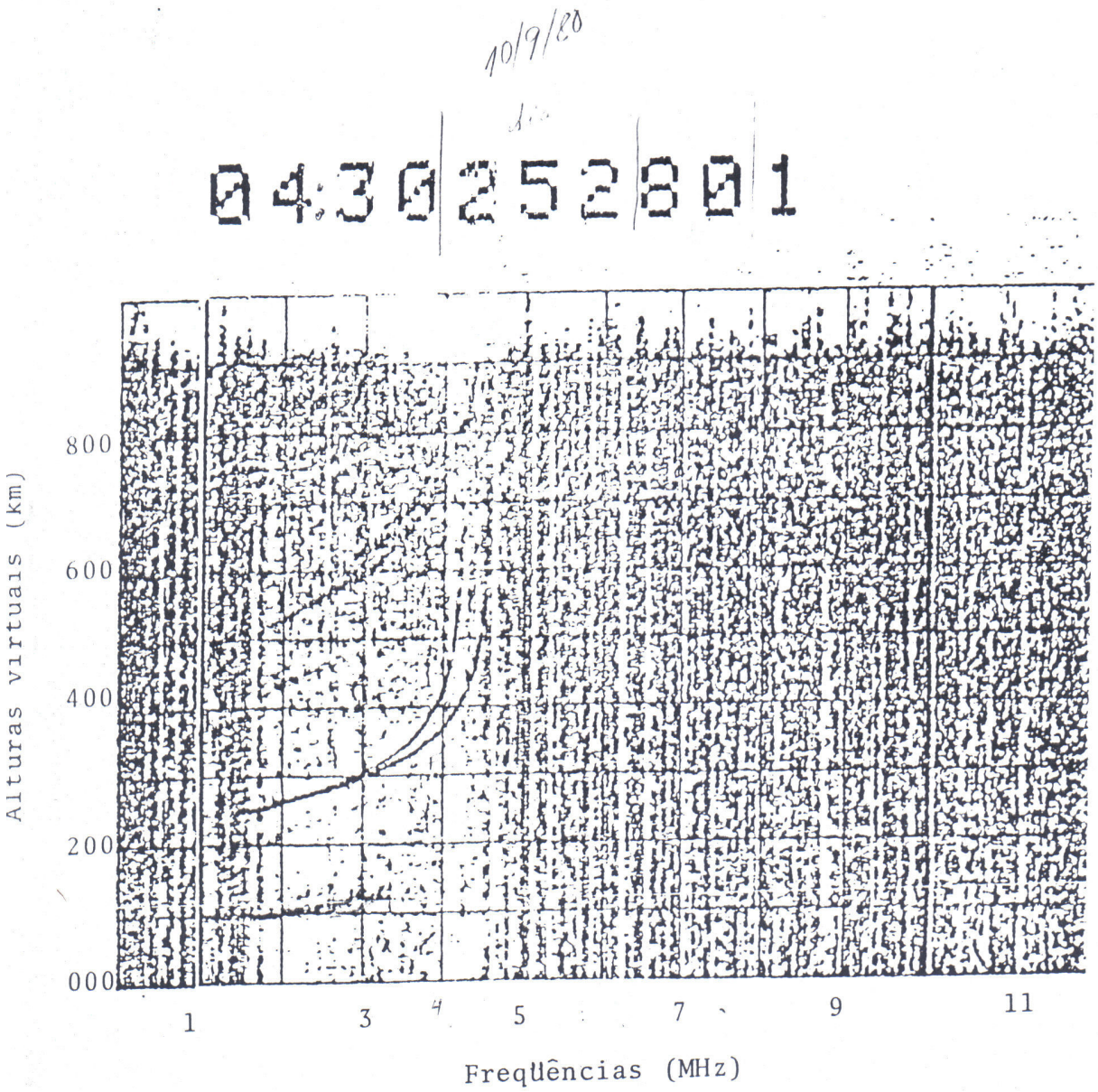


FIG. 12 – Camada esporádica do tipo (r) com: foEs = 3,1MHz, h'Es = 93Km

Acima da camada esporádica do tipo (r) observa-se o primeiro eco e segundo eco referentes a camada (F)

O índice de refração representado por n é uma função complicada e depende:

- Da freqüência da onda incidente $W = 2.\pi.f$ (5)
- Da freqüência do plasma $(Wp)^2 = (2.\pi.fp) = (N . e^2 / Єo.m)$ (6)
- Da freqüência de colisões v pela relação $z = v / W$ (7)
- Do campo magnético terrestre $Bo = \mu o.H$ (8)
- Do ângulo entre a onda e o campo θ e
- Da carga do elétron e de sua massa m, onde ainda, μo é a permeabilidade magnética do vácuo, H o vetor intensidade de campo magnético e Єo a permissividade elétrica.

Além destas grandezas, para compactar a fórmula, são usadas as expressões:

$YT = Y \text{ sen } \theta$, $YL = Y \cos \theta$, onde $Y = (\mu o.H . e / w . m)$ e $X = (WP)^2 / W^2$

Como n no caso geral é um número complexo, podemos escrever:

$$n^2 = (\mu - iX)^2 = (\mu^2 - X^2) - 2i \mu X \quad (9)$$

onde μ é a parte real do número complexo (o índice de refração) e X é a parte imaginária (o índice de absorção da onda). X está ligado ao coeficiente de absorção κ através da equação:

$$\kappa = wX / c = (2 \pi N e^2 v / (Єo m (w \pm wp)^2 n \quad (10)$$

e assim (9) em sua plenitude vale: [X (1 - X – iZ)]

$$(\mu^2 - X^2) - 2i \mu X = 1 – \{(1 – iZ)(1 – X – iZ) – ½ Y^2\tau \pm [1/4 Y\tau + Y^2_L (1 – X –iZ)^2] ½\} \quad (11)$$

Como se trata de uma equação complicada vamos considerar só dois casos simples:

a) Não temos colisões $Z = 0$ e não temos Campo magnético $Y = 0$

Então a equação 11 fica simplesmente: $n^2 = \mu^2 = 1 – (Wp)^2 / W^2$ (Real) (12)

Pela condição (c) da página 18, $n = \mu = 0$ é a condição de reflexão.

Por outro lado, se Wp for nulo ou muito pequeno em relação a W, então n = 1 ou seja, a onda não sofre refração. Graficamente a equação (12) em relação a X, temos a figura 14:

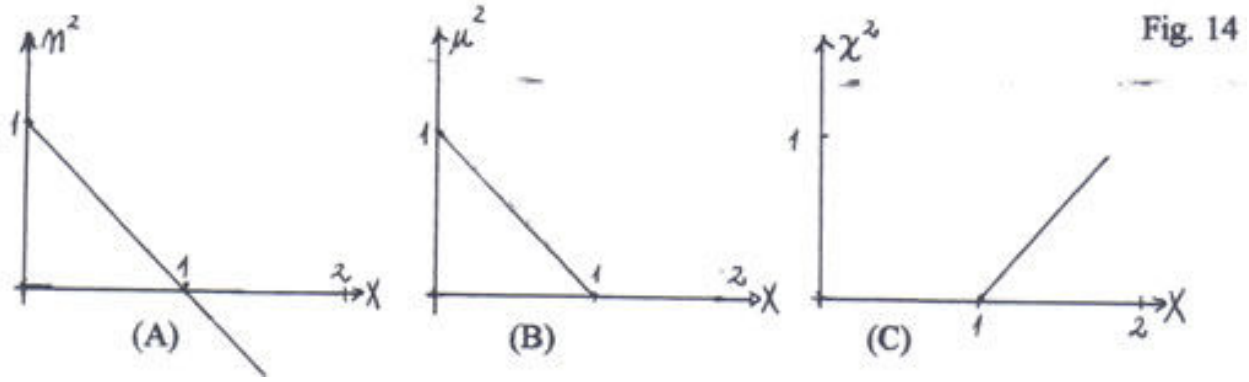


Fig. 14

b) Não temos colisões Z = 0 e a onda corre paralela ao campo magnético (caso longitudinal)

Então sen θ = 0 e Y_T =0 e a equação (11) fica:

$n^2 = \mu^2 - X^2 = 1 - [X / (1 \pm Y)] = \mu^2 - X^2$ . ... (Real) (13)

Fixemos Y = ½ para traçar uns gráficos em relação a X (Figura 15)

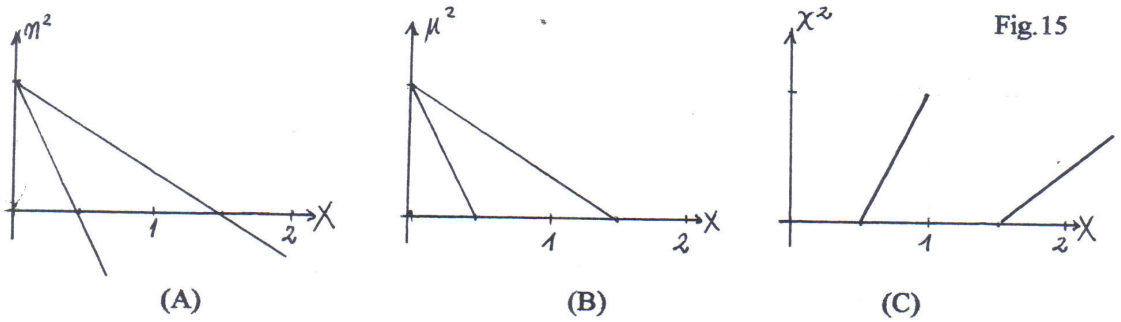


Fig. 15

Os gráficos das figuras 14 e 15 ainda não permitem visualizar a existência das ondas ordinária e extraordinária refletidas. Mas se sobrepusermos as figuras 14 e 15 e fazendo uma análise matemática fina no ponto X = 1, teremos uma idéia das soluções de n para essas duas ondas.

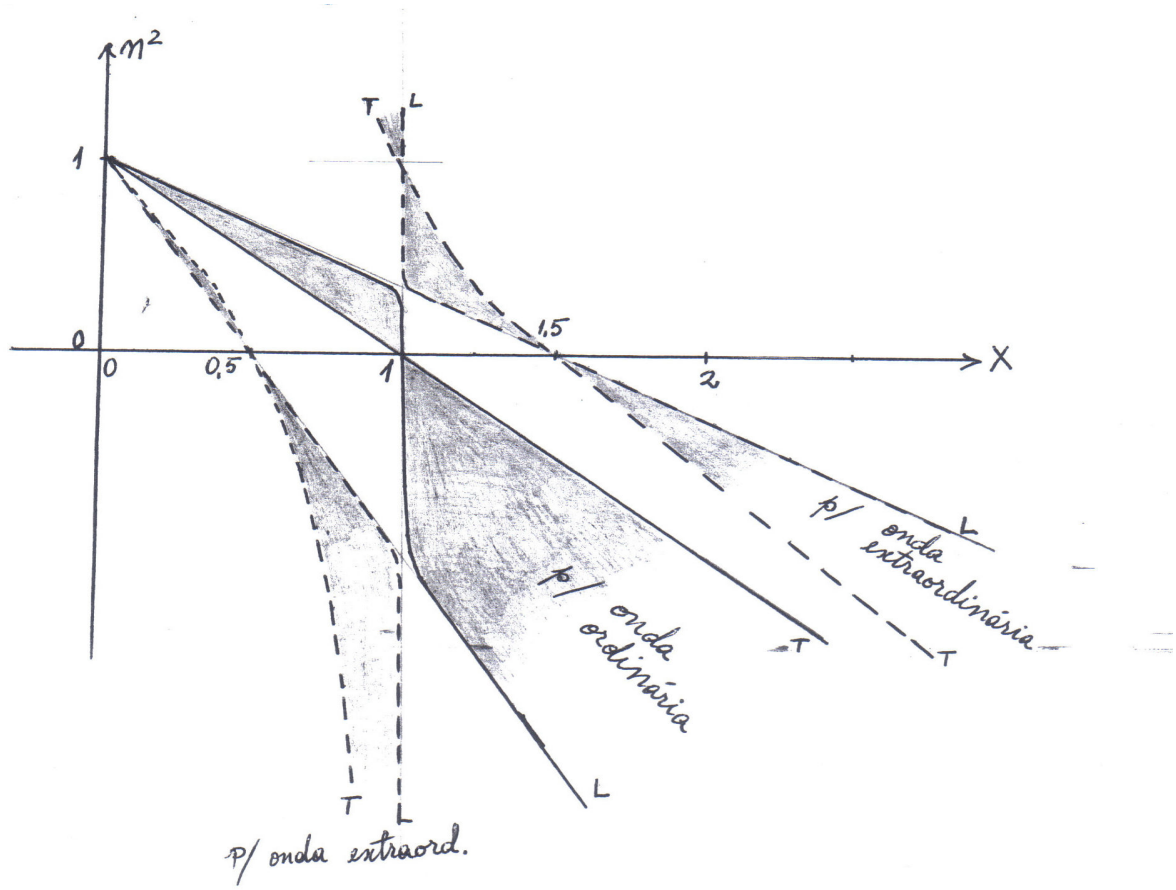


Figura 16

CAPÍTULO IV - A MUF (MOST USEFUL FREQUENCY)

A máxima freqüência utilizável para um determinado elo de propagação ionosférica, num instante dado, é a freqüência que atravessa a ionosfera sem reflexão.

A MUF é, portanto, um valor limite superior abaixo do qual existe reflexão de sinais eletromagnéticos.

A MUF é um valor de previsão, computado por fórmula matemática, que inclui dados históricos estatísticos de variações regulares, tais como:

- O ciclo de atividade solar (n° médio de manchas solares).
- A variação diurna da radiação solar (hora do dia).
- A variação sazonal da radiação solar (estações do ano).

Assim a MUF prevista pode ser bem diferente da realidade se houverem perturbações solares não previstas, tais como tempestades magnéticas.

A análise estatística mostra que num mês a MUF tem 50% de aceitos.

Se a constância na preservação do elo de comunicação é importante, usa-se a **FOT - Frequency of Optimal Transmission**.

$$FOT = 0{,}85\ MUF \qquad (14)$$

Durante o dia devem-se evitar freqüências muito abaixo da MUF, pois quanto mais baixa a freqüência, maior a absorção do sinal de HF.

A MUF pode ser vista como a freqüência crítica do plasma da camada ionosférica de maior concentração eletrônica. Isto recai na camada F2 durante o dia e na camada F durante a noite.

Quando se está de posse de uma tabela de MUF para certo mês e se deseja um elo de 24 horas, escolhe-se o valor mais alto ao longo do elo pretendido e fez-se um gráfico destes valores para as 24 horas do dia. A seguir calcula-se a FOT que também pode ser graficada.

Com isto, o operador tem uma diretriz de trabalho ao longo do dia.