



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

HERMANY LIMA RAMOS

INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NAS ONDAS DE RÁDIO

CAMPINA GRANDE

2021

HERMANY LIMA RAMOS

INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NAS ONDAS DE RÁDIO

Trabalho apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Graduado em Física.

Área de concentração: Física espacial e atmosférica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni

CAMPINA GRANDE

2021

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

R175i Ramos, Hermany Lima.
Influência da ionosfera nas ondas de rádio [manuscrito] /
Hermany Lima Ramos. - 2021.
37 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2021.

"Orientação : Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni ,
Departamento de Física - CCT."

1. Ionosfera. 2. Ondas de rádio. 3. Plasma. 4. Dinâmica. I.
Título

21. ed. CDD 538.767

HERMANY LIMA RAMOS

INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NAS ONDAS DE RÁDIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como partes do requisito para a obtenção do título de graduado em Licenciatura Plena em Física.

Área de concentração: Física Espacial e Atmosférica.

Aprovada em: 07/10/2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

RESUMO

Este trabalho aborda a ionosfera terrestre e suas influências nas ondas de rádio e seu objetivo é investigar como a ionosfera afeta as ondas de rádio. A metodologia utilizada neste trabalho foi uma pesquisa bibliográfica e para chegar ao objetivo começamos com uma revisão da teoria magneto-iônica da ionosfera, na qual se envolve sua formação, transporte de plasma e eletrodinâmica. Em seguida, fizemos uma pequena revisão sobre fenômenos como irregularidades, spread-F e cintilações, bem como uma revisão a respeito de ondas eletromagnéticas. Por fim, fizemos uma revisão sobre efeitos da ionosfera na propagação das ondas de rádio. Com base em resultados qualitativos, concluímos que a ionosfera afeta as ondas de rádio das seguintes formas: reflexão das ondas, absorção, espalhamento nos sinais de rádio (fenômenos spread-F observados nos ionogramas) e cintilações. Como também não sofrer efeito nenhum e os sinais passarem livres sem alterações significativas.

Palavras-Chave: Ionosfera. Ondas de rádio. Plasma. Dinâmica.

ABSTRACT

This work deals with the terrestrial ionosphere and its influences on radio waves and its objective is to investigate how the ionosphere affects radio waves. The methodology used in this work was a bibliographic research, and to reach the objective we started with a review of the magneto-ionic theory of the ionosphere, which involves its formation, plasma transport and electrodynamics. Then we did a short review of phenomena such as irregularities, spread-F and scintillations, and also a review of electromagnetic waves. Finally, we did a review on effects of the ionosphere on radio wave propagation. Based on qualitative results, we concluded that the ionosphere affects radio waves in the following ways: wave reflection, absorption, scattering in radio signals (spread-F phenomena observed in ionograms) and scintillations. It can also have no effect and the signals pass freely without significant changes.

Keywords: Ionosphere. Radio waves. Plasma. Dynamics.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. COMO A IONOSFERA É FORMADA	8
2.1 Aeronomia física	10
2.1.2 A função de produção	11
2.2 Recombinação química	11
3. TRANSPORTE DE PLASMA	13
3.1 Difusão do plasma	13
3.2 Ventos neutros	13
3.3 Derivas eletromagnéticas	14
4. CAMPO ELÉTRICO, CORRENTE E CONDUTIVIDADE	15
4.1 Condutividade	15
5. TÉCNICAS PARA SONDAGEM DA IONOSFERA	17
5.1 As ionossondas	17
5.2 Radares de espalhamento	19
6. FENÔMENO SPREAD-F	20
6.1 Spread-F	20
7. CINTILAÇÕES	22
8. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	25
8.1 Velocidade de propagação de uma onda eletromagnética	25
8.2 Fluxo de energia	27
8.3 Pressão de radiação	27
9. EFEITOS DA IONOSFERA NA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO	29
9.1 Reflexão de uma onda de rádio de alta frequência (HF) na ionosfera	29
9.2 Efeito de absorção	30
9.3 Propagação transionosférica	31
9.4 Efeito do campo geomagnético	31
9.5 Propagação das ondas de rádio na ionosfera com irregularidades no plasma	32
9.5.1 Difração por irregularidades fracas	32
9.6 A temperatura dos íons e elétrons	33
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
10.1 Conclusão	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é uma camada de ar formada por vários gases, seu volume total é composto por 78,09% de nitrogênio (N₂), 20,95% de oxigênio (O₂), 0,04% de dióxido de carbono (CO₂) e um pequeno percentual formado por outros gases. Por ela ser uma camada de gases, a lei geral dos gases é aplicável aos estudos atmosféricos. Conforme a lei geral dos gases, temos:

$$P = nkT$$

onde P é a pressão, n é o número de moléculas por unidade de volume, T é a temperatura absoluta e k é a constante de Boltzmann .

A atmosfera terrestre pode ser dividida em camadas, e os critérios para suas nomeações são altitude, temperatura e composição. De acordo com o critério baseado na temperatura, a *troposfera* é a primeira camada da atmosfera acima da superfície da Terra, a temperatura decai em uma taxa de 10 K/km, e tem seus limites finais na tropopausa entre 10-12km. Na sequência vem a segunda camada, a *estratosfera*, com altitude inicial de aproximadamente 17 km, a temperatura aumenta com a altitude e tem seus limites finais na estratopausa. A terceira camada, conhecida como *mesosfera*, tem altitude inicial de aproximadamente 85 km e tem seus limites na mesopausa, nessa camada, ao contrário da estratosfera, a temperatura decresce com a altitude. A quarta camada, nomeada como termosfera, com altitude inicial de aproximadamente 90 km, nessa camada, por ser a que mais absorve a radiação do extremo ultravioleta do sol, é nela onde possui as maiores temperaturas da atmosfera terrestre (HARGREAVES, 1992).

A parte da alta atmosfera terrestre em que está contida a maioria das partículas portadoras de cargas é conhecida como ionosfera. Por ser uma região ou sub camada da atmosfera mais externa, ela está exposta a radiações solares.

O motivo pelo estudo da ionosfera e pelo qual faz jus o título desse trabalho, se dá pelo fato de que, segundo a definição de Kenneth Davies (1989), a ionosfera é uma parte da alta atmosfera onde existe ionização suficiente para afetar a propagação das ondas de rádio. Embora outros fatores possam afetar a propagação de ondas eletromagnéticas e que são relacionados à atmosfera neutra, tal como a presença de vapor d'água na atmosfera, por exemplo.

Portanto, nosso objetivo geral é investigar como a ionosfera terrestre afeta as ondas de rádio por meio da bibliografia científica.

Mas qual é a importância dos estudos da ionosfera? Como a ionosfera é considerada a fronteira para o espaço sideral. É justamente nela que encontramos a maioria dos satélites, como

também a Estação Espacial Internacional. Portanto, a comunicação com os satélites podem ser afetadas, pelo fato de que a ionosfera é composta por partículas carregadas eletricamente.

Assim como a ionosfera afeta a comunicação com os satélites, ela também afeta o sistema de posicionamento global (GPS), pelo fato de que, como esses instrumentos utilizam sinais de rádio para se comunicar com receptores no solo, as mudanças na composição e densidade da ionosfera podem perturbar esses sinais.

Um ponto interessante a respeito da ionosfera é que ela está em constante mudança, ela muda do dia na terra para noite, quando a noite chega, a radiação solar cessa, e parte das partículas carregadas recombina-se, tornando partículas neutras. Outro fator que também causa mudança na ionosfera é a influência de fenômenos meteorológicos. Furacões, grandes tempestades, criam gradientes de pressão que podem alcançar a atmosfera superior e conseqüentemente afetar a ionosfera. Segundo a NASA, dados de satélites revelaram a conexão entre o tempo na terra e as mudanças na ionosfera. Esses efeitos foram descobertos recentemente.

2. COMO A IONOSFERA É FORMADA

As radiações solares do extremo ultravioleta (EUV) e raios-X são as principais responsáveis pela ionização dos gases atmosféricos nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) (HARGREAVES, 1992). Em radiações nessa faixa de comprimento de onda do espectro eletromagnético, os fótons têm energia suficiente para dissociar elétrons das moléculas de gás e ionizar os constituintes da atmosfera neutra, produzindo elétrons livres e íons positivos, esse processo é chamado fotoionização. A região onde o material atmosférico é ionizado é chamada *ionosfera* e é constituída pelo plasma ionosférico. O número de elétrons livres e o número de íons positivos, são, aproximadamente iguais, por esse fato, a ionosfera como um todo é considerada eletricamente neutra. Devido à extrema energia térmica radiante do sol, a temperatura na ionosfera pode chegar acima dos 1000 K.

A ionosfera inicia aproximadamente a partir de 60 km de altitude, estendendo-se até aproximadamente 1000 km de altitude. Ela possui estratificações, que estão divididas conforme sua densidade de plasma, são elas, D, E, F1 e F2. Sendo as regiões E e F, de acordo com Budden, (1961, p.8), as principais regiões. A região E possui densidade de plasma máximo em altitudes de aproximadamente 110 km. A região F é a que tem a maior ionização de todas, com densidade de plasma máximo em altitudes de aproximadamente 200km-400km (BUDDEN, 1988). A figura 2.2 está ilustrada a densidade de plasma em função da altura de cada região.



Figura 2.1: O sol emite radiação do extremo ultravioleta para terra e essa radiação afeta a camada da termosfera, tomando as partículas eletricamente carregadas e elevando drasticamente a temperatura. Fonte: NASA's Scientific Visualization Studio.

Cada região da ionosfera, tem suas particularidades, as regiões mais baixas como a D e E, variam durante o dia e noite. Durante a noite, devido à ausência da radiação solar, as partículas

carregadas eletricamente, como elétrons livres e pares de íons, se recombinam, tornando-se moléculas neutras. Esse processo de recombinação é o que mais predomina durante a noite nas regiões D e E. Já nas regiões F, o processo de fotoionização é o que mais predomina, durante o dia, chegando a uma densidade de plasma de aproximadamente 10^6 cm^{-3} . Durante a noite, na região F, devido a influência dos ventos neutros que empurram o plasma ionosférico para camadas mais externas da alta atmosfera, há ainda a presença de plasma. No gráfico da figura 2.2, é mostrada a densidade de plasma nas regiões D, E, F.

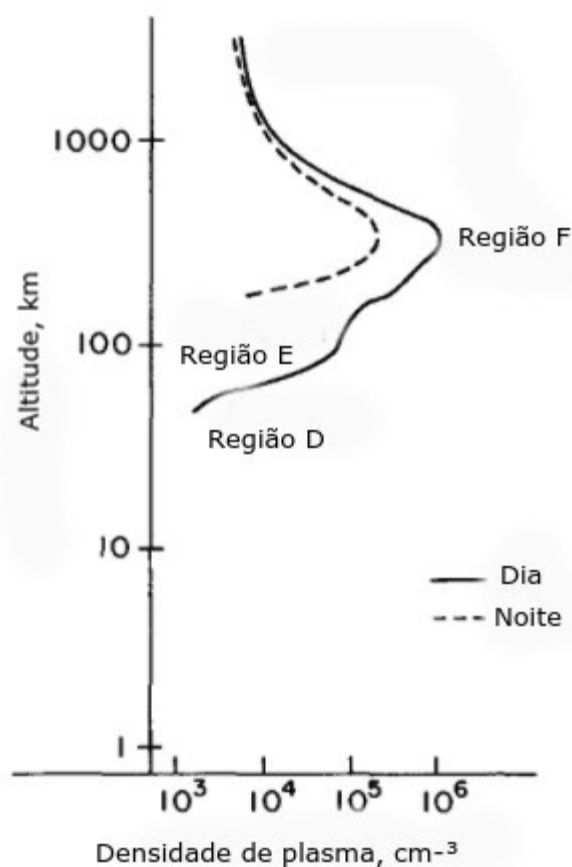


Figura 2.2: Densidade de plasma em função da altitude na ionosfera. Fonte: (Kelley M.C, 1989, P.5)

O vento solar é constituído por um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas e magneticamente polarizadas que são emitidas pelo Sol para o meio interplanetário. Esse fluxo de partículas pode chegar à Terra, mas as partículas transportadas por esses ventos são desviadas pelo campo geomagnético. Tais partículas carregadas eletricamente dos ventos solares, são desviadas pelo campo geomagnético e em altas latitudes atingem os elementos da alta atmosfera por meio de colisões, transferindo-lhes energia cinética e ao voltarem para o seu estado fundamental de energia são liberados fótons de luz, produzindo assim fenômenos ópticos chamados de auroras polares -

conhecidas também como auroras boreais, quando acontecem no polo norte e auroras austrais, no polo sul.

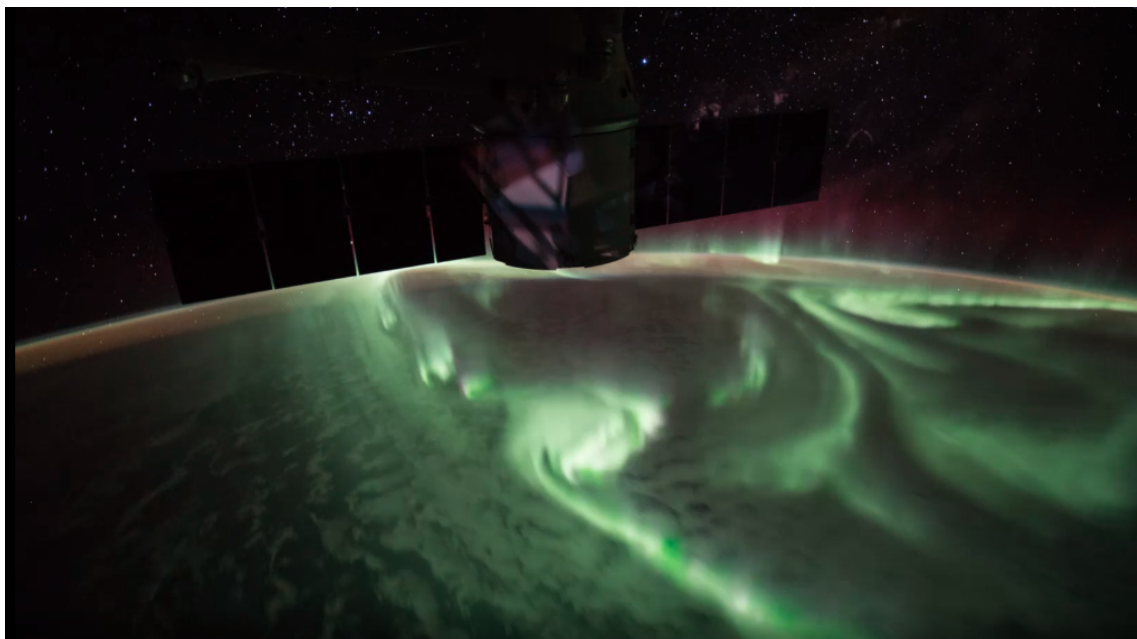


Figura 2.3: Ilustração do fenômeno de aurora polar. Fonte: International Space Station.

2.1 Aeronomia física

Como já foi mencionado anteriormente, a ionosfera é formada por meio da ionização dos gases atmosféricos, tais como nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). Nela, há os processos de produção,

causados pela ionização de espécies gasosas. Perda, causadas pela recombinação de pares de íons e elétrons. Transporte que pode estar relacionado a ventos neutros, difusão e derivas eletromagnéticas verticais. Todos esses fatores englobam a dinâmica do plasma ionosférico e estão relacionados pela equação de continuidade de massa, expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \vec{\nabla} \cdot (N\vec{v})$$

onde q é a taxa de produção, L é a taxa de perda pela recombinação, e $N\bar{v}$ é taxa de perda expressa pelo movimento dos elétrons, \bar{v} é a velocidade de deriva (HARGREAVES, 1992).

2.1.2 A função de produção

A taxa de produção dos pares íons-elétrons, também conhecida de função de produção de Chapman, é dado pela seguinte expressão:

$$q = \eta\sigma nI$$

onde I é a intensidade de radiação ionizante em determinado nível da atmosfera e n é a concentração de átomos ou moléculas capazes de serem ionizados pela radiação. Para ocorrer a ionização de um átomo ou molécula, esses precisam primeiro absorver a radiação, para isso, temos a *seção transversal de absorção*, σ . Porém, nem toda energia radiante irá para o processo de ionização, por conta disso, também está como termo do produto da equação a *eficiência de ionização*, η (HARGREAVES, 1992).

2.2 Recombinação química

Nas camadas ionizadas da atmosfera, há dois termos que moldam a dinâmica do plasma ionosférico, e que está descrito na equação de continuidade de massa. O primeiro é a taxa de produção, que envolve a formação dos pares de íons e elétrons causados principalmente pela radiação solar incidente. O segundo termo é a taxa de perda, que trata dos elétrons que são removidos de um

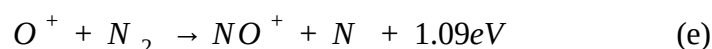
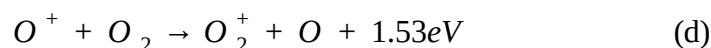
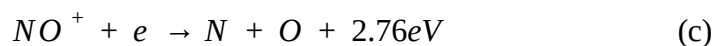
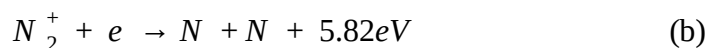
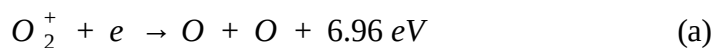
determinado volume, conseqüentemente reformando partículas neutras. Dentro do segundo termo está englobado mais dois termos, o primeiro é a perda causada pelo movimento do plasma para dentro ou para fora de um determinado volume, que trataremos em capítulos posteriores, e o outro termo envolve a perda por recombinação de pares de íons e elétrons (HUNSUCKER; HARGREAVES, 2002). Neste sub capítulo trataremos do segundo termo.

Como descreve Hargreaves (1992, p.218), para determinarmos a taxa de perda por recombinação química L , vamos considerar elétrons recombinando diretamente com íons positivos sem a presença de íons negativos, tal como: $X^+ + e = X$. A taxa de elétrons perdido é dada por:

$$L = \alpha[X^+]N_e = \alpha N_e^2$$

Onde N_e é a densidade de elétrons (igual a densidade de íons X^+) e α é o coeficiente de recombinação.

Na região E, a maioria dos íons são moleculares, tal como O_2^+ , N_2^+ . Por outro lado, na região F, a maioria dos íons são atômicos, tal como, O^+ . Segundo Kenneth Davies (1989, p.63), As reações mais importantes durante o dia nas regiões E e F, são as seguintes:



as reações (a), (b) e (c), são chamadas de reações de recombinação dissociativas; (d) e (e) são chamadas de reações de transferência de cargas.

3. TRANSPORTE DE PLASMA

Conforme a equação de continuidade de massa, além do processo de perda pela recombinação de pares de íons e elétrons, há também a perda pelo transporte, que pode incluir difusão, ventos neutros e derivas eletromagnéticas verticais (DAVIES, 1989). Neste capítulo, trataremos dessas três formas de transporte de plasma.

3.1 Difusão do plasma

O transporte vertical do plasma ionosférico acontece devido a vários fatores, um deles é o gradiente de pressão do gás, que faz as partículas se moverem para cima e para baixo, até que a pressão seja equalizada. (HARGREAVES, 1992). Contudo, como o plasma é composto por íons e elétrons, e todas essas partículas movimentam-se, sendo assim havendo colisões e forças de arrastos, deve-se levar em consideração a teoria cinética dos gases. Outro componente que tem influência no transporte vertical de uma partícula é a força da gravidade. Com base nesses conceitos, e de acordo com Kenneth Davies (1989, p. 65), a velocidade de difusão vertical w é expressa pela equação:

$$w = -D(h) \sin^2 I \left(\frac{1}{N_e} \frac{dN_e}{dh} + \frac{Mg}{2KT} \right)$$

onde M é a massa do íon, $D(h)$ é o coeficiente de difusão ambipolar (íons e elétrons difundem-se juntos) e I é o ângulo de inclinação das linhas de campo magnético em relação ao plano horizontal terrestre. Também segundo Kenneth Davies (1989, p. 65), nas regiões equatoriais, quando $I = 0^\circ$, a difusão vertical desaparece, porque a difusão através do campo magnético é inibida. Nas regiões dos pólos geomagnéticos, Em $I = 90^\circ$, a difusão vertical é máxima.

3.2 Ventos neutros

Os ventos neutros são movimentos de massa de ar (sendo estes compostos por partículas neutras). De maneira geral, quando o sol aquece determinada massa de ar, é estabelecida uma diferença de pressão, fazendo com que ocorra um deslocamento do ar que está na região de maior pressão para região de menor pressão, conseqüentemente produzindo forças de arrasto, que podem causar um movimento vertical do plasma. Nesses movimentos, também ocorre o que Kenneth Davies (1989, p. 66) chama de colisão neutra-iônica, quando o movimento desses ventos é transferido para íons, sendo assim ocorrendo uma colisão de partículas neutras em partículas carregadas. Também segundo Kenneth Davies (1989, p.66), nas regiões mais baixas, como D , E e F_1 , as colisões

neutra-iônica são suficientemente numerosas de modo que, o movimento do plasma seja determinado pelo movimento desses ventos.

Os ventos neutros que dirigem-se para regiões equatoriais, têm significativa influência no aumento da densidade de elétrons. A velocidade da componente vertical é dado por:

$$w = V \sin I \cos I$$

podemos notar que, quando $I = 0^\circ$ na região do equador, ou $I = 90^\circ$ na região dos pólos não haverá movimento vertical. Como também podemos notar que terá velocidade máxima em $I=45^\circ$.

3.3 Derivas eletromagnéticas

A deriva eletromagnética ($\vec{E} \times \vec{B}$), é o principal mecanismo que produz movimento dos íons e elétrons através das linhas de campo magnéticos. A velocidade w é dado por:

$$w = \frac{E}{B_0} \cos I$$

ou

$$w = \frac{\vec{E} \times \vec{b}}{|\vec{B}|^2}$$

com base nessa equação, percebemos que a magnitude da velocidade é zero nos pólos e máxima nas regiões próximas ao equador (DAVIES, 1989).

4. CAMPO ELÉTRICO, CORRENTE E CONDUTIVIDADE

Os ventos neutros têm papel fundamental na produção de campos elétricos da região E. Quando o sol aquece determinada massa de ar em baixas altitudes, é produzido gradiente de pressão e este movimentação o plasma, produzindo forças de arrasto e colisões. Segundo Bertoni (1999, p.33), devido a diferença na ordem de grandeza nas massas de íons e elétrons, os ventos neutros têm maior influência nos íons.

As forças de arrasto e colisões provocadas pelos ventos neutros, produzem separações entre partículas carregadas (como íons positivos e elétrons), sendo assim, produzindo campos elétricos entre essas partículas.

4.1 Condutividade

Em baixas altitudes próximos às regiões equatoriais, devido à fraca influência do campo magnético, a condutividade elétrica das espécies ionizadas podem ser dada por:

$$\sigma_0 = \frac{Ne^2}{(m\nu)} \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde N é densidade numérica, cada uma com carga e e massa m , ν é a frequência de colisão de partículas carregadas eletricamente com espécie neutras. Se há mais de uma espécie de partículas carregadas (elétrons e íons positivos, por exemplo), a condutividade total será a soma da condutividade de cada uma das espécies. (HUNSUCKER; HARGREAVES, 2002). E a densidade de corrente pode ser escrita como:

$$\vec{J} = \sigma_0 \vec{E} \quad (\text{eq. 4.2})$$

Em regiões mais altas, o campo magnético passa a ter influência. Nessas ocasiões, as partículas carregadas estão sujeitas às forças de Lorentz $e\vec{v} \times \vec{B}_0$ que agem perpendicularmente a direção do campo magnético e também na direção do movimento das partículas. Se o movimento for paralelo às linhas de campo magnético, a força de Lorentz é zero, conseqüentemente o campo magnético não terá efeito e a eq. 4.1 será aplicável. (HUNSUCKER; HARGREAVES, 2002).

Nessas ocasiões em que há influência do campo magnético, a condutividade elétrica é expressa em duas partes pelas seguintes equações:

$$\sigma_1 = \left(\frac{N_e}{m_e V_e} \frac{V_e^2}{(V_e^2 + \omega_e^2)} + \frac{N_i}{m_i V_i} \frac{V_i^2}{(V_i^2 + \omega_i^2)} \right) e^2$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{N_e}{m_e V_e} \frac{V_e^2}{(V_e^2 + \omega_e^2)} + \frac{N_i}{m_i V_i} \frac{V_i^2}{(V_i^2 + \omega_i^2)} \right) e^2$$

onde o termo subscrito e se refere a elétrons, e i a íons. Como as partículas estão se movendo perpendicularmente às linhas de campo geomagnético, elas tendem a assumir um movimento ciclotrônico, por conta disso o termo ω é usado na equação ($e\vec{B}/m$, para um íon, onde \vec{B} é a densidade de fluxo magnético. $e\vec{B}/2\pi m$ para um elétron). σ_1 é a condutividade de Pedersen, que é a corrente que flui paralelamente ao campo elétrico, e σ_2 é a condutividade de Hall, que relaciona a corrente perpendicular.

5. TÉCNICAS PARA SONDAGEM DA IONOSFERA

Nas últimas décadas, várias técnicas de sondagem vêm sendo utilizadas para estudos quantitativos da alta atmosfera. Elas podem ser objetos enviados por meio de foguetes para as regiões da alta atmosfera (satélites e sondas espaciais), como também instrumentos localizados totalmente na superfície terrestre (ionossondas e radares de espalhamento). Neste capítulo, iremos dar ênfase à instrumentos localizados totalmente na superfície terrestre.

5.1 As ionossondas

As ionossondas são espécies de radares cujo todos seus componentes operam a partir da superfície da terra e tem como função principal fornecer informação sobre o perfil da densidade de plasma da ionosfera. De acordo com Robert D. Hunsucker (1991, p. 67), nos modelos simples (ou analógico), elas trabalham da seguinte forma: primeiro o osciloscópio é iniciado e após um curto período de tempo um pulso de energia eletromagnética é emitido por um transmissor em direção a ionosfera. Após um tempo de poucos milissegundos, esses pulsos são refletidos pelas camadas da ionosfera e os dados são exibidos em um gráfico com altura virtual versus frequência, chamado ionograma. A figura 5.3 mostra um exemplo de ionograma.



Figura 5.1: Ionossonda DPS4. Fonte: UMLCAR



Figura 5.2: Antena receptora. Fonte: Lowell Digisonde International, LLC

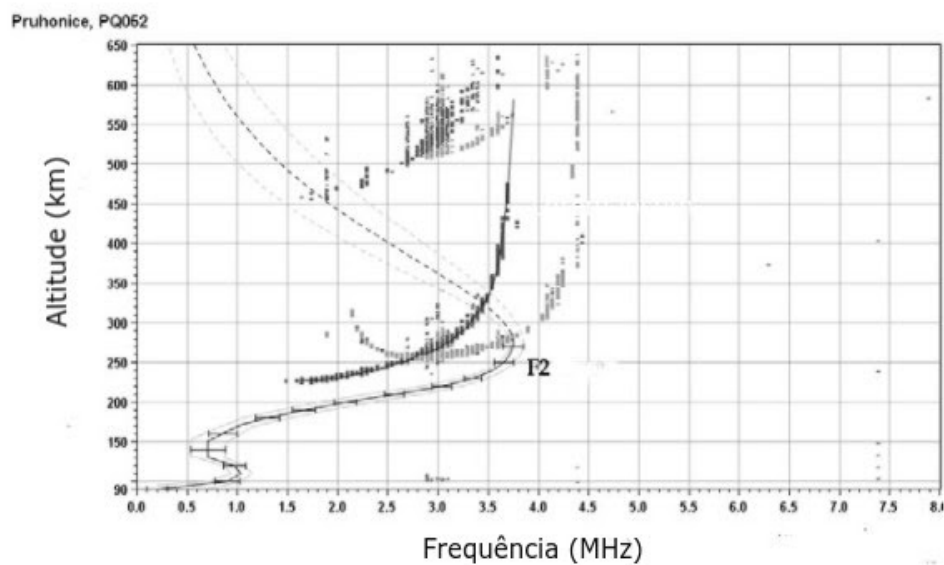


Figura 5.3: Exemplo de ionograma obtido pela Digissonda DPS 4. Fonte: Observatory Pruhonice

De acordo com Fernando Bertoni (1999, p. 63), as ionossondas analógicas foram instrumentos muito utilizados para monitoramento das condições ionosféricas devido ao seu baixo custo de manutenção e uma boa aplicabilidade como instrumento de pesquisa científica.

5.2 Radares de espalhamento

Os radares de espalhamento, assim como as ionossondas, são técnicas de sondagem que são realizadas a partir da superfície da terra. Com eles, é possível não somente estudar o perfil da densidade de plasma a partir da superfície da terra, como também várias outras propriedades da alta atmosfera (densidade neutra, temperatura e composição) (DAVIES, 1989).

Fazendo um pequeno aparato histórico, Thomson (1906, apud DAVIES, 1989, p. 106) descobriu que os elétrons eram capazes de espalhar ondas eletromagnéticas. Gordon (1958, apud DAVIES ,1989, p.106) previu que a tecnologia de radar poderia detectar esses espalhamentos na ionosfera. Mas a existência do espalhamento incoerente foi demonstrado experimentalmente pela primeira vez por Bowles (1958, Apud DAVIES, 1989, p. 106) com um transmissor de alta potência de aproximadamente 1 MW e um comprimento de onda de 7.5 m e com uma antena de seção transversal de 5 acres.

6. FENÔMENO SPREAD-F

No decorrer dos estudos da alta atmosfera, ao longo das últimas décadas e com o surgimento de instrumentos de sondagens mais sofisticados, tem-se observado que a densidade de plasma ocasionalmente não é totalmente homogênea, essa não-homogeneidade na densidade de plasma é conhecida como irregularidades no plasma. As irregularidades no plasma são causadas pelos mais diversos fenômenos e afetam consideravelmente a comunicação com satélites e as ondas de rádio transionosféricas.

6.1 Spread-F

Ao longo do tempo vem-se observando que os pulsos de rádios refletidos pela região F2 da ionosfera tem uma duração 10 vezes maior do que os pulsos transmitidos; esse fenômeno é conhecido como spread-F. Esses fenômenos são causados pelo espalhamento dos sinais de rádio devido às irregularidades do plasma ionosférico. (DAVIES, 1989). Nas figuras 6.1, são mostrados ionogramas com spread-F.

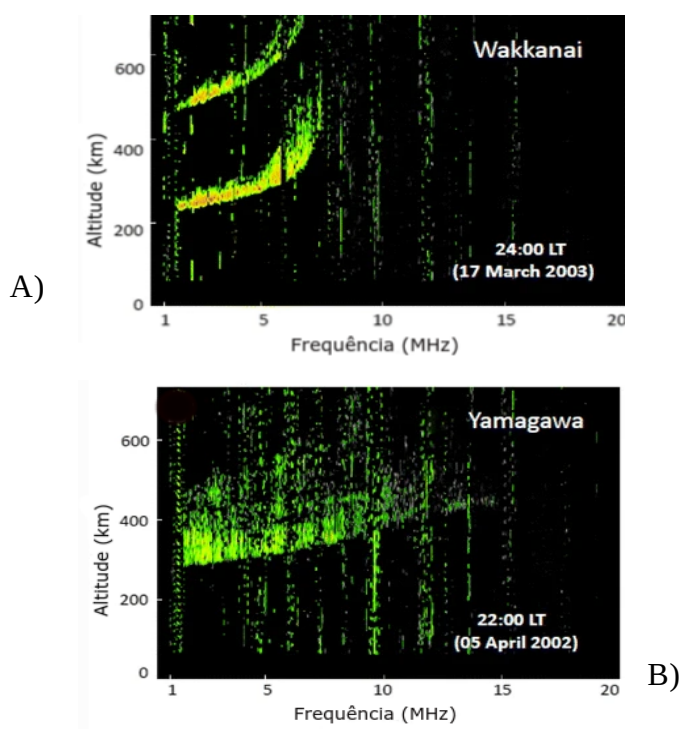


Figura 6.1: Dois exemplos de ionogramas com spread-F: A) Ionograma obtido na cidade de Yamagawa (Japão), que na qual a frequência de alcance em baixas latitudes. B) Ionograma obtido em Wakkanai (Japão), que na qual a frequência

observada ocorreu em médias latitudes. Fonte: Progress in Earth and Planetary Science volume 5, Article number: 27 (2018).

Como podemos observar nas figuras 6.1 (diferentemente de um ionograma sem spread-F), os traços do ionograma ficam difusos, conforme Kenneth Davies (1989), a presença desses traços difusos indica a ocorrência de irregularidades no plasma ionosférico.

7. CINTILAÇÕES

As irregularidades na ionosfera são detectadas por duas técnicas principais: uma é a medida direta por meio de sondas a bordo de foguetes e satélites, e a outra por meio de seus efeitos nos sinais de rádio. Os efeitos que as irregularidades causam nos sinais de rádio que passam através da ionosfera (ou são refletidos), são alterações irregulares na fase e variações na amplitude desses sinais. Essas variações irregulares na amplitude ou fase são chamadas *cintilações* (HARGREAVES, 1992). Na figura 7.1, está ilustrado o efeito das irregularidades nos sinais de rádio e, na figura 7.2, é mostrado um exemplo de cintilação na amplitude de onda de rádio.

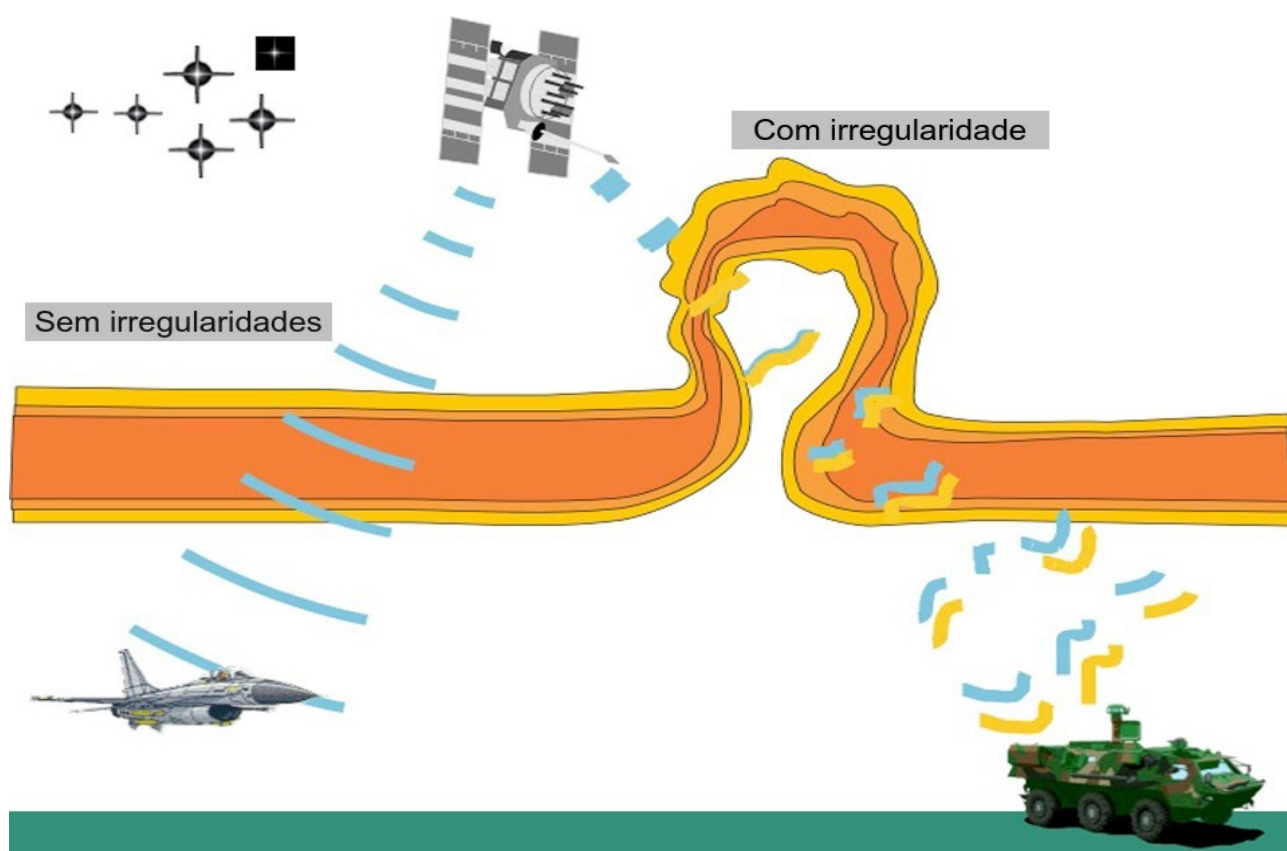


Figura 7.1: Cintilações dos sinais de rádio. Como está ilustrado na figura, nas regiões da ionosfera com irregularidades no plasma, há variações na amplitude e fase das ondas de rádio emergidas dos satélites. Já nas regiões sem irregularidades, os sinais de rádio passam “limpos” sem alterações na sua amplitude e fase. Fonte: U.S. Air Force Research Laboratory (AFRL).

A teoria das cintilações foi usada por Booker et al. (1986, apud DAVIES, 1989), para explicar o espalhamento das frequências nos ionogramas da região F, e segundo Booker, a base para explicar esses espalhamentos é a larga escala de irregularidades no plasma nesta região.

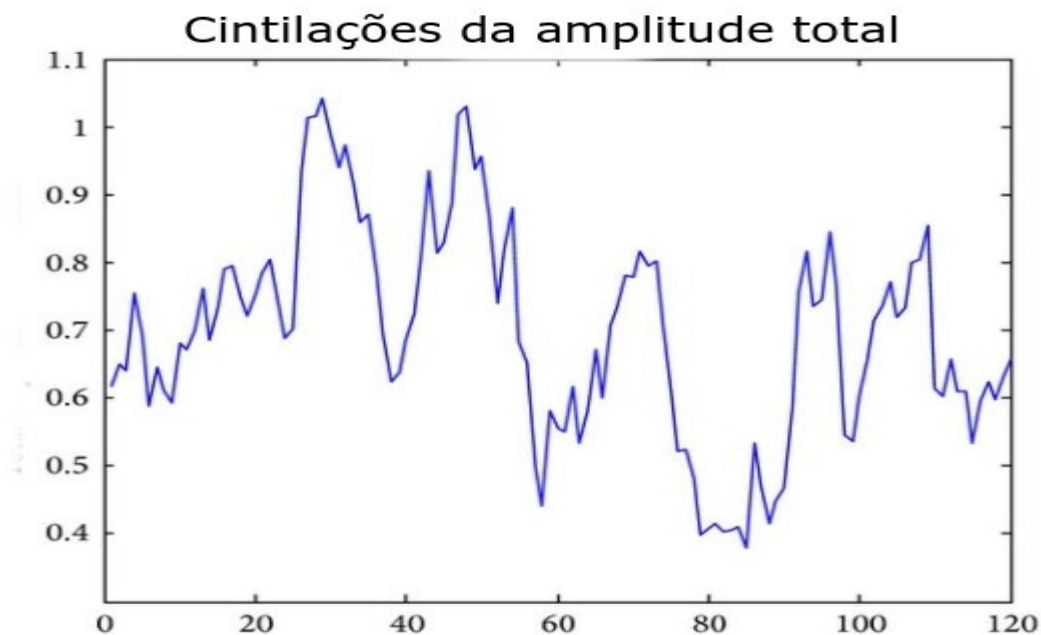


Figura 7.2: Exemplo de cintilação na amplitude. Fonte: Research Institute of Electronic Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, China.

A maioria das cintilações ocorrem na região F. A figura 7.3 ilustra um método para estimar a altitude das irregularidades com base na observação das órbitas dos satélites. Quando os satélites movem-se mais rápido que a irregularidade, a velocidade aparente da irregularidade observada do solo V_g depende da razão entre o produto da velocidade do satélite V_s e altura da irregularidade h_i pela diferença entre a altura do satélite h_s e altura da irregularidade h_i (HARGREAVES, 1992). Desse modo, temos a seguinte expressão:

$$V_g = \frac{V_s h_i}{h_s - h_i}$$

portanto, a altitude da irregularidade pode ser expressa:

$$h_i = \frac{h_s}{\left(1 + \frac{v_s}{v_g}\right)}$$

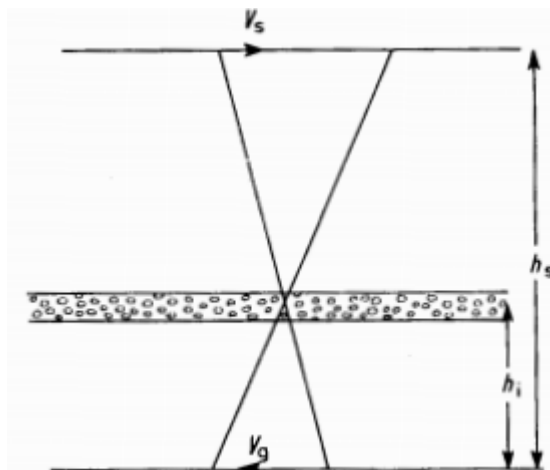


Figura 7.3: Determinação da altura da irregularidade por meio do movimento aparente. Fonte: Hargreaves, 1992.

A maioria das altitudes das irregularidades fica em torno de 200-600 km (HARGREAVES, 1992).

8. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Para entendermos como a ionosfera afeta as ondas de rádio, é muito importante, inicialmente, fazermos uma revisão do conteúdo de ondas eletromagnéticas.

Uma onda eletromagnética é formada por campos elétricos e magnéticos que variam com o tempo e o espaço. As várias frequências e comprimentos de ondas possíveis constituem um espectro, do qual uma parte é composta por ondas de rádio (HALLIDAY; RESNICK, 2016). Na figura 8.1, são mostrados todos esses comprimentos de ondas possíveis.

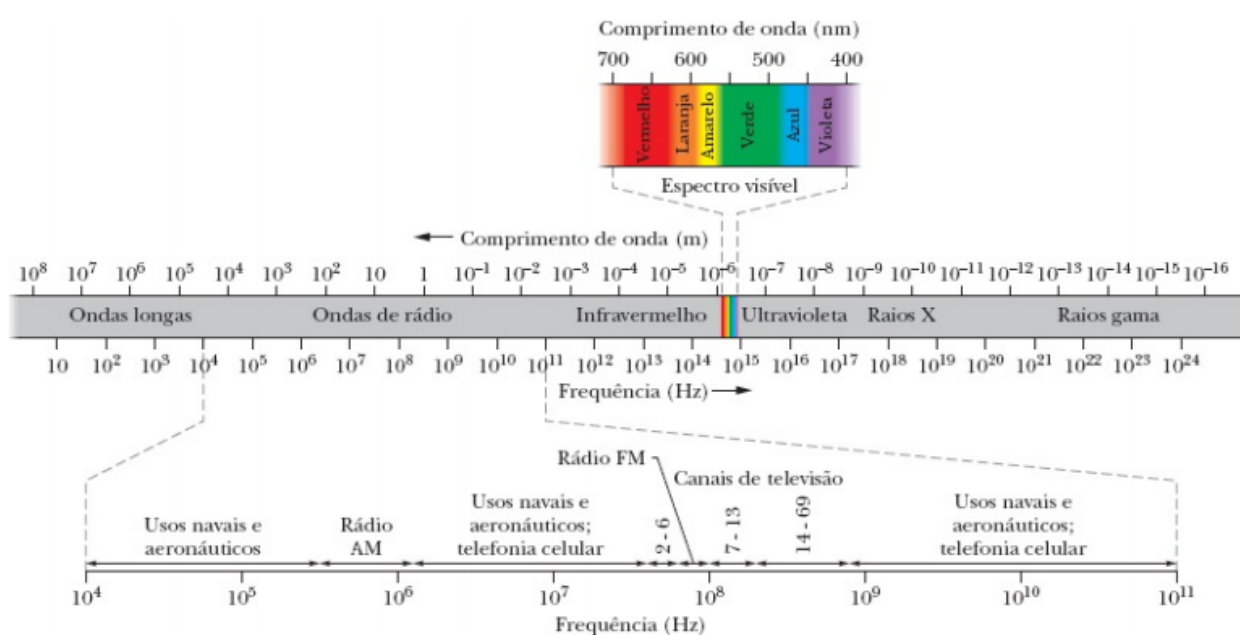


Figura 8.1: Espectro eletromagnético. Fonte: Halliday e Resnick (2016).

Algumas ondas eletromagnéticas de frequências mais altas, como os raios-X e os raios gama, são produzidas por fontes de dimensões atômicas ou nucleares, governadas pela física quântica (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

8.1 Velocidade de propagação de uma onda eletromagnética

Qualquer onda eletromagnética, de ondas de rádio até raio gama deslocam-se com a mesma velocidade de propagação de $v = 299.792.458$ m/s no vácuo. A velocidade, a frequência e o comprimento de onda, da onda eletromagnética, no vácuo, estão relacionadas pela expressão:

$$c = f\lambda \quad \text{eq. 8.1}$$

em que c é a velocidade da luz no vácuo, f a frequência, λ o comprimento de onda. (SEARS, 1959).

A velocidade da onda também pode ser expressa por:

$$c = \frac{E}{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad \text{eq. 8.2}$$

Uma onda eletromagnética que se propaga na direção x possui um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} cujos módulos dependem de x e t , é expressa pelas seguintes funções senoidais:

$$E = E_M \text{sen}(kx - \omega t) \quad \text{eq. 8.3}$$

e

$$B = B_M \text{sen}(kx - \omega t) \quad \text{eq. 8.4}$$

em que E_M e B_M são as amplitudes de \vec{E} e \vec{B} . O campo elétrico induz o campo magnético mutuamente (HALLIDAY; RESNICK, 2016). A figura 8.1 representa uma onda eletromagnética.

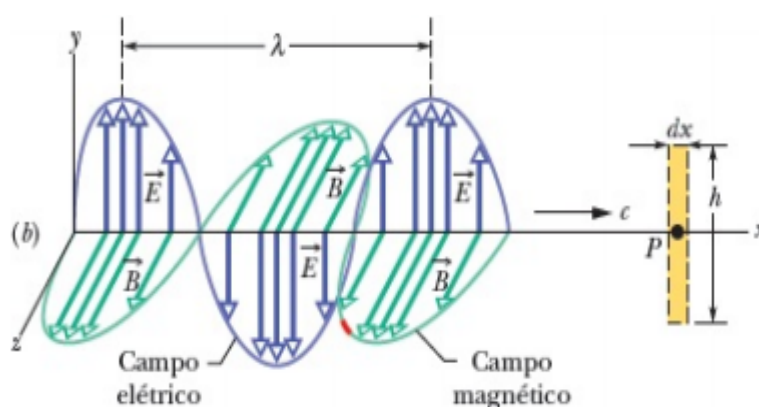


Figura 8.1: Onda eletromagnética sendo representada por funções senoidais de campo elétrico e magnético variando no tempo. Fonte: Halliday e Resnick (2016).

8.2 Fluxo de energia

Assim como qualquer outra espécie de onda, a onda eletromagnética se propaga transportando energia. A taxa com a qual a energia é transportada por uma onda eletromagnética, por unidade de área perpendicular à direção de propagação é dada pelo vetor de Poynting:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B}) \quad \text{eq. 8.5}$$

onde o fluxo de energia \vec{S} , é perpendicular às direções dos campos \vec{E} e \vec{B} (SEARS, 1959).

8.3 Pressão de radiação

Quando uma onda eletromagnética é interceptada por uma superfície, a onda exerce uma força e uma pressão sobre a superfície. Quando a radiação é totalmente absorvida pela superfície, a força é dada por:

$$F = \frac{IA}{c} \quad \text{eq. 8.6}$$

e quando a radiação é totalmente refletida, a força é dada por:

$$F = \frac{2IA}{C} \quad \text{eq. 8.7}$$

e conseqüentemente, a pressão, é dada por:

$$P_r = \frac{I}{C} \text{ (Absorção total)} \quad \text{eq. 8.8}$$

e no caso de incidência perpendicular e reflexão total:

$$P_r = \frac{2I}{C} \quad \text{eq. 8.9}$$

nas equações 8.7, 8.7, 8.8 e 8.9, I é a intensidade de radiação e A a área da superfície (HALLIDAY; RESNICK, 2016).

9. EFEITOS DA IONOSFERA NA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RÁDIO

A ionosfera tem fundamental importância para a comunicação por rádio de altas frequências (HF), pelo fato de que os sinais emitidos pelas antenas transmissoras (ou recebidos dos satélites geoestacionários pelas antenas receptoras), precisam atravessar esse meio ionizado da atmosfera. Os efeitos da ionosfera nos sinais de rádio vão depender de diversos fatores, um deles é se há ou não irregularidades nesse meio, como também a frequência dos sinais de rádio. Neste capítulo, vamos discutir os efeitos da ionosfera na propagação das ondas de rádio.

9.1 Reflexão de uma onda de rádio de alta frequência (HF) na ionosfera

Considerando-se que uma onda de rádio de alta frequência (HF) tem frequências entre 3 e 30 MHz e comprimentos de onda entre 10 e 100 m, a reflexão dessa onda vai depender da densidade de plasma da região da ionosfera onde a onda está incidindo, segundo J. K. Hargreaves (1992, p.27), para que ocorra a reflexão, a frequência da onda deve ser igual a frequência do plasma do meio ionizado onde a onda está incidindo.

Vamos considerar um sinal de rádio transmitido e incidindo com ângulo i_0 , como está ilustrado na figura 9.1, mas como a densidade de plasma da ionosfera aumenta com a altura, há vários índices de refração $n_1, n_2, n_3 \dots n_n$. De acordo com J. K. Hargreaves (1992), a ionosfera é considerada uma pilha de “lajes finas”, e cada uma dessas lajes corresponde a um índice de refração. Aplicando a lei de Snell para cada índice, temos:

$$\begin{aligned}
 \text{sen } i_0 &= n_1 \text{sen } i_1 \\
 n_1 \text{sen } i_1 &= n_2 \text{sen } i_2 \\
 n_2 \text{sen } i_2 &= n_3 \text{sen } i_3 \\
 &\cdot \quad \cdot \\
 &\cdot \quad \cdot \\
 \frac{n_{(r-1)} \text{sen } i_{(r-1)}}{\text{sen } i_0} &= n_r
 \end{aligned}
 \tag{eq. 9.1}$$

De acordo com o conjunto de equações 9.1 e com o que está ilustrado na figura 9.1, vemos que o raio que incide vai sendo refratado de forma oblíqua ao passar por cada “laje fina”, até que ao chegar em determinada laje superior ele será totalmente refratado.

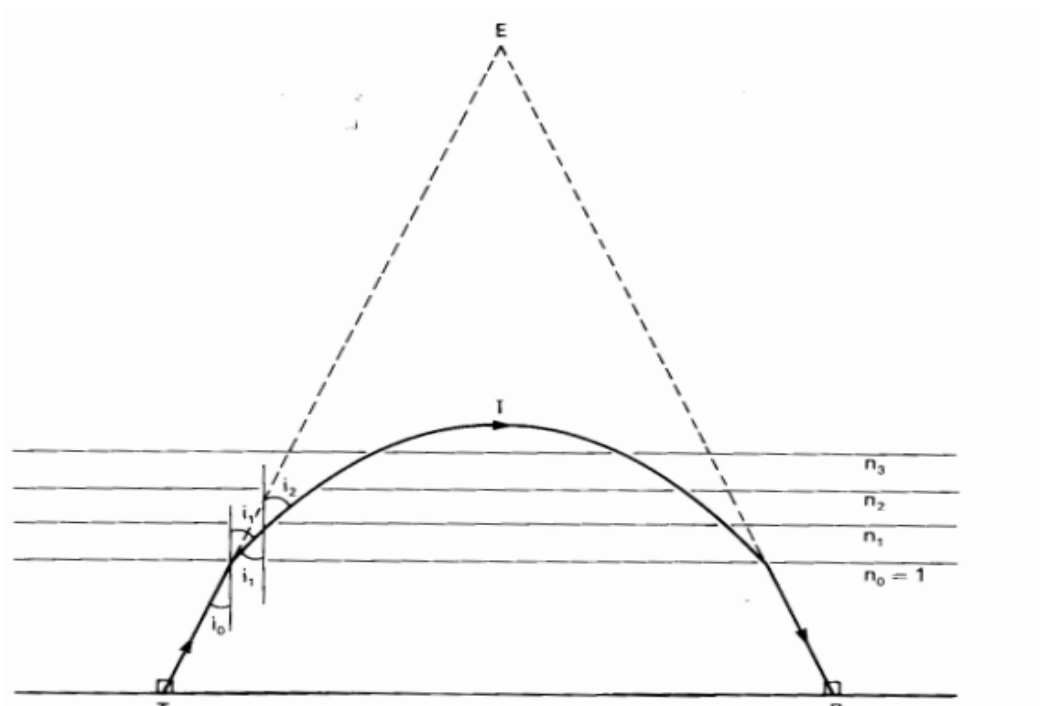


Figura 9.1 : Refração e reflexão de ondas de rádio na ionosfera. Fonte: Hargreaves (1992).

9.2 Efeito de absorção

Outro efeito que a ionosfera pode ocasionar nas ondas de rádio é a absorção. A absorção é o processo pelo qual energia transportada pela onda de rádio é absorvida pela ionosfera, essa energia é convertida grande parte em calor e outra parte em pequenos ruídos eletromagnéticos (DAVIES, 1989). Na figura 9.2, é mostrado um gráfico da densidade de plasma baseado na absorção dos sinais de rádio.

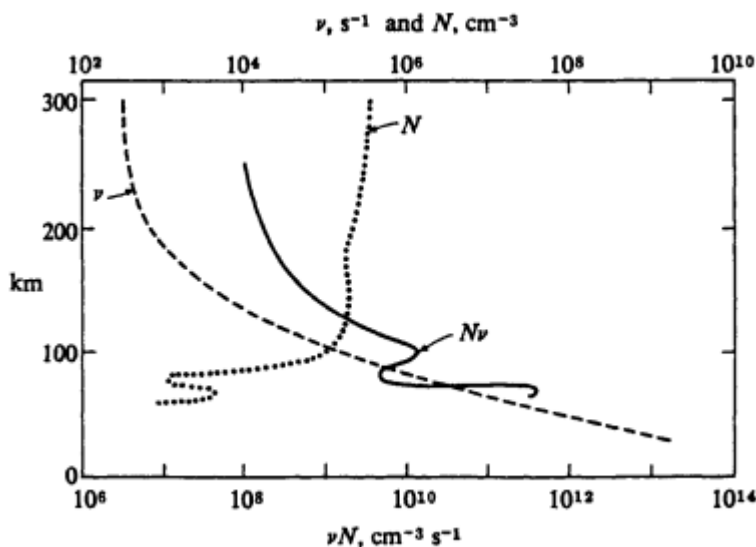


Figura 9.2: Variação da altura com a frequência de colisões de elétrons ν , densidade de plasma N , e o produto $N\nu$.
Fonte: Kenneth Davies (1989).

9.3 Propagação transionosférica

Quando uma onda de rádio cuja frequência supera a frequência crítica da ionosfera, o sinal não é refletido, mas continua a seguir para o espaço sideral. Da mesma forma, os sinais que vêm de fora da terra e da alta atmosfera, se sua frequência for superior à frequência crítica da ionosfera, eles poderão ser recebidos no solo. Porém, esses sinais não são totalmente afetados pela ionosfera, a fase, sua polarização e sua intensidade podem sofrer efeitos. (HUNSUCKER, HARGREAVES, 2002).

9.4 Efeito do campo geomagnético

O principal efeito do campo geomagnético na onda de rádio é dividir a onda incidente em duas ondas, uma delas chamada onda ordinária e a outra onda extraordinária (DAVIES, 1989), que viajará ao longo do campo magnético com diferentes velocidades. Essas ondas são circularmente polarizadas em direções opostas, e a soma de seus componentes são planos polarizados. Considerando que as ondas polarizadas circularmente fazem um ângulo θ_o e θ_E em relação a uma direção de referência, a onda plano polarizada terá o ângulo: (HUNSUCKER, HARGREAVES, 2002)

$$\Omega = (\theta_o + \theta_E)/2$$

onde

$$\theta_o = 2\pi f [t + n_o l/c]$$

e

$$\theta_E = 2\pi f [t + n_E l/c]$$

como está ilustrado na figura 9.3.

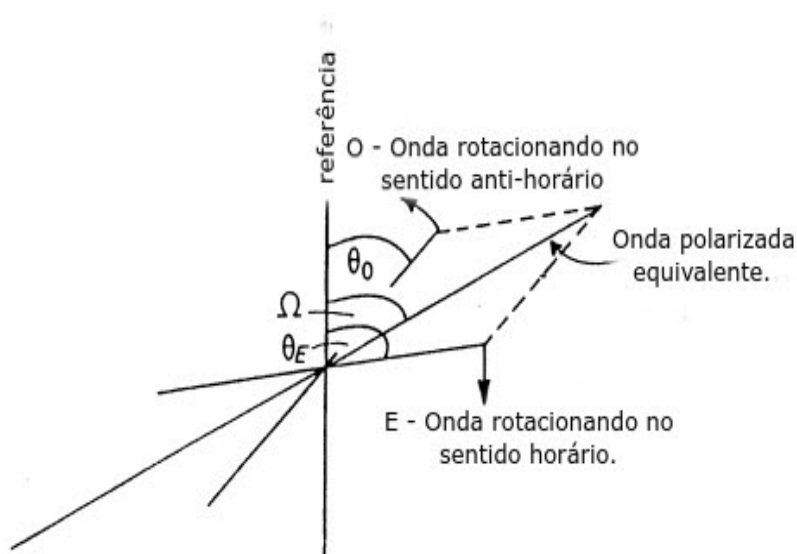


Figura 9.3: A soma de duas ondas circularmente polarizada, produz uma onda plano polarizada. Fonte: Hargreaves, 1992.

9.5 Propagação das ondas de rádio na ionosfera com irregularidades no plasma

Vimos em capítulos anteriores que a ionosfera não é totalmente homogênea, o meio ionizado da atmosfera pode ter irregularidade e essas irregularidades podem afetar a propagação das ondas de rádio.

As ondas que se propagam através de um meio irregular, irão acumular pequenas mudanças na sua amplitude e fase. Os efeitos das irregularidades nas ondas de rádio serão tratados pela teoria da difração (HARGREAVES, 1992).

9.5.1 Difração por irregularidades fracas

Vamos considerar um caso simples em que a onda incide em um meio com pequenas irregularidades. Como vemos na figura 9.2, a onda que emerge do plano de observação OO' é

difratada no ponto P, e incide no plano de incidência EE'. Se a onda difratada no plano OO' for irregular em fase, a onda emergida do plano de incidência também será irregular em fase. Segundo J.K Hargreaves (1992), em geral tanto a amplitude como a fase serão afetadas.

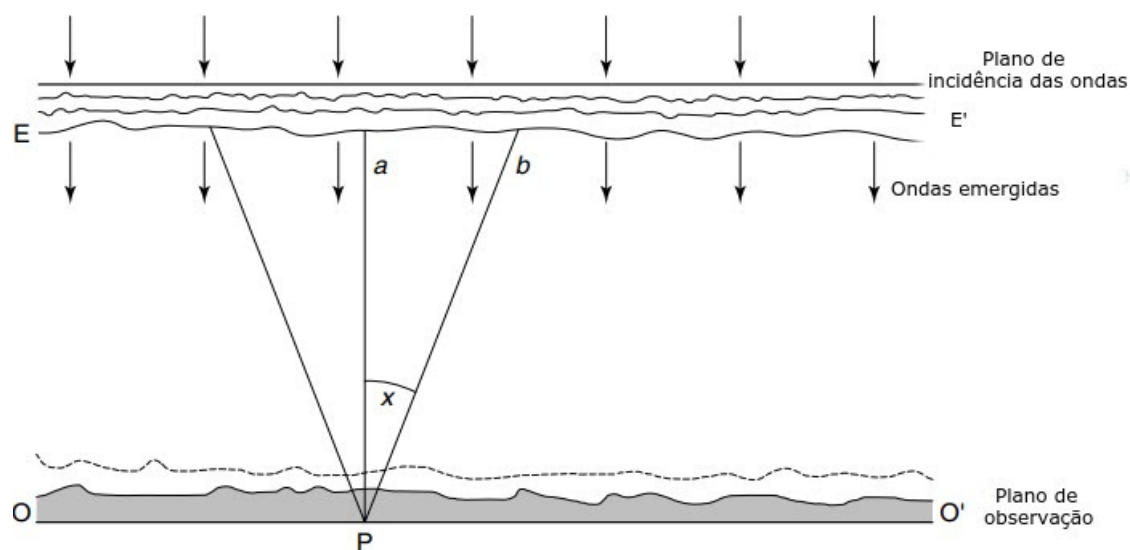


Figura 9.2: Difração de uma onda em um meio irregular. Fonte: Hargreaves (1992).

9.6 A temperatura dos íons e elétrons

A temperatura dos íons e elétrons também pode afetar a propagação das ondas de rádio, devido ao movimento térmico aleatório dos elétrons que produz espalhamento nos sinais de rádio. No processo de fotoionização, os elétrons são dissociados de suas moléculas de origem com energia maior que a energia térmica do gás ambiente (DAVIES, 1989). Na figura 9.5, está ilustrado o gráfico da variação da altura com a temperatura, onde T_i é a temperatura dos íons, T_E é a temperatura dos elétrons e T_n é a temperatura dos gases neutros.

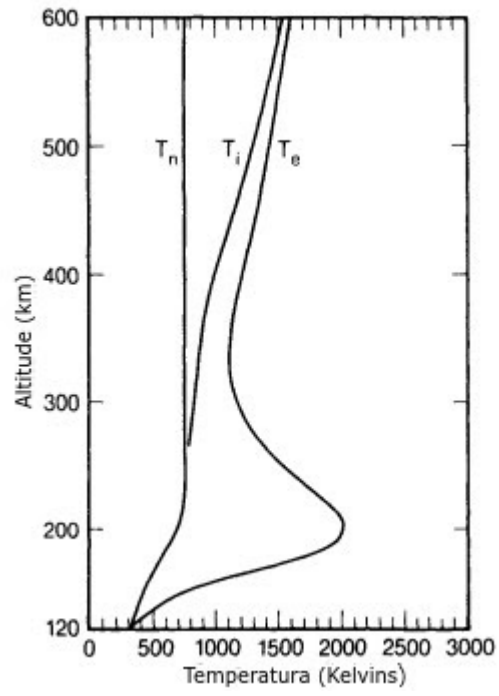


Figura 9.5: Variação da altura com a temperatura. Fonte : Kenneth Davies (1989)

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ionosfera por ser um meio eletricamente ativo tem influência nas ondas de rádio, portanto, o nosso objetivo neste trabalho foi entender *como a ionosfera afeta as ondas de rádio que alcançam*. Para chegarmos a esse objetivo, fizemos uma pesquisa na bibliografia científica com foco em resultados qualitativos.

O que descobrimos ao longo dessa pesquisa foi que a ionosfera afeta as ondas de rádio das seguintes formas:

- 1) **Reflexão das ondas de rádio.** Autores como J. K Hargreaves (1992), Kenneth Davies (1989) reforçam essa teoria. Esse fenômeno é claramente observado por instrumentos de sondagem ionosférica, como as ionossondas, pois sua técnica para sondagem utiliza esse princípio.
- 2) **Absorção.** É a característica da ionosfera de absorver a energia transportada pela onda de rádio e essa energia é dissipada em forma de calor. Kenneth Davies (1989) trata dessa característica.
- 3) **Propagação transionosférica:** Quando uma onda tem frequência superior a frequência crítica do plasma ionosférico, ela não é refletida, mas se propaga para o espaço sideral. R.D. Hunsucker e Hargreaves (2002) abordam esse fenômeno.
- 4) **Spread- F:** Um dos efeitos notáveis da ionosfera nas ondas de rádio é o fenômeno spread-F, que nada mais é do que o espalhamento dos sinais de rádio nos ionogramas. Esse efeito se dá principalmente pela presença de irregularidades no plasma ionosférico. Autores como J.K. Hargreaves (1992), Kenneth Davies (1992) e M. C Kelley (1989), tratam desse assunto em suas obras.
- 5) **Cintilações:** São alterações irregulares na amplitude e fase dos sinais de rádio na comunicação com satélites. Esse efeito é causado principalmente por causa da presença de irregularidades no plasma ionosférico. J.K. Hargreaves (1992) aborda bem esse tema.

10.1 Conclusão

Retomando o assunto principal, a ionosfera tem uma grande influência nas ondas de rádio que a alcançam. Os efeitos que a ionosfera causa nas ondas de rádio vai depender das suas condições, se há ou não irregularidades.

A começar considerando a ionosfera uniforme (ou seja, não havendo irregularidades), os principais efeitos da ionosfera uniforme nas ondas de rádio são reflexão dessas ondas (se a frequência

da onda for igual a frequência da densidade de plasma), absorção ou sem efeito (nesse caso, a onda passará livre para o espaço sideral). Sua amplitude e fase não terão alterações significativas ou até mesmo não terão alterações.

Considerando a presença de irregularidades, as ondas de rádio irão sofrer significativas alterações nas suas amplitudes e fases. Um fenômeno que é notável nos instrumentos de sondagem ionosférica, por meio dos ionogramas, é o spread-F. Esse fenômeno, é o espalhamento dos sinais de rádio nos ionogramas e é um dos principais indicativos de irregularidades na ionosfera.

O objetivo geral deste trabalho foi *entender como a ionosfera afeta as ondas de rádio*, esse objetivo foi atingido pelo autor e, de acordo com os vários estudiosos da área da física da alta atmosfera citados ao longo deste trabalho, a hipótese de que a ionosfera afeta as ondas de rádio é verdadeira e os principais dados que corroboram essa afirmação foram apresentações de ionogramas, que fornecem um tratamento quantitativo dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BERTONI, F. C. P. **Estudos da derivas ionosféricas por meio de ionossondas digitais**. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial. INPE, 1998.
2. BUDDEN, K.G. **The propagation of radio waves: the theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere**. Cambridge University Press, New York, 1988.
3. DAVIES, Kenneth. **Ionospheric radio**. The Institution of Engineering and Technology. London, United Kingdom, 2008.
4. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de física**. Ed. LTC. Rio De Janeiro, 2016.
5. HARGREAVES, J. K. **The solar terrestrial environment: An introduction to geospace - the science of terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere**. (Cambridge atmosphere and space science series 5) . University of Lancaster, 1992.
6. HUNSUCKER, Robert. **Radio techniques for probing the terrestrial ionosphere**. Geophysical Institute, University of Alaska, 1991.
7. HUNSUCKER, R.D; HARGREAVES, J.K. **The High-latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation**. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks; University of Lancaster, 2002.
8. KELLEY, Michael C. **The Earth's ionosphere**. International Geophysics Series, Vol. 43. New York, 1989.
9. SEARS, Francis Weston. **Princípios de física**. Ed. Ao livro Técnico. Rio De Janeiro, 1956.