

Propagação Radioelétrica

2017/II

Profa. Cristina



Módulo I

- Introdução à Propagação Radioelétrica
- A Atmosfera
- A Ionosfera
- Ionização
- Camadas Ionosféricas (D, E, F1, F2)
- Observando a Ionosfera
- Variações Ionosféricas
- Variações devidas ao Ciclo Solar
- Tipos (ou modos) de propagação em HF
- Ground, Sky e Space Waves
- Line-of-sight Propagation
- Sky Wave Propagation
- Ground Wave Propagation
- Características da Propagação nas Camadas D, E e F
- Saltos - Distância de Salto e Zona de Salto
- Frequências Limites para Sky Waves - o intervalo de frequências utilizáveis
- Modos de Propagação

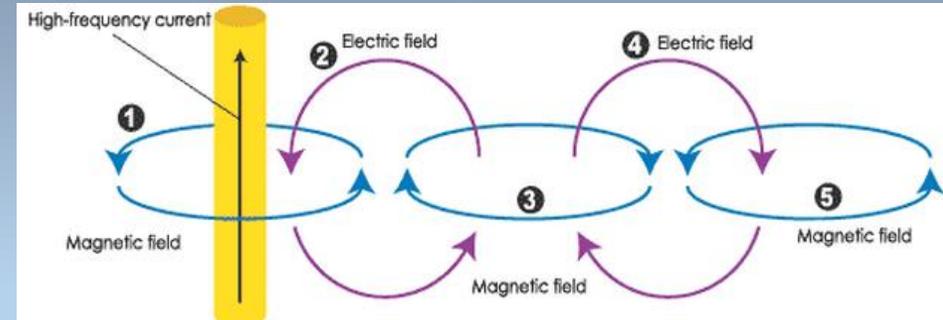
Radiopropagação

- Comunicações via rádio são dependentes das condições de propagação das ondas eletromagnéticas.
- A propagação de ondas eletromagnéticas em torno da Terra é influenciada pelas propriedades do solo e da atmosfera.
- A Terra é um corpo não homogêneo cujas propriedades eletromagnéticas variam de um ponto a outro (por exemplo, a água do mar é altamente condutora, enquanto que as areias do deserto são um dielétrico, de condutividade quase nula, e dissipando energia).
- A atmosfera que envolve a Terra é um meio dinâmico, e suas propriedades variam com a temperatura e com a umidade.



Ondas Eletromagnéticas

- Previstas por Maxwell, detectadas e geradas por Hertz nos anos 1880, são utilizadas em radiodifusão, TV, radares, e telecomunicações em geral.



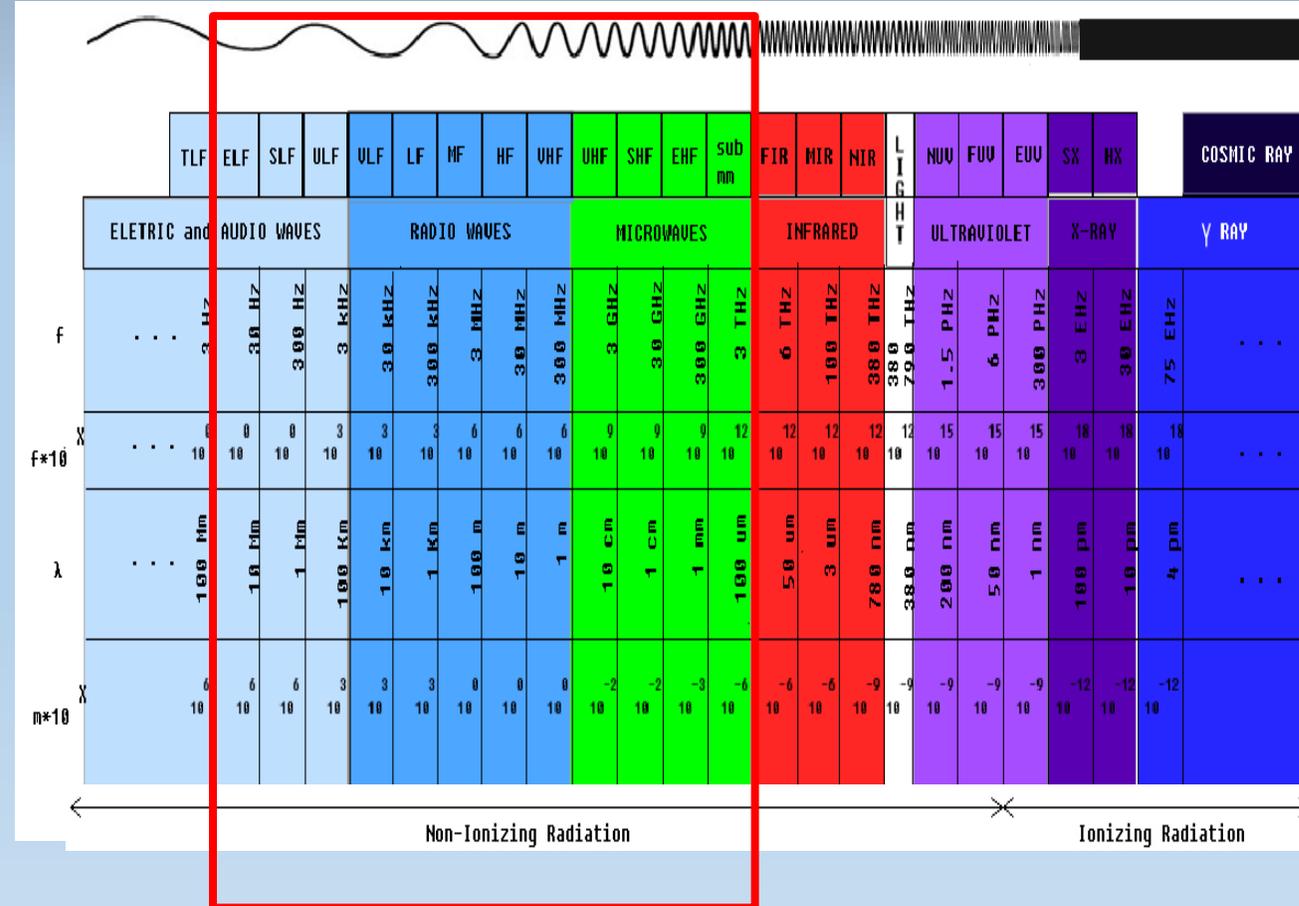
- A onda EM é dual, como o próprio nome diz: elétrica/magnética.
- Uma componente dela é o campo elétrico E (V/m), e a outra o campo magnético H (A/m).
- O campo elétrico dá origem ao campo magnético e o campo magnético dá origem ao campo elétrico, e assim eles vão gerando um ao outro, ao longo do espaço. Ou seja, se estabelece uma **onda**.

Ondas de Rádio: Frequências mais baixas, de até cerca de 30kHz a 300MHz. Transmissões de rádio e TV.

Microondas: Frequências mais elevadas do que as frequências das ondas de rádio, compreendidas entre 300MHz e 3THz. Amplamente usadas em telecomunicações, transportando sinais de TV ou transmissões telefônicas.

Ondas Eletromagnéticas e o Espectro Eletromagnético

Y	- Gamma Rays
X-Rays	
HX	- Hard X-Rays
SX	- Soft X-Rays
Ultraviolet	
EUU	- Extreme Ultraviolet
FUV	- Far Ultraviolet
NUU	- Near Ultraviolet
Infrared	
NIR	- Near Infrared
MIR	- Moderate Infrared
FIR	- Far Infrared
Microwaves	
EHF	- Extremely High Frequency
SHF	- Super High Frequency
UHF	- Ultra High Frequency
Radio Wave	
VHF	- Very High Frequency
HF	- High Frequency
MF	- Medium Frequency
LF	- Low Frequency
ULF	- Very Low Frequency
Electric and Audio Waves	
SLF	- Super Low Frequency
ELF	- Extremely Low Frequency
TLF	- Tremendously Low Frequency



Nomenclatura das Faixas de Radiofrequência

Aplicações

(Técnica)

(Leiga)

3 Hz	AUDIO WAVES	F	ELF – Extremely Low Frequency	Ondas Extremamente Longas	Comunicações Submarinas, Escavações de minas
30 Hz		ELF	SLF – Super Low Frequency		
300 Hz		SLF	ULF – Ultra Low Frequency		
3 kHz		ULF	VLF – Very Low Frequency		
30 kHz	RADIO WAVES	ULF	LF – Low Frequency	Ondas Muito Longas	Auxílio à navegação aérea, serviços marítimos, radiodifusão
300 kHz		LF	MF – Medium Frequency		
3 MHz		MF	HF – High Frequency	Ondas Longas	Radiodifusão local e distante, serviços marítimos.
30 MHz		MF	VHF – Very High Frequency		
300 MHz		UHF	UHF – Ultra High Frequency	Ondas Tropicais / Ondas Curtas	Transmissão de TV, sistemas comerciais e particulares de comunicação, serviço de segurança pública (polícia, bombeiros, etc)
3 GHz		UHF	SHF – Super High Frequency		
30 GHz	MICROWAVES	SHF	EHF – Extremely High Frequency	Microondas	Comunicação pública à longa distância: sistemas interurbanos e internacionais em radiovisibilidade, tropodifusão e satélite
300 GHz		EHF			
3 THz		sub mm			

Propagação Ionosférica:

Acontece com ondas de altas frequências (HF), que correspondem à porção do espectro entre 3 e 30 MHz.

Propagação em Linha de Visada (Line of sight - LoS) ou Quase Linha de Visada (Near Line of Sight - NLoS):

Acontece com ondas de VHF, UHF e Microondas (maiores que 30MHz).

Propagação Ionosférica

A comunicação usando a faixa de HF é possível porque existe uma camada da atmosfera superior terrestre chamada ionosfera, a qual refrata e/ou reflete as ondas de rádio.

- O Sol é a fonte da energia necessária para arrancar os elétrons das moléculas do topo da atmosfera e transformá-las em íons, o que faz o plasma ionizado resultante ter características reflexivas e/ou refrativas.
- As características elétricas da ionosfera estão sujeitas a amplas variações, em função da radiação solar, que varia com a hora do dia, a estação do ano, e a localização geográfica.
- Além disso ocorrem variações cíclicas na capacidade da ionosfera de refletir ondas de rádio, devidas aos ciclos de atividade solar.
- Quando a superfície solar está coberta com um grande número de manchas solares, o grau de ionização da ionosfera é maior, aumentando a capacidade de reflexão e refração da ionosfera.

A Atmosfera

A atmosfera pode ser dividida em diferentes camadas, de acordo com suas propriedades.

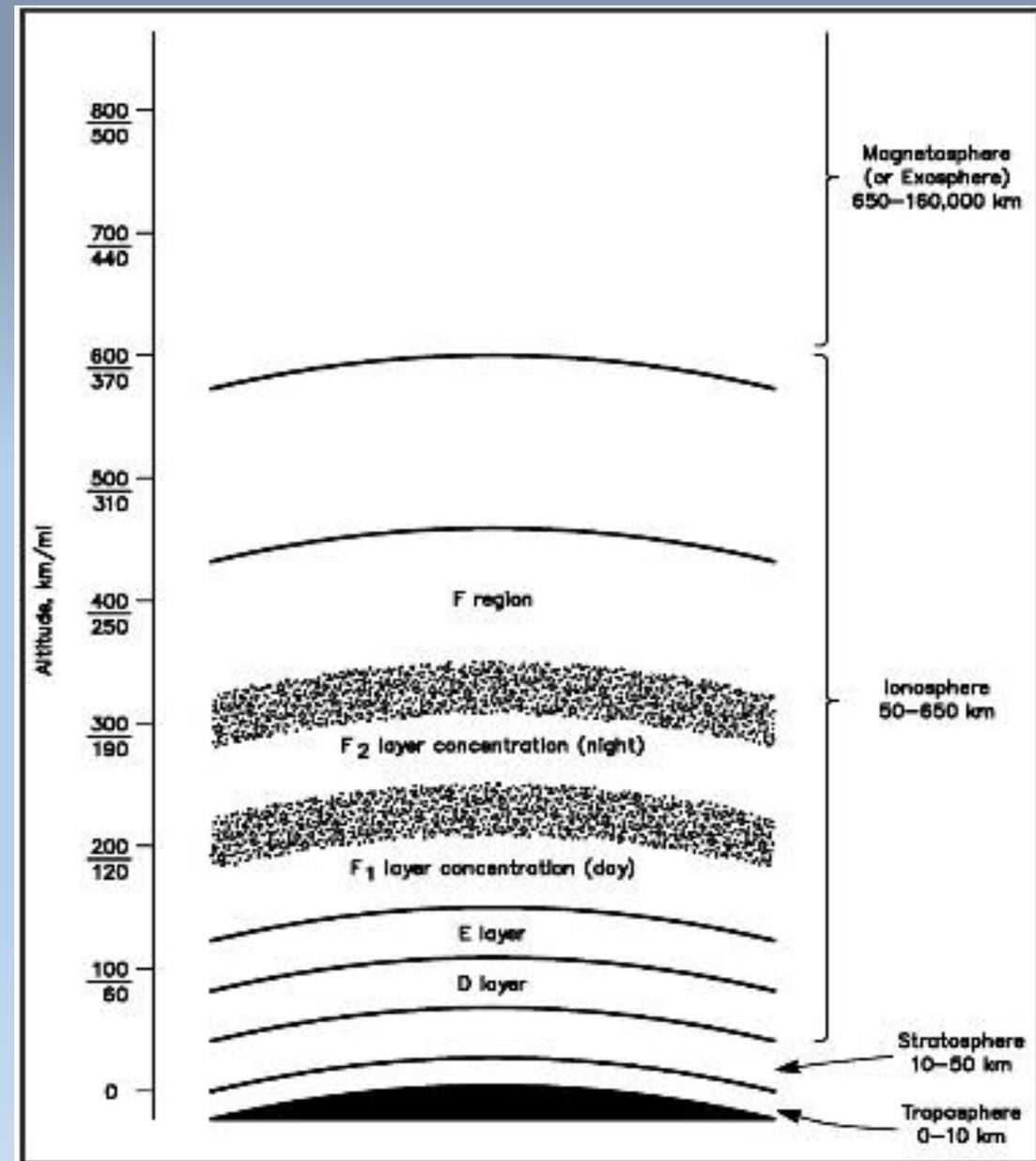
A terminologia mais usual é mostrada na figura ao lado.

Troposfera: parte da atmosfera mais próxima do solo, se estendendo por cerca de 10km.

Estratosfera: entre 10km e 50 km, compreendendo a camada de ozônio, a uma altura de cerca de 20km.

Ionosfera: compreende várias camadas meteorológicas e se estende por cerca de 50km a 650km. A ionosfera é a camada mais importante para comunicações em ondas curtas, embora a ionosfera também seja importante para comunicações em VHF e UHF.

Magnetosfera ou Exosfera: se estende de 650km a 160000km (distância Terra/Lua= 384403 quilômetros).



Note que as distâncias tomam como referência o nível do solo.

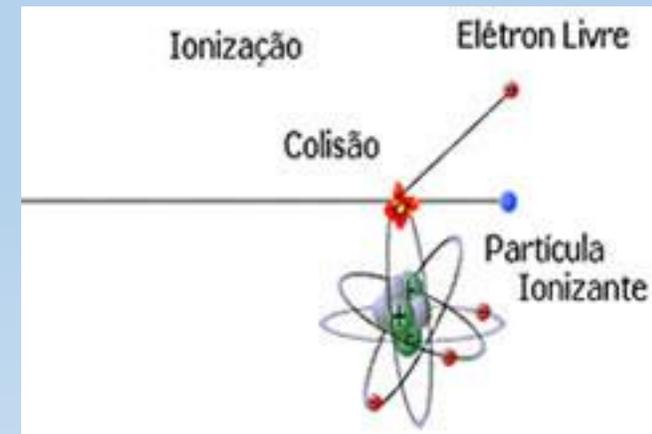
A Ionosfera

- É a região que se estende de cerca de 50 km a aproximadamente 650 km, em que a maioria das moléculas da atmosfera são ionizadas por radiação do Sol.
- A Ionosfera é assim denominada porque é a região da atmosfera em que existem íons.
- A ionosfera é a camada que permite que os sinais de rádio possam ser propagados de uma localidade a outra, na superfície do planeta, mediante reflexão e/ou refração da onda.



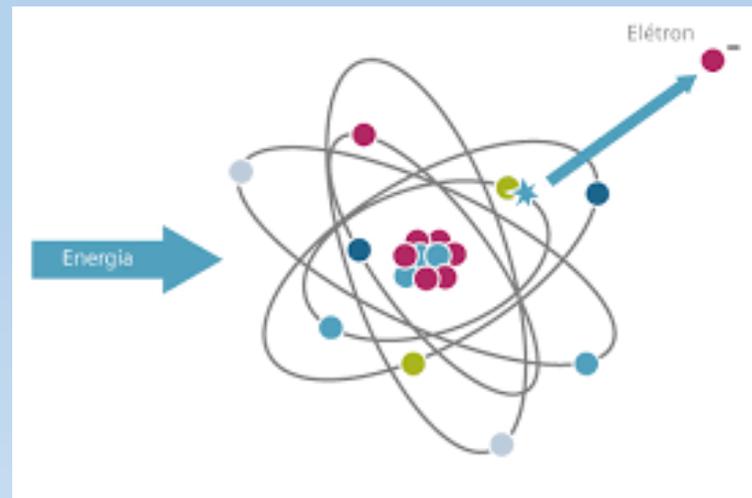
A Ionosfera

- Na maior parte das regiões da atmosfera as moléculas estão em um estado combinado, permanecendo eletricamente neutras.
- Na Ionosfera, entretanto, a radiação solar, principalmente luz ultravioleta, é tão intensa que quando atinge as moléculas gasosas, estas se quebram – ionizam – e um elétron é liberado. O que sobra é um íon positivo (uma molécula com um elétron faltando) e um elétron livre.
- A ionização muda a velocidade dos elétrons livres na ionosfera, alterando a constante dielétrica e, conseqüentemente, a densidade do meio, provocando reflexão e refração do sinal (ondas de rádio) que se propaga na ionosfera. (Alegoricamente a radiação solar “metaliza” a ionosfera”.)



Ionização

- A ionização é o processo em que os elétrons, que são carregados negativamente, são removidos de átomos neutros ou moléculas, para deixar íons carregados positivamente e elétrons livres.
- São os íons que dão nome à ionosfera, mas são os elétrons muito mais leves e com movimentos mais livres que são importantes em termos de propagação de rádio HF.
- Os elétrons livres na ionosfera causam a refração das ondas de rádio HF (refratar = curvar) e eventualmente as refletem de volta à terra.
- Quanto maior a densidade de elétrons, maiores as frequências que podem ser refletidas.



Produção e perda de elétrons

Produção:

- A radiação do Sol provoca ionização na ionosfera.
- Os elétrons são produzidos quando a radiação solar colide com átomos e moléculas não carregados.
- Uma vez que este processo requer radiação solar, a produção de elétrons só ocorre no hemisfério da ionosfera em que é dia.



Produção e perda de elétrons

Perda:

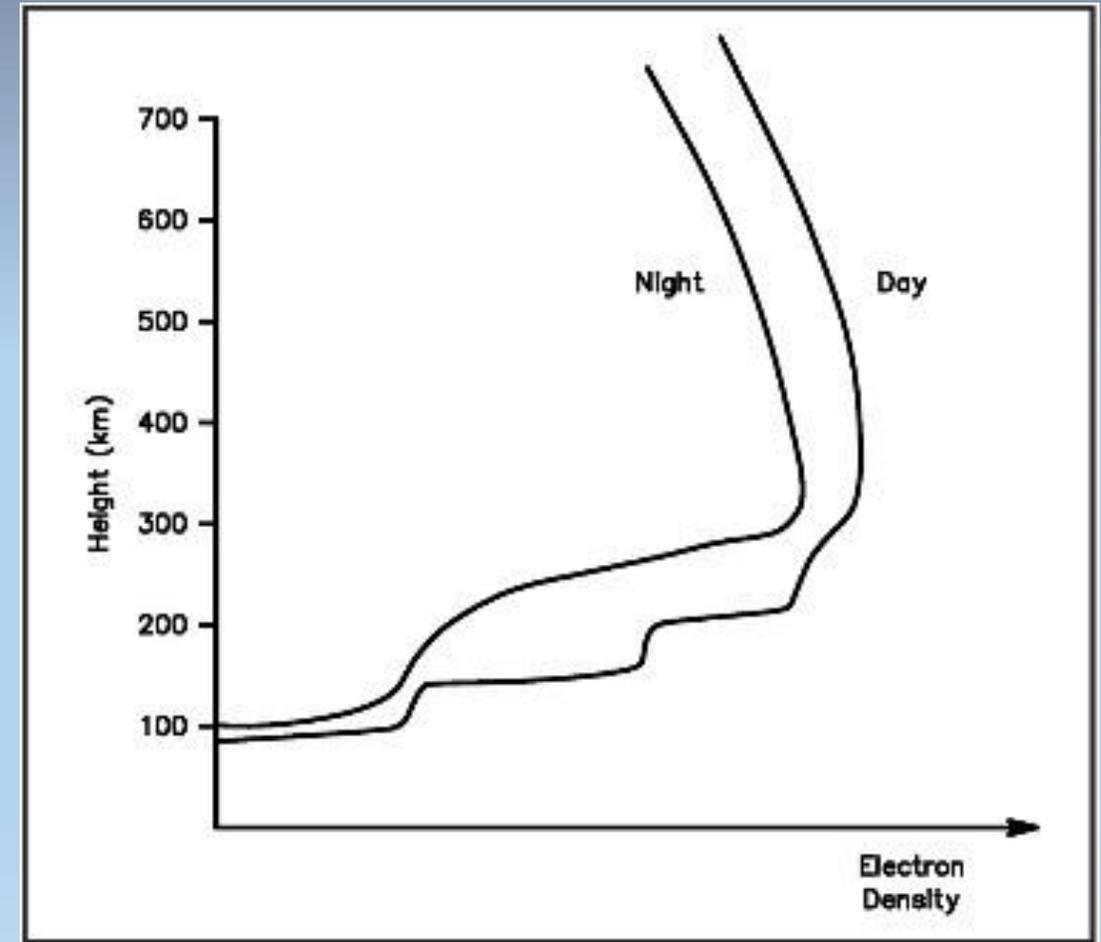
- A perda de elétrons livres na ionosfera ocorre quando um elétron livre combina com um íon carregado para formar uma partícula neutra.
- A perda de elétrons ocorre continuamente, tanto no dia como na noite.

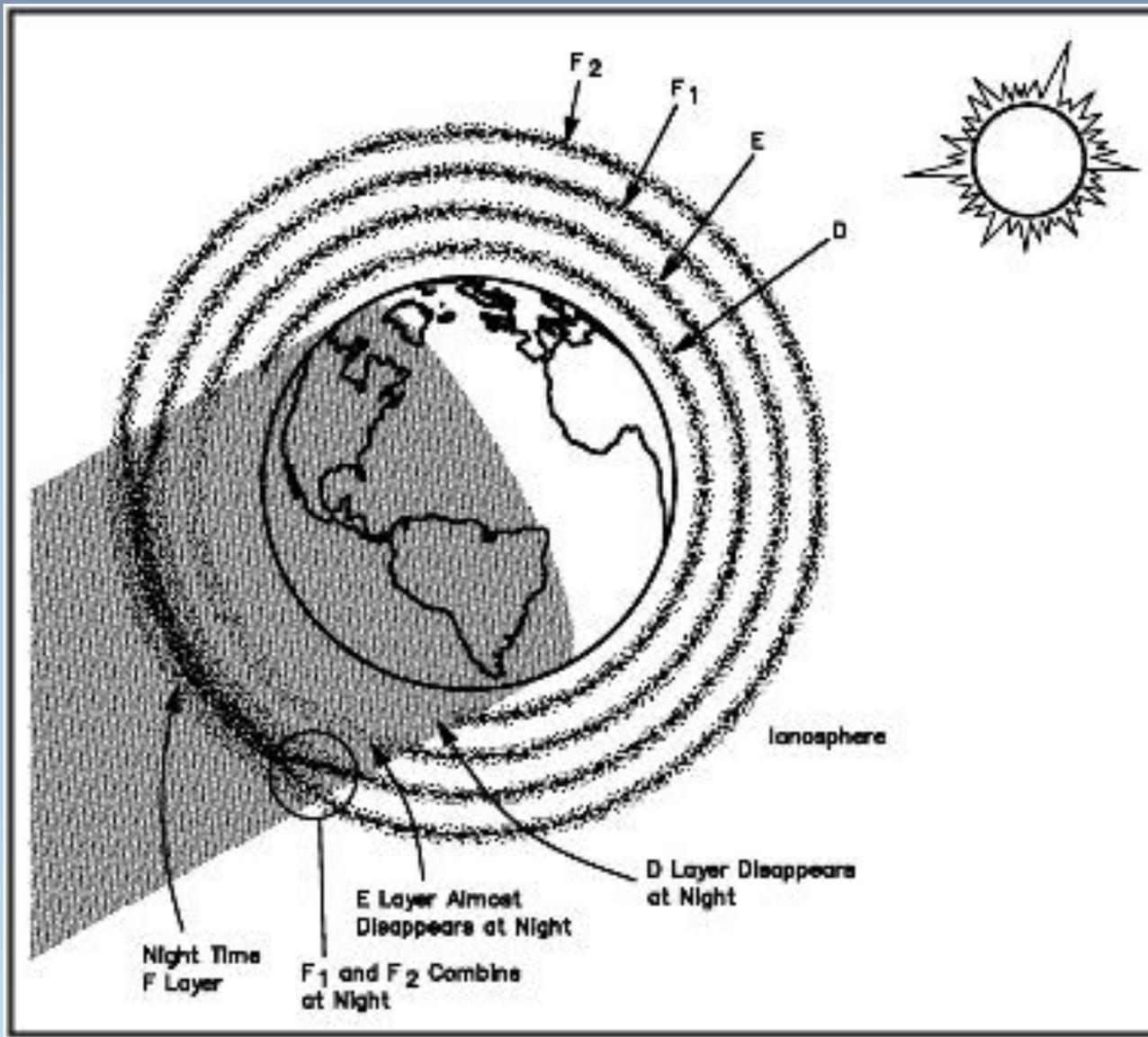


O número de elétrons começa a aumentar a uma altitude de cerca de 30km, mas a densidade de elétrons não é ainda suficiente para afetar as ondas de rádio.



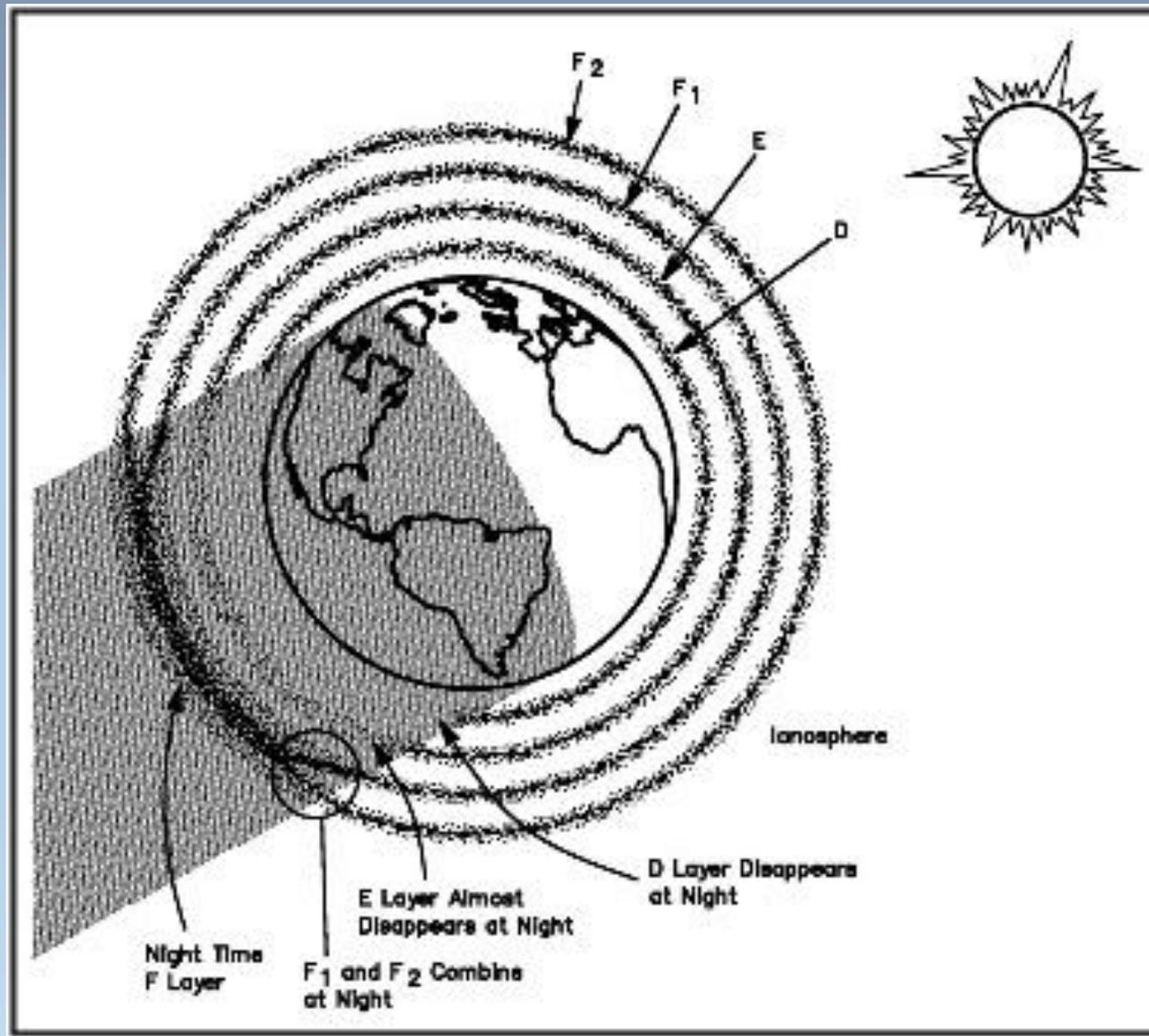
Apesar do nome ionosfera ser derivado dos íons, são os elétrons livres que efetivamente afetam as ondas de rádio.





Camadas Ionosféricas

- Frequentemente a ionosfera é tratada como se fosse formada por um certo número de camadas. No entanto, toda a ionosfera contém moléculas ionizadas e elétrons livres.
- As camadas são melhor representadas se pensarmos em picos nos níveis de ionização.
- As camadas, picos ou regiões são classificadas em D, E e F (F1 e F2).
 - Camada D: 50 a 90 km;
 - Camada E: 90 a 140 km;
 - Camada F1: 140 to 210 km;
 - Camada F2: acima de 210 km.



Camada D

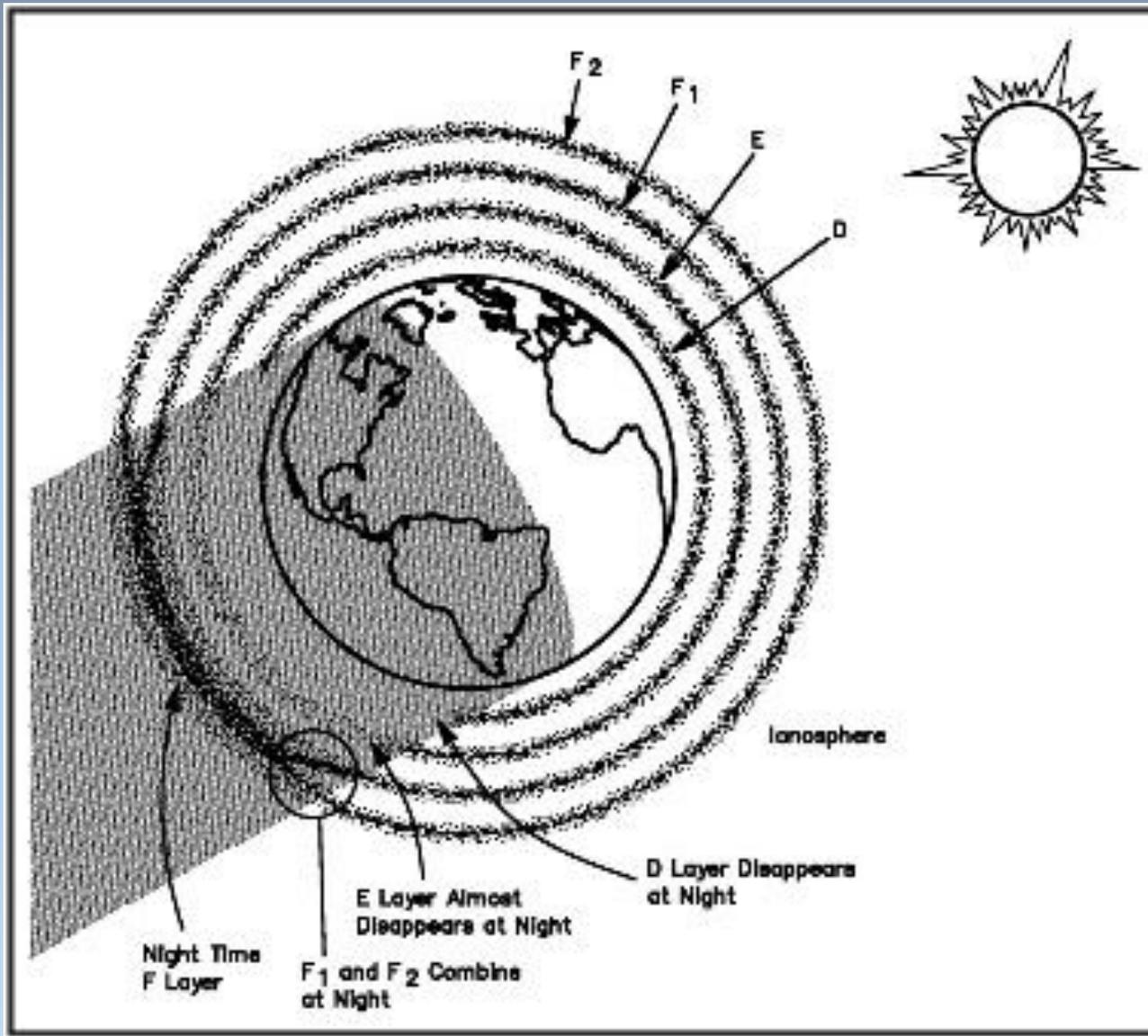
É a camada mais baixa, a altitudes entre 50 e 90km.

Está presente de dia, quando há radiação solar.

Apesar de haver radiação solar, dado que a densidade do ar é ainda alta nesta altitude, íons e elétrons se recombinam relativamente rápido.

Após o pôr do Sol, quando a radiação solar é bloqueada pela Terra, os níveis de elétrons caem rapidamente, e a camada D efetivamente desaparece.

Camada E



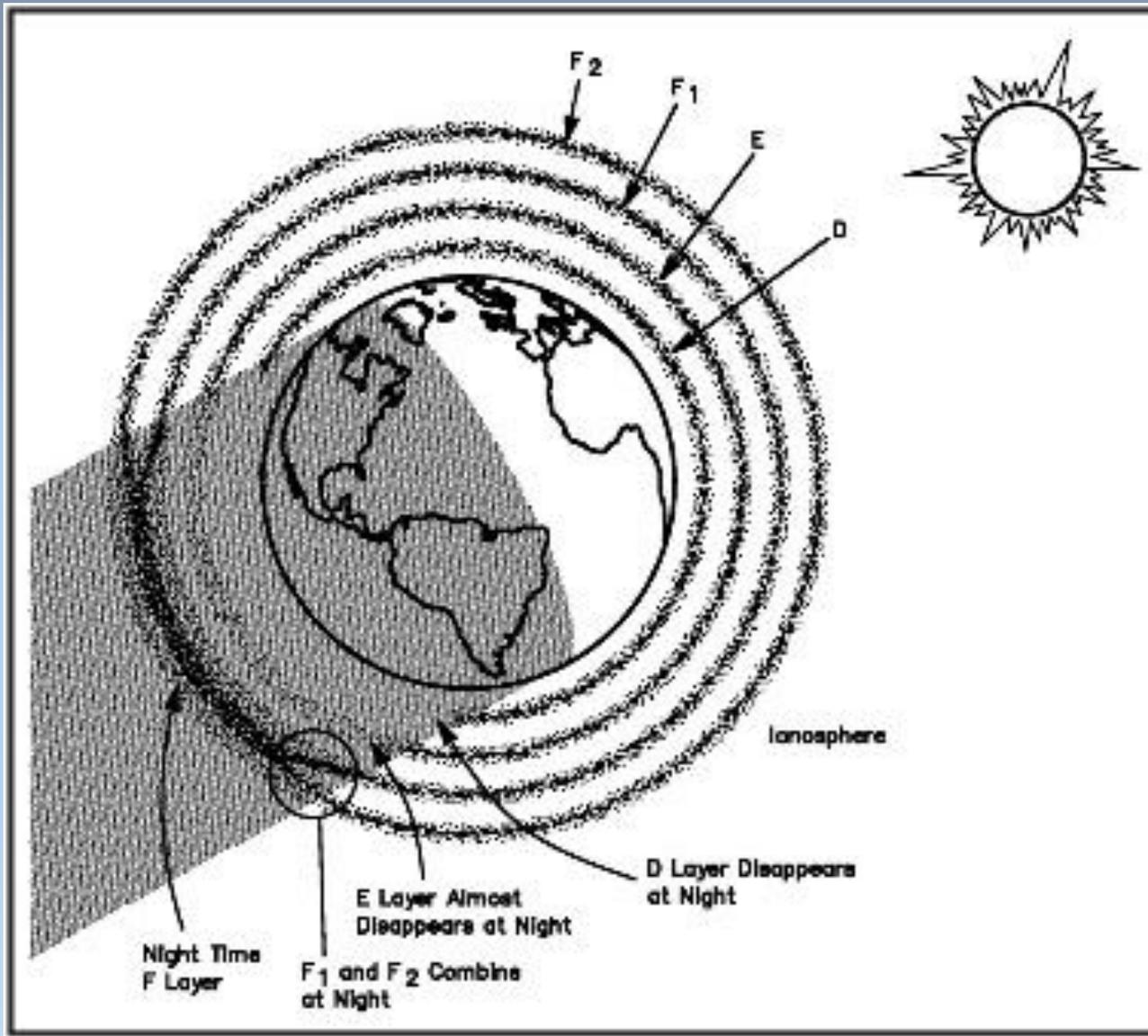
É a camada logo acima da camada D.

É encontrada em altitudes entre 90 e 140km.

Os níveis de ionização caem rapidamente após o pôr do sol, em função da relativamente rápida combinação entre elétrons e íons.

Apesar de persistir uma pequena quantidade de ionização residual, a camada E virtualmente desaparece à noite.

Camada F

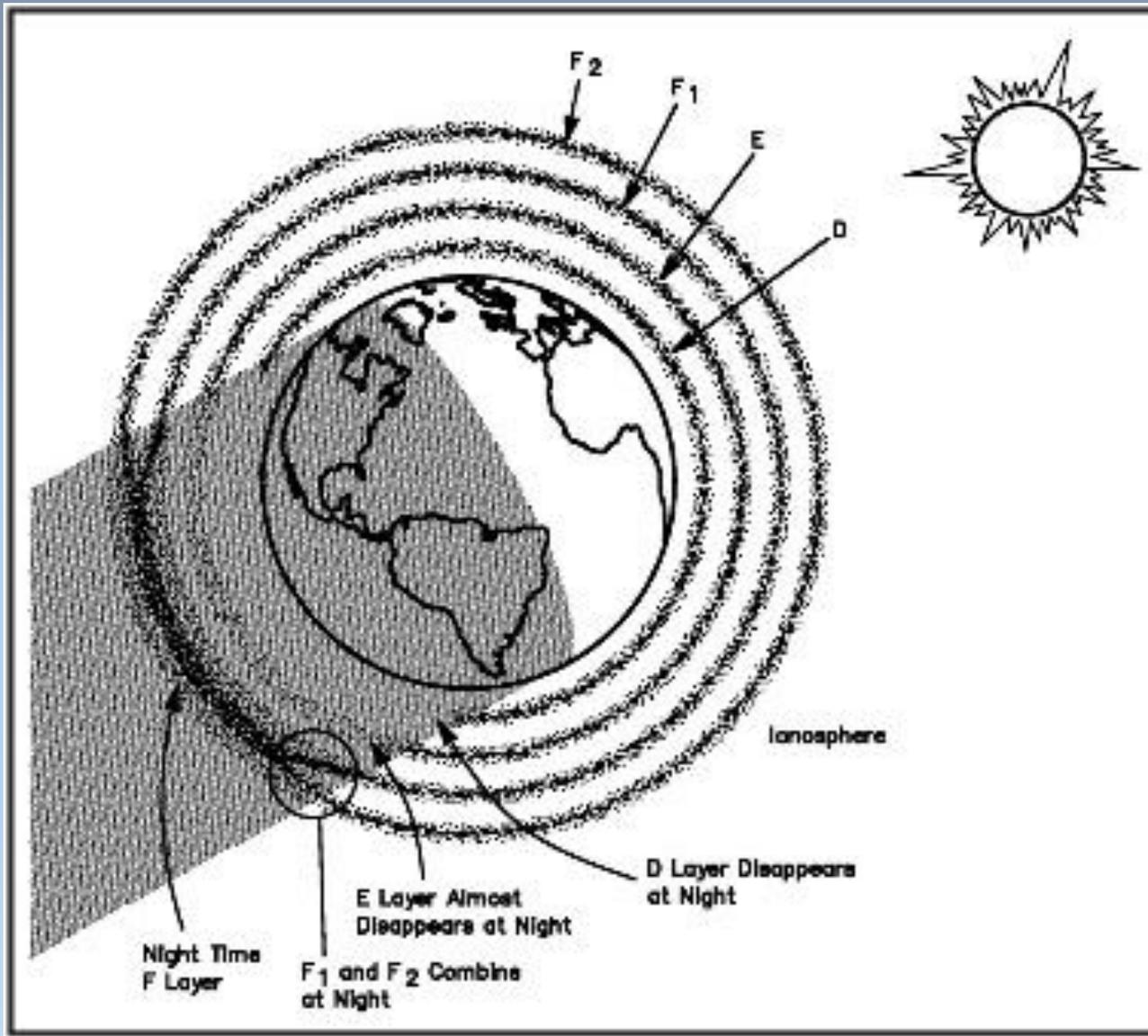


É a camada mais importante para comunicações à longa distância.

Durante o dia, esta camada se separa em duas sub-camadas, denominadas F1 e F2.

À noite, as duas camadas se mesclam em uma única camada.

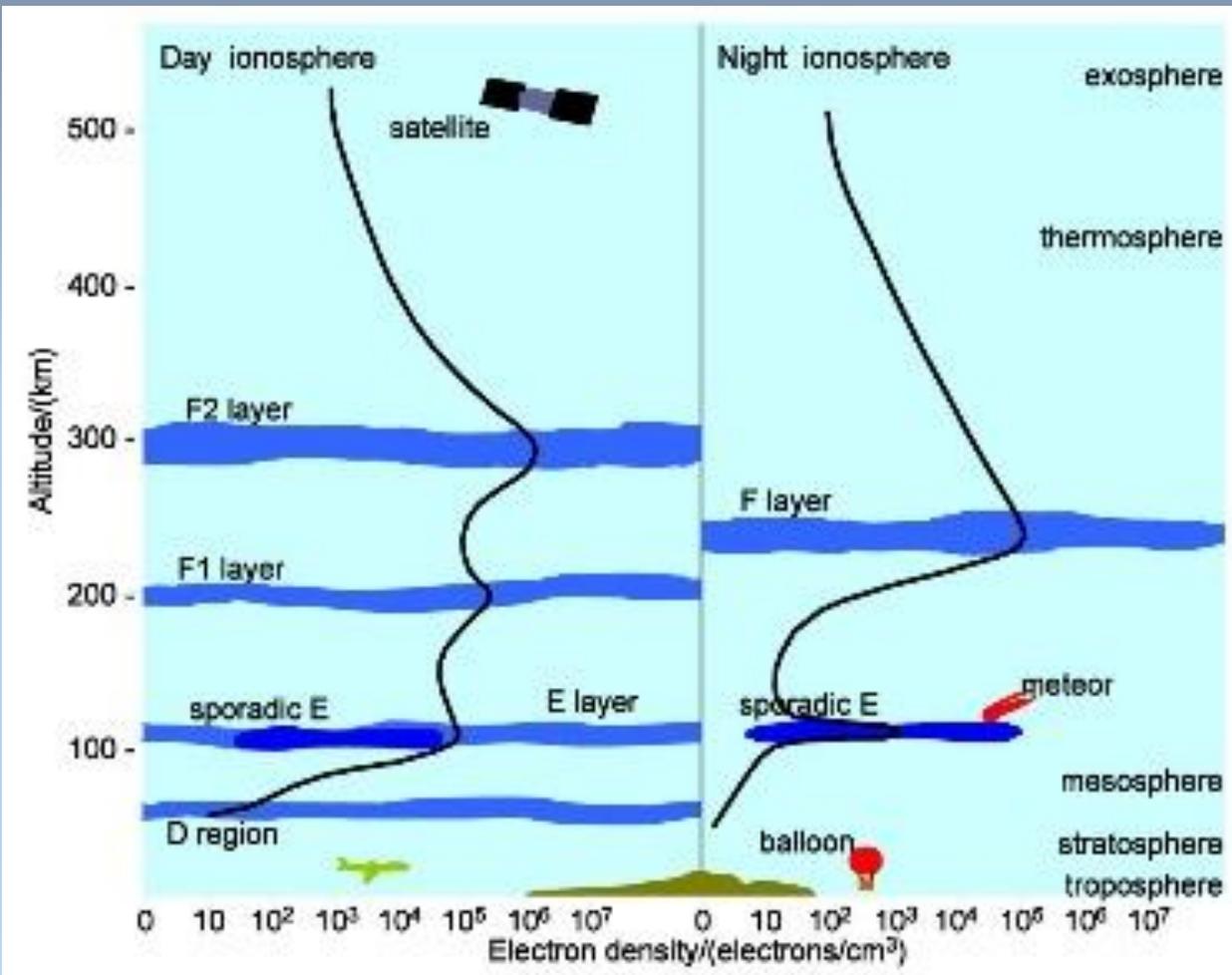
Camada F



As altitudes da camada F variam de acordo com a hora do dia, a estação do ano e o Sol.

A camada F1 é encontrada entre 140km e 210km.

A camada F2 é encontrada acima de 210km.



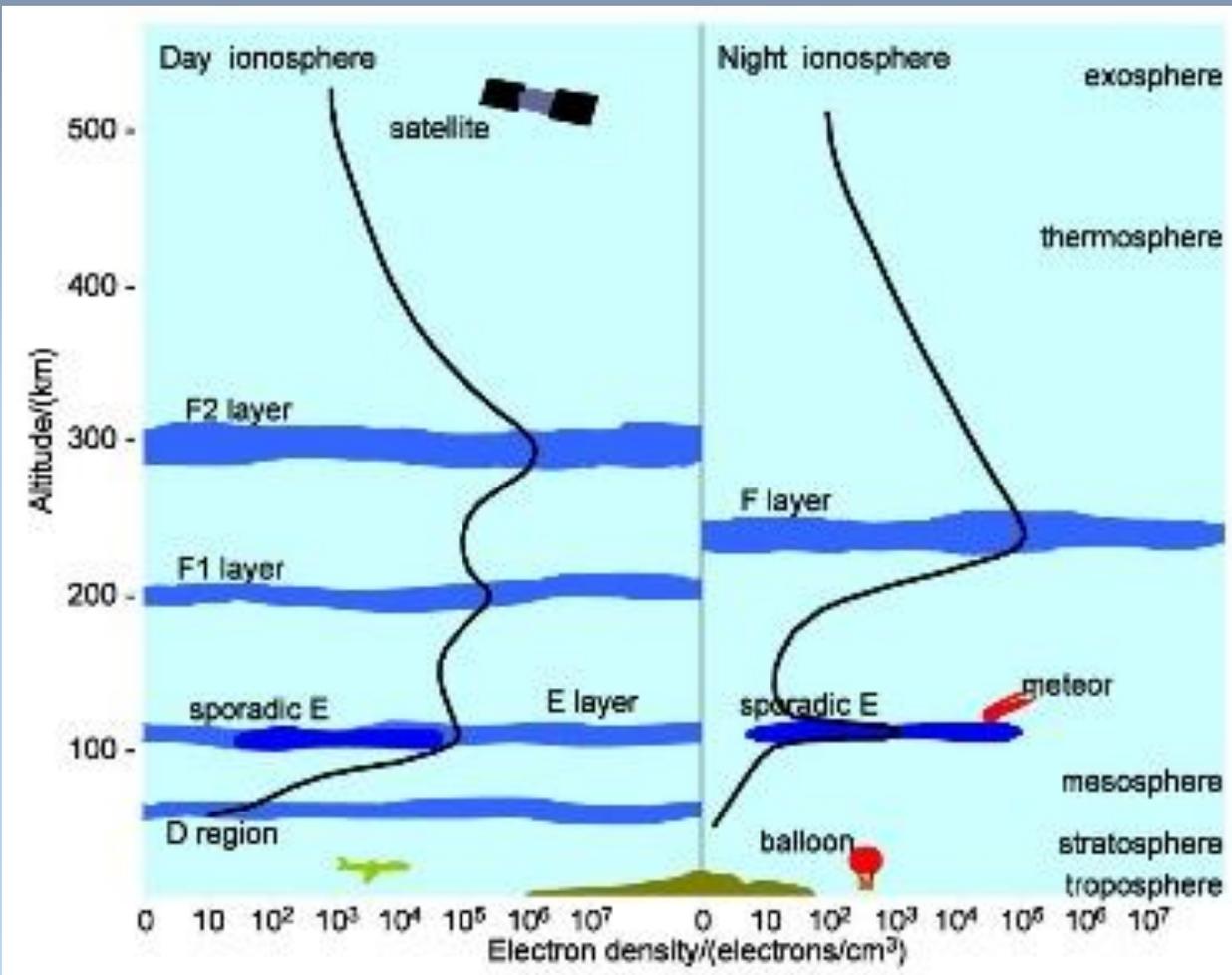
Day and night structure of the ionosphere.

Em certos momentos durante o ciclo solar diário, a região F1 pode não ser distinta da região F2, com as duas camadas sendo fundidas para formar uma região F.

À noite, as regiões D, E e F1 ficam muito esgotadas de elétrons livres, deixando apenas a região F2 disponível para comunicações.

Somente as regiões E, F1 e F2 refratam as ondas HF.

No entanto, a região D é muito importante, porque, embora não refrate ondas de rádio HF, elas as absorvem ou atenuam.



Day and night structure of the ionosphere.

A região F2 é a região mais importante para a propagação de rádio HF porque:

- está presente 24 horas do dia;
- sua alta altitude permite os caminhos de comunicação mais longos;
- reflete as frequências mais altas na faixa de HF.

O tempo de vida dos elétrons livres é maior na região F2, razão pela qual a camada F2 está presente à noite.

Os tempos de vida típicos dos elétrons nas regiões E, F1 e F2 são 20 segundos, 1 minuto e 20 minutos, respectivamente.

Como a região F1 nem sempre está presente e, muitas vezes, se funde com a região F2, normalmente não é considerada ao examinar possíveis modos de propagação.

Observando a Ionosfera

- A característica mais importante da ionosfera em termos de comunicações de rádio é a capacidade de refletir ondas de rádio.
- No entanto, apenas as ondas dentro de uma certa faixa de frequência serão refletidas.
- O intervalo de frequências refletido depende de vários fatores.
- Vários métodos são utilizados para investigar a ionosfera, e o instrumento mais utilizado para esse fim é a ionossonda.

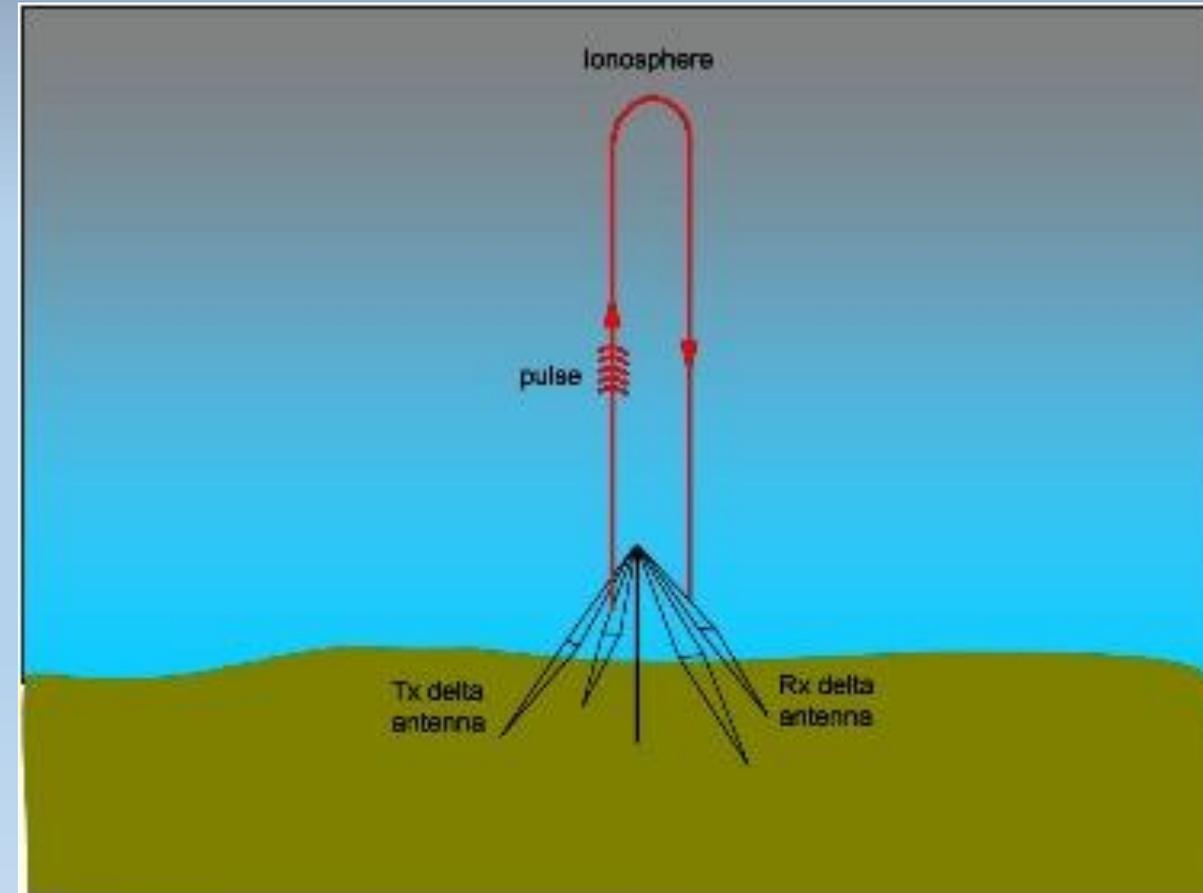


Figura à esquerda: Ionossonda
Figura à direita: Antena receptora



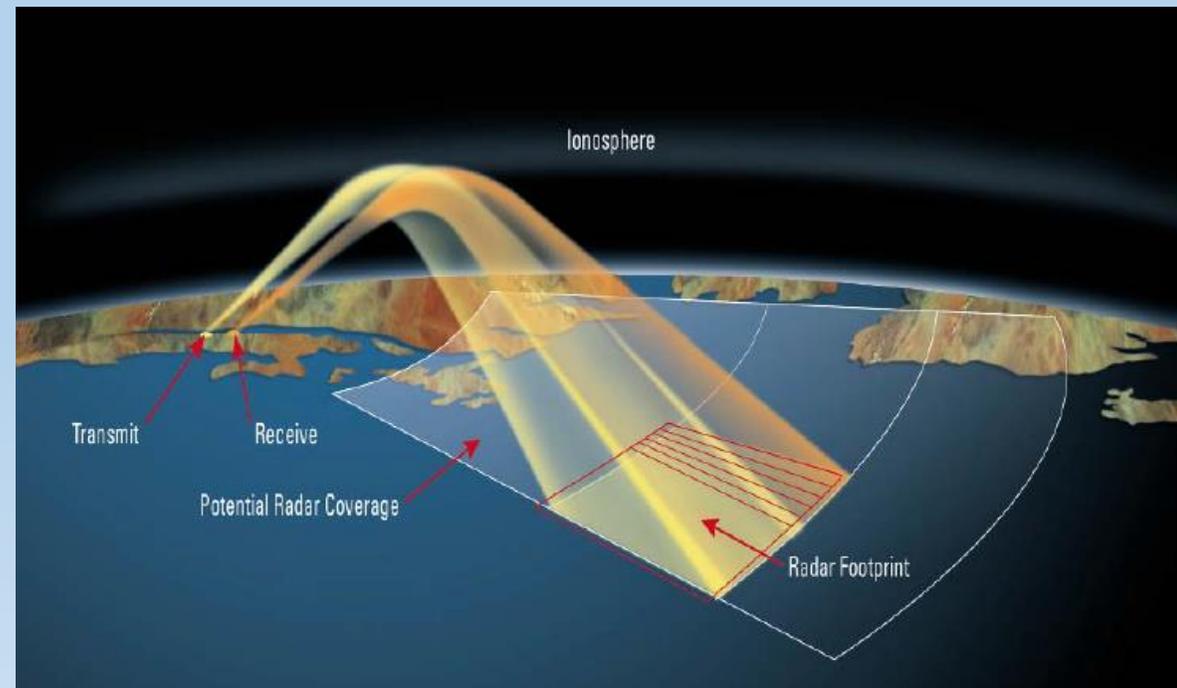
Observando a Ionosfera

- Uma ionossonda é um radar de alta frequência que envia pulsos muito curtos de ondas de rádio verticalmente para a ionosfera.
- Se a frequência do sinal não for muito alta, os pulsos são refletidos de volta para o solo.
- A ionossonda registra o tempo de atraso entre a transmissão e a recepção dos pulsos em uma variedade de frequências diferentes.
- A partir do tempo de atraso, se determina a altura da camada em que ocorreu a reflexão.
- Os ecos aparecem primeiro da região E inferior e posteriormente, com maior atraso de tempo, das regiões F1 e F2.
- À noite, os ecos são retornados apenas da região F, uma vez que a região E não está presente.



Observando a Ionosfera

- A ionosfera é sondada não apenas por sinais enviados em incidência vertical, mas por sondas oblíquas que enviam pulsos obliquamente para a ionosfera, com o transmissor e o receptor separados por alguma distância.
- As ionosondas de retro-dispersão (back scattering) dependem de ecos refletidos a partir do solo e retornados ao receptor.
- Este tipo de sonda pode monitorar a propagação em um percurso de interesse e observar os vários modos suportados pela ionosfera.
- Este tipo de sonda é usado para o radar over-the-horizon.



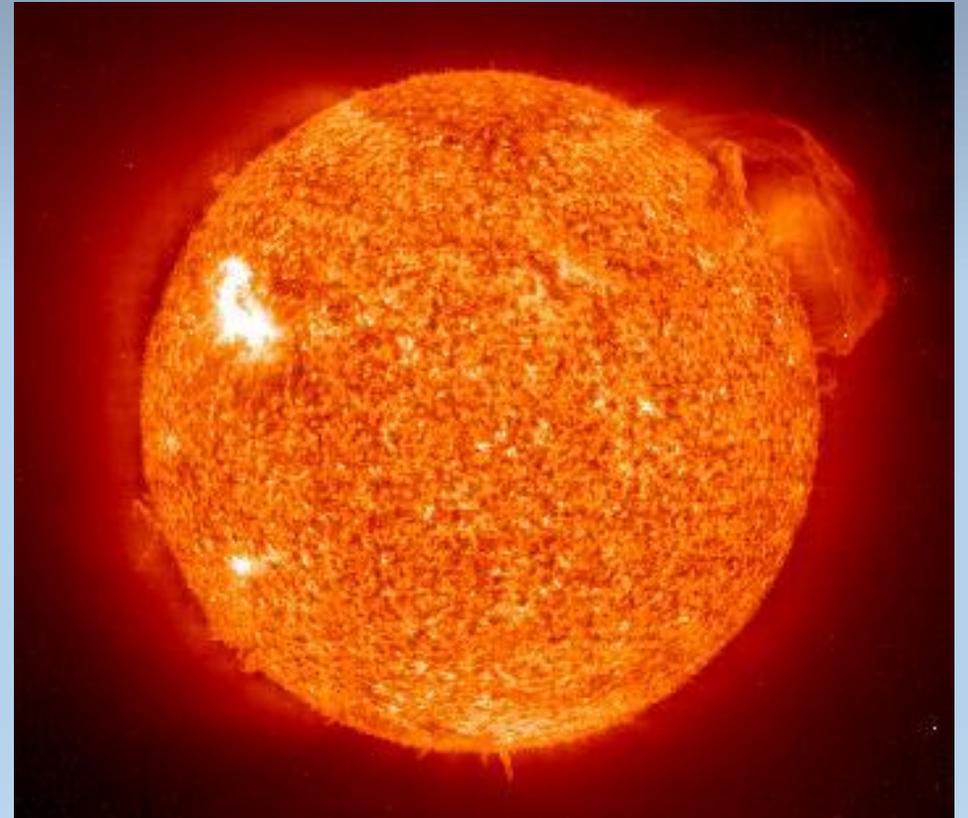


Variações Ionosféricas

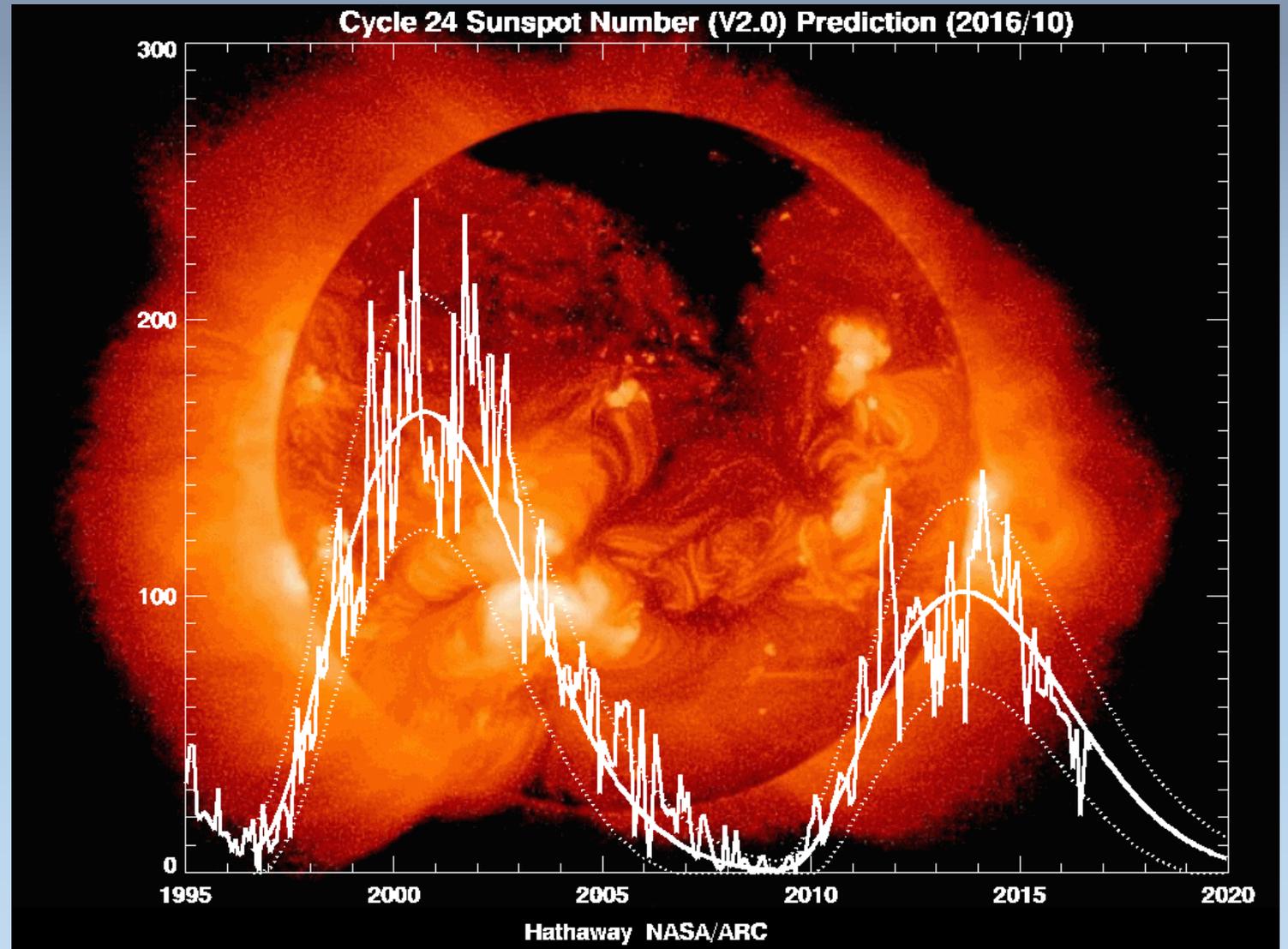
- A ionosfera não é um meio estável que permite o uso da mesma frequência ao longo do ano, ou mesmo por mais de 24 horas.
- A ionosfera varia com o ciclo solar, as estações, e mesmo durante o período de um dia.

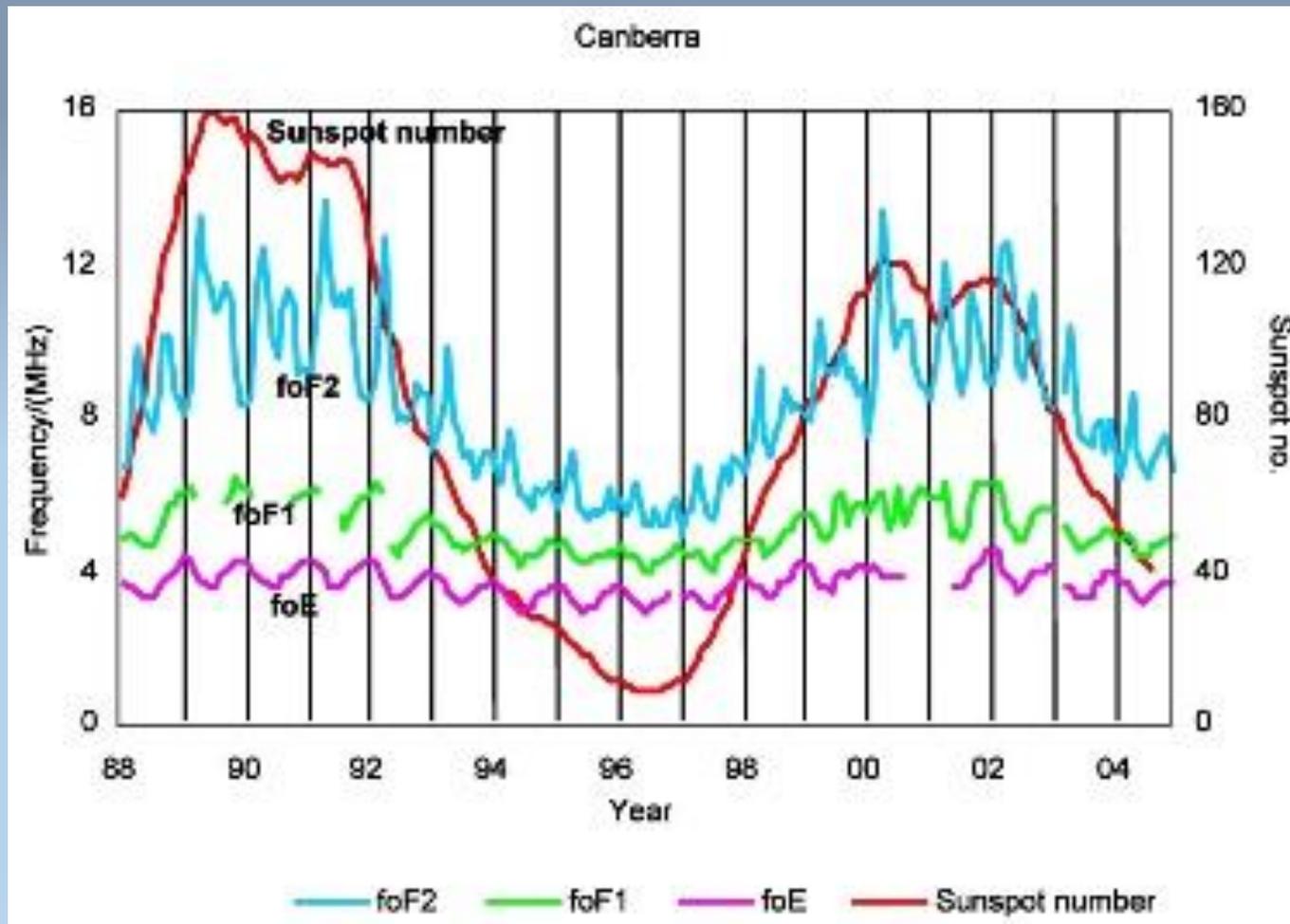
Variações devidas ao Ciclo Solar

- Variações solares afetam a Ionosfera, especialmente no que diz respeito ao número de manchas solares visíveis.
- As manchas são notadas como áreas escuras (relativamente escuras) na superfície solar.
- Manchas solares afetam a Ionosfera porque as áreas ao redor das manchas emitem grandes quantidades de radiação ultravioleta – a principal causa da ionização.



- O aparecimento de manchas solares costuma ocorrer a períodos de 11 anos, o que significa dizer que as condições ionosféricas – e as condições de radiopropagação – variam de acordo com este ciclo.
- No mínimo solar, apenas as frequências mais baixas da banda de HF serão suportadas (refletidas) pela ionosfera ($f < 10\text{MHz}$).
- Próximo aos pontos de máximo do ciclo de 11 anos, ou nos pontos de máximo, as frequências mais altas se propagarão com sucesso (frequências até 50MHz).





Relação entre os ciclos solares e as frequências máximas foE, foF1 e foF2 suportadas respectivamente pelas regiões E, F1 e F2. As linhas verticais indicam o início de cada ano. Observe também as variações sazonais.

← → ↻ 🏠 ⓘ www.hamqsl.com/solar3.html

📱 Apps 🌐 Google 📞 WhatsApp Web 👤 Fernando DeCastro ⚙️ Configurações 📄 página F&C 🗓️ SAE - Agendamento 🗣️ Google Tradutor

NONBH

Paul L Herrman
Sierra Vista, Arizona USA (DM41um)
Space Weather, Conditions, & MUF
UTC: Thu 27 Jul 2017 - 20:48:40
n0nbh@n0nbh.com

🇩🇪 🇮🇹 🇯🇵 🇵🇱 🇧🇷 🇪🇸 🇲🇽 🇫🇷 🇮🇳 🇮🇹 🇷🇺 🇸🇪 🇬🇷 🇺🇦 🇵🇹 🇳🇴 🇧🇪 🇹🇷 🇵🇭 🇺🇸 🇫🇮 🇮🇸 🇩🇪 🇷🇺 🇮🇳 🇮🇳 🇮🇳 🇮🇳 🇮🇳 🇮🇳 🇮🇳 🇮🇳 🇮🇳

Do not use HTML code from translated pages.

MOF/LOF Conv Tools CME/Wind Using Data Glossary Solar Imgs HF PROP f0F2/T/Fade MUF/ABS Space Cond Website Win|Mac|Lnx Pod/Phone/BB RSS/XML

NONBH Solar Banners in QST Magazine

*The NONBH Solar Banners are featured in Feb 2014 [QST Magazine](#) (you have to have a guest or regular membership to view).
Thanks Steve AG1YK for a great article!*

HF Propagation Tools and Solar Data are now on multiple pages for faster loading

- Use the buttons at the top and bottom of the page to navigate, or use the following links:
- For Solar-Terrestrial Data banners and widgets (both web page and devices) [click here](#)

Donate now...
PayPal

-- Jose, EA3EZD, Barcelona

Solar Data/Propagation
Click to add to your website
Solar-Terrestrial Data

Outras consequências do ciclo solar

Ao redor do máximo solar, no ciclo de 11 anos, há uma maior probabilidade de grandes erupções solares ocorrerem.

Erupções solares (flares) são enormes explosões no Sol, que emitem radiação que ioniza a região D, causando maior absorção de ondas de HF nesta camada.

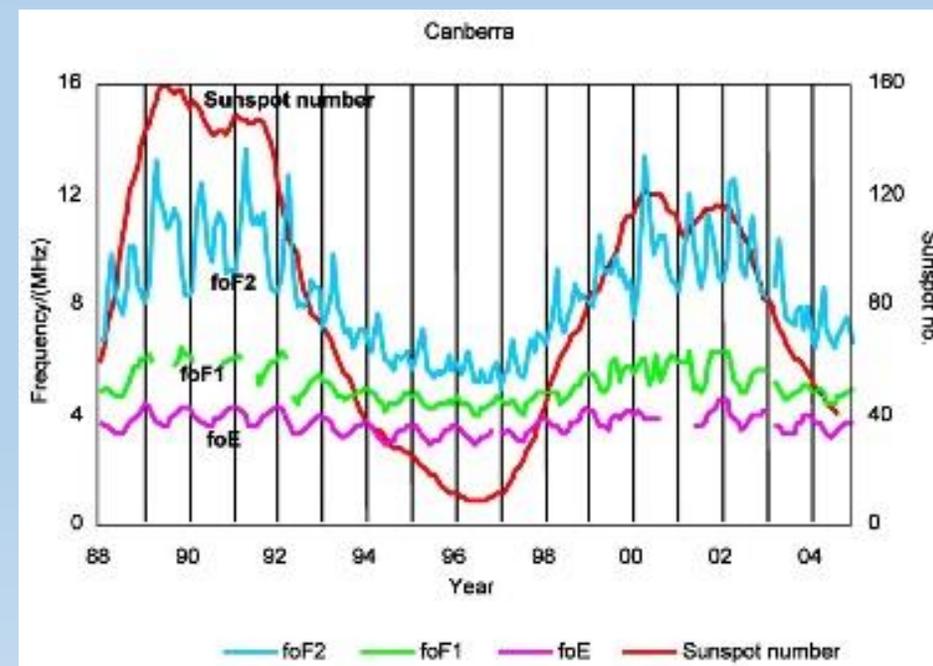
A absorção de ondas HF na ionosfera após o aparecimento de uma erupção solar é denominada desvanecimento de ondas curtas (fade-outs).

Fade-outs ocorrem instantaneamente e usualmente afetam as frequências mais baixas (a absorção da camada D se dá para estas frequências, $f < 5\text{MHz}$).

A duração dos fade-outs pode variar entre cerca de 10 minutos a várias horas, dependendo da duração e intensidade da erupção solar.

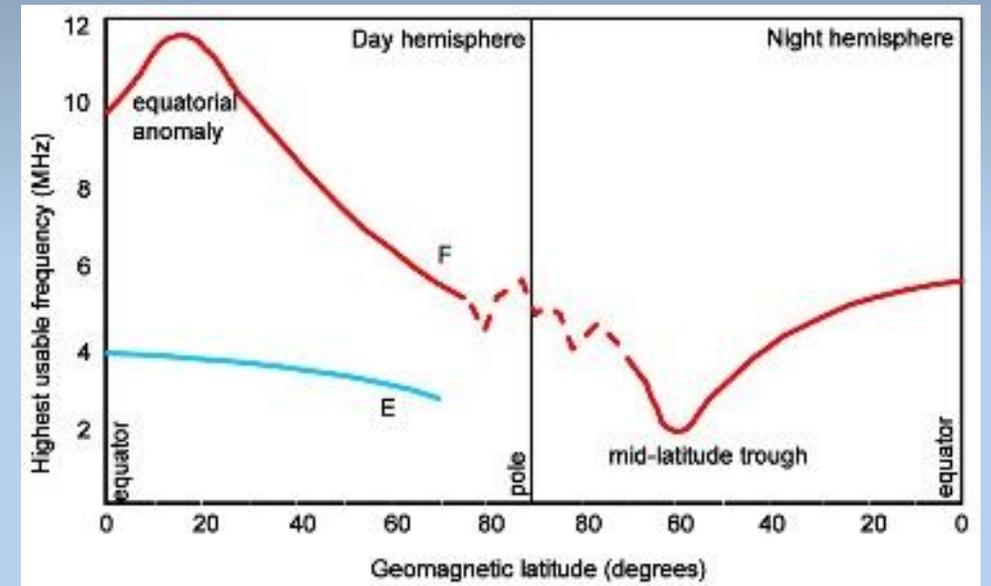
Variações sazonais

- As frequências máximas suportadas pela região E são maiores no verão do que no inverno, porque o grau de ionização é maior no hemisfério em que está ocorrendo o verão ($Fo_{\text{verão}} > Fo_{\text{inverno}}$).
- Na região F a variação nas frequências máximas suportadas não é tão simples como na região E.
- Em ambos os hemisférios, as frequências máximas ao meio-dia da região F geralmente atingem picos nos equinócios (março e setembro).
- Ao redor do mínimo solar, no ciclo de 11 anos, as frequências máximas do verão no meio-dia são geralmente maiores do que as do inverno ($Fo_{\text{verão}} > Fo_{\text{inverno}}$).
- Ao redor do máximo solar, no ciclo de 11 anos, as frequências máximas do inverno tendem a ser superiores às do verão ($Fo_{\text{inverno}} > Fo_{\text{verão}}$).
- Quando se observa as frequências máximas de inverno sendo maiores do que as do verão, denomina-se este fenômeno de anomalia sazonal.
- Além disso, as frequências máximas em torno dos equinócios (março e setembro) tendem a ser mais altas no verão e no inverno para ambos os máximos e mínimos do ciclo solar de 11 anos.



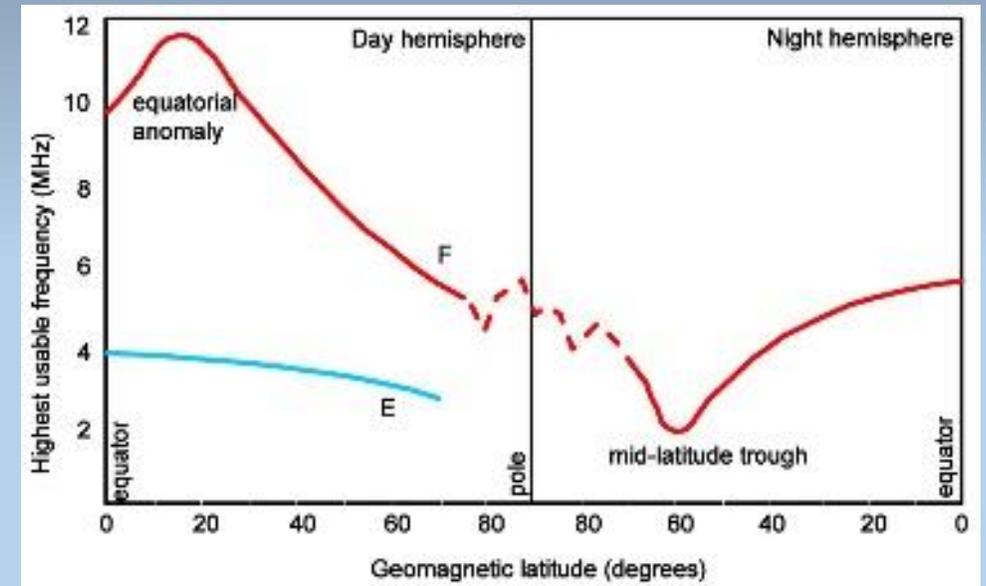
Variações com a Latitude

- A Figura ao lado mostra as variações nas frequências máximas das regiões E e F no meio do dia (hemisfério do dia) e no meio da noite (hemisfério noturno) do pólo ao equador.
- Durante o dia, com latitude crescente, a radiação solar atinge a atmosfera de forma mais oblíqua, de modo que a intensidade da radiação e a produção diária de elétrons livres diminuem com o aumento da latitude.
- Na região F, esta variação com a latitude persiste durante toda a noite devido à ação das correntes de vento na atmosfera superior, de um hemisfério a outro (dia/noite).



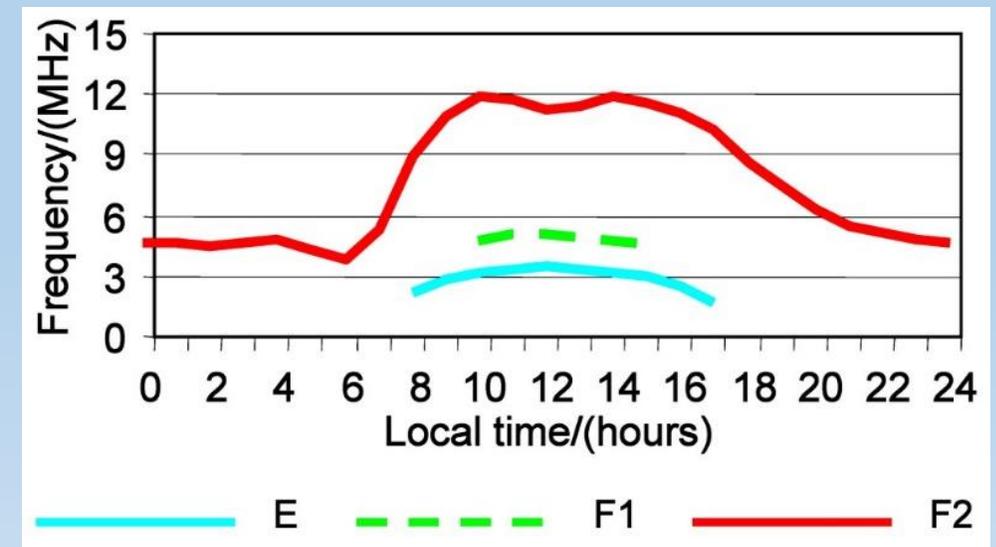
Variações com a Latitude

- Nota-se no gráfico, a existência de picos (máximos e mínimos) na curva de máximas frequências da camada F.
- Na camada F, as frequências de pico não estão exatamente no equador geomagnético, mas 15 a 20° do mesmo. Isso é chamado de anomalia equatorial.
- Além disso, à noite, as frequências máximas atingem um mínimo a uma latitude de aproximadamente 60° do equador geomagnético. Isso é chamado de mínimo de latitude média.
- No gráfico, pode-se verificar a rapidez (declividade) com que as frequências podem mudar com a latitude perto do mínimo de latitude média e da anomalia equatorial, de modo que uma variação no ponto de reflexão próximo desses em alguns graus pode levar a uma grande variação na frequência suportada.



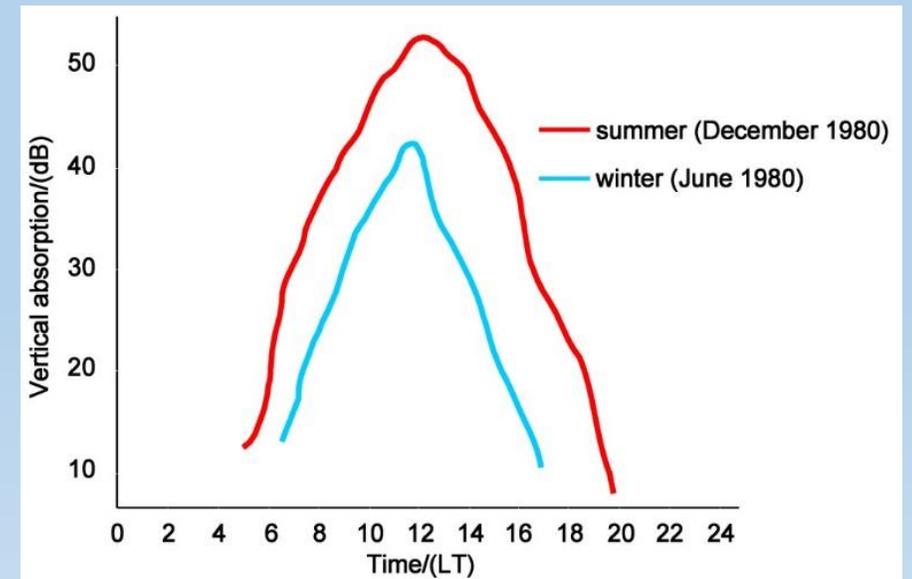
Variações Diárias

- As frequências máximas são normalmente mais altas durante o dia e mais baixas à noite.
- Após a madrugada, a radiação solar faz com que os elétrons sejam produzidos na ionosfera e as frequências aumentam rapidamente, indo ao máximo ao meio-dia.
- Durante a tarde, as frequências começam a cair devido à perda de elétrons e, com a escuridão, as regiões D, E e F1 desaparecem.
- A comunicação durante a noite é apenas viável pela região F2 (ou apenas F, à noite) e a atenuação é muito baixa porque não há mais a presença da camada D para absorver o sinal e atenuá-lo.
- Durante a noite, as frequências máximas diminuem gradualmente, atingindo o mínimo imediatamente antes do amanhecer.



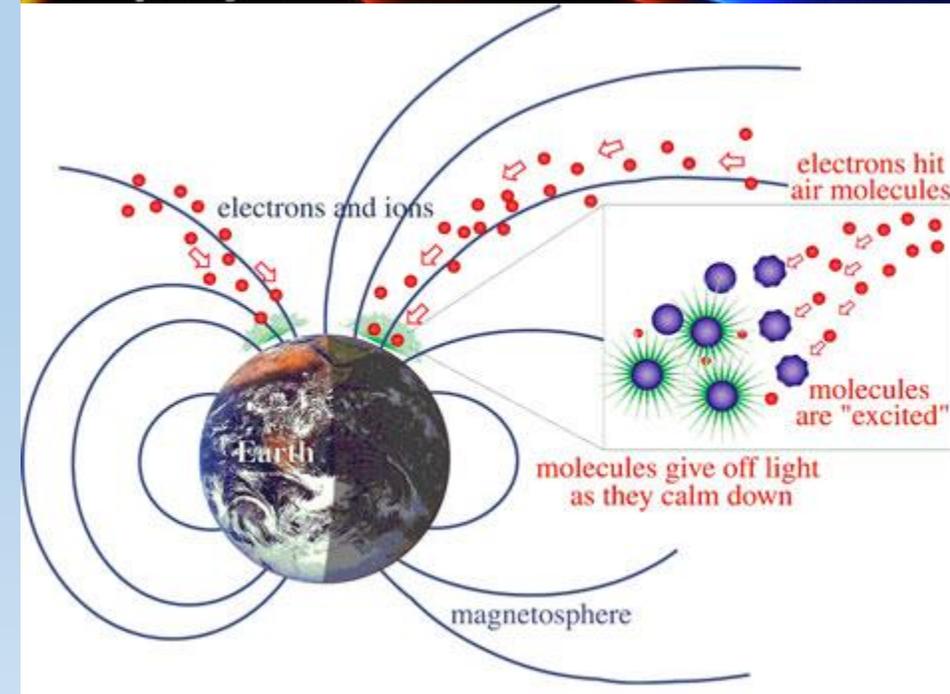
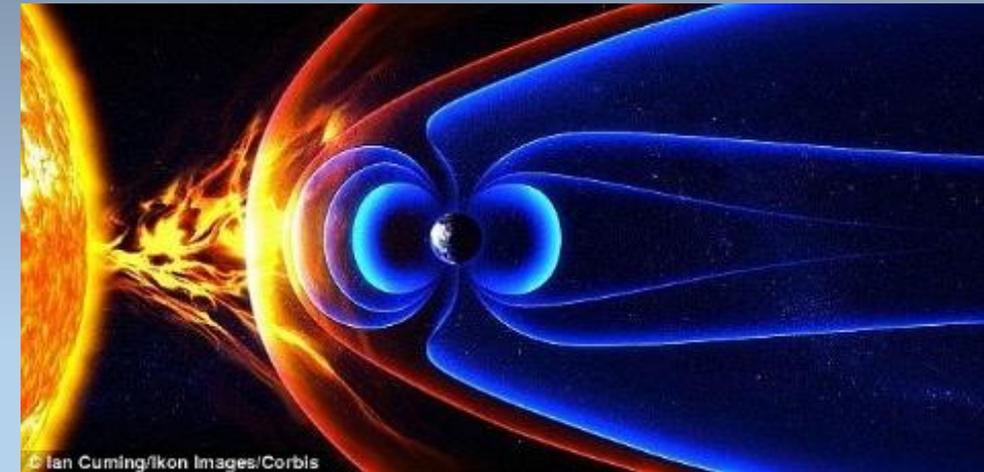
Variações na Absorção

- Embora a absorção seja extremamente alta durante uma erupção solar, uma certa quantidade de absorção ocorre o tempo todo na região D .
- A absorção na região D varia com o ciclo solar de 11 anos, sendo maior ao redor do máximo solar.
- A absorção do sinal também é maior no verão, e durante o meio do dia.
- Existe uma variação na absorção de acordo com a latitude, com maior absorção ocorrendo perto do equador e diminuindo em direção aos pólos.
- As frequências mais baixas são absorvidas ($f < 5\text{MHz}$), pelo que é sempre aconselhável usar a maior frequência possível, particularmente durante o dia, quando a absorção é maior.



Variações na Absorção

- Durante grandes erupções solares, prótons de alta energia são ejetados do Sol. Estes prótons movem-se na direção da Terra até encontrar as linhas de campo magnético da Terra.
- O prótons são então capturados pelas linhas do campo magnético da Terra e se movimentam ao longo das linhas do campo magnético em um movimento espiral em torno das mesmas. Quando os prótons atingem as regiões polares, onde a densidade de linhas do campo magnético é máxima, a proximidade entre os prótons (íons mostrados na figura ao lado) causará um enorme gradiente de potencial, gerando um campo elétrico suficiente para ionizar o ar, causando as auroras boreais (em verde na figura).
- Esta ionização maciça da Camada D na região polar, leva a uma absorção aumentada ou total de ondas de HF nas regiões polares da Terra.
- Este efeito pode durar até 10 dias e é chamado de evento de Absorção de Capa Polar (PCA) .



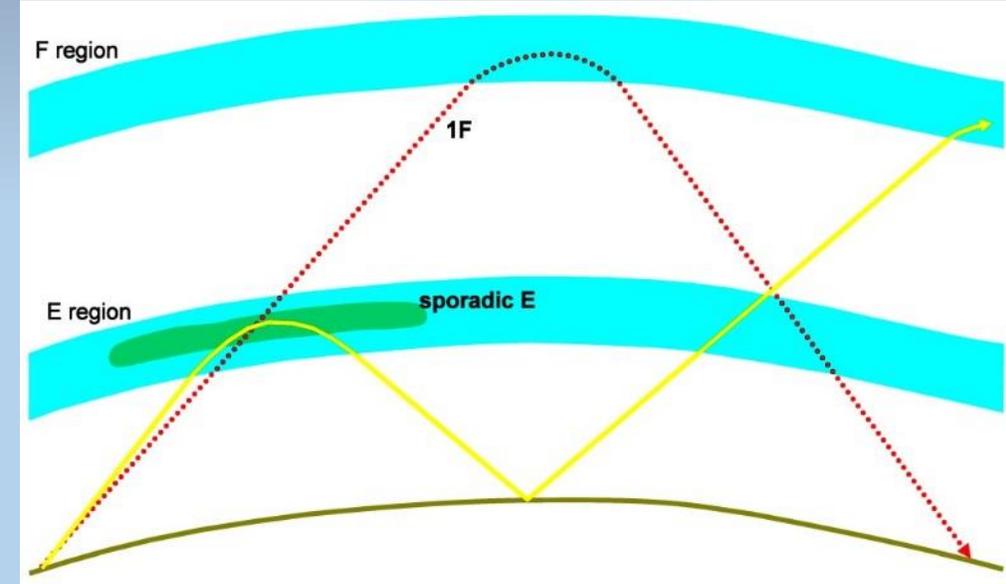
Variações na Absorção

Quando os prótons atingem as regiões polares, onde a densidade de linhas do campo magnético é máxima, a proximidade entre os prótons (íons mostrados na figura ao lado) causará um enorme gradiente de potencial, gerando um campo elétrico suficiente para ionizar o ar, causando as **auroras boreais**.



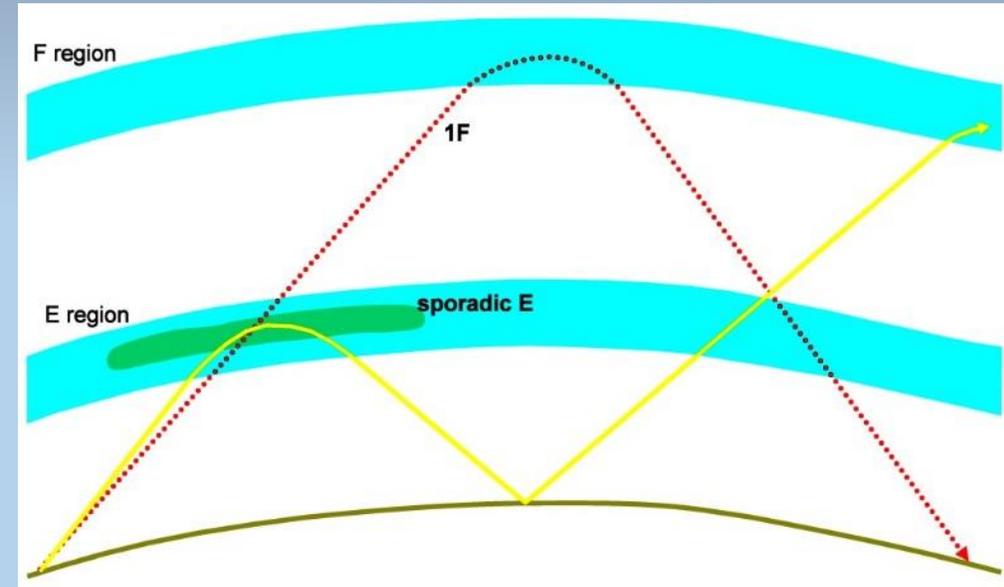
Camada E Esporádica

- O fenômeno denominado “Camada E Esporádica” refere-se a uma formação de regiões de densidade de elétrons muito alta, em altitudes de 90 a 140 km (região E) que ocorre sem regularidade.
- Esta densidade de elétrons é comparável à densidade da região F, o que significa que a camada E pode refletir frequências tão altas quanto as que são refletidas pela camada F.
- Este fenômeno é mais ativo no verão e no máximo do ciclo solar de 11 anos.
- Varia muito em termos de área de cobertura (de alguns quilômetros a centenas) e do tempo que persiste (minutos a muitas horas), muitas vezes se deslocando a centenas de km/h.
- Quanto mais perpendiculares forem os raios solares que incidem sobre a ionosfera, maior será a probabilidade de aparição da Camada E Esporádica.



Camada E Esporádica

- Determinadas áreas da camada E esporádica são transparentes (em verde na figura ao lado), permitindo que a maior parte das ondas de rádio passem por ela para a região F.
- Outras vezes, no entanto, a camada E esporádica obscurece a região F totalmente e o sinal não atinge a região F e, portanto, não se reflete na camada F.
- Se a camada E esporádica for parcialmente transparente, a onda de rádio provavelmente será refletida a partir da região F e, em outras ocasiões, será refletida da própria região E esporádica, o que pode levar à transmissão parcial ou intermitente do sinal, ou desvanecimento.
- A Camada E Esporádica, nas latitudes baixas e médias, ocorre principalmente durante o dia e início da noite, e é mais prevalente durante os meses de verão. Em altas latitudes, a Camada E Esporádica tende a se formar de noite.



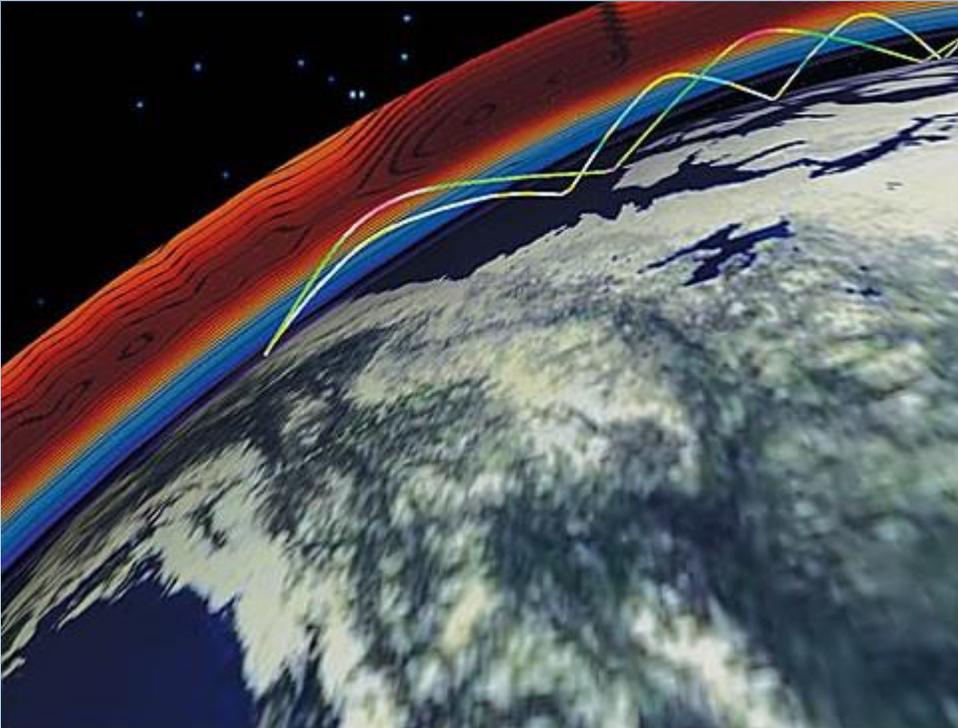
Espalhamento da Camada F

- O fenômeno denominado “Spread F” ocorre quando a região F se torna difusa devido a irregularidades que dispersam as ondas de rádio.
- O sinal recebido é a superposição de uma série de ondas refletidas a partir de diferentes alturas e locais na ionosfera, com tempos de propagação ligeiramente diferentes (multi-percurso na ionosfera).
- Em baixas latitudes, este fenômeno ocorre principalmente durante a noite, e em torno dos equinócios (março e setembro).
- Nas latitudes médias, o fenômeno é menos provável do que nas latitudes baixas e altas, e é mais provável que ocorra durante a noite, e no inverno.
- Em latitudes superiores a cerca de 40° , tende a ser um fenômeno noturno, aparecendo principalmente em torno dos equinócios.
- Ao redor dos pólos magnéticos, o espalhamento da Camada F é observado tanto no dia como na noite.
- Em todas as latitudes há uma tendência para o fenômeno Spread F ocorrer quando há uma diminuição nas frequências máximas da região F, em geral por redução da densidade de elétrons causada por tempestades ionosféricas.



Nome da Camada	Altura aproximada a partir da superfície da Terra	Período em que existe	Frequências usuais em que ocorre propagação
Troposfera	10 km	Dia e Noite	VHF (até vários GHz) – propagação em LoS e NLoS.
D (parte da Estratosfera)	50 – 90 km	Somente dia	Reflete LF Absorve MF e HF para $f < 5\text{MHz}$.
E (parte da Estratosfera)	90 – 140 km	Somente dia	Ajuda ondas de superfície Reflete HF
F1 (parte da Mesosfera)	140 – 210 km	Dia, e à noite se mescla com a camada F2	Absorve parcialmente ondas de HF, ainda permitindo que atinjam a camada F2
F2 (Termosfera)	Acima de 210 km	Dia e noite	Reflete ondas de HF eficientemente, particularmente à noite

Tipos (ou modos) de propagação em HF:

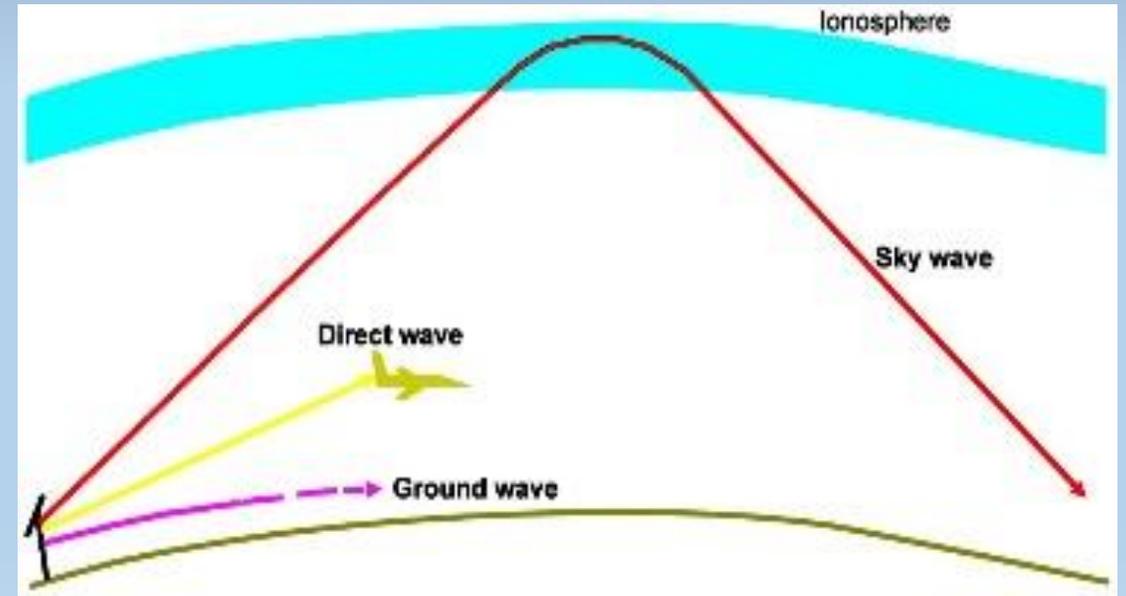


1. Surface ou Ground wave propagation
2. Space, Direct ou Line-of-sight propagation
3. Sky wave propagation

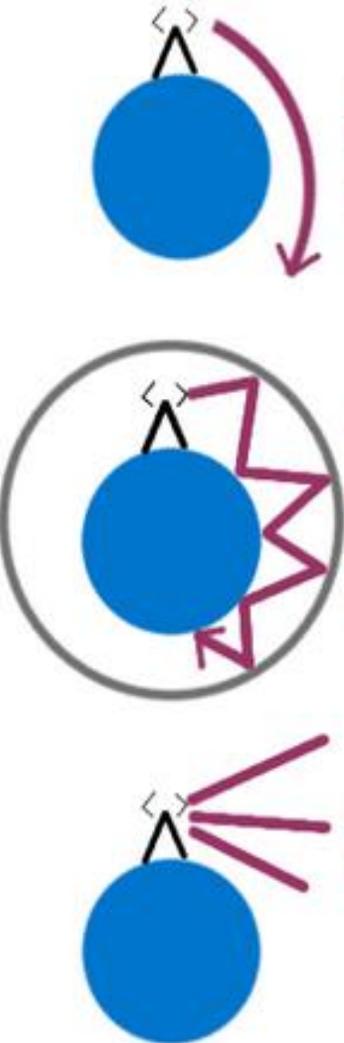
Tipos (ou modos) de propagação em HF:

Sinais de radio de HF (3 a 30MHz) podem se propagar por três modos distintos:

- *Surface ou ground waves propagation*: λ grandes, muito próximas da superfície do solo, podendo se propagar perto do solo para distâncias curtas, até 100 km sobre terra e 300 km sobre o mar. A atenuação da onda depende da altura da antena, polarização (ideal polarização vertical), frequência, tipos de terreno e/ou estado do mar (quanto maior a condutividade, melhor);
- *Sky waves*: λ médios, são refletidas pela ionosfera. Podem se propagar por quaisquer distâncias;
- *Space, direct ou line-of-sight waves*: λ pequenos, podem ultrapassar atmosfera em direção ao espaço.



Ground, Sky e Space Waves



The diagram illustrates three types of radio wave propagation from a transmitter (represented by a black antenna symbol) on a blue Earth:

- Ground Waves:** A single curved arrow follows the surface of the Earth.
- Sky Waves:** A zigzag arrow reflects between the Earth's surface and an outer layer representing the ionosphere.
- Space Waves:** Three straight arrows point away from the transmitter into the open space above the Earth.

Ground Waves

- Long wavelength radio waves.
- Follow the curvature of the earth.
- Used for time signals.

Sky Waves

- Medium wavelength.
- Refracted back to the earth's surface by a layer in the atmosphere called the ionosphere.
- The surface reflects them back so they 'skip' between the earth and the ionosphere.

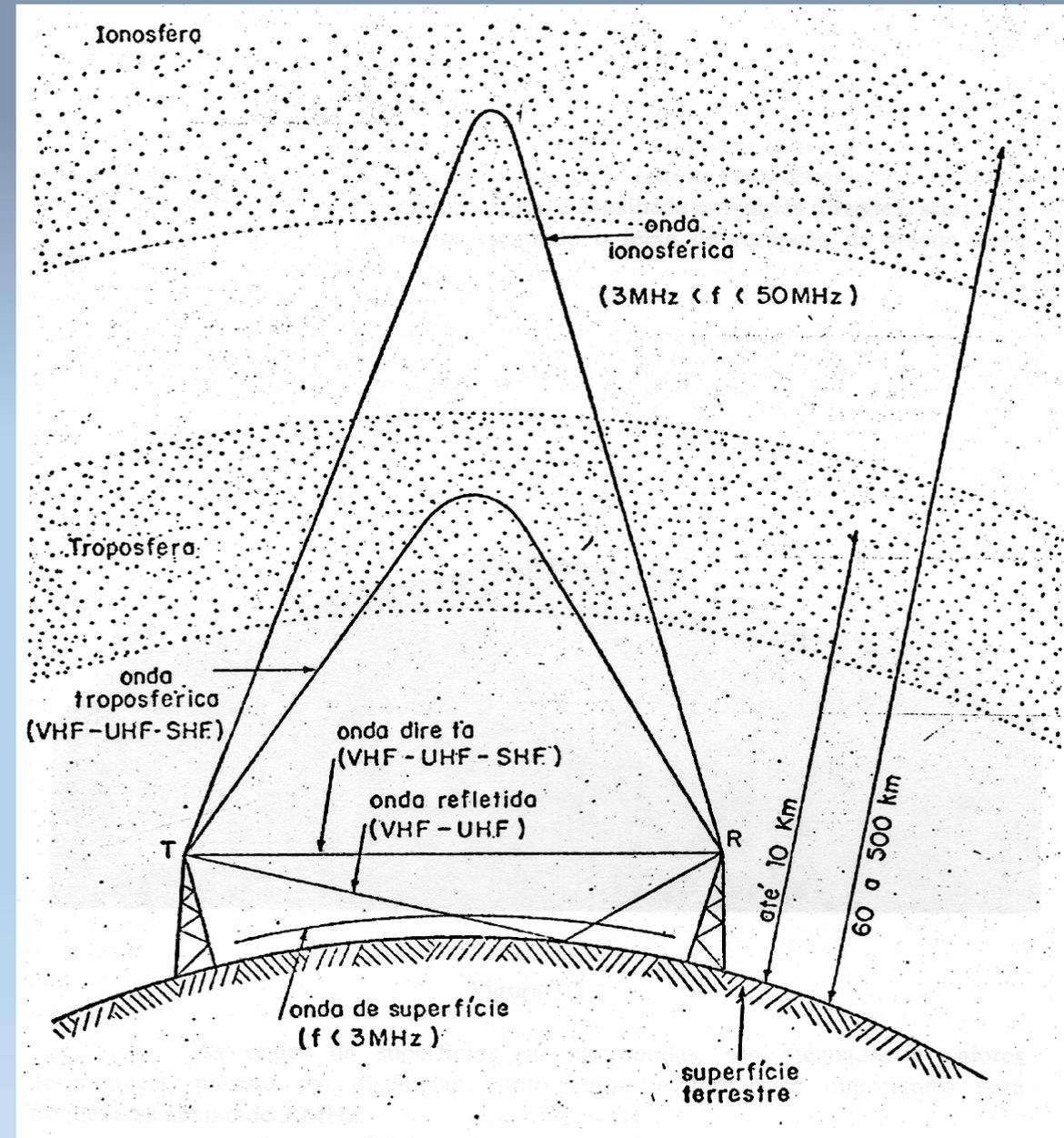
Space Waves

- Short wavelength.
- Can pass through the ionosphere and out in to space.

© www.science aid.net

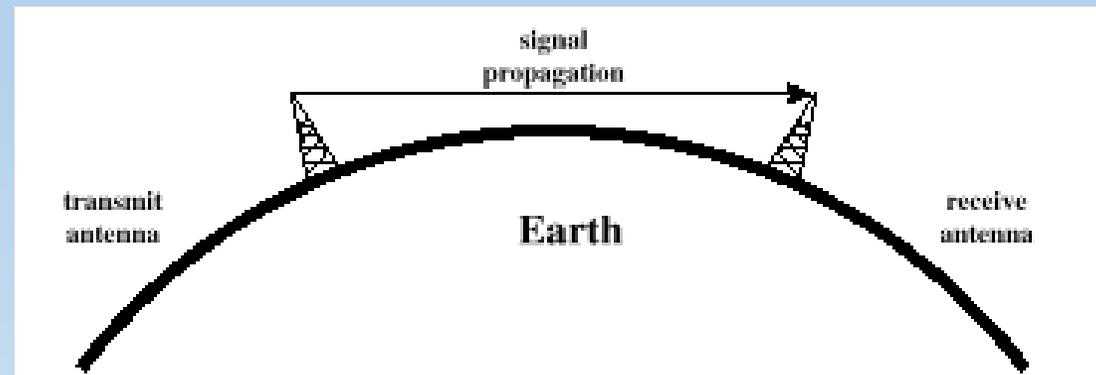
Caracterização das ondas eletromagnéticas, no contexto de propagação:

1. Ondas ionosféricas ou celestes (sky waves)
2. Ondas troposféricas (refratam na troposfera por gradiente de refração causado por variação de temperatura)
3. Ondas terrestres
 - Ondas diretas
 - Ondas refletidas pela Terra
 - Ondas de superfície

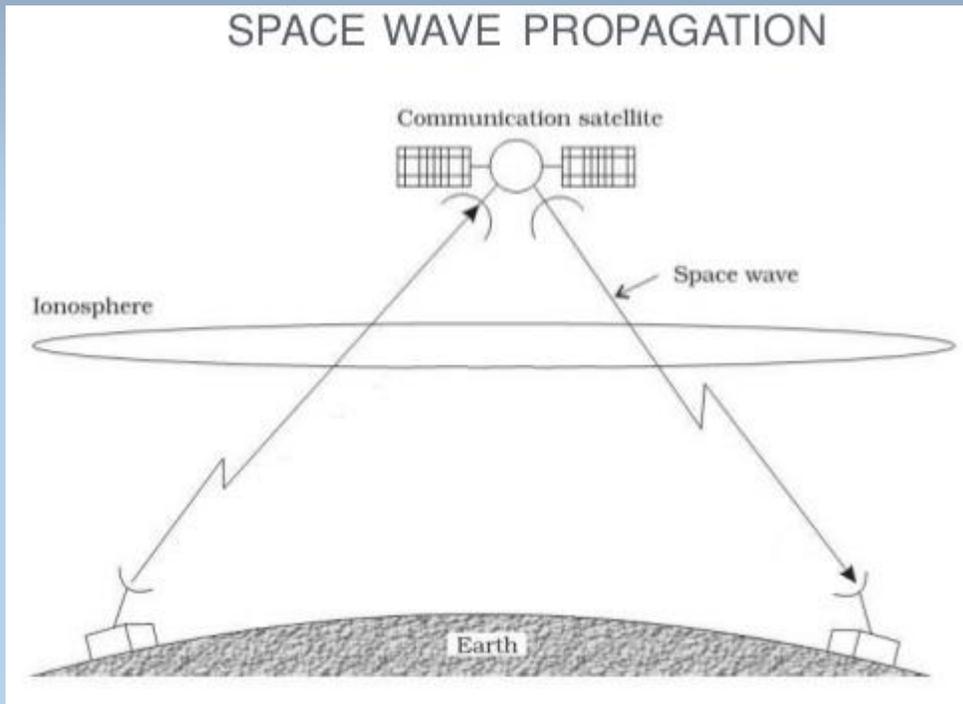


Line-of-sight Propagation

- As ondas de rádio de alta frequência têm a capacidade de se propagar através da atmosfera, desde a antena do transmissor até a antena do receptor.
- Neste modo de propagação, as antenas (transmissora e receptora) devem estar em linha de visada.
- A distância de linha de visada é a distância exata na qual a antena do transmissor e do receptor estão à vista uma da outra. Para aumentar a distância de transmissão é necessário aumentar a altura de ambas as antenas.



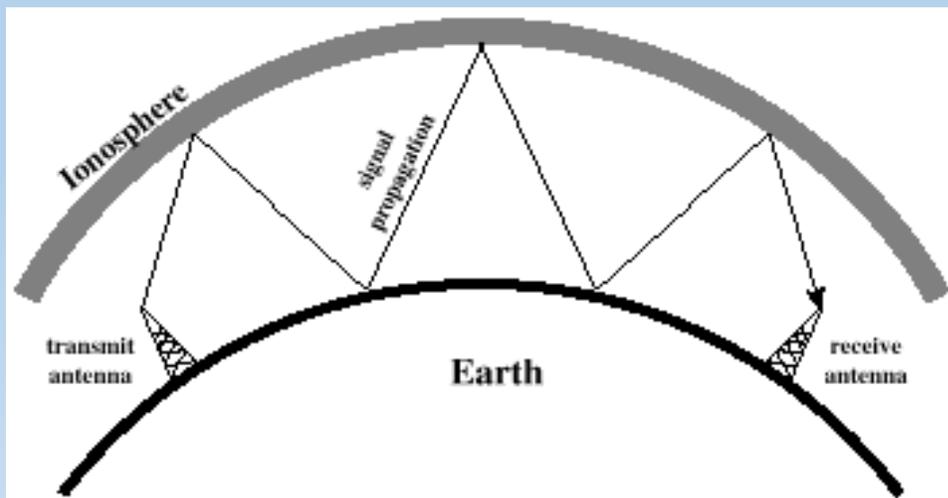
Line-of-sight Propagation - Space Propagation



- Em frequências mais altas, essas ondas não são refletidas pela ionosfera da Terra, nem têm a propriedade de seguir a curvatura da Terra.
- Assim, para a propagação destes sinais usam-se satélites geoestacionários.
- Os satélites completam a tarefa de refletir sinais em direção à terra.
- Este tipo de propagação é usado basicamente em comunicação de radar e televisão, em faixas de frequência de 80 a 200 MHz, bandas de VHF e UHF.

Sky Wave Propagation - Ondas Ionosféricas

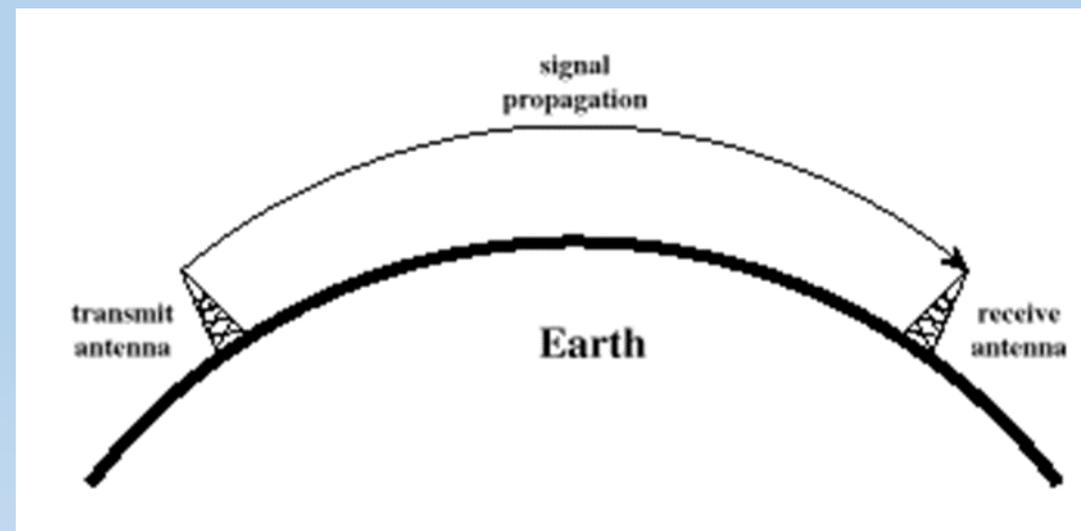
- A propagação por Sky Waves, também referida como Skip, é caracterizada por depender da reflexão (reflexão causada por refração) das ondas de rádio na ionosfera, uma camada eletricamente carregada da atmosfera superior.
- A ionosfera é uma região da atmosfera de cerca de 60 km a 500 km que contém camadas de partículas carregadas (íons) que podem refletir uma onda de rádio de volta para a Terra.
- Uma vez que não está limitada pela curvatura da Terra, a propagação por Sky Waves pode ser usada para se comunicar além do horizonte, em distâncias intercontinentais.



- O sinal pode, ainda, percorrer vários saltos, entre a ionosfera e a superfície terrestre (múltiplas reflexões).
- Sky Wave Propagation é de interesse considerável para os operadores de rádio amadores e as comunicações comerciais marítimas e aeronáuticas, e também para as emissoras de ondas curtas.

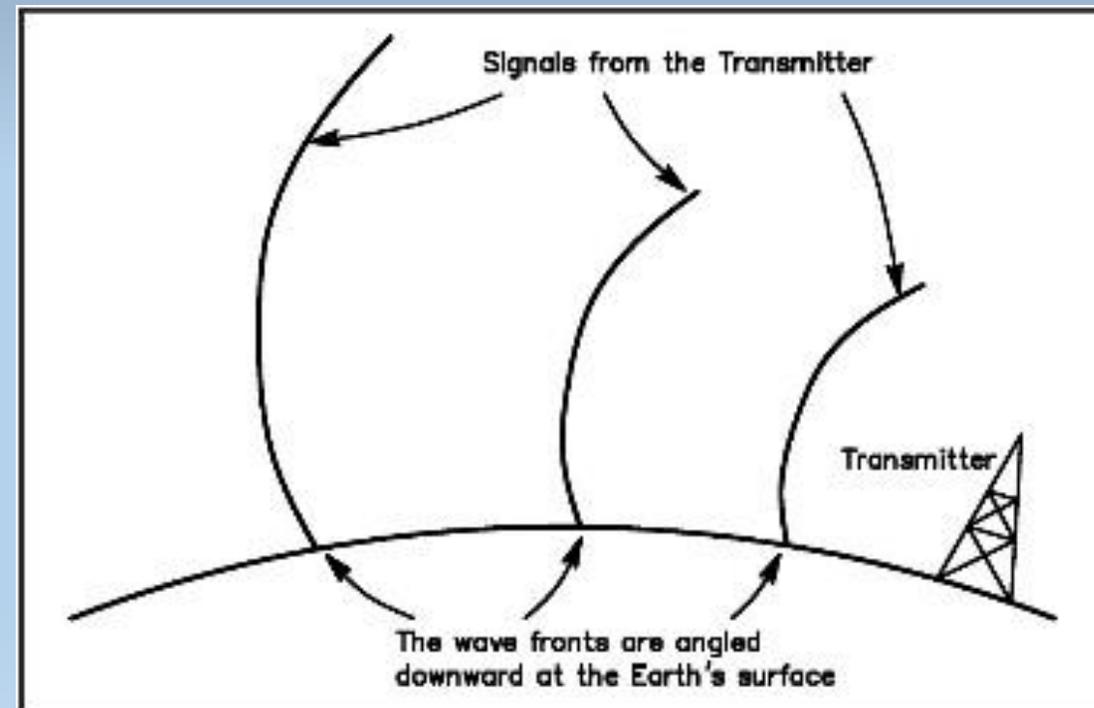
Ground Wave Propagation

- Quando as ondas de rádio se propagam a partir da antena transmissora acompanhando a superfície da Terra, de modo a alcançar a antena receptora além da linha de visada do horizonte, a propagação da onda é chamada propagação de superfície ou propagação por onda de superfície.
- Frequências mais baixas (entre 30kHz e 3 MHz) têm a propriedade de seguir o contorno da Terra.
- Ao invés de seguirem uma linha reta, e não se propagarem além da linha de visada, os sinais de rádio tendem a seguir a curvatura da Terra.



Ground Wave Propagation

- Os sinais de rádio tendem a seguir a curvatura da Terra porque as correntes são induzidas na superfície da Terra, o que diminui a frente de onda próximo ao solo.
- Como resultado, a frente de onda se inclina para baixo, permitindo seguir a curvatura da Terra e se propagar além do horizonte.
- O Campo Elétrico é usualmente polarizado verticalmente para que o solo faça parte do contexto do meio de propagação. O solo precisa ser bom condutor para que ocorra uma boa propagação, sem atenuação.



Ground Wave Propagation

- Ondas de superfície podem se propagar por uma distância considerável sobre a superfície da Terra, particularmente nos casos de baixa e média frequências do espectro radioelétrico (uma típica estação de broadcast AM de 2MHz de alta potência pode ter a cobertura de 100 milhas ou mais).
- Uma vez que o solo não é um condutor elétrico perfeito, as ondas de superfície são atenuadas conforme elas seguem a superfície da Terra. Dado que a atenuação do solo é proporcional à frequência, para frequências mais altas a cobertura se torna progressivamente menos confiável.
- As ondas de terra se propagam em polarização vertical, de modo que são necessárias antenas verticais (monopolos).
- A propagação por onda de superfície é usada para prover cobertura relativamente local de comunicações, especialmente durante o dia.

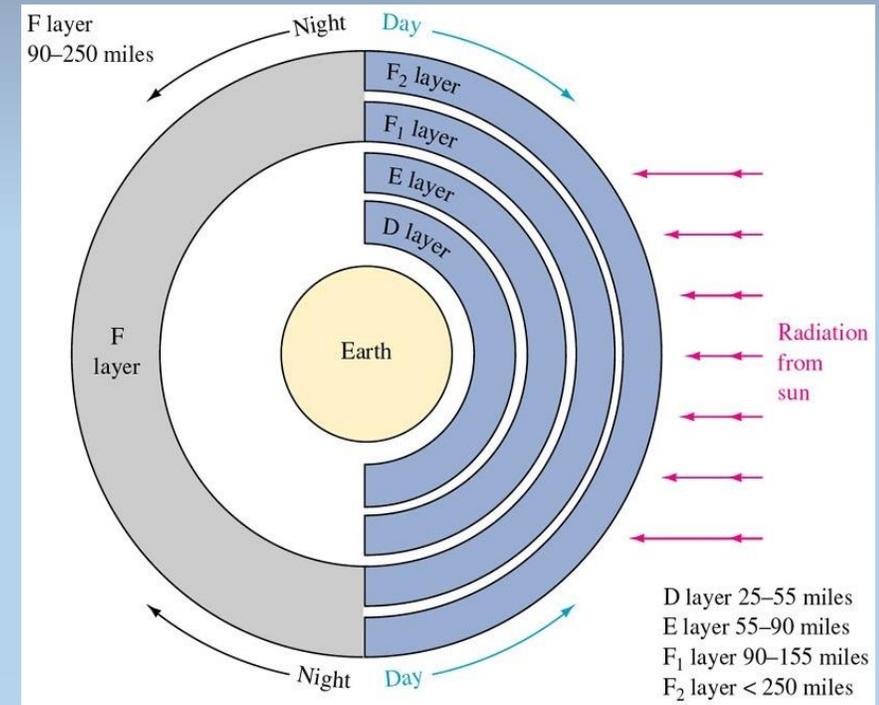
Características da Propagação na Camada D

A primeira camada que um sinal atinge é a camada D. Esta camada age como um gigantesco atenuador, absorvendo os sinais de HF.

Como a atenuação varia com o inverso do quadrado da frequência, para este fenômeno, quanto maior a frequência do sinal de rádio, menor será a absorção do sinal pela camada D.

Os sinais são atenuados à medida que passam pela camada D porque causam vibração nos elétrons livres. Quando isto ocorre, os elétrons colidem com outras moléculas, consumindo energia e dissipando proporcionalmente o sinal de radio.

O nível de atenuação depende do número de colisões que ocorrem, o que, por sua vez, depende de uma série de fatores. Um dos mais óbvios é o número de moléculas de gás que estão presentes. Mais moléculas de gás significam mais colisões, e atenuação aumentada.



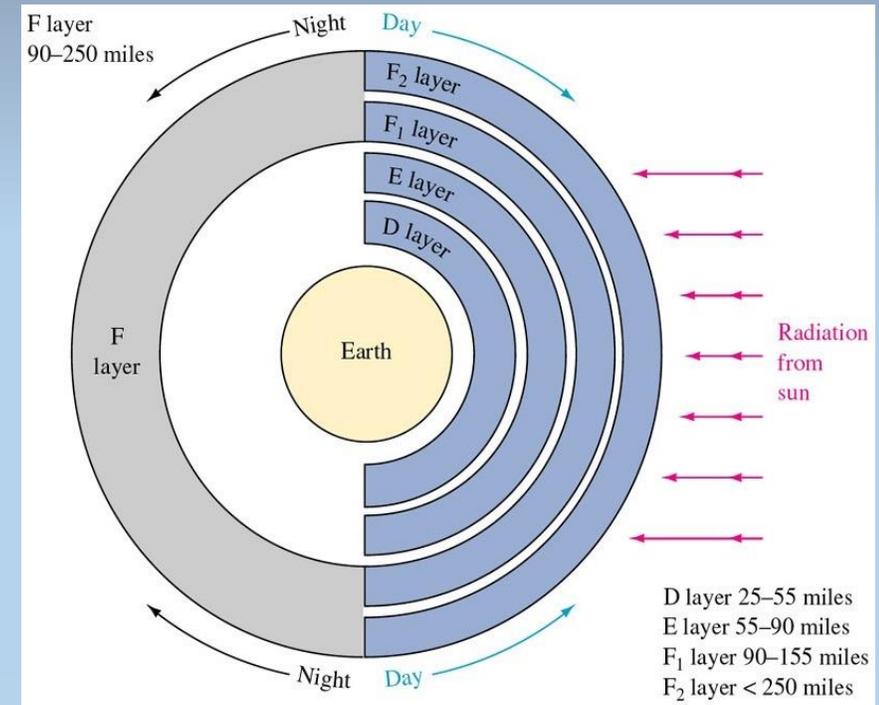
Características da Propagação na Camada D

Níveis de ionização são também importantes, assim como é a frequência do sinal de rádio.

À medida que as frequências aumentam, os comprimentos de onda se tornam menores e as colisões entre elétrons livres e moléculas gasosas diminui.

Como resultado, sinais de baixa frequência são atenuados muito mais do que aqueles de frequências mais altas. Mesmo assim, sinais de alta frequência ainda sofrem atenuação.

Esta é a razão pela qual sinais de baixa frequência são impedidos de atingir camadas superiores, exceto à noite, quando a camada D desaparece.



Características da Propagação nas Camadas E e F

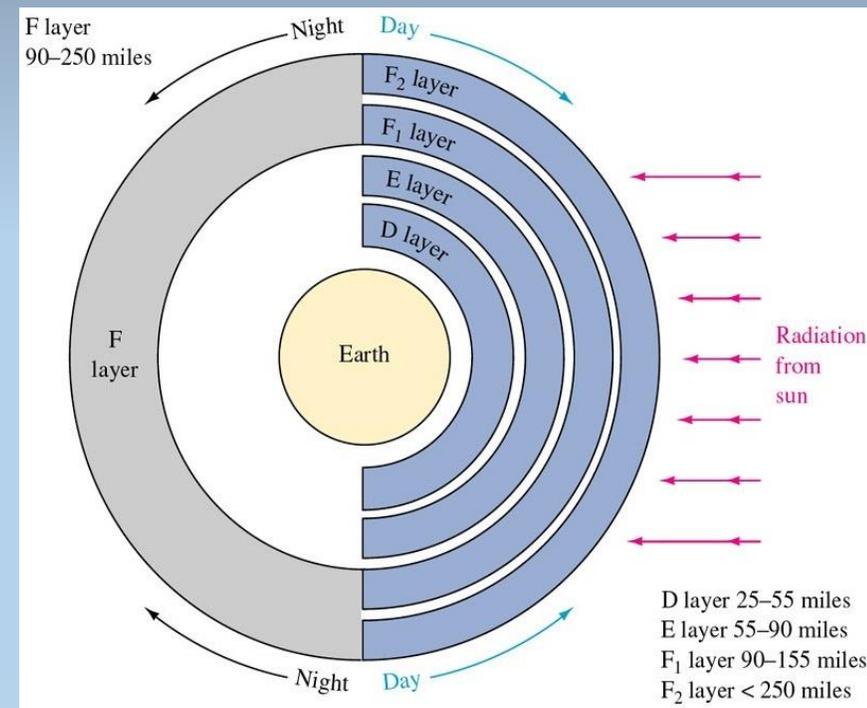
Assim como na camada D, quando sinais ingressam nas camadas E e F eles causam vibração nos elétrons livres.

Aqui, a densidade do ar é muito menor, e ocorrem menos colisões.

Como resultado, muito menos energia é perdida, e estas camadas afetam sinais de rádio de forma diferente do que a camada D.

Em vez de colidirem com moléculas gasosas e perderem energia, os elétrons tendem a reirradiar o sinal.

Porque o sinal está se propagando em uma área onde a densidade de elétrons está aumentando, quanto mais longe ele avançar na camada, mais o sinal é refratado para fora da área de maior densidade de elétrons.



Características da Propagação nas Camadas E e F

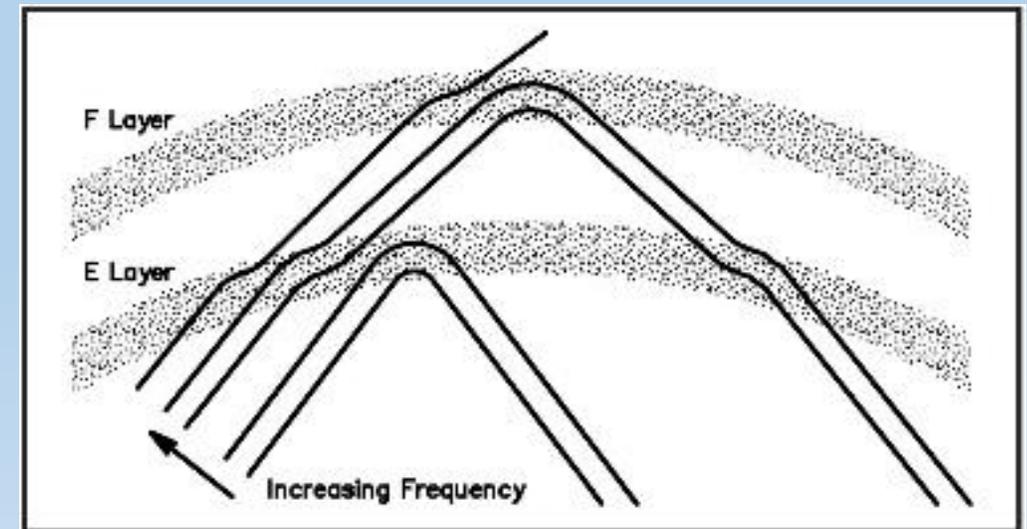
Em altas frequências, esta refração é frequentemente suficiente para alterar drasticamente o caminho de propagação da onda, de modo que a onda volta para a Terra.

Na prática, é como se a camada “refletisse” o sinal.

Estas “reflexões” são afetadas pela frequência e pelo ângulo de incidência da onda de rádio.

Com o aumento da frequência, o nível de refração diminui até que seja atingida uma frequência em que os sinais passam através da camada e se propagam para a próxima camada.

Eventualmente é atingida uma frequência em que os sinais passam através de todas as camadas e seguem para o espaço.

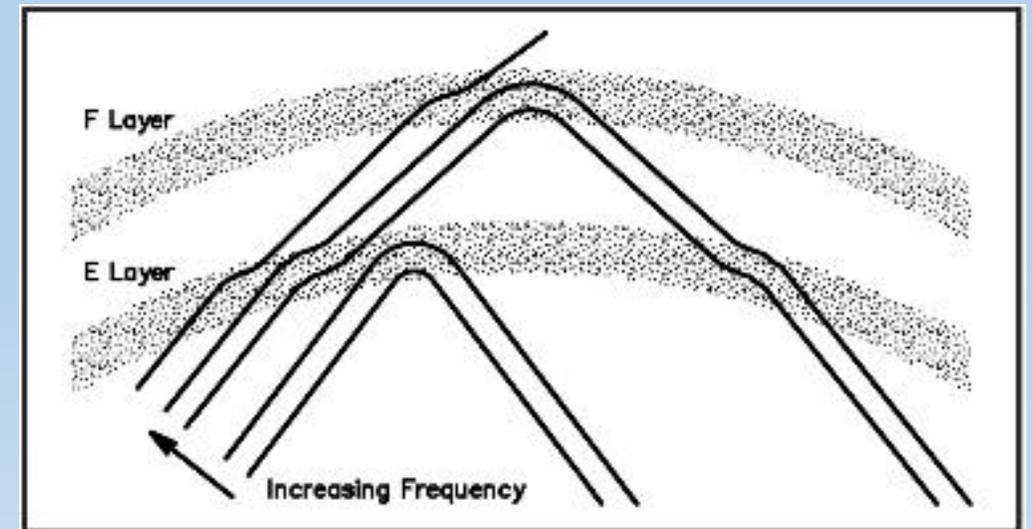


Características da Propagação nas Camadas F

As camadas F são as mais importantes regiões da ionosfera para a propagação de sinais de rádio.

Durante as horas do dia existem duas regiões com características distintas: F1 e F2.

- Camada F1:
Dia de inverno: Se estende por 100km a partir da camada E.
Dia de verão: Se estende a maiores altitudes.
- Camada F2:
Dia de inverno: Se estende por 350km.
Dia de verão: Se estende por 500km.



Características da Propagação nas Camadas F

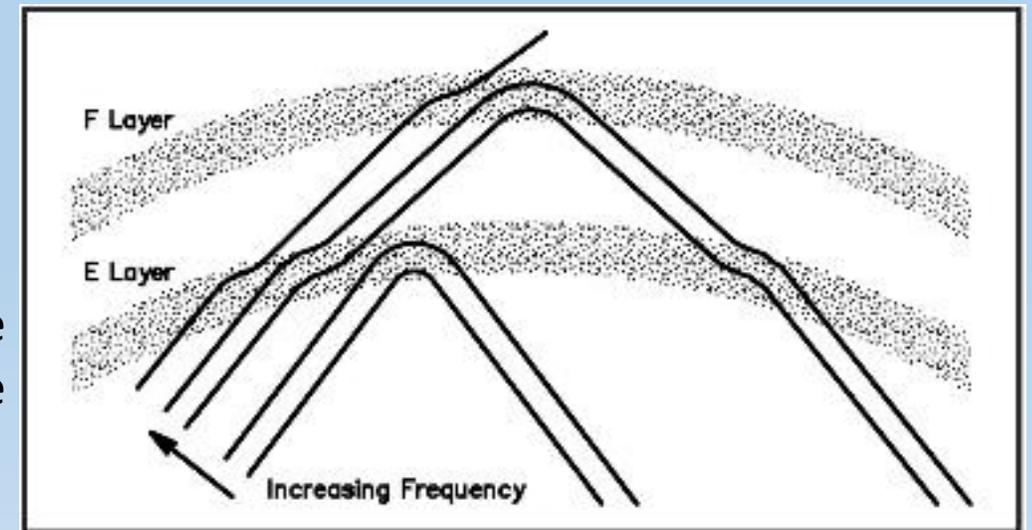
Durante o dia: A Camada F1 suporta propagação a curto e médio alcance.

Durante a noite: A camada F1 desaparece.

A maior parte das transmissões de ondas curtas é possibilitada pela Camada F2.

A Camada F2, diferentemente de todas as outras camadas, existe independentemente de ser dia ou noite, e é sempre capaz de suportar propagação em alguma frequência.

A Camada F2 é a mais importante das camadas, e é a base de estudo e análise dos modelos de previsão de condições de propagação existentes.



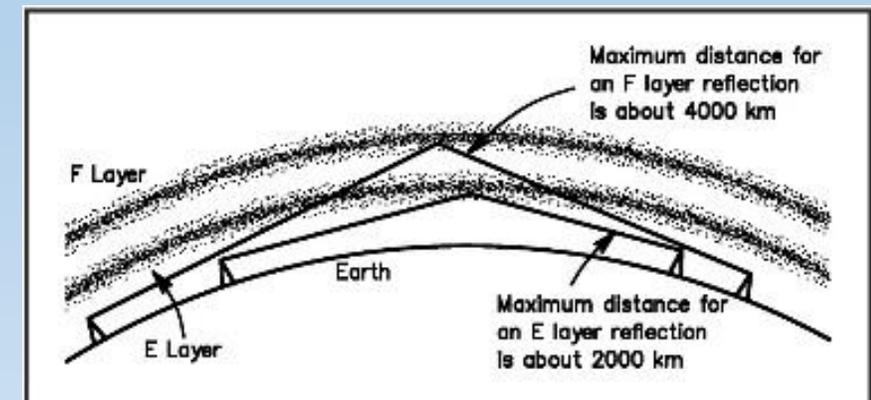
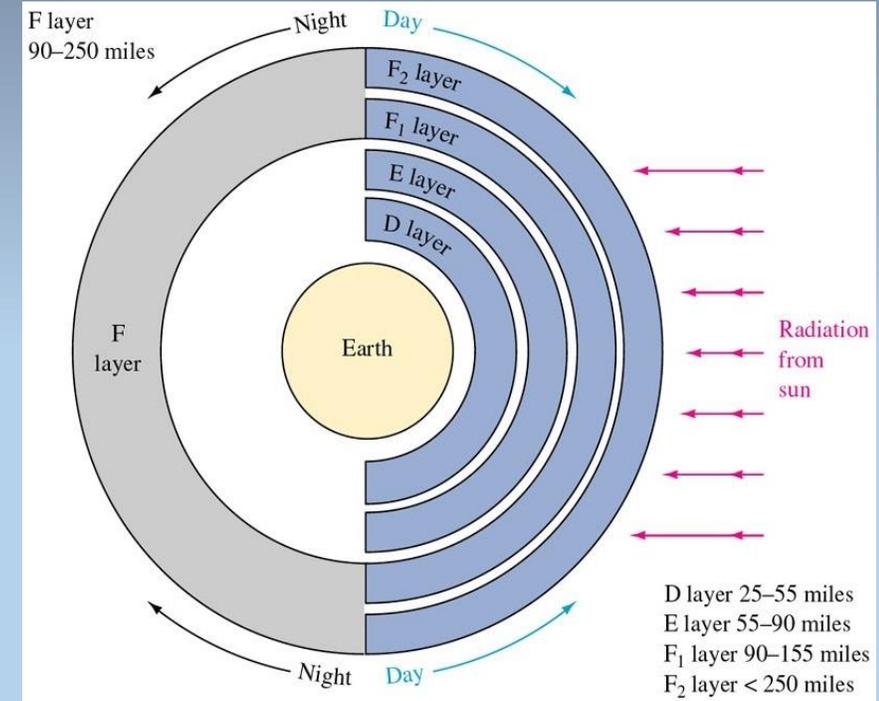
Mudando a frequência

Durante o dia, sinais de ondas-médias (MF) se propagam somente via ground waves, porque a camada D absorve os sinais que atingem a ionosfera.

À medida que a frequência aumenta, a atenuação cai para um ponto em que os sinais passam através da camada D em direção à camada E.

Na camada E os sinais são refletidos e passam de volta pela camada D e retornam à Terra a uma distância considerável do transmissor.

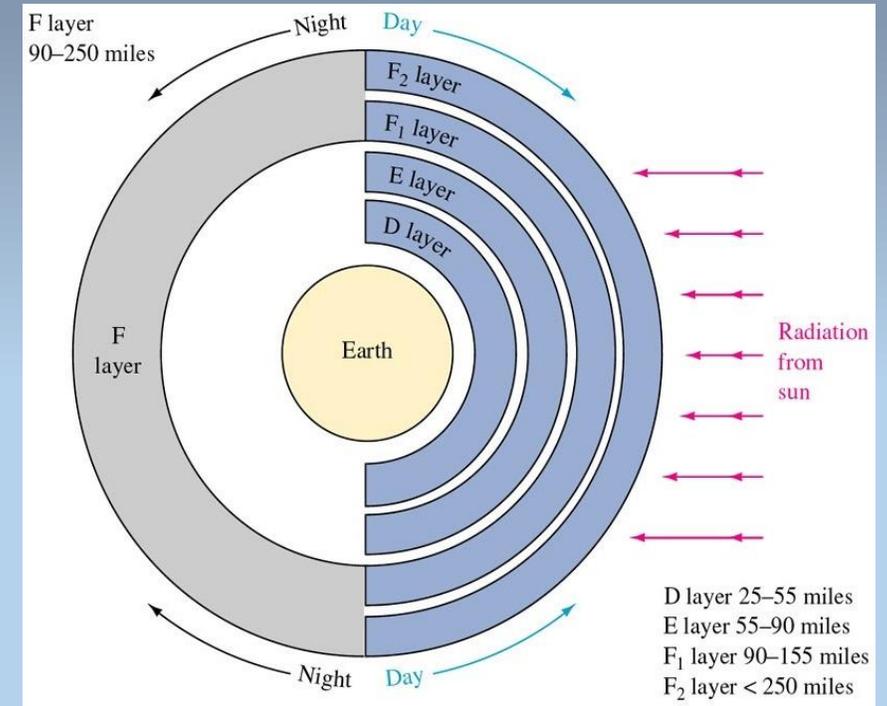
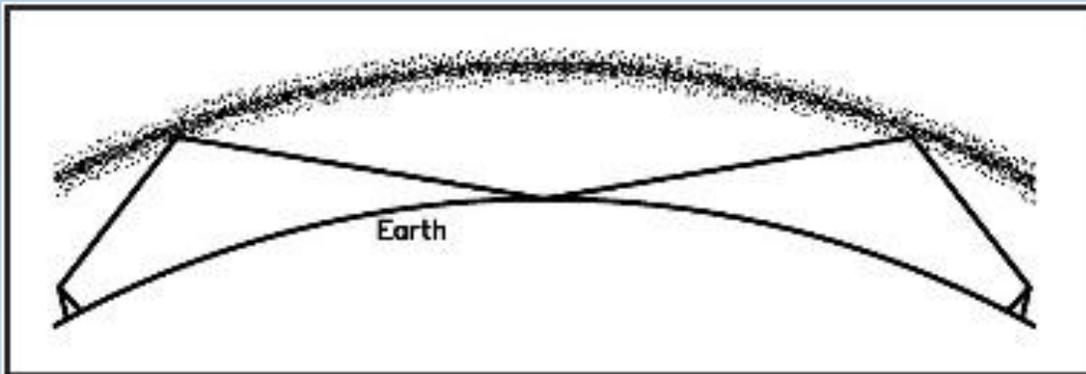
À medida que a frequência aumenta ainda mais, a refração da Camada E se torna menos eficiente.



Vários Saltos

Distâncias consideráveis podem ser abrangidas por reflexão de camadas E ou F (múltiplas reflexões).

Tendo retornado para a Terra a partir da ionosfera, a superfície da Terra age como um refletor e retorna o sinal de volta para a ionosfera, onde é refletido novamente para a Terra. Desta forma os sinais podem viajar pelo globo, algumas vezes em várias direções.



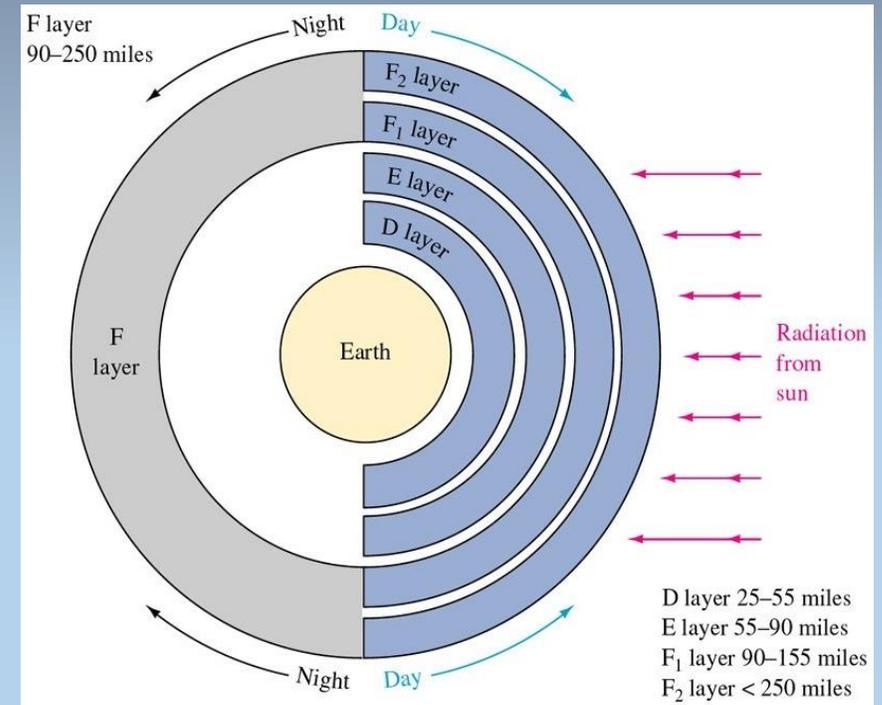
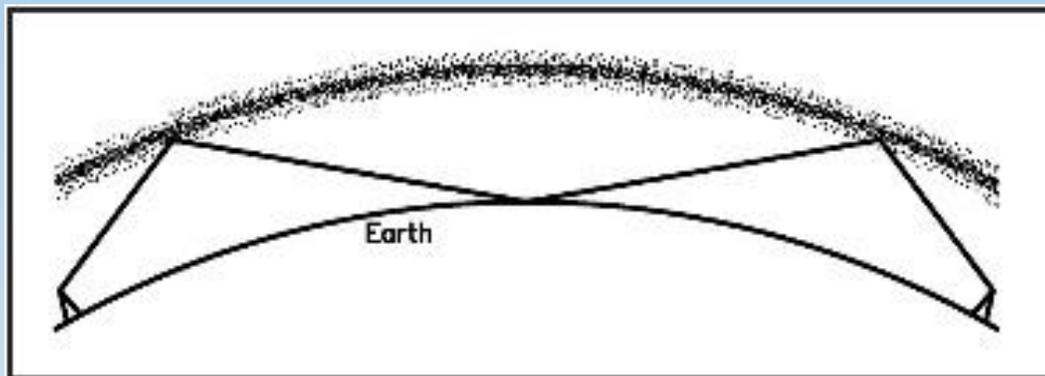
A natureza da superfície da Terra também tem efeito. Áreas desertas são pobres refletores, mas oceanos são bastante efetivos. Sinais refletidos pelo oceano Atlântico, por exemplo, serão mais fortes do que aqueles refletidos por áreas como o deserto do Sahara.

Vários Saltos

Além de perdas causadas por reflexões na superfície da Terra, sinais são atenuados a cada passagem pela camada D.

De fato, estas perdas são significativas, se notarmos que os sinais têm que passar através da camada D duas vezes para cada rodada Camada E ou Camada F.

Além do fato que caminhos de alta frequência mais provavelmente usarão a camada F2 e irão requerer menos reflexões, caminhos de alta frequência também sofrem menos atenuação da camada D.



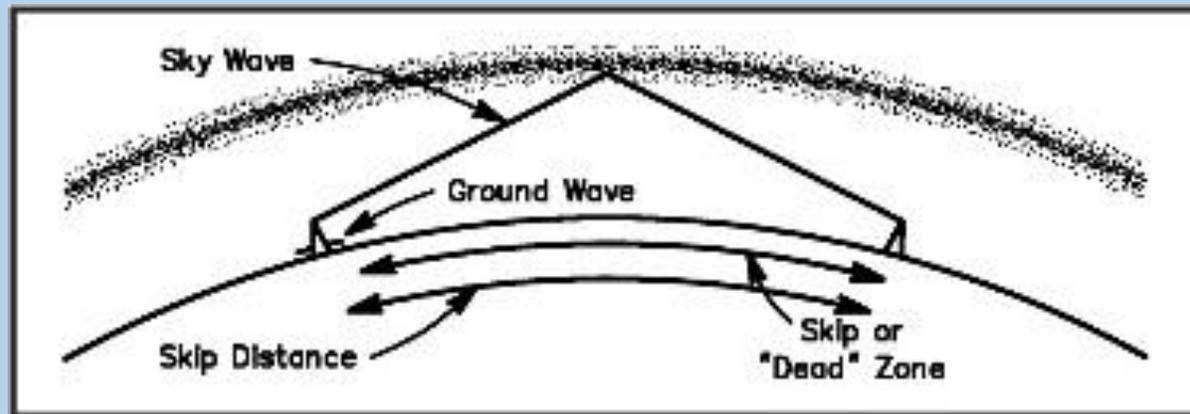
Isto significa que um sinal de 28MHz, por exemplo, será mais forte do que um sinal de 14MHz, se a propagação for suportada em ambas frequências, e todos os outros fatores foram iguais.

Distância de Salto e Zona de Salto

Distância de salto, zona de salto e zona morta são termos importantes associados com propagação ionosférica. A distância que um sinal se propaga ao longo da superfície da Terra quando é refletido pela ionosfera é conhecido como distância de salto.

Há também uma região conhecida como zona de salto ou zona morta.

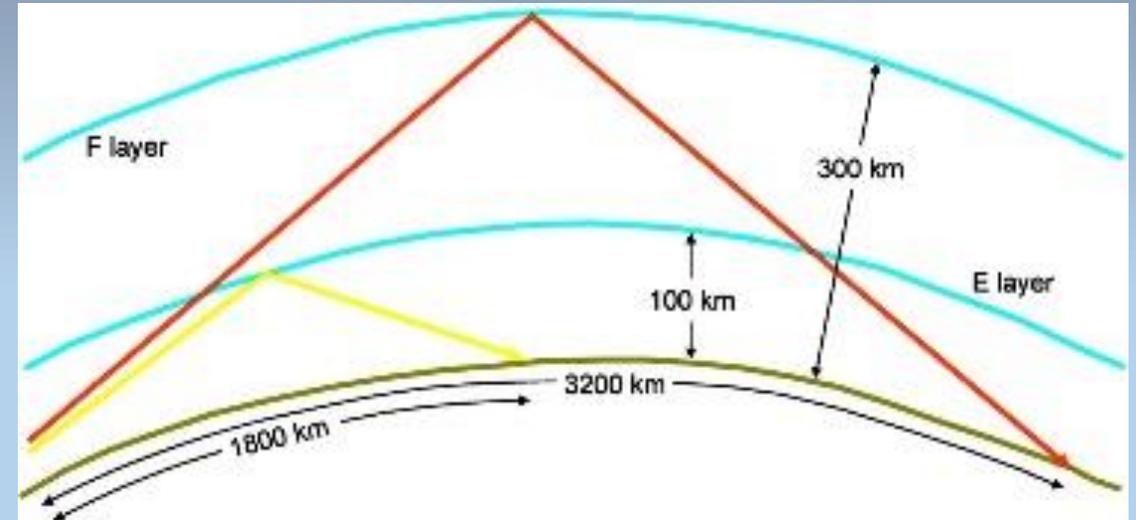
Ground waves signals se propagam a apenas uma pequena distância do transmissor, em função da atenuação do sinal. Sinais se propagando para a ionosfera podem não ser refletidos até que atinjam distâncias muito além daquelas onde ground waves signals desaparecem.



O resultado é uma área ou zona onde não há sinais, conhecida como zona de salto ou zona morta. Isto é particularmente pronunciado para sinais de alta frequência onde ground waves desaparecem rapidamente e distâncias de salto podem ser de milhares de milhas ou mais.

Distância de Salto e Zona de Salto

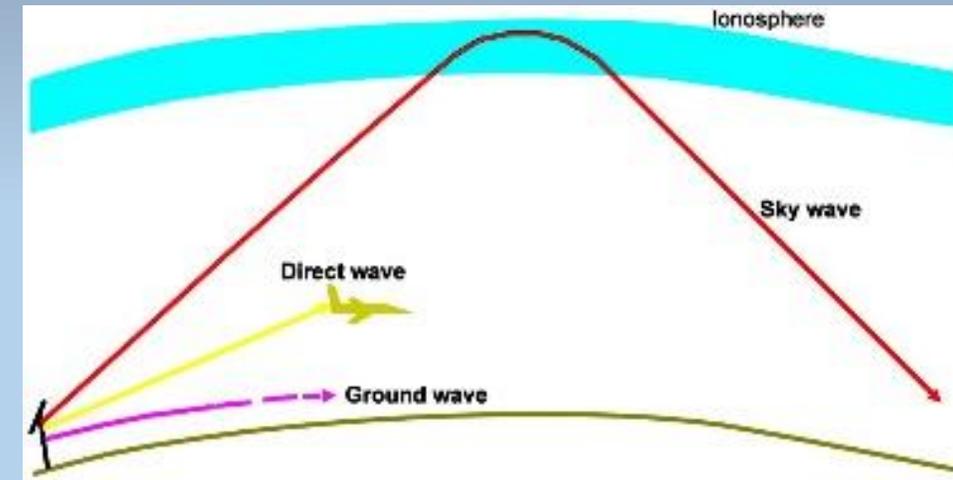
- O comprimento do salto é a distância no solo coberta por um sinal de rádio depois de ter sido refletido uma vez da ionosfera e retornado à Terra.
- O comprimento máximo do salto é definido pela altura da ionosfera e pela curvatura da Terra.
- Para as alturas das regiões E e F de 100 km e 300 km, os comprimentos máximos de salto são de cerca de 1800 km e 3200 km, respectivamente (correspondendo a um ângulo de elevação de cerca de 4°).
- Distâncias superiores a estas exigirão mais de um salto. Por exemplo, uma distância de 6100 km exigirá um mínimo de 4 saltos pela região E e 2 saltos através da região F.



Comprimentos de salto com base em um ângulo de elevação da antena de 4 ° e alturas para as camadas E e F de 100 km e 300 km, respectivamente.

Frequências Limites para Propagação por Sky Waves

- Nem todas as ondas HF são refletidas pela ionosfera.
- Existem limites de frequência superior e inferior:
 - Se a frequência for muito alta, a onda passará diretamente através da ionosfera.
 - Se a frequência for muito baixa, a intensidade do sinal será muito baixa, devido à absorção na região D.
- O intervalo de frequências utilizáveis variará:
 - ao longo do dia
 - com as estações do ano
 - com o ciclo solar
 - de um lugar para outro



Tipos de Propagação em HF

O limite superior das frequências varia principalmente com os fatores acima, enquanto o limite inferior também depende do ruído do local receptor, eficiência da antena, potência do transmissor, e absorção pela ionosfera.

O intervalo de frequências utilizáveis (MUF e ALF)

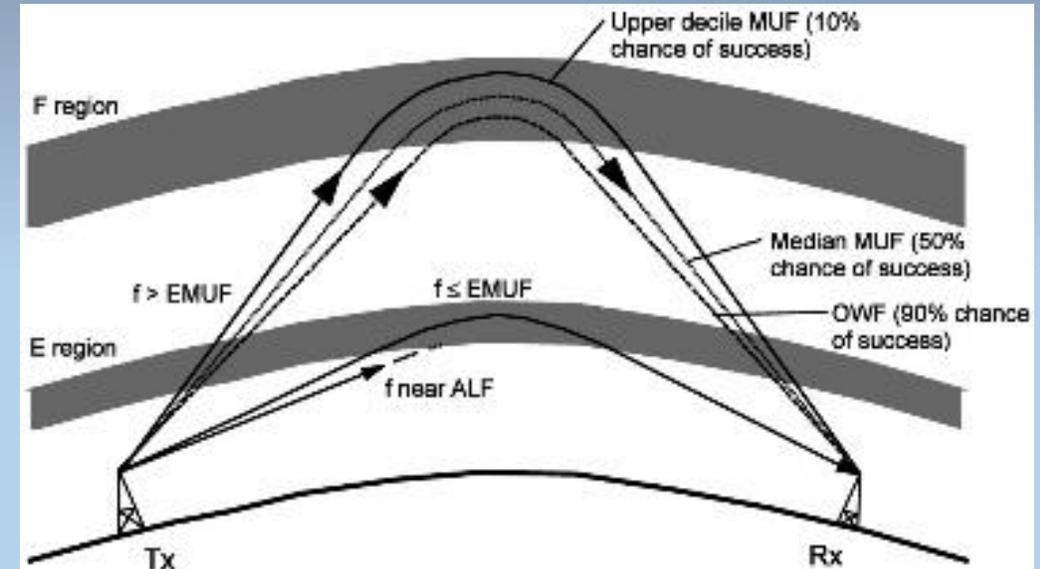
Para qualquer enlace, existe uma Frequência Máxima Usável (MUF) que é determinada pelo estado da ionosfera na proximidade dos pontos de reflexão e o comprimento do enlace.

A MUF é função da densidade máxima de elétrons em uma determinada camada da ionosfera.

Frequências superiores ao MUF para uma região específica irão penetrar completamente nessa região, não sendo refletidas.

EMUF: Maior frequência suportada pela camada E

FMUF: Maior frequência suportada pela camada F

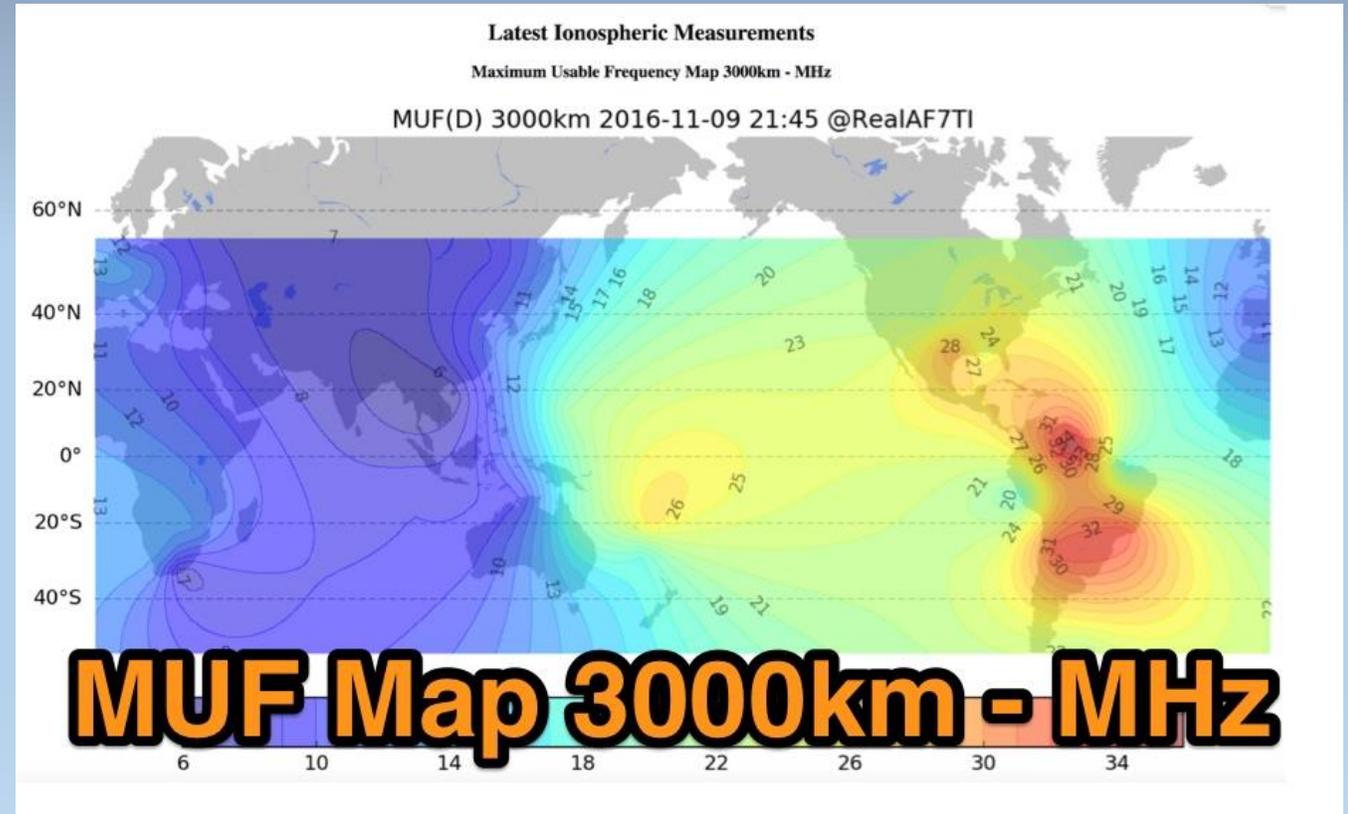


Faixa de frequências utilizáveis

- Se f estiver próxima do ALF, a onda pode sofrer absorção na região D.
- Se a f estiver acima do EMUF, a propagação será através da região F.
- Acima do FMUF, a onda provavelmente penetrará na ionosfera.

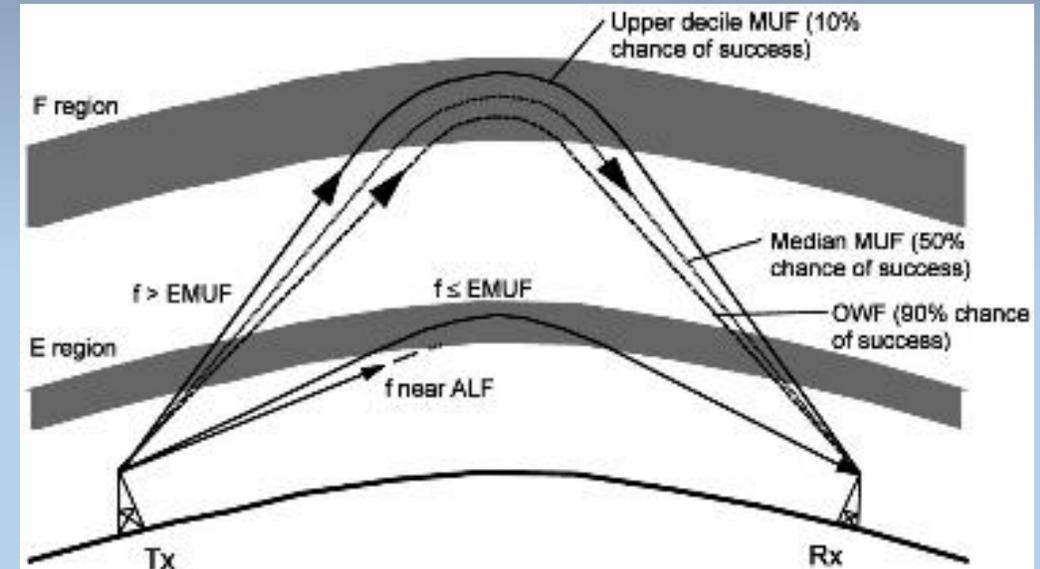
O intervalo de frequências utilizáveis (MUF)

- Durante o dia, é possível se comunicar através das camadas E e F, usando diferentes frequências.
- A MUF da região F, em particular, varia muito ao longo do dia, sazonalmente, e com o ciclo solar.
- Os dados históricos são calculados ao longo de muitos anos, e organizados para dar um MUF por cada hora do dia (24 valores), para cada mês do ano.
- Estes também podem ser ajustados para o ciclo solar.



O intervalo de frequências utilizáveis (ALF)

- A absorção da região D das ondas de rádio em HF aumenta rapidamente com frequências decrescentes.
- A região D coloca assim um limite inferior nas frequências que podem ser utilizadas para a propagação ionosférica. Esse limite é chamado Limite de Frequência por Absorção (ALF).
- O ALF é significativo apenas para circuitos com pontos de reflexão no hemisfério iluminado pelo sol.
- À noite, a ALF cai para zero, permitindo frequências que não são utilizáveis durante o dia para se propagar com sucesso.



Faixa de frequências utilizáveis

- Se f estiver próxima do ALF, a onda pode sofrer absorção na região D.
- Se a f estiver acima do EMUF, a propagação será através da região F.
- Acima do FMUF, a onda provavelmente penetrará na ionosfera.

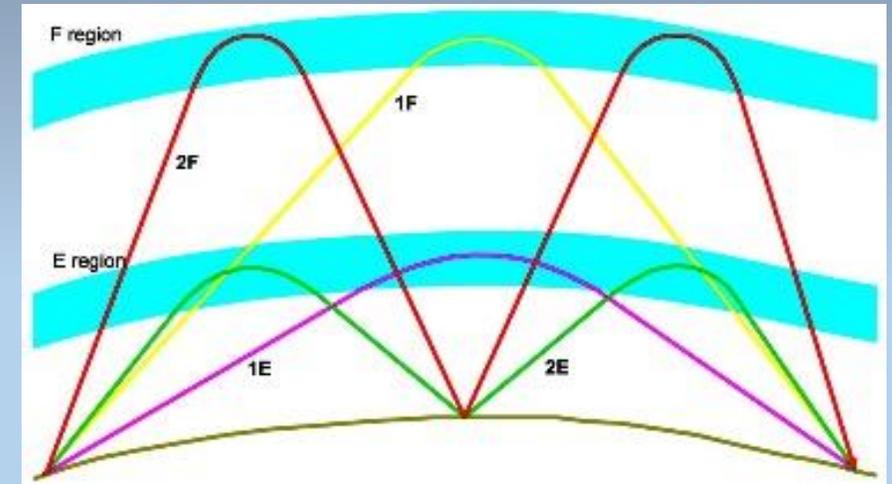
Modos de Propagação

- Há muitos caminhos pelos quais uma sky wave pode viajar de um transmissor para um receptor.
- O modo refletido por uma camada específica que requer o menor número de saltos entre o transmissor e o receptor é chamado de modo de primeira ordem.
- O modo que requer um salto extra é chamado de modo de segunda ordem, e assim por diante.

Por exemplo, para um caminho de propagação com um comprimento de 5000 km, o modo F de primeira ordem terá dois saltos (2F), enquanto o modo F de segunda ordem terá três saltos (3F).

O modo E de primeira ordem terá o mesmo número de saltos que o modo F de primeira ordem.

Se resultar em um comprimento de salto superior a 2050 km, o que corresponderia a um ângulo de elevação de aproximadamente 0° , então o modo E não é possível.



Exemplo de modo de propagação simples. Os modos simples são aqueles propagados por uma única região, digamos a região F, por exemplo.

Modos de Propagação

Existem modos mais complexos, consistindo em combinações de reflexões das regiões E e F, sendo também possíveis os modos denominados duto e cordas.

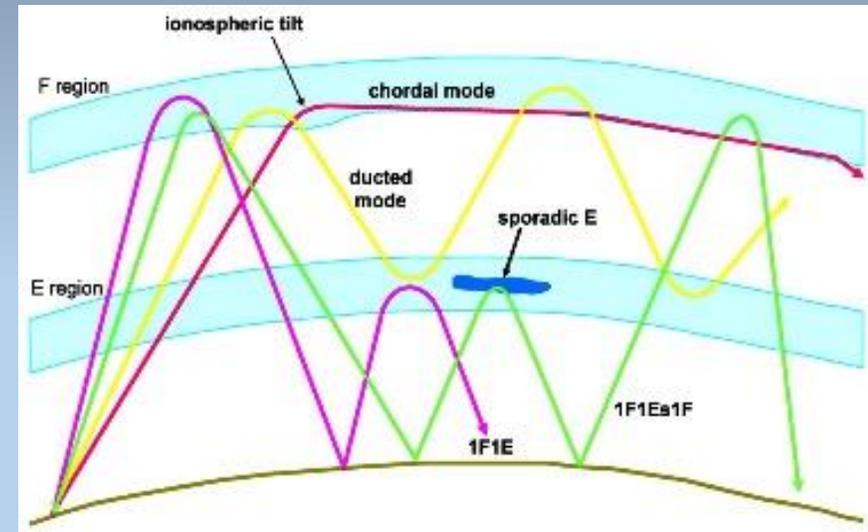
Os modos de propagação em dutos e cordas envolvem uma série de reflexões/refrações da ionosfera sem reflexões intermediárias da Terra.

As regiões da ionosfera não são homogêneas, a ionosfera apresenta ondulações de curvaturas significativas (vide figura ao lado), afetando a refração de sinais de rádio.

Quando as camadas ionosféricas se curvam, podem ocorrer os modos de corda e canalização.

Estas curvaturas não suaves da ionosfera são mais prováveis em regiões próximas do mínimo de latitude média (ver slide 38) e nas regiões do globo onde está ocorrendo no momento o nascer e o por do sol.

Quando os modos de propagação em dutos e cordas ocorrem, a intensidade dos sinais é significativa, uma vez que a onda percorre menor percurso através da região D, como também é menos atenuada por não haver reflexões no solo.



Exemplo de modo de propagação complexo.