

2 Ionosfera

2.1. Introdução

A ionosfera é a parte superior da atmosfera, compreendida entre aproximadamente 60 e 1000 km de altura, na qual existem partículas ionizadas positivamente e elétrons livres. É formada, primordialmente, pela ionização de gases neutros, como oxigênio, nitrogênio e outros, pela radiação solar correspondente a determinados comprimentos de onda. Exemplos de perfis verticais das densidades dos gases neutros podem ser observados na figura 2.1. Sabe-se que estes perfis variam com as condições geofísicas, com o local e com a hora do dia.

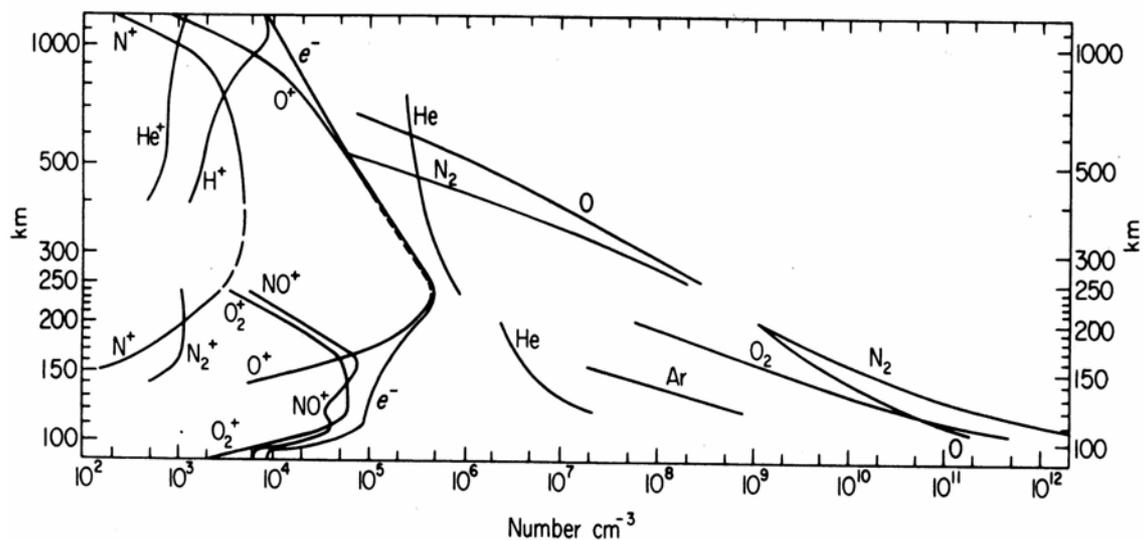


Figura 2.1 – Perfis verticais de concentração de gases neutros e de partículas ionizadas em condições de atmosfera diurna não perturbada (reproduzida da referência [19]).

As características da ionosfera são fortemente influenciadas por fenômenos fotoquímicos, pela difusão e por processos eletrodinâmicos, controlados em grande parte pelo campo magnético da Terra. Como resultado da interação destes fenômenos, observa-se uma distribuição de densidade

eletrônica e iônica com a altura cujo formato geral está exemplificado na figura 2.1. No perfil vertical de densidade eletrônica identificam-se camadas, que serão descritas posteriormente. Observa-se, também uma grande variabilidade de suas características com a atividade solar, estação do ano, latitude, longitude e hora do dia. Em particular, as variações das alturas virtuais das camadas da ionosfera com a hora local e com as estações do ano estão exemplificadas na figura 2.2.

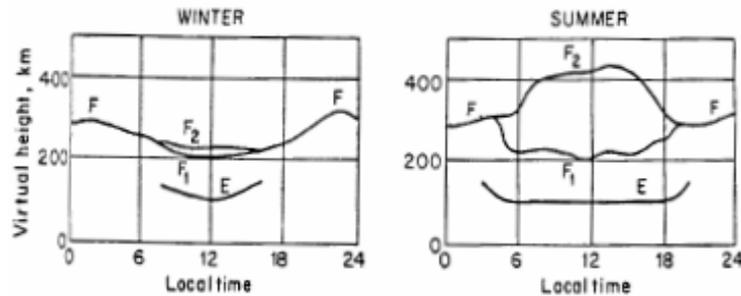


Figura 2.2 – Variações das alturas virtuais das camadas da ionosfera com a hora local e com as estações do ano (reproduzida da referência [8]).

2.2. O Campo Magnético e o Sol

Basicamente, o campo geomagnético pode ser considerado como o de um dipolo situado a 540.27 km do centro da Terra na direção do ponto de coordenadas (21.80° N, 143.24° L) e inclinado em relação ao seu eixo de rotação de tal forma que os pólos magnéticos axiais norte e sul situam-se nas coordenadas (83.03° N, 266.70° L) e (75.34° S, 118.66° L), respectivamente. Esta posição e esta inclinação, que variam lentamente com o tempo, proporcionam diferenças entre o equador geomagnético e o geográfico, observados na figura 2.3, sendo um dos fatores que influenciam o comportamento da ionosfera. Adicionalmente, como resultado da ação dos ventos solares, principalmente a grandes distâncias da Terra, suas linhas de campo são comprimidas do lado da Terra voltada para o sol e estendidas do lado oposto.

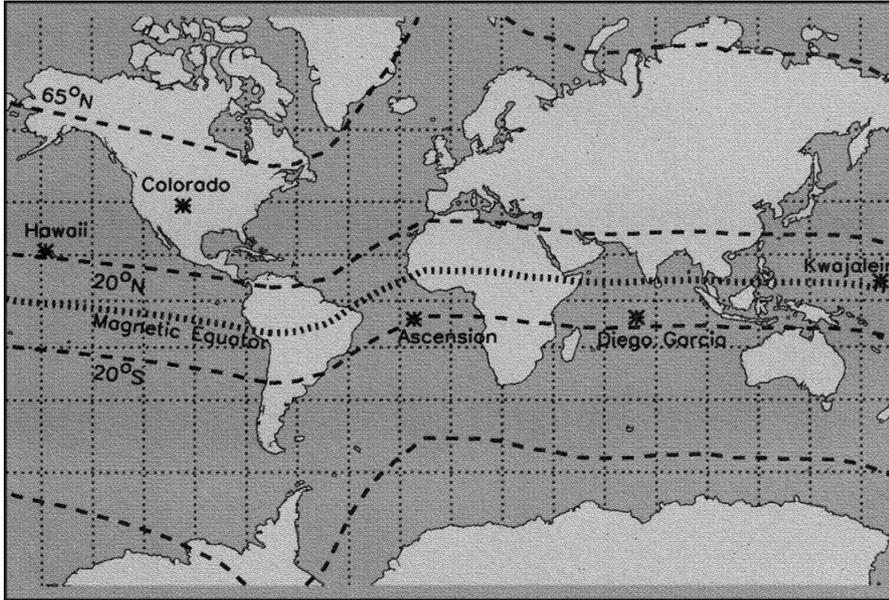


Figura 2.3 – Equador magnético (reproduzida da referência [22]).

Algumas faixas de comprimentos de onda e linhas específicas do espectro do fluxo de potência do sol são responsáveis pela formação da ionosfera. A radiação solar varia periodicamente entre valores máximos e mínimos e essa variação afeta a taxa de ionização da ionosfera. Nos estudos da ionosfera, a atividade solar é caracterizada pelo número de manchas solares ou pela densidade do fluxo de potência no comprimento de onda de 10.7 cm. As manchas solares são regiões escuras (de temperaturas relativamente mais baixas) observadas na superfície do Sol.

O ciclo de atividade solar tem um período aproximado de 11 anos, conforme mostra a figura 2.4. Observa-se que as fases ascendente e descendente do ciclo têm, aproximadamente, as durações de 4.8 anos e de 6.2 anos. A figura 2.4 mostra que o ciclo atual teve início em 1996, tendo a atividade solar atingido o máximo em 2002.

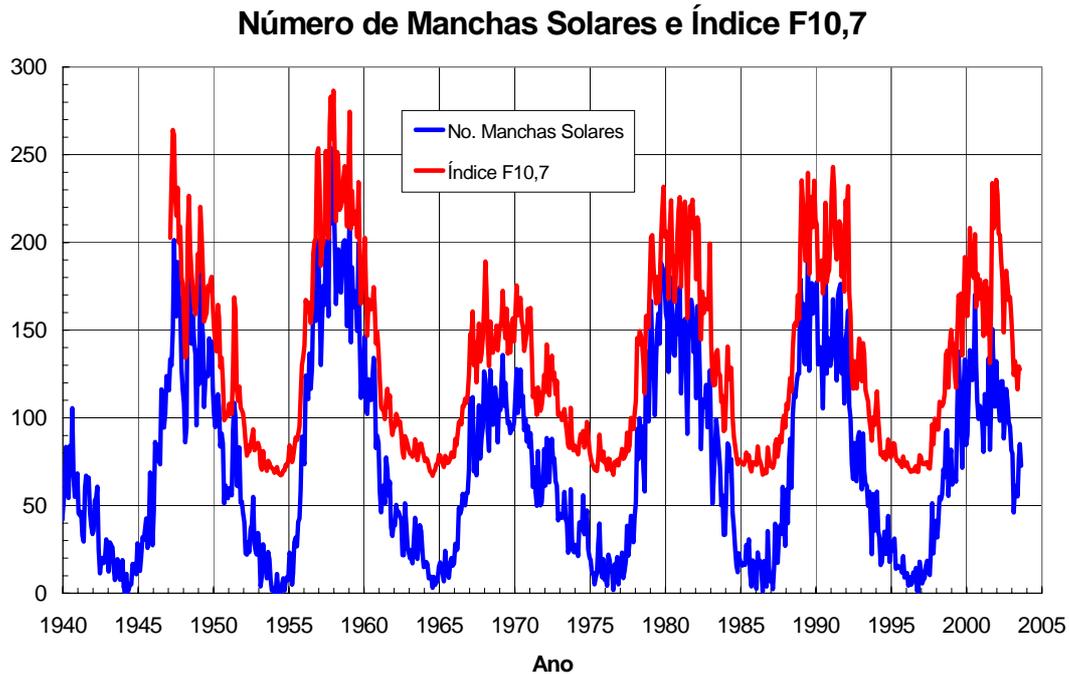


Figura 2.4 – Variações do número de manchas solares e do índice F10.7 durante os ciclos solares (dados provenientes da referência [23]).

2.3. Camadas da Ionosfera

O maior responsável pela produção de elétrons livres na ionosfera é o sol. Sua radiação contém energia (fótons) que, ao incidir sobre um elemento neutro, o faz liberar elétrons e íons positivos. As características químicas e a radiação solar caracterizam a ionosfera, dividindo-a em camadas: D entre 60 e 90 km; E entre 90 e 120 km de altura; e F, que é subdividida em F1 entre 120 e 200 km e F2 de 200 a 1000 km de altura (alturas aproximadas). Essa divisão pode ser observada na figura 2.5, onde se relacionam o espectro dos comprimentos de onda ionizantes com as camadas da ionosfera e a concentração dos gases neutros predominantes, que serão ionizados em cada região (D, E e F).

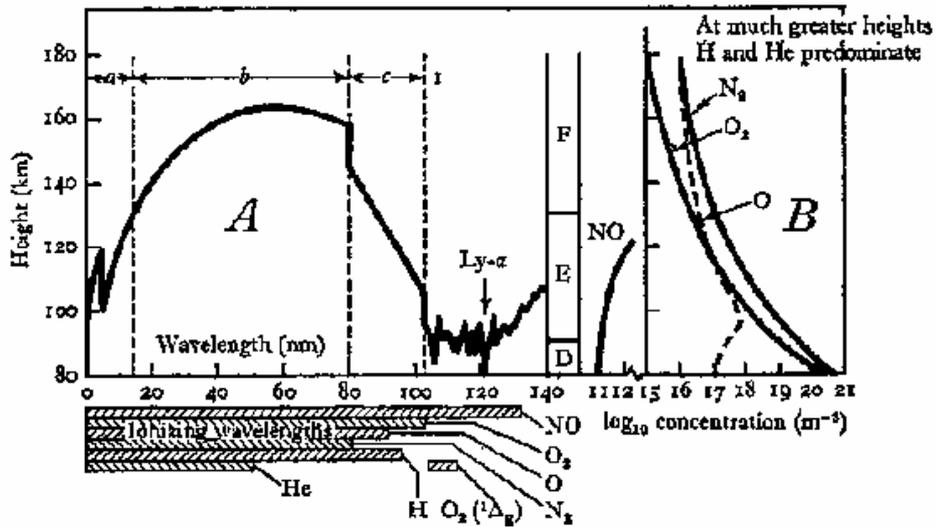


Figura 2.5 – Espectro Solar e ionização da ionosfera (reproduzida da referência [9]).

Observando a figura 2.5 e a dependência com a radiação solar para a produção de elétrons livres, o espectro solar pode ser dividido em três partes, com seus respectivos comprimentos de onda: (a) abaixo de 14nm; (b) entre 14 e 80 nm; e (c) entre 80 e 102.7 nm, onde (a) e (c) ionizam a camada E e (b) ioniza a camada F. Adicionalmente, a camada D é ionizada pelos raios-X , pela linha espectral Lyman-alfa e pelos raios cósmicos [9], sendo estes últimos os maiores responsáveis pela ionização em baixa atividade solar.

O perfil vertical da concentração de elétrons na ionosfera é variável. Exemplos de perfis que mostram esta variação são apresentados na figura 2.6 para o dia, e a noite, tanto para a baixa quanto para a alta atividade solar.

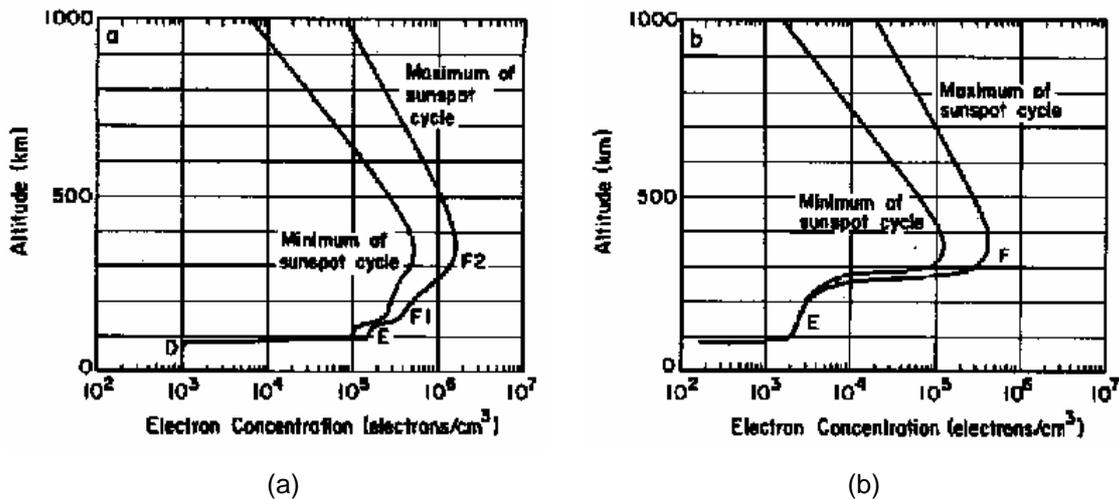


Figura 2.6 – Perfil da concentração eletrônica da ionosfera em baixa e alta atividade solar: (a) dia e (b) noite (reproduzida da referência [20]).

Pode-se destacar na figura 2.6 que a concentração de elétrons é maior durante períodos de alta atividade solar, em relação aos de baixa atividade solar.

2.3.1. Algumas Características das Camadas da Ionosfera

A camada D é ionizada durante o dia, pelos raios-X, pela linha espectral Lyman-alfa e pelos raios cósmicos. Na camada D, as colisões entre elétrons, íons e partículas neutras são relativamente freqüentes, causando atenuações nos sinais de rádio que interagem com a ionosfera. Adicionalmente, os elétrons podem se recombinar com algumas moléculas formando íons negativos. À noite, na ausência da radiação solar, a camada D desaparece. Deve-se observar que esta camada é relativamente estreita e apresenta baixas concentrações de elétrons, de modo que tem uma contribuição pouco importante, mesmo durante o dia, na degradação do desempenho do sistema que se pretende analisar nos demais capítulos desta dissertação. A camada E, é formada como resultado da ionização de N_2 , O_2 e O pelos raios-X, que depende da atividade solar e do ângulo zenital do sol. Como resultado da fotoionização e da troca de cargas, seus principais íons são NO^+ e O_2^+ . A camada E está presente durante o dia, apresentando concentrações da ordem de 10^{11} elétrons/m³. À noite, sua concentração diminui sensivelmente. A camada F1 se faz presente durante o dia. É formada pela ionização do oxigênio atômico O pelos raios EUV (extremo

ultra-violeta), o que produz elétrons livres e O^+ . Sua concentração de elétrons depende do ângulo zenital do sol e da atividade solar. À noite, desaparece.

A camada F2 também é composta, principalmente, de elétrons livres e O^+ . Sua formação é predominantemente dependente da difusão, mas sua concentração de elétrons também varia com a atividade solar. Durante o dia, apresenta os maiores valores de concentração de elétrons livres, sendo seu maior valor observado entre do meio-dia local e as primeiras horas da tarde, dependendo das condições geofísicas. Durante a noite, a concentração sofre uma diminuição, mas a camada não desaparece, devido aos efeitos da difusão.

2.3.2. Regiões da Ionosfera

A ionosfera pode ser delimitada por diferentes faixas de latitudes, nas quais são identificadas características eletrodinâmicas distintas: as altas latitudes, compreendidas entre 60° e 90° (hemisférios norte e sul); as de médias latitudes entre 20° e 60° (hemisférios norte e sul); e as de baixas latitudes (faixa de $\pm 20^\circ$ centrada no equador), tendo como referência o sistema de coordenadas geomagnéticas. São divididas pelas variações que ocorrem na ionosfera devidas à radiação solar, ao campo magnético da Terra e a campos elétricos, sendo as regiões de altas e baixas latitudes as mais sensíveis às variações e as que possuem maiores concentrações de elétrons.

2.4. Alguns Aspectos da Ionosfera

2.4.1. Anomalia Equatorial

A anomalia equatorial é caracterizada pela maior concentração de elétrons nas proximidades do equador magnético (por volta de 15° a 20° magnéticos ao norte e ao sul). Resulta do efeito combinado do campo magnético da Terra e do campo elétrico resultante da acumulação de cargas de polarização criadas pela ação do dínamo atmosférico [19]. A componente zonal deste campo elétrico tem o sentido de oeste para leste durante o dia. Como o campo magnético da Terra é essencialmente horizontal e com sentido de sul para norte no equador magnético, cria-se uma deriva eletromagnética $(\vec{E} \times \vec{B})/B^2$ vertical para cima, que eleva as cargas na região do equador magnético. Estas cargas sofrem a

ação da gravidade e de gradientes de pressão e se difundem ao longo das linhas do campo magnético. Como resultado, a concentração de elétrons decai no equador magnético e aumenta nas latitudes já indicadas. Este processo, conhecido como efeito fonte, está esquematizado na figura 2.7.

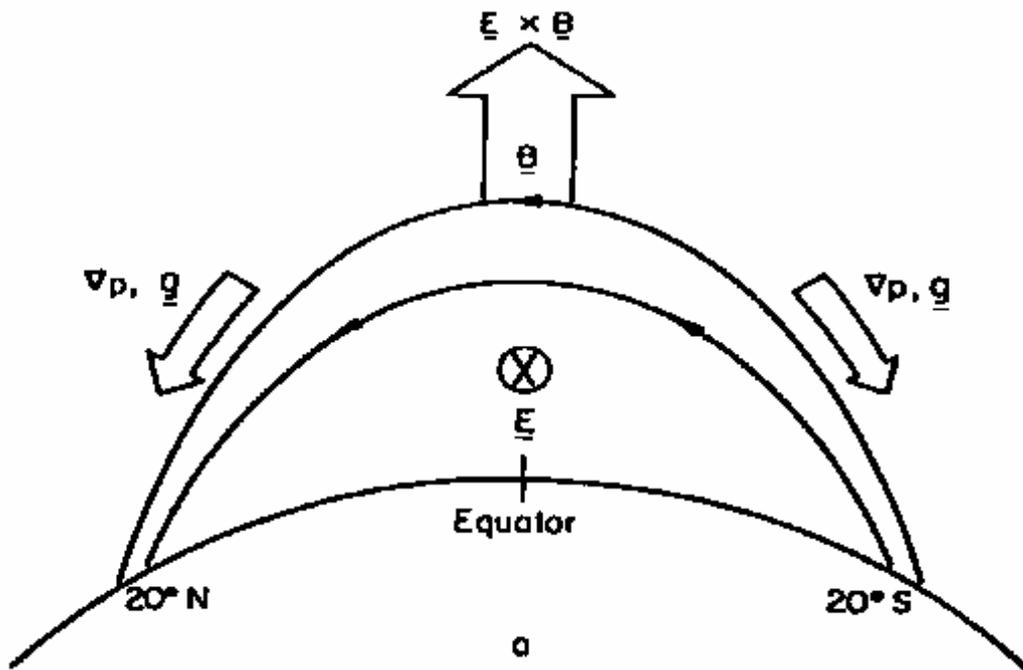


Figura 2.7 – Efeito fonte (reproduzida da referência [20]).

A figura 2.8 mostra as concentrações elevadas nas latitudes magnéticas de aproximadamente 15° a 20° norte e sul e reduzidas no equador magnético. Observações indicam que a anomalia equatorial existe durante as horas do dia, sendo pronunciada entre o meio-dia e o pôr-do-sol (horas locais), decaindo nas horas da noite. A anomalia equatorial tem um efeito muito importante no desempenho do sistema que se pretende analisar na presente dissertação.

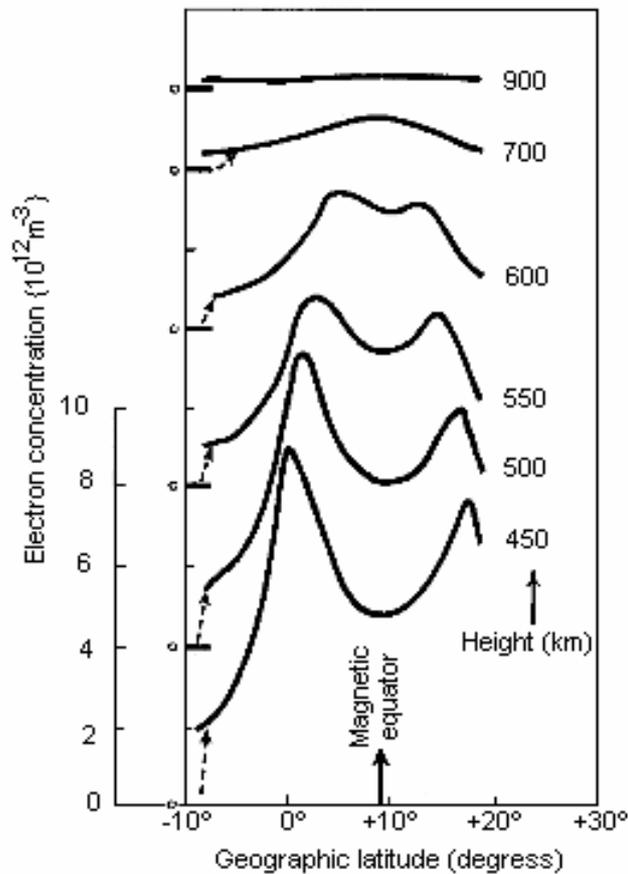


Figura 2.8 – Anomalia equatorial (reproduzida da referência [9]).

2.4.2.

Outras Anomalias e Instabilidades da Ionosfera Equatorial

Deve-se destacar a camada F espalhada (“spread F”), causada pela instabilidade Rayleigh-Taylor na parte inferior da camada F da ionosfera equatorial. A evolução não linear desta instabilidade gera bolhas ascendentes de plasma menos densas que o ambiente, assim como outras instabilidades. Como resultado, são criadas irregularidades aleatórias na concentração eletrônica com um amplo espectro de dimensões. A figura 2.9 representa a criação e a evolução das bolhas de plasma. Este fenômeno é importante para a propagação, pois as irregularidades na concentração eletrônica podem espalhar as ondas de rádios, causando a cintilação de amplitude e da fase dos sinais de rádio transionosféricos recebidos na superfície da Terra. A cintilação equatorial é um fenômeno que se inicia após o pôr-do-sol local e que pode durar várias horas. Depende, adicionalmente, da estação do ano, das atividades solar e magnética e do setor longitudinal de interesse. É mais intensa nas regiões da

anomalia equatorial que na região do equador magnético. Embora a cintilação equatorial tenha um efeito muito importante no desempenho do sistema a ser analisado, não será considerada na presente dissertação, podendo ser o objeto de um futuro estudo.

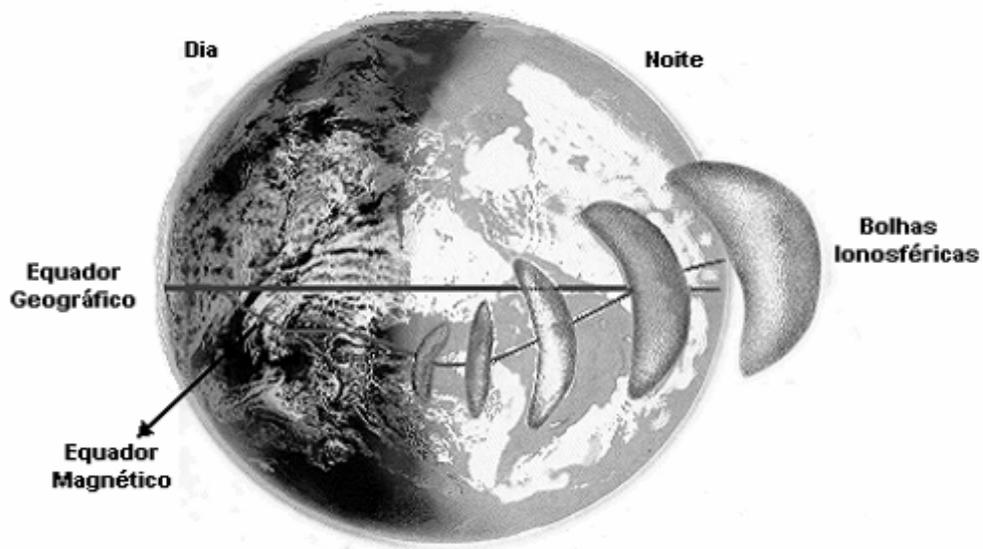


Figura 2.9 – Concepção artística da evolução das bolhas ionosféricas (reproduzida da referência [21]).

2.5. Alguns Efeitos da Ionosfera na Propagação de Sinais

Os sinais que propagam na ionosfera podem sofrer refração ou reflexão, devido à grande concentração de elétrons e íons (positivos) que a formam. A ionosfera é considerada um meio dispersivo que influencia a propagação de sinais GPS, afetando sua modulação, atrasando o grupo e avançando a fase da portadora. As velocidades de fase e de grupo podem ser relacionadas com os índices de refração por intermédio das equações (2.1) e (2.2), respectivamente [5].

$$n_p = \frac{c}{v_p} \quad (2.1)$$

$$n_g = \frac{c}{v_g} \quad (2.2)$$

Os índices de fase e grupo na ionosfera podem ser aproximados por séries de potências da frequência de operação, conforme mostram, respectivamente, as equações (2.3) e (2.4) [5].

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.3)$$

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} - \frac{2c_3}{f^3} - \frac{3c_4}{f^4} + \dots \quad (2.4)$$

Nestas equações, os coeficientes c_2 , c_3 e c_4 são funções da densidade de elétrons, definida por n_e , e f representa a frequência de operação. Considerando as frequências de interesse, o que permite manter apenas os termos de primeira ordem nas equações (2.3) e (2.4), tem-se:

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (2.5)$$

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (2.6)$$

Pode-se mostrar que o coeficiente c_2 é igual a $-40.3 n_e$ [MHz²], tendo a concentração eletrônica n_e a unidade de el/m³ e a frequência f a unidade de MHz. Substituindo c_2 nas equações (2.5) e (2.6), tem-se [5], [7]:

$$n_p = 1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \quad (2.7)$$

$$n_g = 1 + \frac{40.3n_e}{f^2} \quad (2.8)$$

A medida do percurso ótico (S) entre o satélite (SV) e o usuário (user), onde n é o índice de refração (grupo ou fase), é dada por:

$$S = \int_{SV}^{User} n ds \quad (2.9)$$

A distância geométrica (real) é dada por:

$$l = \int_{SV}^{User} dl \quad (2.10)$$

Deve-se observar nas equações (2.9) e (2.10) que, em princípio, os percursos ótico e geométrico são diferentes. A diferença entre as equações (2.9) e (2.10), devida ao índice de refração na ionosfera, que pode representar um atraso do percurso de grupo ou um avanço do percurso de fase, é dada por:

$$\Delta S_{iono} = \int_{SV}^{User} n ds - \int_{SV}^{User} dl \quad (2.11)$$

Logo, os atrasos causados pelo índice de refração de fase e grupo podem ser representados por:

$$\Delta S_{iono,p} = \int_{SV}^{User} \left(1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \right) ds - \int_{SV}^{User} dl \quad (2.12)$$

$$\Delta S_{iono,g} = \int_{SV}^{User} \left(1 + \frac{40.3n_e}{f^2} \right) ds - \int_{SV}^{User} dl \quad (2.13)$$

Desprezando a diferença entre os percursos ótico e geométrico (isto é, trocando ds por dl) e integrando os primeiros termos das equações (2.12) e (2.13) ao longo do percurso e, tem-se que:

$$\Delta S_{iono,p} = \int_{SV}^{User} - \left(\frac{40.3n_e}{f^2} \right) dl = - \frac{40.3}{f^2} \int_{SV}^{User} n_e dl \quad (2.14)$$

$$\Delta S_{iono,g} = \int_{SV}^{User} \left(\frac{40.3n_e}{f^2} \right) dl = \frac{40.3}{f^2} \int_{SV}^{User} n_e dl \quad (2.15)$$

Define-se o conteúdo eletrônico total (TEC – “Total Electron Content”) ao longo do percurso por:

$$TEC = \int_{SV}^{User} n_e dl \quad (2.16)$$

O mapa global do conteúdo eletrônico total (TEC) vertical ilustrado na figura 2.9 destaca a região da anomalia equatorial (região de maior concentração de elétrons livres).

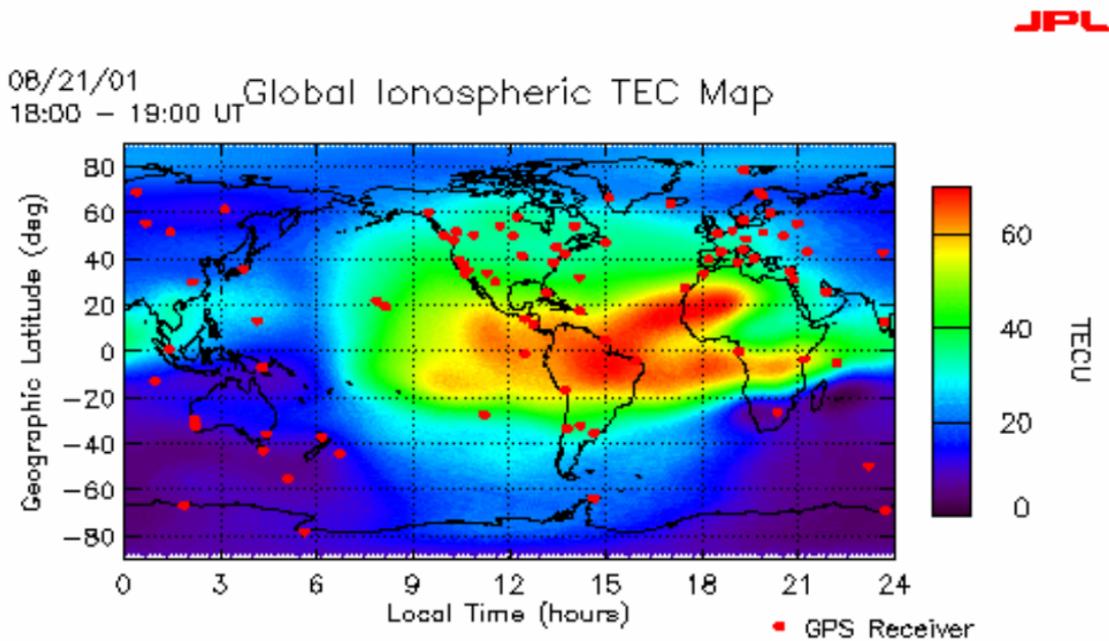


Figura 2.9 – Mapa variação do conteúdo eletrônico total (reproduzida da referência [22]).

Reescrevendo as equações (2.14) e (2.15), tem-se:

$$\Delta S_{iono,p} = -\frac{40.3}{f^2} TEC \quad (2.18)$$

$$\Delta S_{iono,g} = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (2.19)$$

Deve-se observar que o sinal negativo na equação (2.18) indica o avanço da fase da onda que se propaga na ionosfera em relação àquela da onda que se propaga no vácuo.

O TEC varia em função do tempo, da localização do usuário, do ângulo de elevação do satélite, das atividades magnética e solar, assim como da cintilação. O TEC é referenciado em relação à direção vertical no ponto de penetração da ionosfera (ponto em que o segmento de reta definido entre o usuário e o satélite atinge uma altitude especificada). Para tanto, é necessário multiplicar o TEC oblíquo pelo fator de correção apresentado na equação (2.20). A geometria utilizada para definir este fator de correção a partir de um ponto de penetração situado na altitude h_1 (altitude média da ionosfera, tipicamente situada a 350 km de altura) está apresentada na figura 2.11.

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos \phi}{R_e + h_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

Nesta equação, R_e é o raio da Terra, ϕ é o ângulo de elevação do raio satélite-usuário e h_1 é altura do ponto de penetração.

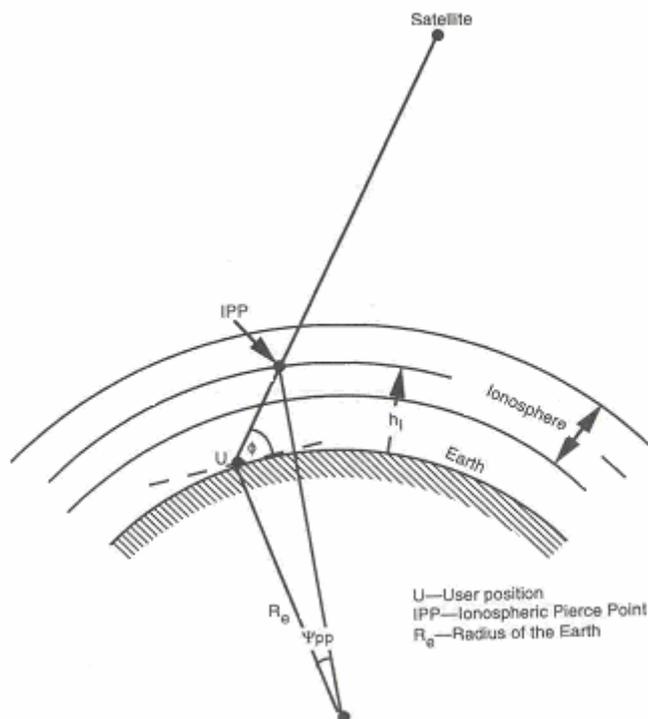


Figura 2.11 – Geometria relativa ao ponto de penetração (reproduzida da referência [5]).