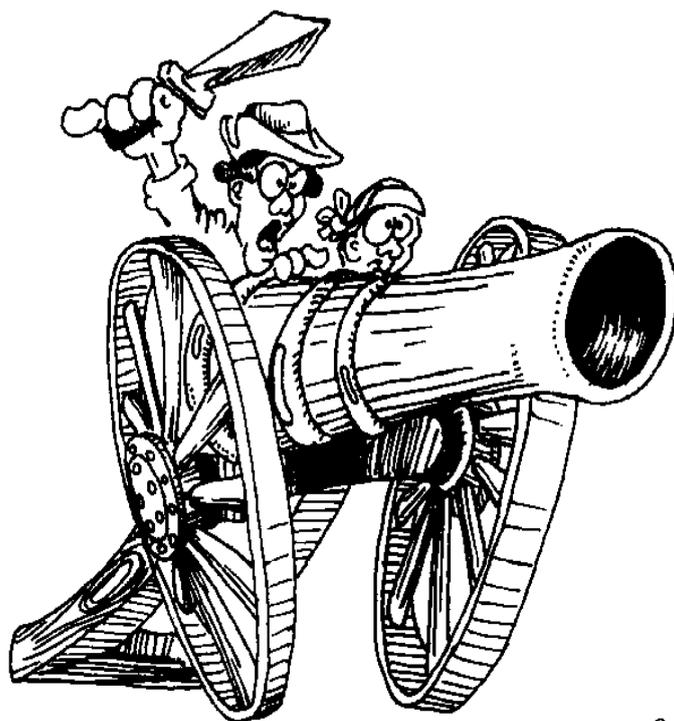


Guia da Propagação em Bandas Baixas para o Dx-Man

por Robert R. Brown, NM7M

Abril de 2002



D-

Copyright © 2002 de Robert R. Brown

Permitida a reprodução deste material para uso pessoal e não-comercial.

Prefacio

Ao escrever este livro, tentei expor o que sabemos a respeito de eventos importantes que ocorrem na Ionosfera, entre nossa antena e a da estação DX que estamos perseguindo, quando operamos em bandas baixas. E tenho de admitir aqui que existem muitos fatores que sequer conhecemos. A esse respeito, também tenho de dizer que a ignorância não é algo pessoal, ela é frustrante para todos nós.

Parece haver um consenso geral de que o DX nas bandas mais baixas representa o “último grande desafio” do Radioamadorismo. No entanto, em muitos aspectos, ele é “contrário à lógica comum”, sendo melhor no mínimo do ciclo solar, enquanto que em HF o DX é mais fácil no máximo do ciclo solar. Portanto, a Física aplicável à faixa inferior do espectro solar aqui na Terra é bem diferente daquela aplicável à faixa superior do mesmo espectro; a faixa inferior exige mais para se obter um DX dos mais simples, algo que é facilmente conseguido na faixa superior do espectro.

Isso não quer dizer que não sejamos capazes de melhorar nesse aspecto. Entretanto, da forma que eu vejo, trata-se de uma questão de interesse – ter de dedicar um pouco mais de tempo pensando sobre o que acontece e talvez até deixar momentaneamente de lado o DX. Também pode não ser tão difícil como parece o fato de que o que nos falta é uma melhor compreensão sobre como a atmosfera afeta o DX.

Costumo dizer que está em ação um cenário do tipo “caótico” que não foi ainda totalmente compreendido nem apreciado. Esse cenário tem a ver com o fato de que toda a ionização com a qual contamos para a propagação nas bandas baixas está na realidade cercada por estranhos átomos e moléculas neutros, na relação maior do que um milhão para um, e que eles colidem segundo uma proporção elevadíssima. Como resultado, a ionização tem de ocorrer ao longo das partículas neutras em seus movimentos, exatamente como em um “caos”.

Portanto, olhe para o céu e para as nuvens sempre em movimento; esse tipo de evento deve estar acontecendo para a ionização nos níveis mais altos, onde trafegam os sinais das bandas baixas. Entretanto, se você ainda continua pensando que a Ionosfera da qual dependemos está em repouso e permanece sempre paralela com a Terra, então eu tenho um amigo radioamador que tem um viaduto para vender e ele gostaria muito de conversar com você...

Deixando de lado a brincadeira, gostaria de aumentar nossa compreensão sobre como funciona a propagação nas bandas baixas, que é o objetivo deste livro. Mas primeiramente temos de revisar o modo como funciona a propagação, na forma que o conhecemos e, em seguida, prosseguir para assuntos mais complexos. Siga-me com atenção e paciência nestas primeiras páginas do livro, logo em seguida passaremos aos pontos de interesse.

Anacortes, WA, EUA

Abril de 2002

Agradecimentos

Tenho uma dívida impagável com Sheldon Shallon, W6EL, a respeito da propagação nas bandas de HF e também pelos anos de agradáveis QSOs nos 20 metros em SSB, discutindo propagação e assuntos correlatos. Também estou em dívida com meu amigo Carl Luetzelschwab, K9LA, por toda a sua ajuda e por ter assumido a responsabilidade jornalística.

Gostaria de agradecer a meus amigos canadenses por tudo que eles têm feito por mim e pelo Radioamadorismo: Bob Eldridge, VE7BS, que foi o primeiro a me apresentar às maravilhas da “*Top Band*”; Cary Oler, pela versátil ferramenta de estudo da propagação, a PropLab Pro; Peter Oldfield, por seu maravilhoso programa, DXAID e, finalmente, a Nick Hall-Patch, VE7DXR e Bob Kavanagh, VE3OSZ, por seu maravilhoso trabalho experimental a respeito das melhorias ocorridas no nascer do Sol.

Outras pessoas que me ajudaram em meu trabalho e neste estudo incluem os Doutores David S. Evans e Harold Leinbach do Centro do Ambiente Espacial em Boulder e o Professor T. J. Rosenberg da Universidade de Maryland. Eu estaria em falta se não agradecesse também aos membros das expedições de DX que forneceram os registros de contatos em bandas baixas para meu estudo – Bob Schmieder, KK6EK, Warren Hill, K7WX, Joerg Puchstein, DL8WPX e Garry Shapiro, NI6T. E um especial agradecimento a Mike Bazley, VK6HD e Steve Ireland, VK6VZ, por compartilharem mais de 20 anos de registros sobre a banda de 160 metros.

Finalmente, para minha finada esposa, Mary Lou, NM7N, que pacientemente sofreu devido a meu entusiasmo pelo estudo da propagação, entristecido por ela não estar mais comigo para compartilhar a satisfação pelo termino deste livro.

Índice

Prefácio	iii
Agradecimentos.....	iv
Capítulo I – Introdução.....	1
Capítulo II – A Ionosfera	3
Fundamentos	3
Colisões	6
Rerradiação	7
Capítulo III – Propagação.....	11
Atenuação espacial.....	11
Reflexões em superfícies.....	13
Perdas por colisões	19
Ionização	22
Capítulo IV – Mais sobre Propagação.....	27
Trajetos dos raios.....	27
Modelos ionosféricos	33
Flutuações nas frequências críticas	38
Plotagem dos raios	42
Propagação de ruído.....	52
Capítulo V – Propagação Magneto-iônica.....	53
Geomagnetismo.....	53
Giro frequência do elétron.....	55
Polarização circular e elíptica.....	56
Mais orientações gerais	61
Acoplamento de energia.....	67
Plotagem de raios magneto-iônicos	69
Capítulo VI – Distúrbios	77
Ionosfera em um dia calmo	77
Distúrbios ionosféricos.....	78
Eventos de prótons solares	78
Tempestades magnéticas e Aurora - Observações magnéticas	85
Estatísticas geomagnéticas	87
Processos geomagnéticos	90
Absorção auroral	93
Capítulo VII – Propagação via <i>Long-Path</i>	99
Nas bandas de HF.....	99
<i>Skewing</i>	100
Nas bandas baixas	101
Capítulo VIII – Química e Propagação nas bandas baixas.....	107
Íons, átomos e moléculas.....	107
Modificação ionosférica.....	109
Modificação auroral	111
Íons negativos.....	114
Íons positivos	116
Capítulo IX – Predições sobre propagação.....	117
Modos básicos	117
<i>Nowcasting</i>	120
Estudos feitos por satélites	124
Latitudes menores	127
Capítulo X – Conclusão	128
Primeiras considerações	128
Considerações finais.....	132
Referências	136

Capítulo I - Introdução

De certa forma, a capa deste livro é simbólica sobre o que o autor está escrevendo – a teoria por trás dos avanços tecnológicos. Para ser mais específico, a civilização progrediu em duas frentes – o método da guerra e o das comunicações. Conseqüentemente, por um lado nosso progresso envolveu avanços lentos, desde o uso de enormes catapultas para lançar rochas contra castelos até a utilização de mísseis guiados por raio laser, e por outro lado avanços rápidos, desde os transmissores de faísca em frequências ultrabaixas até o uso de HF e UHF para contatar satélites em órbita.

Apesar de que a atmosfera é a mesma, tanto para projéteis lançados, como para mísseis guiados por GPS, estou certo de que a Física da “balística no exterior” é diferente, dependendo da velocidade, formato e massa do projétil. O mesmo vale para a RF – ela é a mesma Ionosfera, no entanto a Física envolvida depende da frequência de rádio em relação às propriedades inerentes da Ionosfera – seu plasma, colisões e giro frequências dos elétrons.

Na atualidade (2002), sei que existem muitas pessoas dedicadas aos primeiros tempos, atiradores de espingarda que carregam e disparam mosquetes usados nas guerras da Independência e na Guerra Civil, assim como canhoneiros que disparam peças de artilharia como o canhão da capa deste livro. No entanto, fazem isso mais por “aparência” do que por “efeito”, não carregando seus mosquetes ou canhões com projéteis de verdade.

No Radioamadorismo ocorre fenômeno semelhante, com operadores das baixas frequências que exercitam seu passatempo no mesmo estilo dos primeiros tempos, na época dos “200 metros em mais para baixo”. Entretanto, ao mesmo tempo em que eles utilizam equipamentos mais modernos, eles “disparam simbolicamente” na Ionosfera, na esperança de conseguir DX além de seu horizonte, até mesmo através do *long path*, mais de meia volta ao redor do mundo.

Para os objetivos do atirador de rifle nas guerras da Independência e Civil, não é preciso se preocupar com a balística exterior – afinal eles disparam embuchamento, não projéteis. Não ocorre o mesmo com o Radioamador, pois a Física em ação na Ionosfera é de suma importância, realmente determinante do sucesso ou da falha na busca pelo DX, a menos que não seja dedicada atenção ao significado. Apesar de que os avanços no hardware têm ajudado muito, certamente o DX nas bandas baixas não é tarefa fácil.

Pode-se então perguntar: porque as dificuldades são tão grandes nas bandas mais baixas? Existe uma variedade de motivos – desde o desvio dos continentes, a demografia, a política do Terceiro Mundo e das nações emergentes, os efeitos do ciclo solar, El Niño e outros efeitos meteorológicos, até o crescimento industrial – **no entanto o real motivo se resume em uma única palavra – a Física.** A Física da propagação é, em último caso, o maior responsável por todos os desafios enfrentados pelos “*Dx-men*” nas bandas baixas e eles não são todos facilmente superáveis, como você verá.

Consequentemente, este livro, “Guia da Propagação em Bandas Baixas para o *Dx-Man*”, tratará da Física dos sinais em uma Ionosfera que se encontra na parte escura de um hemisfério, mergulhada dentro do campo magnético da Terra e bombardeada pelo vento solar. Podemos ver que isso é bem diferente da Ionosfera usada em HF pelos operadores QRP, largamente controlada pelas mudanças EUV resultantes dos ciclos solares.

Não querendo em absoluto desmerecer os operadores QRP, a propagação com a qual eles têm de lidar em HF é simples, quando comparada com aquela que os “*Dx-men da Top Band*” enfrentam diariamente nas bandas baixas. Isso se deve ao fato que as as bandas de HF dependem da ionização em grandes altitudes, e as “fortunas do DX” sobem e descem junto com os ciclos solares. O mesmo no entanto não ocorre nas bandas baixas; nelas, a propagação ocorre em altitudes mais baixas, e existe ionização mais do que suficiente acima, para propagação dessas bandas – mesmo no mínimo do ciclo solar. De fato, a propagação é muito melhor nas bandas baixas quando a contagem de manchas solares é baixa, nas épocas de mínimo solar.

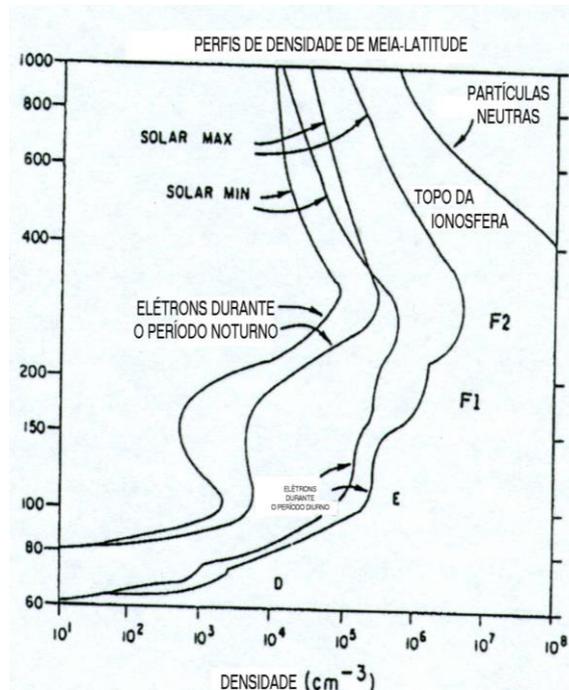
Além disso, para os sinais de HF, a absorção e o ruído não são um problema tão grave, enquanto que para os sinais das bandas baixas eles frequentemente compõem todo o problema. Finalmente, quando se trata de previsões de propagação, sua predição nas bandas de HF é muito mais simples, pois estão sob a influência de uma fonte poderosa e estável de ionização, o Sol alto no céu, enquanto que nas bandas baixas as operações são realizada nas horas de escuridão, quando a ionização do dia está se dissipando através da recombinação. Em grande parte, a contagem de manchas solares governa as predições da propagação em HF, enquanto que as bandas baixas não dispõem de um parâmetro desse tipo para basear suas predições. Como resultado, o operador das bandas baixas enfrenta desafios muito maiores.

É razoável se dizer que a maioria dos *Dx-men* teve grande sucesso, não porque eles “sabiam de tudo”, porque na realidade eles não o sabiam. Ao invés disso, sabiam o suficiente, devido à sua experiência anterior, e foram muito determinados em seus esforços. A finalidade deste livro é ampliar e completar esse conhecimento, para que todos possam olhar para trás e entender todos os obstáculos que

Capítulo II - A Ionosfera

1 – Fundamentos

Mesmo os “novatos” nas bandas de HF sabem que a Ionosfera é levemente ionizada pelos fótons solares na faixa do Ultravioleta (UV). No entanto, não têm condições de apresentar valores ou detalhes sobre como é distribuída a ionização. Alguns sabem a respeito das diversas regiões, ou camadas, que compõem a Ionosfera: as capas D, E e F. Além disso, um “novato” pode até saber que a densidade da ionização nessas regiões varia nas mudanças do dia e noite, conforme as estações do ano e mesmo devido aos ciclos solares. Considerando isso, a **Figura 1** não constitui nenhuma



surpresa:

Figura 1 – Perfis de ionização para as camadas ionosféricas

Essa figura se refere a uma localidade de meia latitude, talvez algo como a cidade de Boulder, no Colorado, e mostra as variações de altitude e de ciclo solar da ionização das diferentes regiões. No entanto, temos de voltar agora ao início e falar sobre o nível de ionização mencionado anteriormente. Para isso, temos de fornecer algumas características da chamada atmosfera neutra para podê-la comparar com a ionosfera e obter uma perspectiva, portanto observemos agora a massa e os valores de densidades das partículas neutras e a ionização nas diferentes faixas de altitudes da

Atmosfera e da Ionosfera:

Atmosfera (durante o dia)		Valores (por cm³)	Massa (g/cm³)
Camada D	De 70 a 90 km	De 1^{16} a 1^{14}	2^{-08}
Camada E	De 95 a 140 km	De 1^{12} a 1^{11}	De 2^{-11} a 4^{-12}
Camada F1	De 140 a 200 km	De 1^{10} a 1^{09}	De 4^{-12} a 3^{-13}
Camada F2	De 200 a 400 km	De 1^{09} a 1^{08}	De 3^{-13} a 4^{-15}

Essa tabela demonstra como é tênue a atmosfera nessas altitudes, quando comparada com os valores ao nível do mar: $2,8^{+19}$ partículas/cm³ e $1,293^{-03}$.

A tabela abaixo mostra como é tênue a ionização da atmosfera, com menos de um par de íons (íon e elétron positivos) para cada milhão de átomos e moléculas neutros!

A Ionosfera e os Ciclos Solares		Noite		Dia	
		Mín./cm³	Máx./cm³	Mín./cm³	Máx./cm³
Camada D	De 70 a 90 km	De 10 a 100		De 100 a 1000	
Camada E	De 95 a 140 km	1^{03}	6^{03}	1^{05}	2^{05}
Camada F1	De 140 a 200 km	1^{04}	2^{04}	5^{05}	2^{06}
Camada F2	De 200 a 400 km	1^{05}	3^{05}	6^{05}	6^{06}

No entanto, para fornecer uma informação mais completa, teremos de incluir a composição básica da atmosfera: Nitrogênio 78,1 %, Oxigênio 20,9 %, Argônio 0,9 %, Dióxido de Carbono 0,03 %, Neon 0,002 %, Hélio 0,0005 % e Água em quantidades variáveis, tudo isso ao nível do mar. Como veremos mais adiante, essas quantidades irão variar até altitudes de cerca de 100 km, no entanto representam o material básico a partir do qual a Ionosfera é criada pelos fótons solares.

Tendo examinado a **Figura 1** e os valores das duas tabelas, o “novato” poderá se sentir um pouco intimidado, tentando entender tanto essas variáveis como onde elas serão aplicadas. Entretanto mais cedo ou mais tarde, o aspecto estático desses valores dará lugar à constatação óbvia de que as quantidades envolvidas também mudam com o passar do tempo: os ventos sopram, espalhando a atmosfera local, além disso os deslocamentos em grande escala da atmosfera ocorrem

juntamente com as mudanças nos sistemas climáticos globais e a própria composição da atmosfera pode ser alterada, veja o buraco na camada de Ozônio que é frequentemente citado. Portanto, existem muitos outros fatores relativos à atmosfera e à ionosfera do que estes aspectos elementares aqui relacionados.

E, o mais óbvio de tudo, partindo da experiência diária, existe uma variação na temperatura atmosférica ao nível do solo, que nossa intuição sugere se estender para cima. Portanto, temos de mostrar a nosso “novato” de que forma a temperatura atmosférica varia, desde o solo até o ponto em que os sinais são propagados. Nesse aspecto, a experiência demonstra que os aumentos de temperatura, começando na Troposfera que começa ao nível do solo e vai até 12 km, em seguida a temperatura da Estratosfera até os 47 km, a Mesosfera (que inclui a região da Camada D) até 85 km e para dentro das temperaturas mais altas da Termosfera (que inclui o topo da Camada D, assim como as regiões das camadas E e F). Isso é mostrado na **Figura 2**, que também demonstra que as variações do ciclo solar ocorrem em grandes altitudes, acima do que pensamos ser a Ionosfera. Esse assunto provavelmente está além da experiência, porém não a intuição de nosso “novato”.

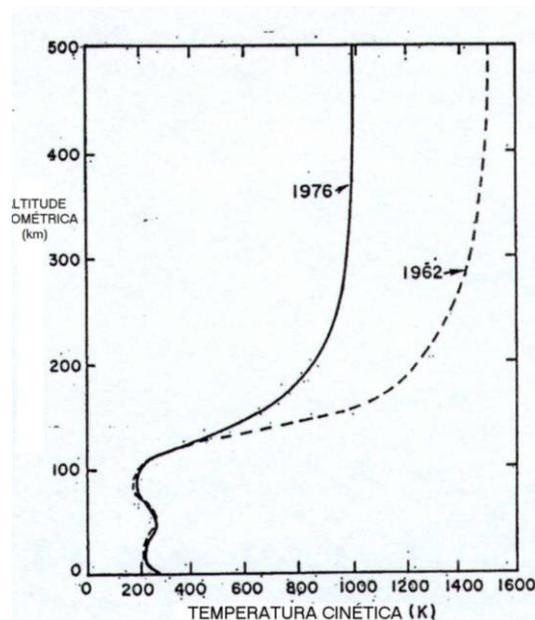


Figura 2 – Variação da temperatura atmosférica para níveis baixos e altos da atividade solar.

Esta figura exhibe as temperaturas da parte superior da atmosfera e da ionosfera, de certa forma insensíveis às variações do ciclo solar devido à injeção de energia proveniente do Sol. Sem dúvida, a dinâmica térmica da atmosfera é determinada pela injeção de energia radiante proveniente do Sol, no entanto ela é relativamente estável, a Constante Solar (a radiação por unidade de área que atinge a Terra, que é de 1.380 Watts por metro quadrado), variando apenas uma pequena fração de um por cento (1%) ao longo do tempo.

Em contraste com a parte visível do espectro solar, nosso “novato” sabe, a partir da experiência, que a porção de comprimento de onda mais curta da emissão do Sol, nas regiões dos raios EUV e X das regiões ativas, é altamente variável. O mesmo ocorre para a porção dos comprimentos de onda mais longas, as emissões de rádio nos comprimentos de onda desde os 10 cm (utilizada diariamente nos relatórios sobre atividade solar) até os 10 metros (escutada nas bandas de HF durante as labaredas solares). Essas variações são interessantes, no entanto as propriedades básicas de ambas, atmosfera e ionosfera, tanto na Física como na Química, continuam sendo determinadas pelas temperaturas dos constituintes neutros (T_n), dos íons positivos (T_i) e dos elétrons (T_e).

Abaixo dos 100 km, essas temperaturas são essencialmente iguais, devido à elevada densidade dos constituintes neutros em relação aos íons e elétrons, e pelo fato de que as partículas neutras estão sofrendo colisões em taxas muito altas em cada direção, começando em 1^{09} ao nível do mar.

Provavelmente nosso “novato” não será capaz de reconhecer a distribuição de energia em ação, entretanto isso nos leva a um ponto que é extremamente importante, pelo menos no que diz respeito à propagação – as colisões e a absorção do sinal.

2 – Colisões

Com uma proporção de 3^{19} partículas por centímetro cúbico na superfície da Terra, não fica difícil entender que cada átomo ou molécula ocupa um volume inferior correspondente a $3,7^{-07}$ cm. De fato, para dar uma ideia sobre o tamanho de uma molécula de ar, ela tem uma ordem de magnitude menor que $3,6^{-08}$ cm. No entanto, essas partículas constituem um gás e seguem um movimento constante e caótico, colidindo umas com as outras. Todas as partículas do gás se movem com velocidades que têm a mesma energia média, cerca de 450 metros por segundo para os gases N_2 e O_2 .

Nessa velocidade e com as dimensões acima informadas, torna-se relativamente fácil determinar a distância média ou o caminho livre entre as colisões, uma média de 8^{-06} cm e o número médio de colisões de $5,5^{+09}$ por segundo.

Isso para as colisões entre partículas neutras e números 6 vezes menores conforme subimos mais na atmosfera. No entanto, o número de partículas neutras sobrepuja o [número] de íons e elétrons positivos na relação de cerca de um milhão para um e, obviamente, colidem com eles. Portanto, mesmo que os íons sejam em menor número, as colisões entre íons neutros são muito importantes, particularmente devido ao fato desses movimentos derivarem dos ventos na parte superior da atmosfera serem capazes de transportar íons com eles, alterando de forma significativa a distribuição de ionização, uma vez que os elétrons seguem o rumo devido à atração eletrostática com os íons positivos.

Os elétrons também são em número menor e colidem, tanto com os íons positivos como com as partículas neutras, no entanto a taxa de colisão elétrons e partículas neutras é a maior dos dois, simplesmente porque as partículas neutras estão presentes em maior quantidade do que os íons positivos. Naturalmente, existe um segundo motivo devido ao qual as colisões entre elétrons e partículas neutras são importantes – ondas eletromagnéticas que atravessam uma região podem impulsionar os movimentos dos elétrons para velocidades ainda maiores e com maior energia; quando esses elétrons colidem com qualquer tipo de partícula neutra, as colisões não são totalmente elásticas, e a energia captada dessas ondas é transferida para as partículas neutras. Essa energia aquece a atmosfera, ainda que ligeiramente, o que resulta em uma perda na intensidade da onda, portanto uma maior absorção do sinal.

3 - Rerradiação

Quando se trata de propagação, normalmente o “novato” que pensa a respeito dela sabe em seu íntimo que os sinais começam quando os elétrons existentes nos fios da antena são excitados pelas correntes provenientes do transmissor na frequência de operação. Os elétrons irradiam “*wavelets*” eletromagnéticos, que se combinam para criar uma onda de superfície maior que se espalha pela Ionosfera.

E os campos elétricos nas ondas resultantes fazem com que os elétrons na Ionosfera no espaço livre oscilem e rerradiem exatamente como os elétrons na antena. Entretanto, os íons positivos na Ionosfera não contribuem com a onda resultante, pois são muito massivos para serem acelerados na proporção necessária para produzir uma rerradiação.

Essas ondas, talvez inicialmente cilíndricas devido à geometria da antena, transformam-se em ondas planas depois de muitos comprimentos de onda a partir da antena e os campos magnéticos ao longo da superfície da onda estão todos em fase num determinado instante, conforme exibido na **Figura 3**:

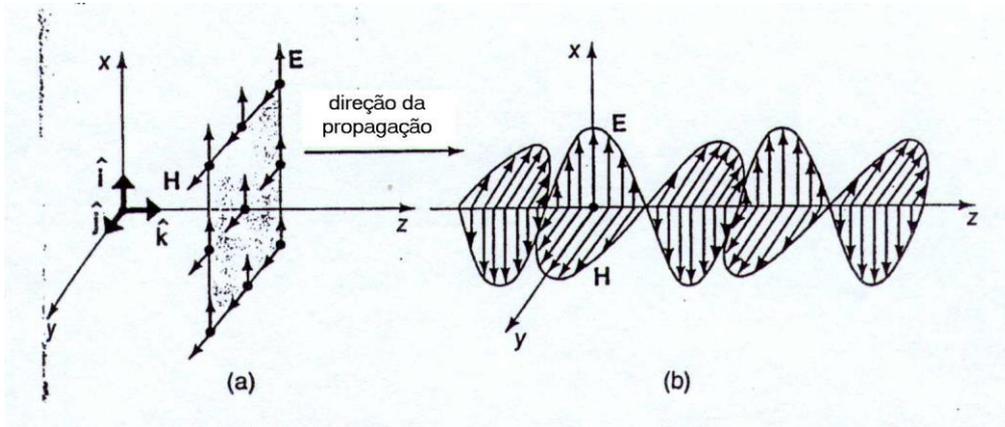


Figura 3 – (a) Vetores E- e H- em uma frente de onda plana e (b) ao longo de um trem de onda em um determinado instante.

Devido a todos os elétrons rerradiando em fase, é gerada mais onda de superfície, que avança com velocidade próxima à da luz, 3^{08} metros/segundo. Presume-se que as superfícies da onda plana se estendem por muitos comprimentos de onda e que tenham se movido por muitos períodos de RF da oscilação da onda. Esta é uma forma de se dizer que está sendo considerada uma situação matematicamente ideal.

Agora, caso a onda esteja se dirigindo para cima, em uma Ionosfera na qual a densidade dos elétrons aumenta com a altitude, conforme mostrado na **Figura 1**, então as partes superiores da frente de onda estará nas regiões onde há maior densidade de elétrons do que nas regiões inferiores. Entretanto, a velocidade de deslocamento das frentes de onda na Ionosfera depende da densidade dos elétrons.

Sob essas circunstâncias, a frente de onda proveniente da rerradiação dos elétrons nas regiões mais densas, em altitudes maiores, se moverá mais rapidamente do que a frente de onda proveniente das porções menos densas, em menores altitudes.

Isso significa que o efeito da frente de onda que segue para a região com crescente densidade de elétrons é o de direcionar a frente de onda para a frente e para baixo, mais em direção da Terra. Como se pode facilmente ver, isso é verdadeiro, independente de a frente de onda estar seguindo para cima ou para baixo na Ionosfera e é o processo básico de refração, ou curvatura, dos trajetos de onda na Ionosfera. Colocando de forma resumida, as ondas são refletidas PARA LONGE das regiões de maior ionização e isso se aplica na direção vertical, onde a densidade dos elétrons na Ionosfera aumenta com a altura, ou na direção horizontal, para longe das regiões de maior ionização do lado de dia do terminador (Zona Cinza) que separa a luz do Sol da escuridão.

E, se tivermos uma onda se movendo para cima na Ionosfera, poderemos representar seu caminho de forma mais conveniente através de uma linha reta ou um raio que seja perpendicular à superfície da onda os pontos na direção da frente de onda esteja avançando na Ionosfera, como ilustrado na **Figura 4**:

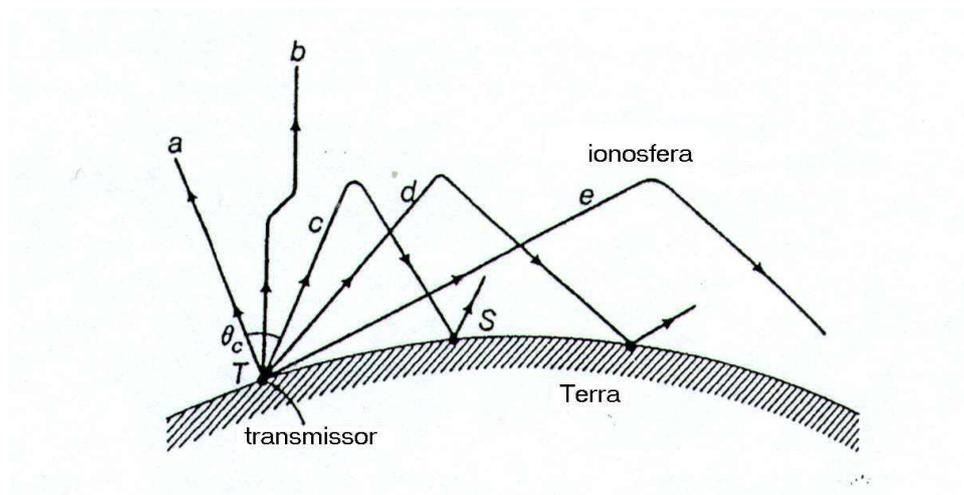


Figura 4 – Diagrama de raios para ondas de HF que estão penetrando na Ionosfera, enquanto que as ondas de baixa frequência são refratadas de volta para a Terra, na forma de saltos.

Essa figura nos leva a outro assunto, a rerradiação ou reflexão do sinal proveniente do solo ou de outras superfícies. Isso é resultante do fato de que qualquer superfície possui propriedades condutoras e esses elétrons serão excitados para rerradiar ondas eletromagnéticas, exatamente como na Ionosfera.

Como resultado, existirão ondas refletidas saindo da superfícies, assim como ondas seguindo para a superfície.

A intensidade das ondas refletidas e transmitidas depende das propriedades, tanto condutoras como dielétricas da superfície, no entanto a natureza das reflexões varia, desde difusa como especular ou semelhante á de um espelho, dependendo da rugosidade da superfície. Consequentemente, a reflexão difusa ocorre quando as ondas incidem sobre uma superfície áspera e são espalhadas em muitas direções. E especulares ou semelhantes a um espelho quando incidem em uma superfície lisa. Em termos práticos, ambos os tipos de reflexões podem ocorrer nos oceanos, que cobrem quase 80 % da superfície da Terra, dependendo da rugosidade dos oceanos naquele momento e no comprimento de onda das ondas incidentes.

Esses detalhes se referem a superfícies densas, sejam sólidas ou líquidas. Considerando que cerca de 80 % da Terra é coberta por oceanos, fica evidente que as reflexões e espalhamentos nos oceanos representam um importante papel na propagação. Mas o que dizer a respeito da atmosfera e da Ionosfera, que cobrem todo o planeta acima do nível do solo e que podem talvez contribuir para o espalhamento dos sinais? Essa dúvida veio à baila durante a chamada Guerra Fria, quando as comunicações globais se tornaram assunto urgente , particularmente através do Ártico, onde a propagação de rádio é muito instável devido a distúrbios magnéticos e da Aurora (aurorais).

Sendo esse o caso, as comunicações eram executadas utilizando o espalhamento nas irregularidades do plasma na região D, devido à natural turbulência na Ionosfera e seus efeitos na distribuição dos elétrons nessas altitudes. Esse método, espalhamento de energia de RF em todas as direções, era muito ineficiente, devido às reduzidas intensidades dos sinais resultantes, no entanto devido à altura da região D, conseguia colocar sinais onde eles não teriam conseguido atingir de forma confiável através da refração na Ionosfera. O problema da intensidade do sinal era superado simplesmente através do uso de altas potências.

Em equipamentos de Rádio Amador, a potência é limitada por lei mas, de qualquer forma, na faixa de HF, o espalhamento lateral de terra é uma forma bem conhecida de se contornar a limitação na MUF em um determinado caminho.

A propagação nas bandas de HF é capaz de cobrir grandes distâncias devido às reduzidas taxas de absorção, porém o espalhamento no solo continua sendo possível para os sinais nas bandas baixas; apenas ele não será tão eficiente em grandes distâncias devido à maior absorção.

O espalhamento e as reflexões ionosféricas também são possíveis, porém a eficiência é ainda menor, limitando o alcance dos sinais a curtas distâncias a partir da região do espalhamento. Entretanto, os rápidos ecos de um sinal de CW e os efeitos de múltiplas reflexões (“*multipath*”) em RTTY nas bandas baixas são testemunhos da realidade desses efeitos.

Isso conclui uma rápida revisão dos fundamentos da propagação nas bandas baixas, lidando primeiro com a distribuição da ionização, os constituintes neutros e a composição do que se encontra acima de nós. Também existem os fatores das colisões, entre partículas neutras e dos íons e elétrons positivos. Além disso, também foram abordados a igualdade de suas energias e temperaturas. Finalmente, o assunto importante da rerradiação das ondas eletromagnéticas que resulta no avanço das frentes de onda na Ionosfera e na reflexão proveniente das superfícies terrestres.

Estes são os fatores fundamentais: agora vamos abordar a propagação com mais detalhes.

Capítulo III - Propagação

1 - Atenuação espacial

Nosso “novato” conhece a atenuação espacial dos sinais, como ela atenua os sinais conforme aumenta a distância, de acordo com a lei do inverso do quadrado. No entanto, o mundo em que todos fazemos DX é grande, para dizer o mínimo e, usando a lei do inverso do quadrado para as taxas da intensidade com distâncias como, por exemplo, 10.000 km, nos levará a GRANDES números. Isso para evitar, a todo custo, que sejam usados números menores, a partir dos logaritmos das taxas de intensidade. Vamos portanto prosseguir, observando de que forma a atenuação espacial produz seus efeitos, em termos logarítmicos, sobre nossos sinais.

Agora não é mais mistério porque um transmissor de um kilowatt emitindo através de um radiador isotrópico virtual, operando no espaço livre, gera uma intensidade de sinal de $7,96^{-5}$ Watt por metro quadrado a 1 km de distância. Essa intensidade de sinal está em unidades de potência por unidade de área, no entanto em termos de propagação, as intensidades de sinal são expressas com maior frequência em termos de intensidades de campo elétrico, o valor de E, em Volts por metro, para ondas que teriam as mesmas intensidades. Se alguém efetuar os cálculos devidos, o campo E de um transmissor de 1 kW a 1 km é de 0,173 V/m ou, usando uma unidade menor, 1 microvolt por metro, obterá 173.000 microvolt por metro ($\mu\text{V/m}$).

Agora, grandes fatores numéricos tornam-se incômodos os cálculos e lidam com intensidades de sinais e reduções de todas as causas, não apenas a atenuação espacial, são expressas em decibéis (dB), uma forma logarítmica simples de se comparar taxas de intensidade. Pela mesma moeda, se tivermos utilizado 1 $\mu\text{V/m}$ como sendo uma intensidade padrão, a comparação a 1 km dará os seguintes resultados:

$$\text{Relação numérica} = (173.000 \mu\text{V/m} / (1 \mu\text{Vm}) = 173.000$$

ou

$$\text{Relação (em dB)} = 20 \times \log (\text{Relação Numérica}) = 104,6 \text{ dB}$$

Conseqüentemente, à distância de 1 km de um transmissor de 1 kW, a intensidade do sinal seria de 104,6 dB maior do que a unidade padrão de intensidade. Então, prosseguindo, a uma distância de 1.000 km, o sinal será 1 milhão de vezes menor (1.000.000) ou 0,173 $\mu\text{V/m}$. Portanto, usando a lei do inverso do quadrado e comparando as intensidades de sinal nessas duas distâncias, temos os seguintes resultados numéricos:

$$\text{Relação} = (1 \text{ kW} / (1 \text{ km})^2) / (1 \text{ kW} / (1.000 \text{ km})^2) = 1.000.000$$

ou, em termos logarítmicos:

$$\text{Relação (em dB)} = 10 * \log (\text{Relação Numérica}) = 10 * 6 = 60 \text{ dB}$$

Com esses resultados, os sinais a 1.000 km serão $104,6 + 60$ ou $164,6$ dB acima do sinal padrão, $1 \mu\text{V/m}$, ou 60 Db menores do que a 1 km.

Deverá ser comentado que toda a discussão não tem nada a ver com a banda de operação ou com o comprimento de onda do transmissor. Portanto, em termos de padrão de intensidade, a intensidade do sinal acima de $1 \mu\text{V/m}$ a uma distância R (grande, em comparação com 1 km) seria de:

$$\text{SIG (sinal em dB)} = 104,6 + 10 * \log (P) - 20 * \log (R)$$

onde P é a potência do transmissor em kW e R a distância em km. Para essa expressão, deverá ser feita uma correção para o fato de que o transmissor está realmente em um meio espaço, não no espaço livre; portanto, com um solo perfeito, que reflete todos os sinais para baixo, de volta para o hemisfério superior, dobrando a intensidade, deverão ser somados 3 dB.

Neste ponto, a questão fica dependente da frequência, com perdas ionosféricas e ganhos de antena entrando na discussão. As perdas ionosféricas são compensadas pelos aspectos dependentes da frequência das colisões entre elétrons ionosféricos com partículas neutras. No entanto, os ganhos de antena representam problemas mais difíceis, porque as antenas de bandas baixas frequentemente envolvem compromissos, devido à falta de espaço, e as distribuições de corrente não são bem conhecidas ou entendidas. Isso torna difícil a utilização de programas simuladores de antenas. As perdas do solo, resultantes das reflexões na superfície, também deverão ser somadas ao cálculo, entretanto elas são mais simples e mais afetadas pela polarização da onda e pelas propriedades da superfície do que diretamente pela frequência. Sendo esse o caso, vamos lidar com essa questão primeiro.

2 - Reflexões em superfícies

Nas bandas de HF, as perdas de solo não representam um grande problema – os comprimentos de onda são pequenos, as antenas relativamente altas, os ângulos de radiação resultantes são baixos e as reflexões na superfície são comparativamente eficientes.

No entanto, nas bandas baixas, a história é bem diferente – os comprimentos de onda muito maiores, as antenas muito baixas, produzindo ângulos de irradiação mais elevados e existe uma maior preocupação com as perdas de sinal resultantes de reflexões superficiais.

Essa preocupação é ainda maior do que as alturas das antenas, pois os sinais das bandas baixas penetram menos na Ionosfera do que os sinais de HF para um determinado ângulo de radiação. Isso significa saltos mais curtos para os sinais de bandas baixas, sendo necessários mais saltos para cobrir uma determinada distância e uma maior perda total resultante das reflexões no solo.

Para visualizar o que está envolvido, é feito uso das fórmulas (Terman, 1945) derivadas das ondas eletromagnéticas refletidas nas superfícies, tanto por elétrons fixados como livres. Essas propriedades são resultantes de constantes dielétricas e condutividades, e os valores representativos para as superfícies tipicamente encontradas na atividade de DX são fornecidos a seguir:

Superfície	Sigma	Epsilon
Capa de gelo	0,0001	2,0
Água do mar	5,0	80,0
Terra	0,001	4,0

Onde Sigma é a condutividade em mhos/metro e Epsilon é a constante dielétrica, uma quantidade sem unidades.

Como indicado acima, as considerações de antena ocupam uma importância muito maior nas bandas baixas, com uma grande fração de antenas verticais curtas em uso, mas também algumas antenas com estrutura em parte horizontal, como “Vs” invertidos, Marconis e “Ls” invertidos. Consequentemente, nas bandas baixas, é dedicada maior atenção às reflexões, tanto da polarização vertical como da horizontal, e menos às reflexões resultantes de sinais não-polarizados, como nas bandas de HF.

No entanto, as superfícies de terra encontradas em um caminho são importantes, ainda que a água do mar seja um bom refletor e cubra quase 80 % da Terra. Para vermos isso, considere um caminho daqui, Nordeste dos EUA, até o Egito, como mostrado a seguir na **Figura 5**:

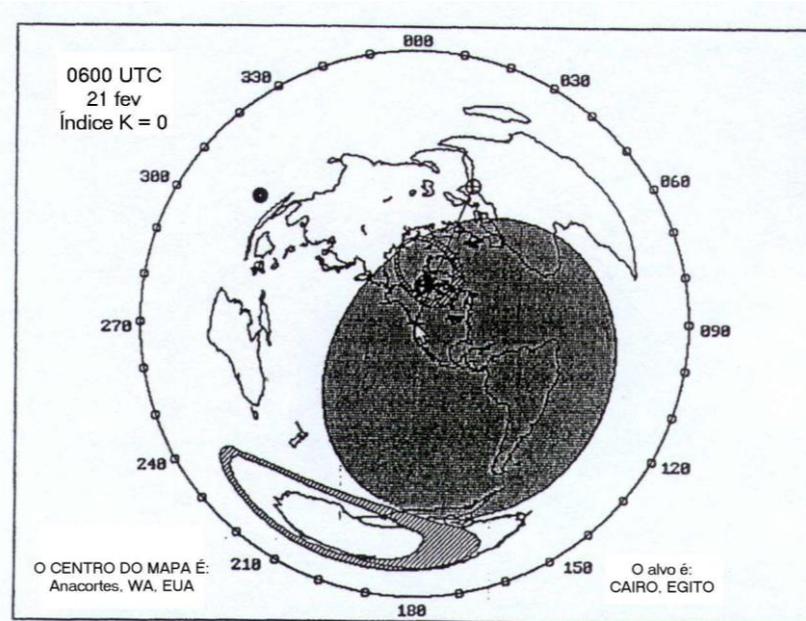
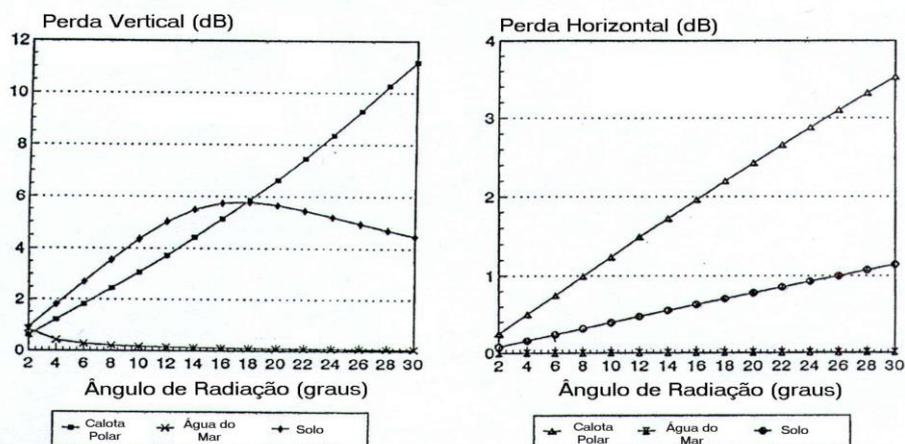


Figura 5 – Mapa azimutal equidistante do Nordeste dos EUA ao Cairo, Egito

Esse caminho segue sobre terra até chegar à calota polar, na parte norte do Canadá, em seguida cruza a calota polar até passar sobre o Mar do Norte, sobre a Noruega e por terra de novo até chegar no Egito. A água do mar constitui apenas uma parte pequena do caminho e superfícies menos eficientes como refletores, terra e gelo estão envolvidas em maior parte.

Observe as Figuras 6 e 7, que ilustram a perda de sinal devido a reflexões, nas polarizações horizontais e verticais na banda de 1,8 MHz (160 metros).



Figuras 6 e 7 – Perdas para sinais polarizados verticalmente e horizontalmente em 1,8 MHz.

Essas figuras exibem uma perda muito baixa na reflexão na água do mar, menos de 1 dB para cerca de 20 % do caminho. Entretanto, para a parte restante, terra e calota polar, a história é diferente entre 3 e 6 dB para ângulos típicos, entre 10 e 20 graus com polarização vertical e 1 a 2 dB para polarização horizontal.

Deverá ser observado que a perda vertical para as reflexões na calota polar varia de um máximo de 12,2 dB a 36 graus, quando comparado com um máximo de 5,8 dB para reflexões no solo a 18 graus. Para a polarização horizontal, as perdas somente aumentam com o ângulo.

Deve ser levado em conta que as superfícies são consideradas como sendo suaves e paralelas à superfície da terra. Na ausência de rugosidade e reflexões difusas, o ângulo de reflexão é o mesmo que o ângulo de incidência. Além disso, para uma dada superfície, a perda de reflexão para polarização horizontal aumenta continuamente, em contraste com a polarização vertical, que passa através de um máximo, conforme indicado acima.

As duas polarizações atingem uma perda comum com um ângulo de radiação de 90 graus (incidência normal), 6,8 dB para a capa de gelo e 2,3 dB para o solo.

Neste ponto, alguém poderá observar a propagação com algumas ferramentas em mãos, atenuação espacial e perdas por reflexão. A atenuação espacial é independente da frequência, portanto pode ser obtida imediatamente, usando distâncias típicas para DX, como exibidas na **Figura 8**:

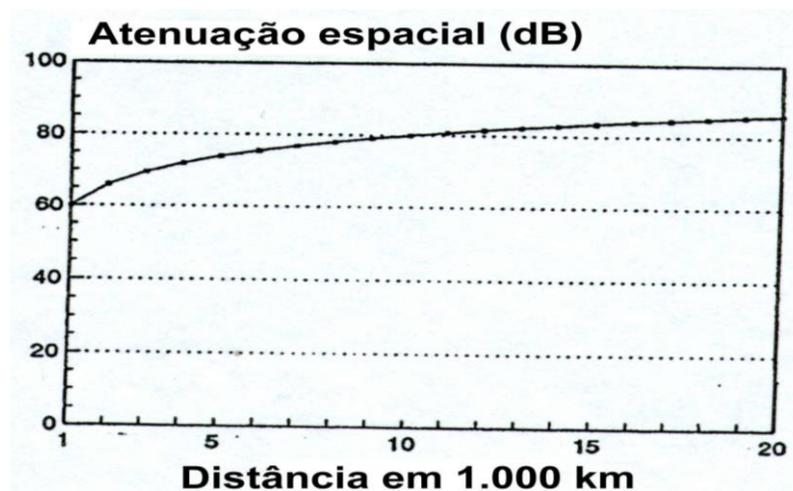


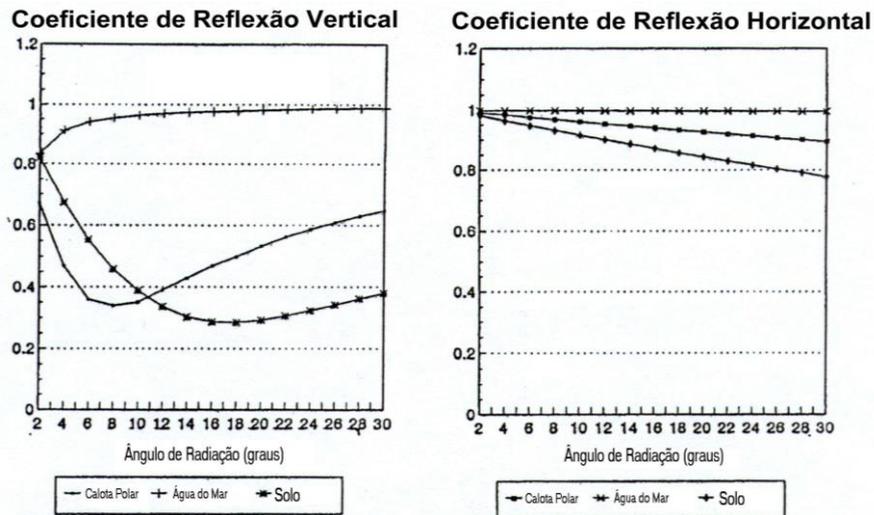
Figura 8 – Perda por atenuação espacial.

Com o comprimento de trajeto dado, o passo seguinte é separá-lo em tipos de superfície e estimar então a perda. Para ilustrar o método, considere um trajeto de 15.000 km em 1,8 MHz que seja composto por um terço (1/3) sobre terra, um terço (1/3) sobre capa de gelo e um terço (1/3) sobre água do mar.

Presumindo um salto de 1.250 km e um ângulo de irradiação de 15 graus para polarização vertical, ocorrerão 12 reflexões sobre terra, considerando perda de 5 dB por reflexão em 8 delas. As perdas para as reflexões sobre água do mar são irrelevantes, resultando em uma perda total em reflexões de cerca de 40 dB, somadas a 124 dB da atenuação de propagação no espaço livre. Não sobra muito sinal acima do ruído do lado do receptor e ainda nem foram consideradas as perdas ionosféricas.

Antes de deixar este aspecto das reflexões em superfícies, deverá ser observado que a perda da intensidade do sinal é um aspecto importante da propagação, mas não é o único efeito; a amplitude e a fase das ondas refletidas sofrem um desvio em relação à onda que chega, que varia conforme a superfície refletora, afetando a polarização da onda na reflexão.

As ondas provenientes de uma antena transmissora têm uma geometria em relação à Terra, que depende da construção da antena e da direção da propagação. Conseqüentemente, antenas verticais dão origem a ondas polarizadas verticalmente em todas as direções. Na reflexão superficial, a amplitude da onda variará conforme a superfície e o ângulo de radiação, conforme mostrado na **Figura 9**. E as antenas com partes horizontais darão origem a ondas polarizadas horizontalmente em algumas direções. Na reflexão em uma superfície, a amplitude da onda variará de forma diferente, como mostrado na **Figura 10**.

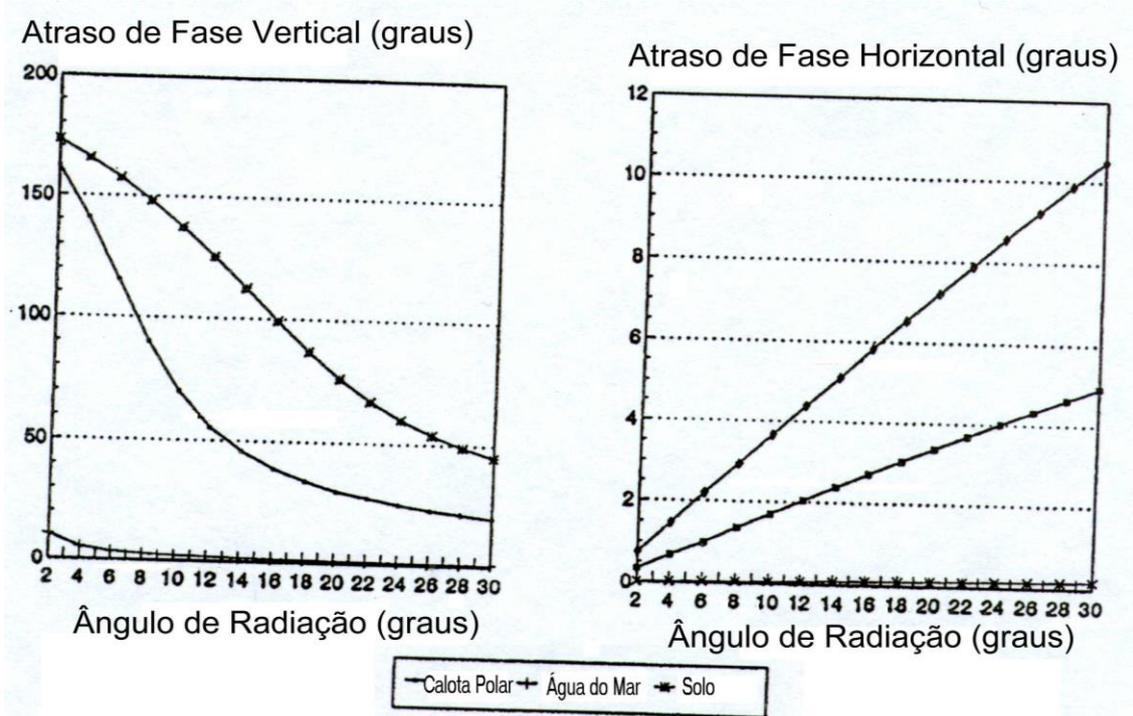


Figuras 9 e 10 – Coeficientes de reflexão para sinais polarizados verticalmente e horizontalmente em 1,8 MHz.

18

O mínimo de amplitude para reflexão de ondas verticalmente polarizadas a partir de superfícies de capa de gelo e terrestres encontra-se no que é denominado “ângulos pseudo-Brewster” das substâncias, e coincide com o pico na perda de reflexão nos mesmos ângulos de radiação. Essas características são bem conhecidas em Óptica e também na faixa de HF, sendo bem discutidas no *Handbook* de Antenas da ARRL.

De grande interesse para operação nas bandas baixas são os desvios de fase das ondas em uma reflexão. Elas não são grande preocupação nas antenas com polarização vertical pois a polarização das emissões é relativamente pura. Entretanto, as antenas com estruturas horizontais significativas produzirão ondas mistas que se distanciam de sua direção principal de radiação. Como consequência, as ondas tanto horizontais como verticais que saem das extremidades de um dipolo (Kraus, 1988) ou de um “V” invertido, poderão ser refletidas a partir de uma superfície, como ilustrado anteriormente nas Figuras 9 e 10. Além disso, as ondas refletidas também sofrerão desvios de fase, atrasando-se em relação às ondas polarizadas incidentes, como mostrado nas Figuras 11 e 12. A onda refletida também as modificará, de dois componentes linearmente polarizados em fase para um aspecto polarizado elipticamente devido à própria reflexão ionosférica, sem nenhuma interação com o campo magnético da Terra.



Figuras 11 e 12 – Atrasos de fase devido a reflexão para

sinais polarizados verticalmente e horizontalmente na banda de 1,8 MHz.

Voltando agora para outras perdas ionosféricas, deverá ser dedicada uma maior atenção aos mecanismos de colisões entre elétrons e partículas neutras, à distribuição de constituintes neutros e de que forma as perdas variam conforme a altitude, quando excitadas por ondas de RF.

3 - Perda por colisão

Conforme citado anteriormente, os elétrons excitados pela passagem das ondas de RF sofrem colisões não-elásticas com os constituintes que os circundam, desse modo transferindo energia dessas ondas para a atmosfera. Uma vez que as colisões entre elétrons ocorrem principalmente com os constituintes neutros, a taxa de perda por colisão dependerá da distribuição na altitude, tanto das partículas neutras como dos elétrons e de seus movimentos. Em geral, a maior perda por colisão ocorre ao redor da região D e, nessa região, onde a mistura é bem feita quando comparada com as maiores altitudes, as energias dos elétrons estão em equilíbrio com aquelas das partículas neutras, mudando ligeiramente com a atividade solar, conforme mostrado anteriormente na **Figura 2**, ou nas transições dia/noite.

A taxa de colisão a uma altitude de 100 km é quase 0,1 MHz, variando cerca de 25 % entre o dia e a noite, e pequenos percentuais entre o mínimo e o máximo solar (Rosenberg, 2000). A variação de altitude diminui com a distribuição de partículas neutras, conforme mostrado na **Figura 13**, para o mínimo solar, atingindo cerca de 100 MHz para a frequência de colisão a 50 km.

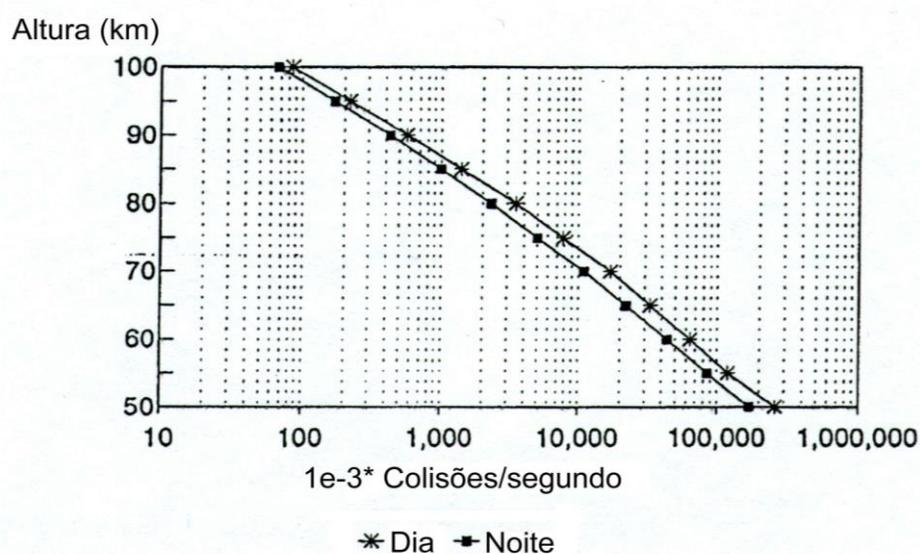


Figura 13 – Perfil de frequências das colisões entre elétron e partícula neutra para o mínimo solar.

A transferência de energia da onda para a atmosfera ocorre em duas etapas: quando o elétron ganha energia da onda e quando sofre uma colisão com uma partícula neutra. Bem no interior da ionosfera, quando a frequência das colisões entre elétron e partícula neutra é alta, as ondas de RF têm pouca oportunidade de transmitir energia para os elétrons quando ocorre uma colisão. Portanto, a absorção da energia da onda é muito pequena nas baixas altitudes. Por outro lado, em maiores altitudes, um elétron ionosférico sofre muitas oscilações de RF entre as colisões e, como consequência, rerradia a energia proveniente da onda incidente antes de finalmente causar uma colisão, transferindo energia para a atmosfera.

Entre esses dois extremos, a absorção de energia da onda que está passando atinge um máximo, quando a frequência das colisões com elétrons e a frequência da onda são comparáveis. Para esclarecer os detalhes, é necessário um modelo mecânico para movimentos de partícula, excitados por ondas de RF, mas são retardadas pelas colisões com partículas neutras. O modelo mais simples, que deixa de lado as forças aplicadas nos elétrons devido à presença do campo geomagnético, mostra que a perda por absorção varia conforme o inverso do quadrado da frequência de operação, na parte alta da faixa de HF.

Esse resultado, quando aplicado às bandas de amador harmonicamente relacionadas, mostra que a frequência relativa de absorção baseada em elétrons varia com a banda e a altitude, conforme ilustrado na **Figura 14**. Para usos práticos, a distribuição de altitude dos elétrons que seria necessária e a taxa de absorção em dB/km somadas ao longo do trajeto. No entanto o fato permanece, a absorção em 1,8 MHz seria muito alta e a única forma de contornar o problema é operando à noite, quando a densidade dos elétrons é menor.

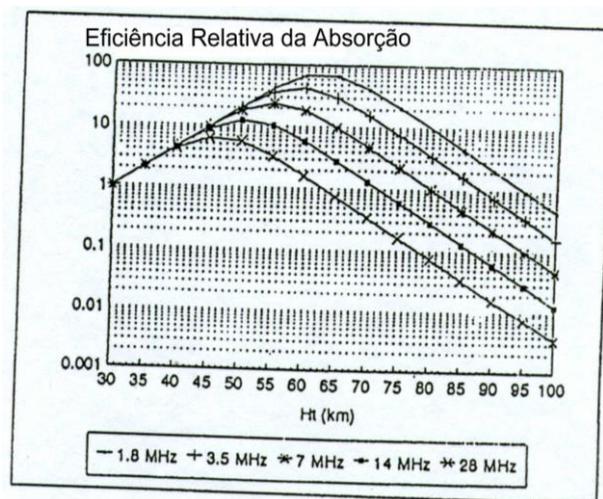


Figura 14 – Eficiência relativa de absorção por elétron.

Em vista do acima exposto, a absorção ionosférica seria relativamente alta em 1,8 MHz com apenas alguns elétrons por centímetro cúbico ao redor dos 65 km na parte baixa da região D, mas requererá uma densidade de elétrons mais alta, em cerca de duas vezes, para um efeito comparável ao redor dos 100 km na região E. Em termos geofísicos, ambos os extremos são possíveis, o primeiro durante o bombardeio da ionosfera pelos prótons solares após uma erupção solar, e o segundo durante atividades da Aurora. Analiticamente, quando os detalhes são equacionados para o caso de HF, ignorando os efeitos derivados do campo geomagnético, a perda por absorção (db/km) em um trajeto de onda é dado pela fórmula:

$$k = 4,6 \text{ E-}02 * N8F_{\text{coll}} / ((2*\text{PI}*f_{\text{RF}})^2 + F_{\text{coll}}^2)$$

(Davies, 1989) e a absorção atmosférica total em um trajeto é obtida somando-se os efeitos ao longo de toda a sua integralidade. O modelo para a frequência de colisão na **Figura 14** seria utilizada ao longo de um perfil de densidade de elétrons para a distribuição ao longo do trajeto.

Claramente, a absorção depende de ser encontrado um determinado número de elétrons ao longo de um trajeto. Isso é perfeitamente ilustrado pelas observações da absorção feitas durante eventos de prótons solares. Consequentemente, receptores de 30 MHz são usados para monitorar o ruído rádio galáctico que penetra na ionosfera de grande altitude, como mostrado na **Figura 4**. Esse ruído é absorvido quando os prótons solares criam ionização na calota polar, e a absorção em dB é calculada comparando-se o registro entre um dia com perturbação com o de um dia sem perturbação.

O efeito de um evento de prótons solares nos sinais direcionados para a calota polar pode ser determinado aumentando a absorção observada em um trajeto vertical por um fator de 3 a 4 vezes para propagação oblíqua em um trajeto inclinado, como ilustrado na **Figura 4**, e por um fator de 2 para sinais que subam ou desçam através da ionização. Finalmente, a absorção 20 poderá ser ajustada para a banda em uso utilizando a aproximação inversa da frequência acima fornecida. Um evento de prótons solares típico 1 dB resulta em uma absorção de 12 dB ou 2 unidades S por salto na calota solar em 14 MHz. Em 1,8 MHz esse efeito seria absolutamente devastador!

4 - Ionização

Neste ponto devemos abordar algo a respeito dos processos de ionização na Ionosfera. A natureza e a composição da atmosfera alvo já foi mencionada, no entanto são necessários mais detalhes como a energia disponível nas partes do espectro solar e a energia requerida para ionizar as partículas neutras existentes na atmosfera.

No espectro solar, a parte energética se concentra nos comprimentos de onda abaixo da faixa violeta do espectro visível, em 3.000 Angstroms. Somente uma fração de um por cento (1%) da energia da radiação solar chega até lá, no entanto é onde a ionização pela parcela EUV começa e continua com comprimentos de onda mais curtos, na região dos raios X. A parcela EUV do espectro solar ioniza as partículas neutras existentes na região F, os raios X “moles” abaixo de 1.000 Angstroms são capazes de penetrar e ionizar na região E, enquanto que os raios X “duros”, abaixo de 10 Angstroms, são capazes de ionizar até mais abaixo na camada D. Qualquer ionização abaixo dos 60 km é devida a partículas energéticas e raios cósmicos, provenientes tanto do Sol como da galáxia.

O espectro solar total incide no topo da atmosfera e a ionização de seus constituintes depende da penetração através das camadas de absorção acima e da energia requerida. Nesse aspecto, os limiares de energia e os comprimentos de onda necessários para ionizar os constituintes mais importantes da atmosfera são relacionados a seguir:

Constituinte	Energia (eV)	Comprimento de onda (Å)
N ₂	15,58	796
O ₂	12,08	1026
NO	9,25	1340
O	13,61	911

Usando o conceito dos fótons, fica fácil mostrar que é válida uma analogia facilmente lembrável para o comprimento de onda ionizante:

$$\text{Comprimento de onda (em Angstroms)} = 12340 / \text{Energia (eV)}$$

Os principais íons positivos abaixo de 100 km se originam nos íons dos constituintes permanentes, do nitrogênio diatômico e dos íons moleculares do oxigênio. Os elétrons liberados pela fotoionização poderão ter pouca energia ou poderá existir alguma energia excessiva e ionizações adicionais poderão ser produzidas pelas colisões entre elétrons. De qualquer forma, qualquer movimento de elétron resultará em uma força devido à presença do campo magnético da Terra e, ao invés de se mover segundo uma trajetória balística, o elétron ficar “localmente” contido. Desse modo, o campo geomagnético organiza a distribuição de elétrons, conforme ilustrada nos mapas ionosféricos globais.

Como um exemplo, a **Figura 15** mostra um mapa de frequência crítica foF2, que é um mapa global das frequências mais altas devolvidas pela ionosfera durante experimentos de sondagem. O mapa é para as 0600 UTC do mês de março de 1979, quando o Sol está sobre o Equador com uma longitude de 90 graus Leste (90E), e uma contagem média de 137 manchas solares, próxima do pico máximo do Ciclo Solar 21.

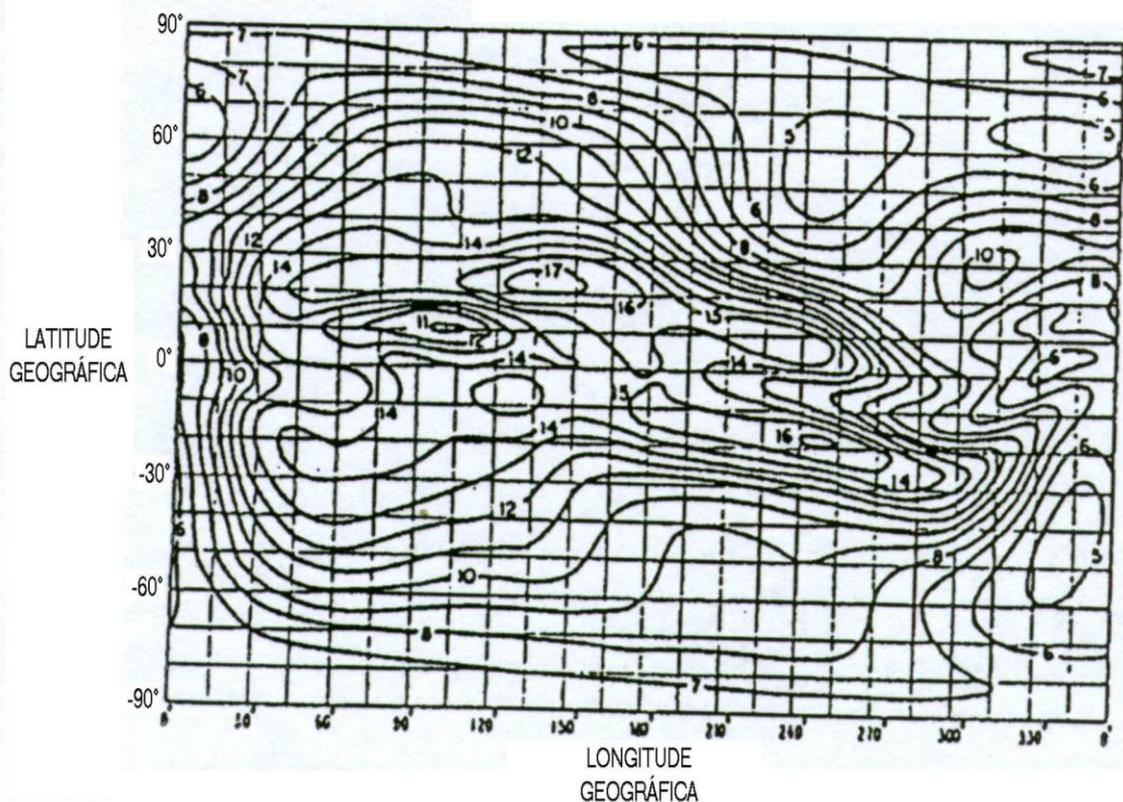


Figura 15 – Mapa global para foF2 às 0600 UTC em Março de 1979.

O exame do mapa mostra que ele não é simétrico em relação ao Equador, como seria no Equinócio caso a ionização da capa F fosse controlada pela radiação solar. Ao invés disso, a ionização é vista como sendo mais simétrica, com o desvio do equador do campo magnético que cruza o Equador inclinando-se para o Hemisfério Sul.

Considere agora a foF2 global para as 0600 UTC do mês de março de 1976, mostrado na **Figura 16**:

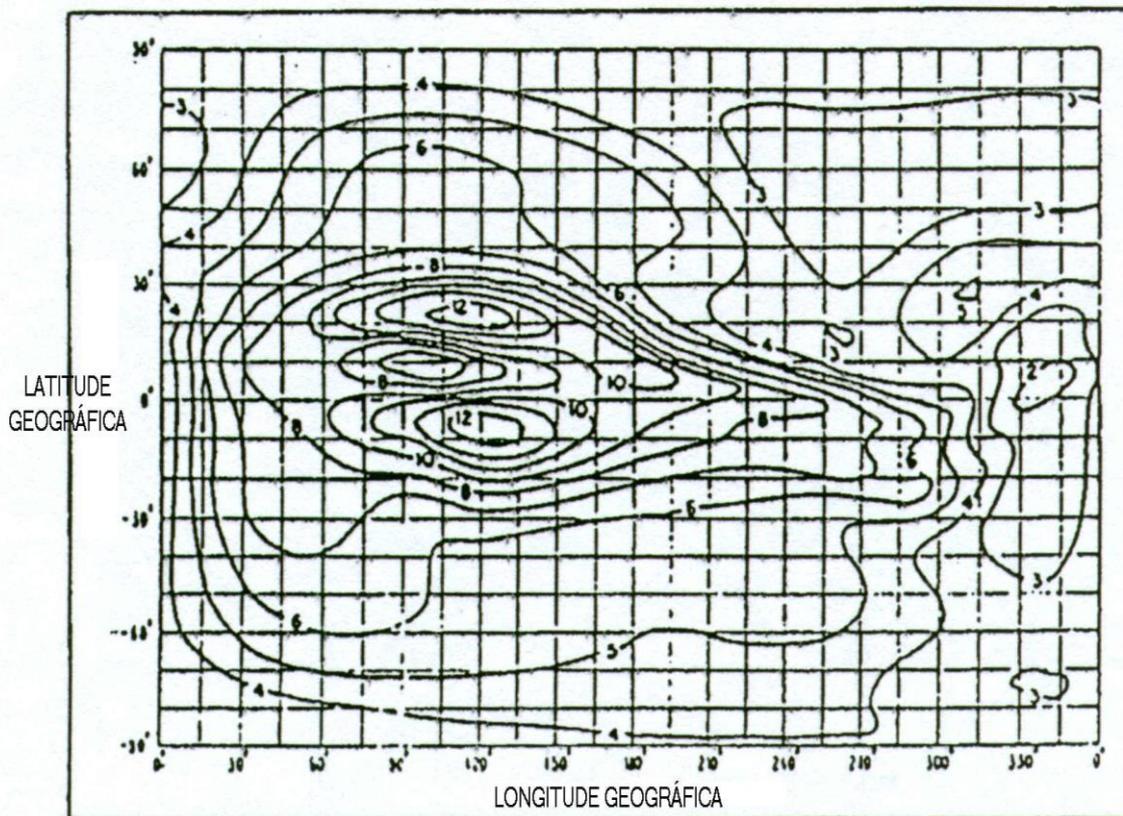
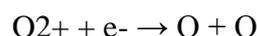
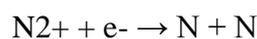


Figura 16 – Mapa global para foF2 às 0600 UTC em março de 1976.

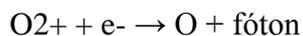
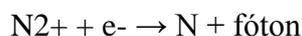
As mesmas características estão presentes nele, mostrando o controle geomagnético da ionosfera. Entretanto, existe uma característica de particular interesse para os operadores das bandas baixas – nenhum dos valores foF2, em nenhum lugar no mundo, durante o mínimo solar, era menos que 2 MHz. Isso significa diversas coisas, dependendo da forma que você o encara: os sinais de 160 metros eram confinados dentro da ionosfera, incapazes de escapar em direção à região F e para o espaço, nem o ruído rádio cósmico alcançaria os 1,8 MHz para ser escutado aqui na Terra.

Colocado de outra forma, isso significa que as MUFs não são de interesse em 1,8 MHz pois ionização mais do que suficiente está presente acima para suportar a propagação oblíqua em ângulos típicos, digamos até 30 graus acima do horizonte. Sendo esse o caso, **os processos ionosféricos que realmente controlam a propagação nos 1,8 MHz são absorção e ruído.**

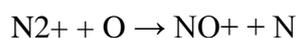
Antes de prosseguir para esses novos tópicos, vamos encerrar o assunto que começamos, a ionização. Primeiro, vamos levar em consideração o que acontece aos íons e elétrons positivos após ter ocorrido o processo de ionização. Como um primeiro palpite, alguém poderia pensar que as partículas carregadas iriam colidir com suas vizinhas, os íons positivos talvez então se recombinem com os elétrons para formar novamente estruturas neutras. Isso acontece, no entanto ao invés de moléculas, os íons se dissociam para átomos:



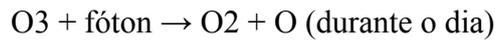
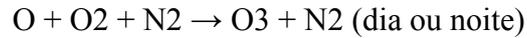
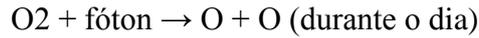
ao invés de reformarem através de processos radioativos:



e as moléculas, N₂ e O₂, são reformados mais tarde, a partir dos átomos, ao passarem através de um ciclo químico diferente. Na realidade, N₂⁺ não é um íon principal na região D abaixo dos 100 km, apesar de ser um constituinte neutro importante. O íon N₂⁺ é formado pela radiação solar, no entanto por um processo mais rápido que ocorre, um intercâmbio de íons-átomos:



com um átomo de oxigênio que estava disponível proveniente da dissociação do O₂⁺. O íon NO⁺ junta-se ao íon O₂⁺ como uma das principais fontes de recombinação de elétrons ou perda na ionosfera mais baixa. Existem muitos processos de química neutra e de química do íon ao longo da ionosfera. Por exemplo, não foi feita ainda nenhuma menção do ciclo de oxigênio que resulta em ozônio sendo formado quando as moléculas do oxigênio são dissociadas pelos fótons solares:



Na ausência de luz do Sol para dissociar o ozônio e terminar a criação do oxigênio atômico à noite, o ozônio na atmosfera dissipa-se até o amanhecer, quando o ciclo recomeça. No entanto, o ozônio que permanece no amanhecer é importante para os operadores das bandas baixas, como pode ser visto em outro processo na ionosfera, a formação de íons negativos à noite.

Ocorre que os elétrons na ionosfera não se recombinam apenas com o número relativamente pequeno de íons positivos disponíveis, mas também podem ser agregados às moléculas neutras muito mais numerosas, formando íons negativos. Isso é de interesse para a propagação nas bandas baixas, na medida em que os íons negativos são mais massivos do que os elétrons e não fazem parte do processo de absorção do sinal, na transferência de energia das ondas de RF para a atmosfera.

Os elétrons agregados em íons negativos são destacados pelos fótons (fotoionização) ao amanhecer, no entanto a energia requerida para o processo é maior do que aquela encontrada nos fótons da parte visível do espectro solar. A energia requerida não é superior ao redor dos 10eV necessários para os processos de fotoionização para N₂ e O₂, mas daquela parte do espectro abaixo de 3.000 Å é bloqueada pela camada de ozônio presente antes do amanhecer. Consequentemente, o destaque dos elétrons provenientes dos íons negativos não começa com a subida do Sol, porém mais tarde, quando o Sol tiver subido acima da camada de ozônio. Isso proporciona aos *Dx-men* das bandas baixas um intervalo, enquanto durar, retardando o aparecimento de uma grande absorção (Brown, 1999), que estende a “janela de DX” pela manhã. A criação de íons negativos não é um benefício global para os *Dx-men* das bandas baixas pois ela varia, de acordo com a presença de constituintes secundários na atmosfera (Brown, 1999), tais como dióxido de carbono, óxido nítrico e vapor d' água.

Os íons negativos sofrem uma complicada reação química na parte mais baixa da ionosfera, no entanto eles são de pouca importância quando se trata de propagação nas bandas baixas e não serão mais levados em consideração.

A discussão sobre ionização até este ponto lidam com a ionosfera mais baixa, abaixo dos 100 km. Quando o traçado dos raios dos sinais nas bandas baixas é levado em consideração, fica evidente que, enquanto a absorção é determinada nas altitudes mais baixas, a propagação para maiores distâncias é controlada pela distribuição da ionização em altitudes maiores, acima dos 100 km.

Ao redor dessa altitude, ocorre uma mudança dramática na composição e nos processos na atmosfera e na ionosfera, uma transição, de uma atmosfera bem misturada para um em que os átomos e moléculas são distribuídos verticalmente pela gravidade de acordo com seus pesos atômicos, e onde a ionização é mais afetada pelo campo geomagnético do que pelas movimentações atmosféricas.

Conseqüentemente, temos de observar o mundo acima da região D, para dentro da região E e na parte inferior da região F. A parte superior da região F é deixada para nossos amigos que ainda operam nas bandas de HF.

Capítulo IV - Mais sobre propagação

1 - Trajeto dos raios

Tendo abordado levemente os fundamentos, agora é o momento e o lugar de se começar a tratar dos detalhes da propagação nas bandas baixas. Para conseguir isso, começaremos utilizando primeiro as ideias sobre refração na ionosfera. Entretanto, ao invés de usar frentes de onda, serão usados os trajetos dos raios e a ideia de que eles são curvados ou refratados para baixo quando a densidade dos elétrons aumenta conforme a altitude, como ilustrado na **Figura 1**.

Na aproximação do tipo “terra plana”, os trajetos dos raios podem ser mostrados como na **Figura 17**, com o lado esquerdo da figura representando um exemplo de sondagem vertical da ionosfera, e o lado à direita mostrando uma propagação oblíqua sob as mesmas condições ionosféricas. O lado direito representa uma altura de reflexão virtual A enquanto que a altura máxima real da penetração da onda é mostrada em B, nessa mesma figura.

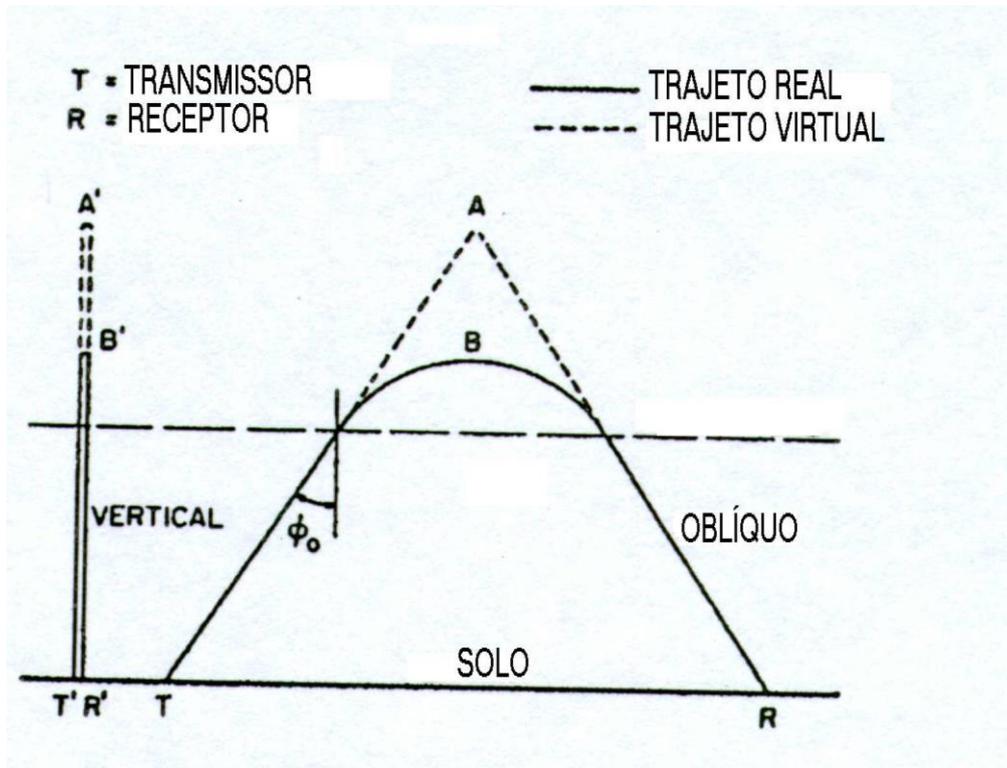


Figura 17 – Reflexões do sinal para trajetos de propagação vertical (esquerda) e oblíqua (direita).

Comparando a **Figura 17** com a **Figura 1** e usando o caso simples das condições durante o dia no pico solar máximo, o trajeto do raio indica pouca refração até atingir a região E a 110 km, onde a densidade dos elétrons é de $2E+05/cm^3$; o sinal atinge uma altitude máxima na região F a cerca de 350 km, onde a densidade dos elétrons é de $5E+06/cm^3$. Depois disso, o caminho do raio é refratado para baixo e atinge a parte inferior da ionosfera (e o solo) com os mesmos ângulos que os trechos ascendentes do trajeto.

Se alguém examinar os registros das sondas ionosféricas que testaram a ionosfera naquela ocasião, constatará que a frequência crítica foE para reflexão de ondas com incidência vertical era de 4.0 MHz naquele nível de 100 km, e que a 350 km ela era de 20,1 MHz. Entretanto, as condições noturnas no pico solar mínimo seriam diferentes, com frequências críticas inferiores, de 0,7 MHz na região E, e de 6,9 MHz no pico da região F.

Entretanto, para os *Dx-men* das bandas baixas, a época preferida é o pico solar mínimo, com frequências críticas noturnas ainda menores, de 0,4 MHz para foE e de 2,8 MHz para foF2 usando as curvas para a cidade de Boulder, CO, na **Figura 1**, e com menos absorção ionosférica.

No entanto, a incidência oblíqua na parte inferior da ionosfera, conforme mostrada na **Figura 17**, as ondas na frequência F adentram a ionosfera e são refratadas na medida em que elas efetivamente têm uma menor frequência, denominada frequência vertical efetiva (EVF) (Davies, 1989), dada pela fórmula:

$$EVF = F * \cos(\Phi) \quad (\text{Equação 3})$$

onde Φ é o ângulo de incidência com a normal para a parte inferior da ionosfera.

No modelo de “terra plana”, o ângulo de incidência na parte inferior da ionosfera, é o mesmo que o ângulo de zênite do raio no momento de seu lançamento. Se, ao invés disso, passarmos a usar um modelo de terra curva e substituirmos o ângulo de zênite pelo ângulo de radiação relativo ao horizonte, poderemos calcular o EVF em função do ângulo de lançamento, como mostrado na **Figura 18**:

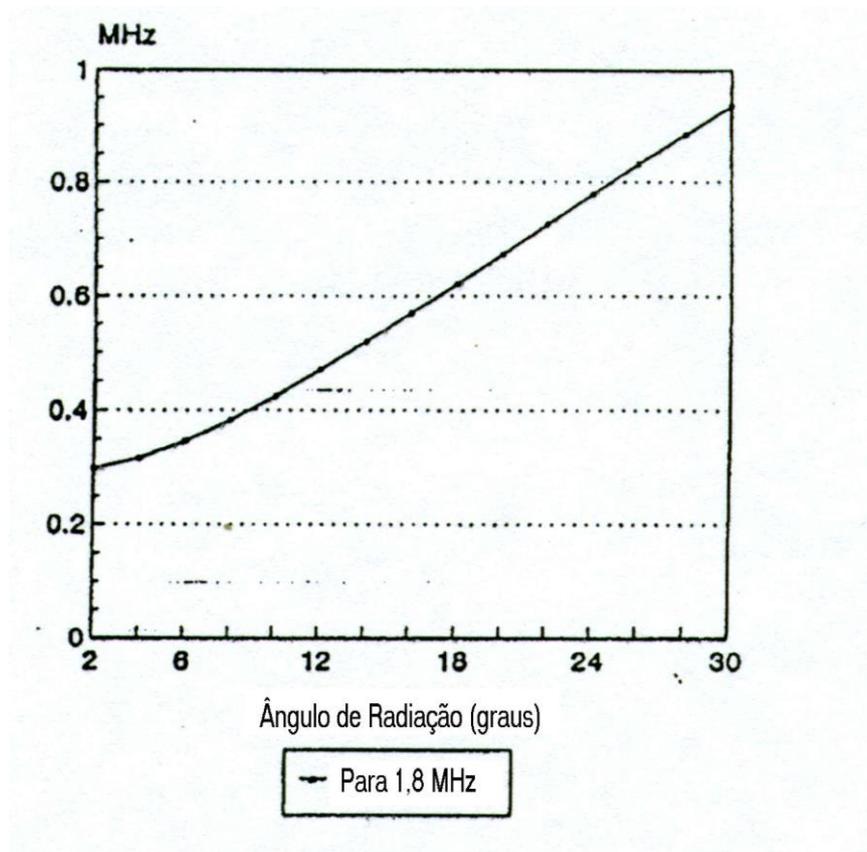


Figura 18 – Frequência vertical efetiva (EVF) para sinais de 1,8 MHz em função do ângulo de radiação vertical.

Esta figura é para os sinais de 1,8 MHz e mostra que a EVF é de 0,4 MHz ou maior, para ângulos de radiação de 10 graus ou mais. Usando isso para trajetos durante a noite, digamos, entre as cidades de Boulder e Londres em 1,8 MHz, poderemos utilizar os programas de propagação como o IONCAP, para observar as diferenças na estrutura do trajeto em ângulos acima e abaixo de 10 graus. Obviamente, os ângulos abaixo de 10 graus resultam em saltos na cama da E, cinco deles abaixo de 100 km e com reflexões de terra com perdas, na direção até Londres, enquanto que os ângulos logo acima de 10 graus resultam em três saltos na camada F, acima de 100 km, com perdas menores devido ao menor número de reflexões em terra.

Os programas como o IONCAP utilizam trajetos do grande círculo para conectar a localização de um transmissor para um receptor. Os trajetos são divididos em saltos nas camadas E e F utilizando as alturas de camadas derivadas de estudos por sondas ionosféricas. Usando um modelo de terra esférica e tratando as reflexões no solo de forma análoga a espelhos, os ângulos de incidência e de reflexão são considerados como sendo iguais, relativos à perpendicular com a superfície do solo, em conformidade com as Leis de Fresnel na Ótica. Com a disponibilidade de uma gama de ângulos, a geometria do trajeto é calculada pelo programa, o ângulo de radiação escolhido para o número de saltos nas camadas E e F.

Agora as camadas ionosféricas são consideradas como sendo esfericamente simétricas, apesar de que suas alturas acima da terra poderá variar ao longo de um trajeto, de acordo com os resultados da sondagem ionosférica. Como resultado, os comprimentos do salto também irão variar ao longo do trajeto. Em qualquer caso, para os DX nas bandas baixas, é desejável que a radiação penetre a região E e atinja a região F antes de ser refratada de volta para o solo.

Cerca de um terço (1/3) do caminho é sobre terra, um terço (1/3) sobre neve e gelo, e um último terço (1/3) é sobre o Mar do Norte. Para os ângulos de radiação entre 25 e 30 graus, o trajeto envolve entre 8 e 10 saltos na camada F, ao invés dos apenas 3 saltos logo acima dos 10 graus. Para água do mar, as perdas por reflexão são irrelevantes, no entanto entre 5 e 10 dB sobre terra e gelo para polarização vertical, a polarização escolhida pelos *Dx-men* das bandas baixas. Isso deverá ser comparado com os 4 dB por salto para os três saltos usando um ângulo de radiação menor.

Foi apontado que, no mínimo do pico solar, a frequência crítica foE durante a noite em Boulder foi 0,7 MHz; usando a curva mostrada na **Figura 18** para o EVF, isso aumenta a faixa angular de tal modo que os saltos de grande perda na camada E continuam até sejam alcançados os ângulos de radiação ao redor de 20 graus. Com antenas verticais, isso aumenta a perda por reflexão em cerca de 5 dB por salto entre 8 e 10 saltos ao invés dos 4 dB por salto para os três saltos no nível inferior da atividade solar.

A discussão acima foi para reflexões em superfície; ainda a ser considerada é a perda ionosférica para as transversais da ionização na região D, como indicado na **Figura 14**. Isso é tratado de formas diferentes, dependendo do programa de propagação. Programas como, por exemplo, o IONOCAP, fazem uso de dados limitados, e as frequências críticas e as alturas as camadas são obtidas através de sondagem ionosférica. As frequências são obtidas através de sondagens ionosféricas, frequência versus tempo, e as alturas de características do tipo “tempo de voo” obtidas dos registros.

Os registros de sondagem fornecidos junto com a **Figura 1** demonstrariam que as reflexões nas regiões E e F ocorreram respectivamente a 100 km e a 300 km, nas frequências de sonda ionosférica de 0,7 MHz e 6,9 MHz durante a noite no pico solar máximo, como foi discutido acima. Com ângulos de radiação acima dos 20 graus, os sinais de 1,8 MHz penetrariam a região E, no entanto certamente não alcançariam ponto tão alto como o pico da região F a 300 km. A questão então fica sendo “onde é o pico?”, informação que não é fornecida pelos registros da sonda ionosférica.

Neste ponto, teremos de apelar para a teoria da propagação ionosférica. Isso diz respeito não apenas de que forma as ondas são devolvidas das camadas críticas, os platôs ou picos da densidade de elétrons mostrados na **Figura 1**, mas com a propagação através de toda a distribuição de ionização acima. Entretanto, para ver os detalhes, deverá ser feito um experimento.

Imagine então que estamos subindo para dentro da ionosfera e coletando certa quantidade de plasma, com íons positivos em uma mão e elétrons com a outra mão. Se eles fossem mantidos à parte e liberados, iriam oscilar para lá e para cá devido à força elétrica de atração existente entre eles. Essa frequência é chamada “frequência do plasma” (Fp) e depende da densidade dos elétrons:

$$F_p \text{ (MHz)} = 9 \text{ E }^{-6} * (N^{0,5}) \text{ (Equação 4)}$$

onde N é a densidade dos elétrons (número por metro cúbico).

Consideremos agora sinais em 1,8 MHz emitidos por uma antena com um ângulo de radiação de 24 graus; a EVF obtida na **Figura 18** seria de 0,8 MHz. Agora, a teoria da propagação indica que os sinais de 1,8 MHz sobem obliquamente até atingirem uma altitude de pico onde a frequência do plasma local (F_p) é a mesma que a EVF. Agora, conforme a **Equação 4**, a frequência do plasma de 0,8 MHz corresponde a uma densidade de elétrons de $7,9E+09$ por metro cúbico ou uma altitude logo abaixo dos 200 km, conforme **Figura 1**.

Portanto, os aspectos simples do problema, a partir dos resultados da sondagem ionosférica, não são suficientes para fornecer informações que proporcionaria um diagrama de raios, como mostrado na **Figura 20**:

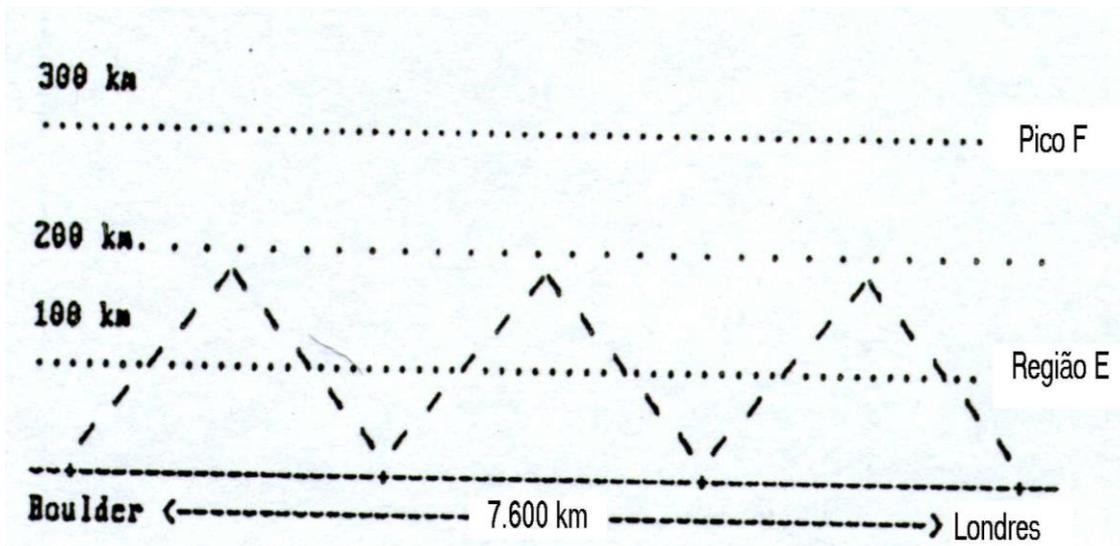


Figura 20 – Trajeto de reflexão entre Boulder e Londres.

Esta figura ilustra um diagrama de reflexão para o trajeto do raio, entretanto as frequências críticas e as alturas de reflexão deverão ser suplementadas por informações sobre o perfil da densidade de elétrons. Ao mesmo tempo em que o diagrama de raios mostrando as reflexões é simples e informativo, ele não é tão detalhado nem definitivo como o caminho de raio baseado na reflexão na ionosfera como um todo. Isso nos leva aos mapas de densidade e perfis dos elétrons, produto do trabalho de radares de espalhamento não-coerentes, sensíveis aos baixos níveis de ionização e teoria eletromagnética, baseada nas Equações de Maxwell.

2 - Modelos Ionosféricos

Um bom resumo dos primeiros modelos atmosféricos e ionosféricos podem ser encontrados no “Manual de Geofísica e Ambiente Espacial” publicado pela Força Aérea dos EUA em 1985. Desde aquela época, tornaram-se disponíveis novos modelos, o modelo MSIS da atmosfera em 1986 e o Ionosferas de Referência Internacional (URSI e CCIR) em 1990. Os modelos ionosféricos URSI e CCIR podem ser examinados na ferramenta de propagação PopLab Pro (1996). Conseqüentemente, os mapas globais foF2 baseados nesses modelos poderão ser explorados, como mostrado na **Figura 21**:



Figura 21 – Mapa foF2 global para o Solstício de Inverno às 1800 UTC.

Esse mapa é para as 1800 UTC do Solstício de Inverno, com os contornos de Isofrequência espaçados em 1 MHz; o contorno mais alto, 11 MHz, está ao Oeste do Peru, e o mais baixo, 4 MHz, ao lado da Austrália.

O programa PropLab também fornece mapas para a altura do pico da região F, hmF2, como mostrado na **Figura 22**:



Figura 22 – Mapa hmF2 global para o Solstício de Inverno às 1800 UTC.

Essa figura ilustra o pico foF2 mais alto a 400 km no ponto subsolar ao longo da costa da América Latina, próximo ao Equador, a altura do pico sobre a América do Norte não ultrapassa os 250 km.

Esse tipo de informação, juntamente com os valores foF2, seria de valor ao trabalhar com os detalhes das MUFs em um trajeto de HF. Entretanto, para operações nas bandas baixas, considerações como MUF ou camada F não têm interesse; os sinais nunca chegam àquela altura na ionosfera. Entretanto, fazer com que eles penetrassem na região E, numa altitude ao redor de 105 km é uma outra história. Portanto, os contornos de Isofrequência nos meses de Inverno são de grande interesse, especialmente seus valores na parte escura da ionosfera.

A escuridão do Inverno começa com o equinócio de Outono e atinge sua extensão máxima no Hemisfério Norte no solstício de Inverno, ao redor do dia 21 de dezembro. Isso está ilustrado na **Figura 19**, quando o caminho para a Inglaterra foi considerado logo após o nascer do Sol em Boulder, CO. Outro momento de interesse é imediatamente após a subida do Sol, como mostrado na **Figura 23**. Novamente, a figura se refere ao solstício de Inverno porém, ao invés de se referir ao nascer do Sol, quando a escuridão se estende para o DX no Leste, o amanhecer abre o DX para o Oeste, no Oriente. Nessa figura, o caminho entre Boulder e Tóquio, cerca de 1.900 km mais longo do que o caminho até Londres na **Figura 19**.

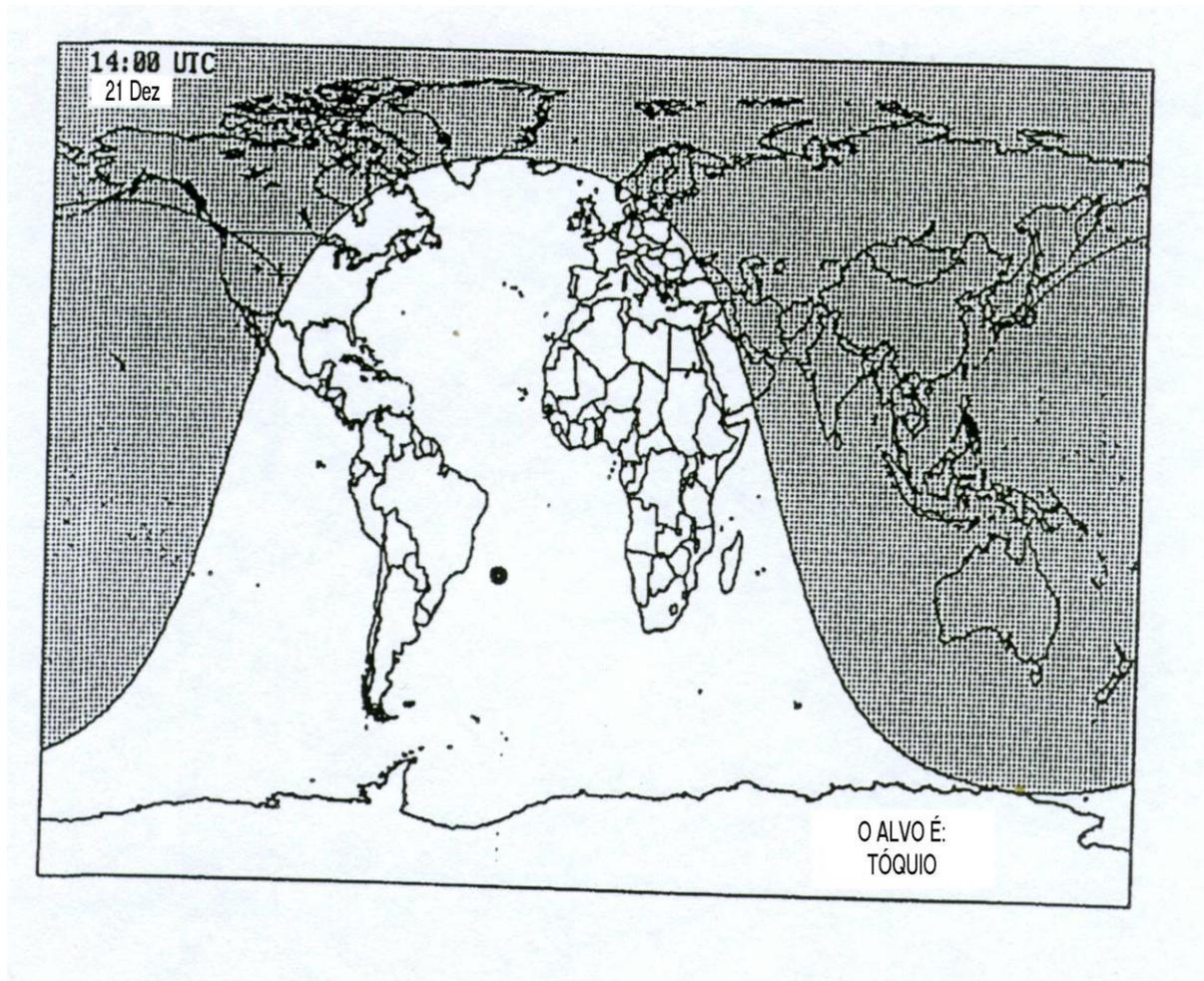


Figura 23 – Trajeto Mercator pré-amanhecer entre Boulder e Tóquio.

Devido à elevada taxa de absorção ionosférica dos sinais de bandas baixas, particularmente em 1,8 MHz, os caminhos possíveis para o Leste ou para o Oeste estão limitados a localidades dentro do hemisfério “no escuro”, e as operações têm de ocorrer segundo essa limitação, de equinócio a equinócio.

Sem dúvida existem exceções, como veremos, e elas costumam ser muito interessantes para os *Dx-men* das bandas baixas. Falaremos mais tarde sobre isso.

Retornando ao mapas ionosféricos, a **Figura 24** mostra os contornos Isofrequência para a região E:

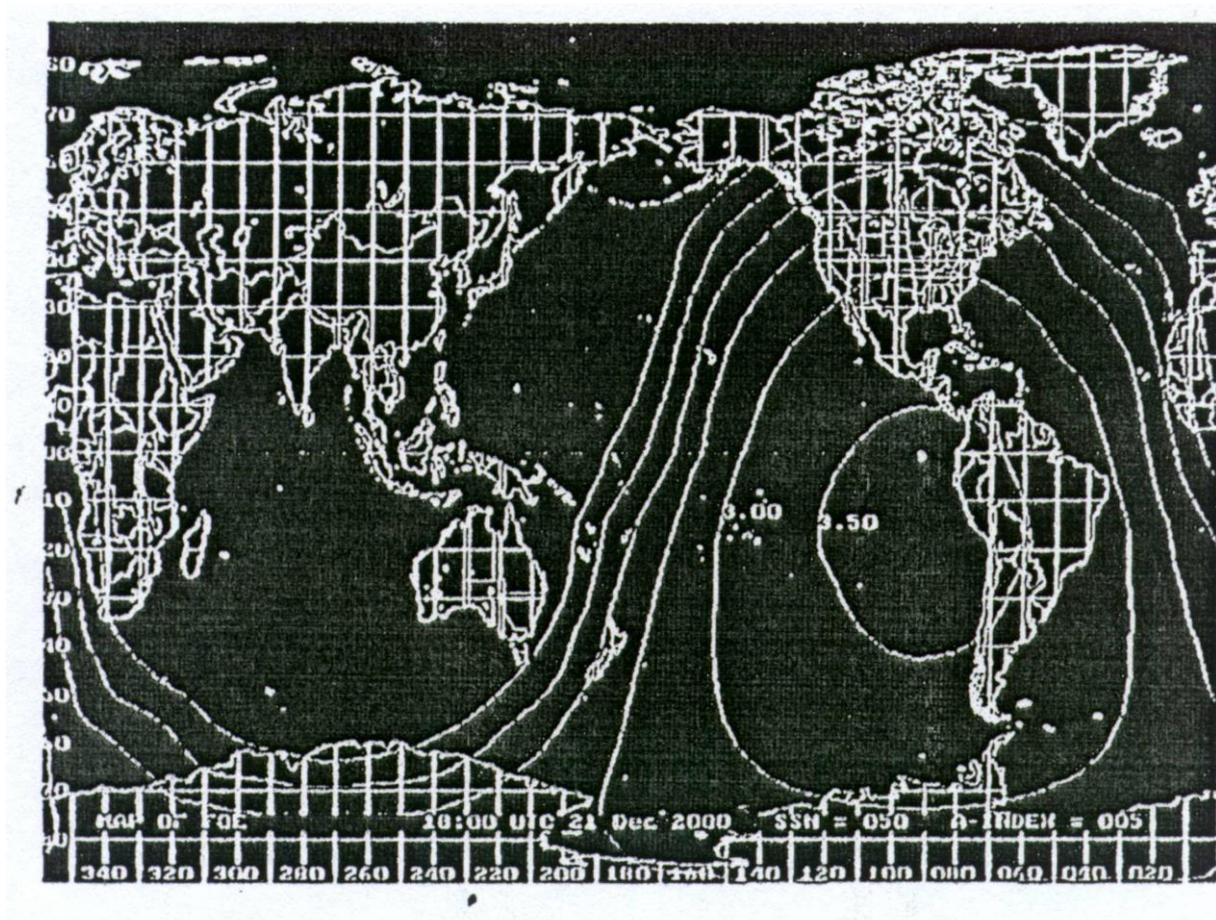


Figura 24 – Mapa foE global para o Solstício de Inverno às 1800 UTC.

Novamente, esta figura aborda o Solstício de Inverno às 1800 UTC. O contorno de Isofrequência foE mais alto é em 3,5 MHz e circunda o ponto subsolar nas coordenadas latitude 23,5 graus Sul e longitude 90 graus Oeste. Em ambas as figuras, 21 e 23, prevalecem as condições de ionização do período noturno nas metades do lado esquerdo das figuras, desde a longitude 0 até a longitude 180. Observe que as divisões de latitude e longitude nessas figuras estão em passos de 10 graus, do lado esquerdo e embaixo dos mapas.

A descrição completa das condições ionosféricas em um determinado horário e lugar é dada pelo perfil da densidade dos elétrons a partir do pico da região F para baixo, até a parte inferior da região D. É fornecido na **Figura 25**, para o trajeto entre Boulder e Londres, um perfil no horário diurno (1800 UTC) no solstício de Inverno. Essa figura mostra um lento aumento na densidade dos elétrons acima da região E a 100 km, em seguida o pico da região F ao redor dos 250 km, assim como foi indicado nos dados de altura na **Figura 22**.

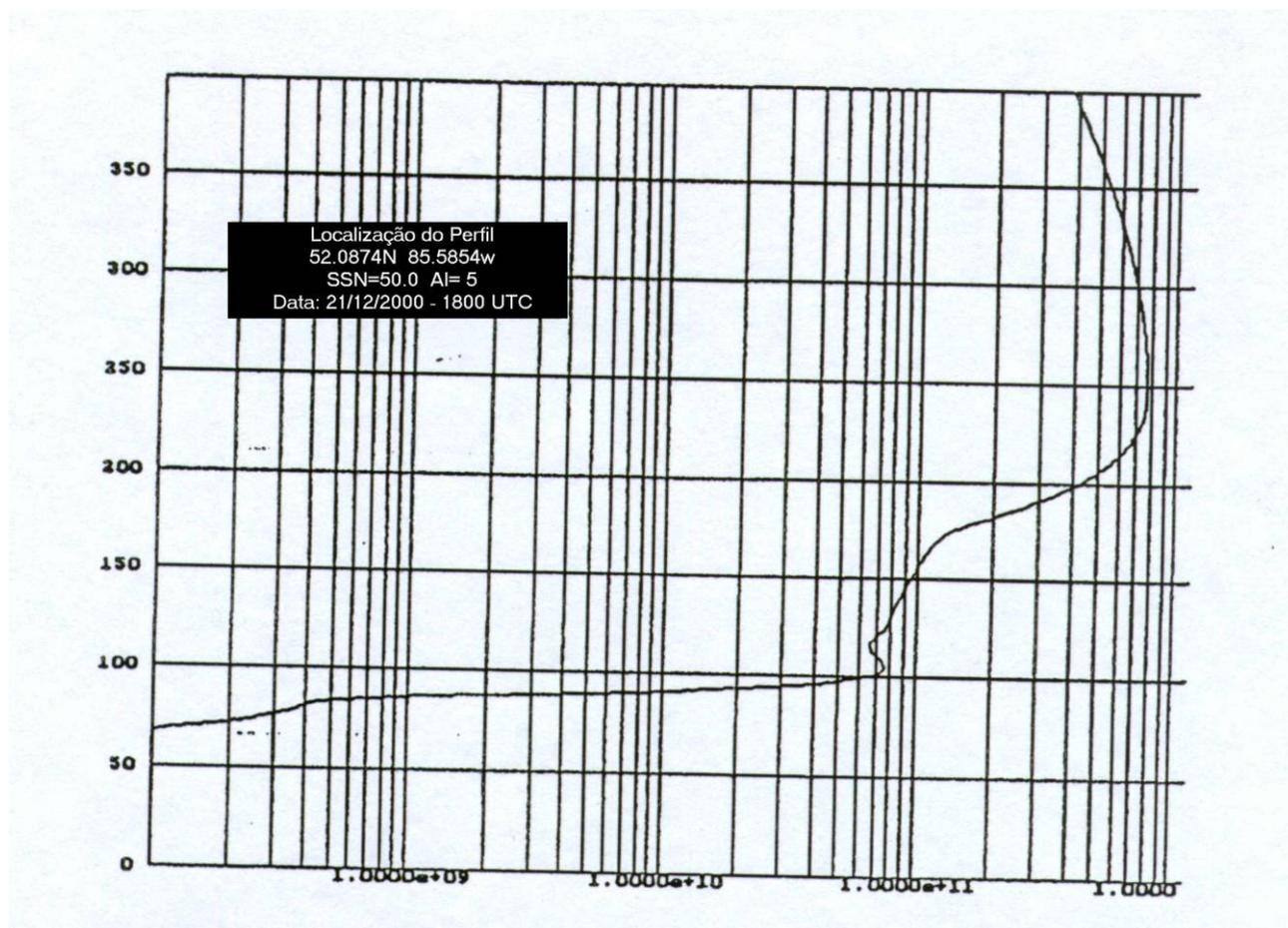


Figura 25 – Perfil da densidade dos elétrons durante o período diurno nas coordenadas 52N/85W para o Solstício de Inverno às 1800 UTC.

À noite, quando a poderosa fonte solar de ionização cai a zero, o perfil da densidade dos elétrons é inteiramente diferente, conforme mostrado na **Figura 26**. Nesse momento aparece um vale na densidade dos elétrons, logo acima do pico da região E, sendo a profundidade desse vale cerca de 25 % do pico próximo.

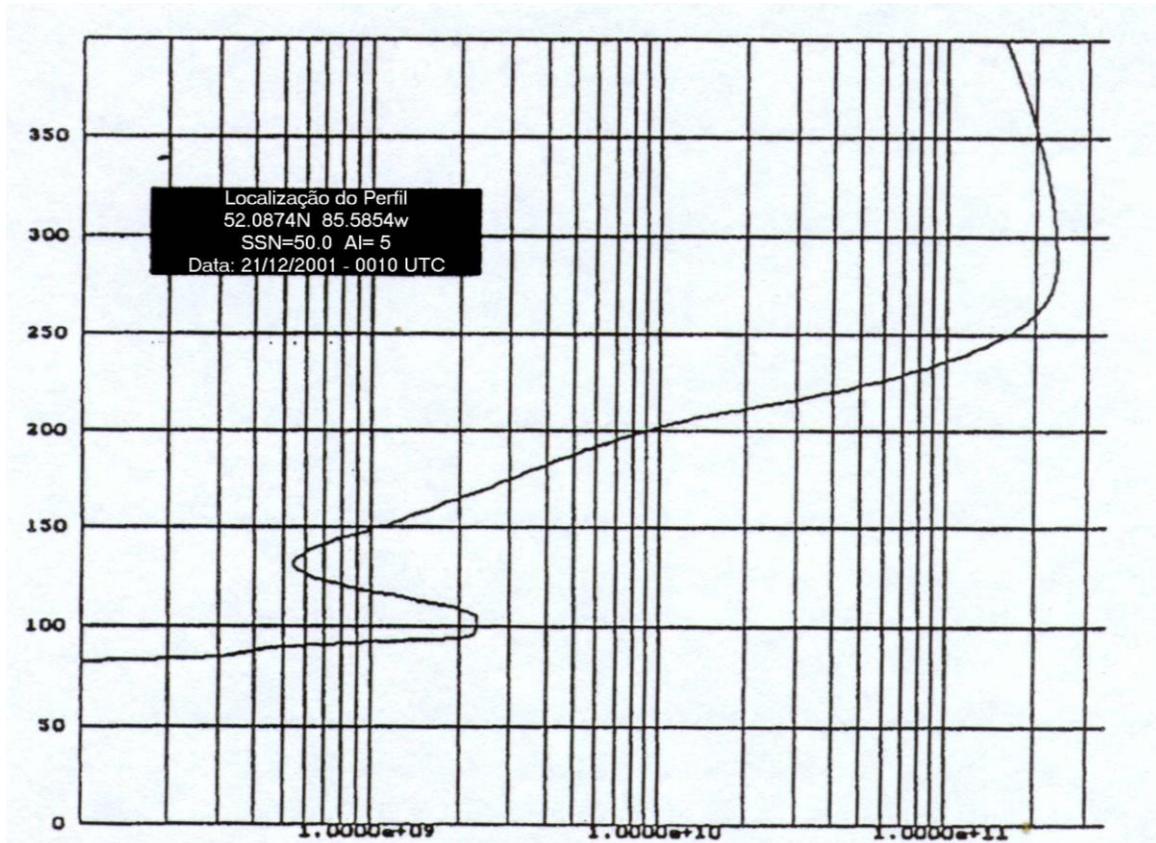


Figura 26 - Perfil da densidade dos elétrons durante o período noturno nas coordenadas 52N/85W para o Solstício de Inverno às 0000 UTC.

Na ausência da forte luz solar, o vale da ionização é suportado por fontes fracas de ionização como EUV da luz das estrelas, raios X estelares ou UV solar espalhado para dentro do hemisfério escuro pela atmosfera, a chamada **geo corona**. As fontes provenientes da galáxia são estáveis ao longo do tempo, porém a fonte mais forte, os fótons solares espalhados, variam conforme a atividade solar. Portanto, mesmo no escuro, a absorção ionosférica continua, apesar de mais fracamente.

3 - Flutuações nas frequências críticas

Além disso, as frequências críticas obtidas nas sondagens verticais são altamente variáveis, os valores médios mensais (50 %) variando entre 20 e 40 % durante épocas quietas (Bilitza, 2001) e ainda mais durante tempestades magnéticas. Isso é visto examinando-se a base de dados no programa IONCAP. Entretanto, as sondagens verticais são de menor interesse para os *dx men* do que as predições para os caminhos oblíquos, digamos entre Boulder e Londres.

Para as predições é utilizado o método do “ponto de controle”, que envolve a divisão na forma de saltos da distância entre dois pontos e usando as frequências resultantes das sondagens no primeiro e no último saltos. A pergunta fica sendo então “qual é a frequência mais baixa devolvida nas duas pontas do caminho em um determinado horário?”. Isso é obtido a partir das frequências críticas nos pontos médios do primeiro e do último salto, aumentando os valores verticais por um fator de 3 para valores apropriados para propagação em um ângulo com o horizonte.

Usando valores medianos (50 %), o menor dos dois valores em um determinado horário fornece a frequência máxima utilizável (MUF) para 15 dias do mês. Se os outros valores **decil** dos registros das sondagens forem usados, digamos os valores de 10 % e de 90 %, então as predições forneceriam a frequência ótima de transmissão (FOT) para 90 % do tempo e a frequência mais alta possível (HPF) para 10 % do tempo. Consequentemente, a **Figura 27** mostra a faixa de frequências críticas foF2 para o trajeto Boulder-Londres, como considerado anteriormente:

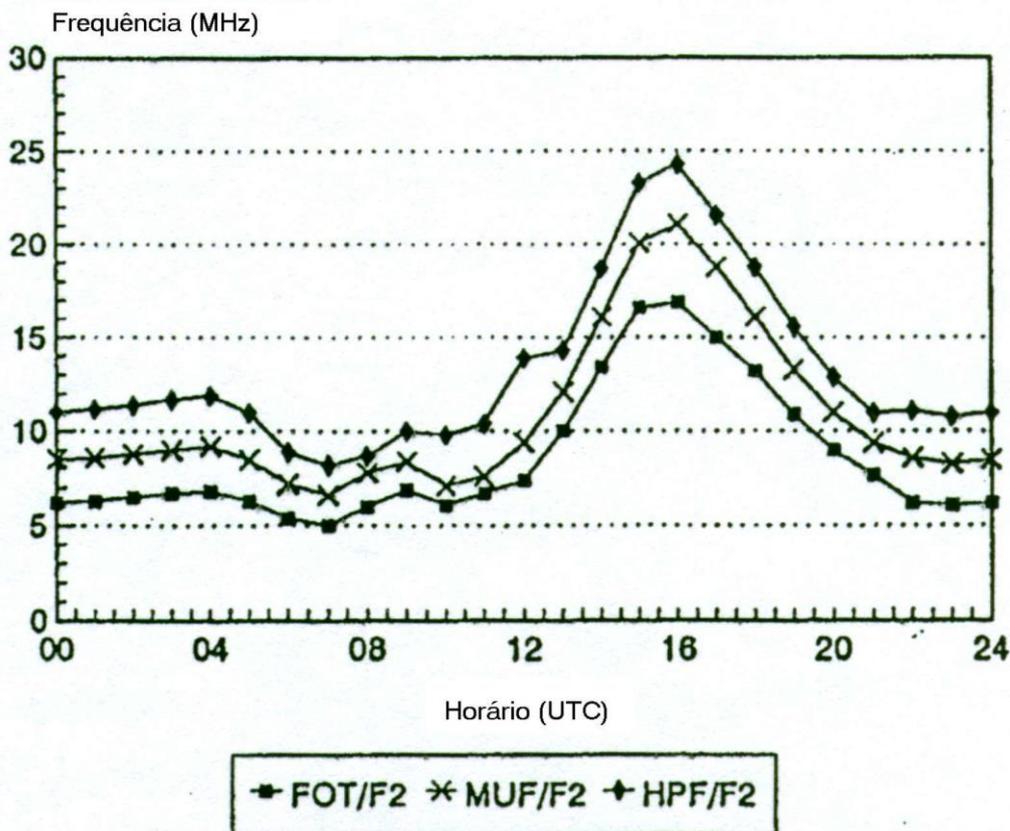


Figura 27 – FOT/F2, MUF/F2 e HPF/F2 para o trajeto Boulder-Londres.

Essa figura mostra a variação nas frequências críticas na região F, da FOT para a HPF, que são responsáveis pelas diferenças na comunicação, um dia para outro, em uma banda de HF como 14 MHz. Consequentemente, os sinais de 14 MHz poderão começar a chegar ao redor das 11 UTC, manter uma comunicação sólida entre 14 e 18 UTC e desaparecer ao redor das 20 UTC.

Para os operadores das bandas baixas, a variação nas frequências da região E são muito mais importantes e a **Figura 28** mostra a situação para o caminho entre Boulder e Londres:

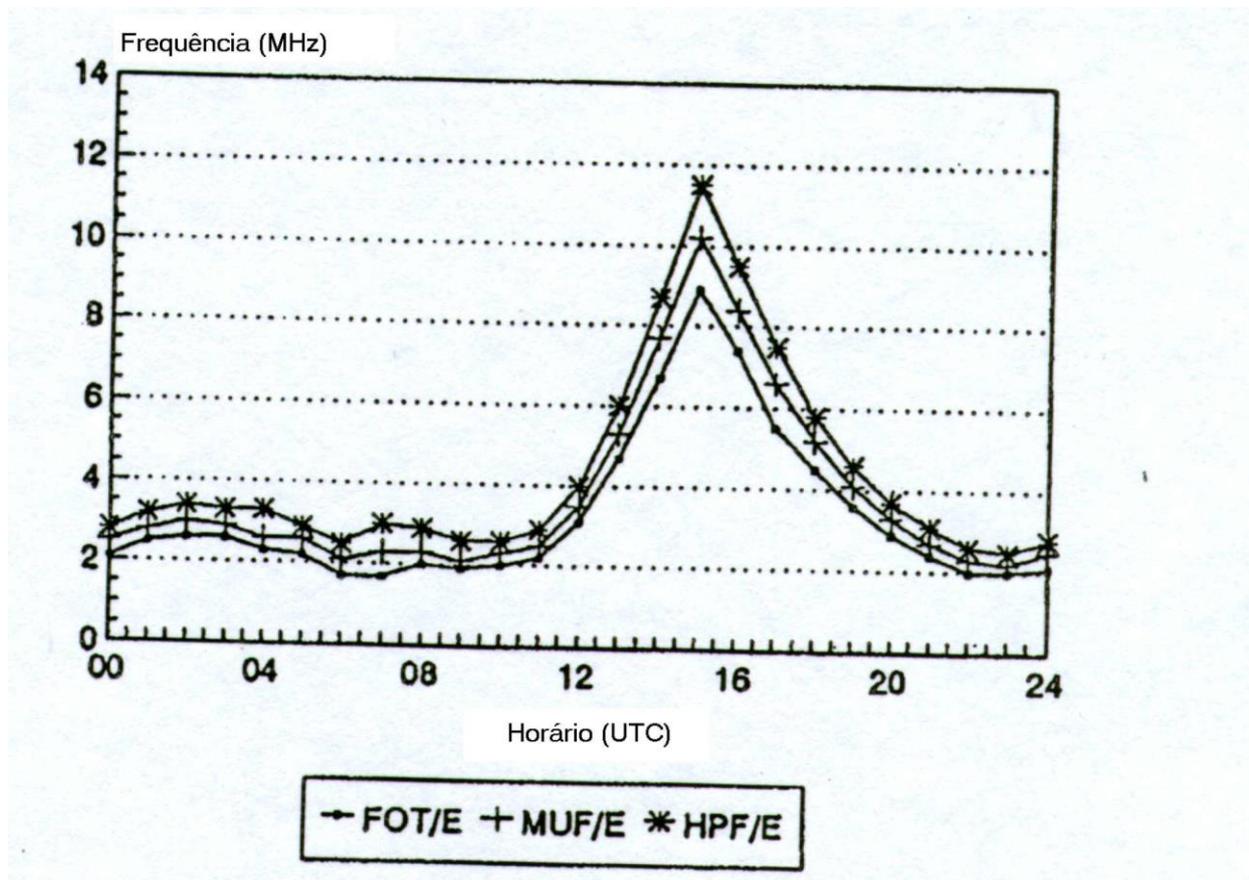


Figura 28 - FOT/E, MUF/E e HPF/E para o trajeto Boulder-Londres.

No entanto, a frequência de operação é 1,8 MHz, portanto parece que o trajeto está aberto durante as 24 horas do dia. Essa declaração se refere à refração dos sinais, não à sua intensidade. Como foi anteriormente comentado, existe ionização mais do que suficiente para garantir a propagação em 1,8 MHz; a intensidade do sinal desaparecerá devido à absorção quando o Sol atingir a região E.

Ao observar essas duas figuras, deverá ser notado que as curvas para a variação na região E não são simétricas em relação ao tempo da mesma forma que aquelas para a região F. Em particular, as curvas para a região E diminuem mais rapidamente do que aquelas para a região F, como seria de se esperar devido ao controle solar quando do ângulo de zênite do Sol. A região F decai mais lentamente ao amanhecer devido a sua menor densidade, composição iônica diferente e taxas de recombinação elétrons-íons nas duas regiões, assim como um maior controle geomagnético na região F.

Para o *dx man* das bandas baixas, as flutuações estatísticas em frequências críticas podem ser muito importantes para a propagação, ainda que as MUFs não sejam fator preocupante. Para constatar isso, uma variação típica poderá ser algo ao redor das 0600 UTC na **Figura 28**, quando os valores de FOT, MUF e HPF são respectivamente 1,7, 2,1 e 2,5 MHz ou 2,1 MHz +/- 20 % durante o mês. Para um determinado ângulo de radiação a partir de uma antena, a EVF na **Figura 18** está com valor fixo.

Portanto uma variação de 20 % na frequência crítica no nível da região E poderá fazer a diferença entre um trajeto de raio que esteja atingindo a parte inferior da região F para um salto longo ou sendo desviado de volta para o solo devido a um salto E com perdas.

Um aspecto interessante da propagação de baixa frequência e as frequências críticas da região E tem a ver com suas variações ao longo de um caminho, devido a irregularidades na ionosfera de origem não solar. Em sua maioria, essas irregularidades são imprevisíveis, mas sabe-se que ocorrem. Como resultado, um caminho de raios pode entrar na região do vale na **Figura 29** em um ponto do caminho devido a uma irregularidade. No entanto, mais longe ao longo do caminho ele poderá não ser capaz de sair do vale pois sua EVF é muito baixa para penetrar na região E, agora com uma frequência crítica mais alta do que antes.

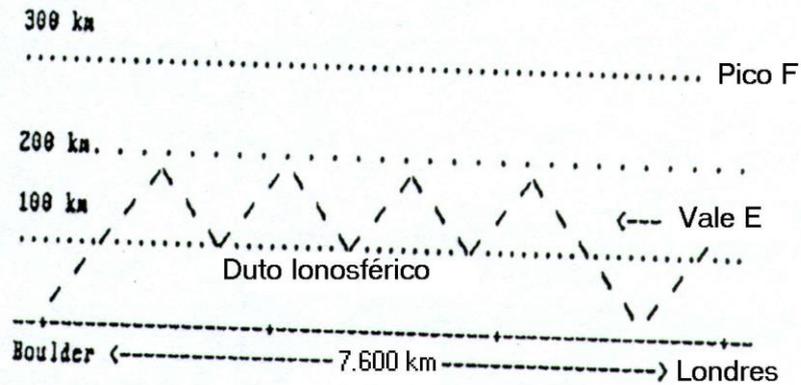


Figura 29 – Duto ionosférico, trajeto Boulder x Londres.

Resumindo, o raio fica aprisionado dentro do vale. Isso poderá resultar em um duto ionosférico, um modo de propagação que é muito eficiente conforme os raios são elevados, alcançando grandes distâncias sem trânsitos na região D e reflexões em terra, até retornar de volta ao nível do solo por outra irregularidade.

Existe uma outra forma de duto de origem magneto iônica, mas isso não será discutido até que sejam levados em consideração os efeitos do campo da terra. A origem dos dois tipos de dutos são diferentes, apesar de que são encontradas nos aumentos nos sinais de DX do amanhecer. Entretanto, no caso ionosférico, o amanhecer está no transmissor, enquanto que o caso magneto iônico, está no receptor.

5 - Plotagem dos raios

Com mapas de frequências típicas e perfis da densidade dos elétrons em mãos, como as **Figuras 25 e 26**, o próximo passo é introduzir a plotagem dos raios, para mostrar os trajetos em termos e detalhes mais realistas. Para isso, é necessário utilizar a Lei de Snell para refração de onda na Óptica e adaptá-la em uma forma apropriada para as ondas eletromagnéticas.

Antes de usar a Lei de Snell, é importante entender as limitações implícitas do método analítico. Conseqüentemente, no início presume-se que a densidade dos elétrons na região ionosférica sob consideração varia suavemente ao longo de um espaço que se estende mais do que um comprimento de onda em todas as direções. Portanto o método não é aplicável a regiões pequenas e turbulentas e nem a possíveis regiões de espalhamento de pequena escala que sejam irregulares, heterogêneas e que possam dar origem a reflexão difusa. Esses são todos os modos de propagação em seu próprio estilo mas não o processo de refração gradual e de lenta variação coberto pela Lei de Snell, e o resultado da refração suave não deverá ser utilizado para essas circunstâncias.

Na Óptica geométrica, a Lei de Snell lida com a mudança na direção de um raio conforme ele passa de um meio para outro. Os meios são caracterizados por índices de refração, a taxa da velocidade da luz (c) em um vácuo para aquele meio no material (v):

$$n = c / v \quad \text{Equação 5}$$

Portanto a Lei de Snell declara que:

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) = \text{constante} \quad \text{Equação 6}$$

para os raios incidentes e refratados que atravessam uma interface, onde teta (θ) é o ângulo com a normal para a superfície ao se ir de um meio para outro, como mostrado na **Figura 30**:

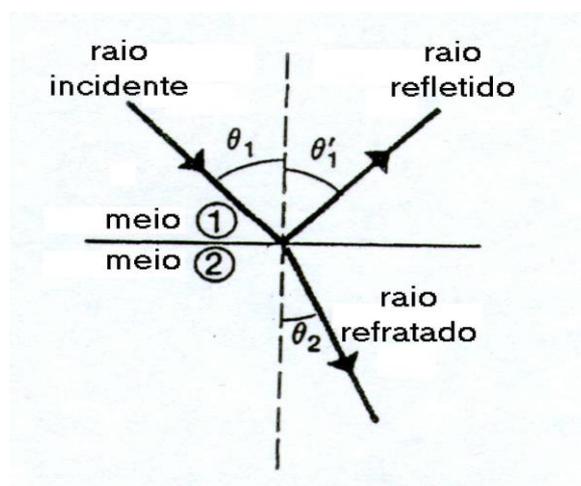


Figura 30 – Raios incidentes, refletidos e refratados na interface entre dois meios.

Isso se refere a uma superfície plana e é bem simples. Para o caso ionosférico, onde as superfícies são curvadas, a uma certa altura acima do solo, a geometria está mais envolvida. Neste caso, a ionosfera poderá estar dividida em finas camadas e os raios são traçados através da refração, camada por camada. Uma abordagem ainda melhor é usar o método do cálculo e plotar o trajeto usando os valores ao longo do caminho.

De qualquer maneira, e de modo a poder estudar a refração da onda na ionosfera, será necessária uma expressão para determinar o índice de refração (n) da ionosfera. Isso requer um modelo de como a ionosfera é constituída - elétrons e partículas neutras - e a utilização da equação de onda de Maxwell. Isso não será feito aqui em detalhes mas, ao invés disso, deixado como um exercício para aqueles interessados na Física do assunto e que disponham de um bom livro de teoria eletromagnética de nível superior. Entretanto, o método será discutido, incluindo suas limitações.

Primeiro, deverá ser entendido que existe uma diferença entre trens de onda e pulsos de onda. Na teoria eletromagnética, os trens de onda permanecem continuamente, de forma estável e sem que seja obtida deles nenhuma informação; por outro lado, os pulsos de onda são trens de onda breves e interrompidos e, devido à natureza de sua formação ou agrupamento, muitos transportam informações ou inteligência, como por exemplo pontos e traços.

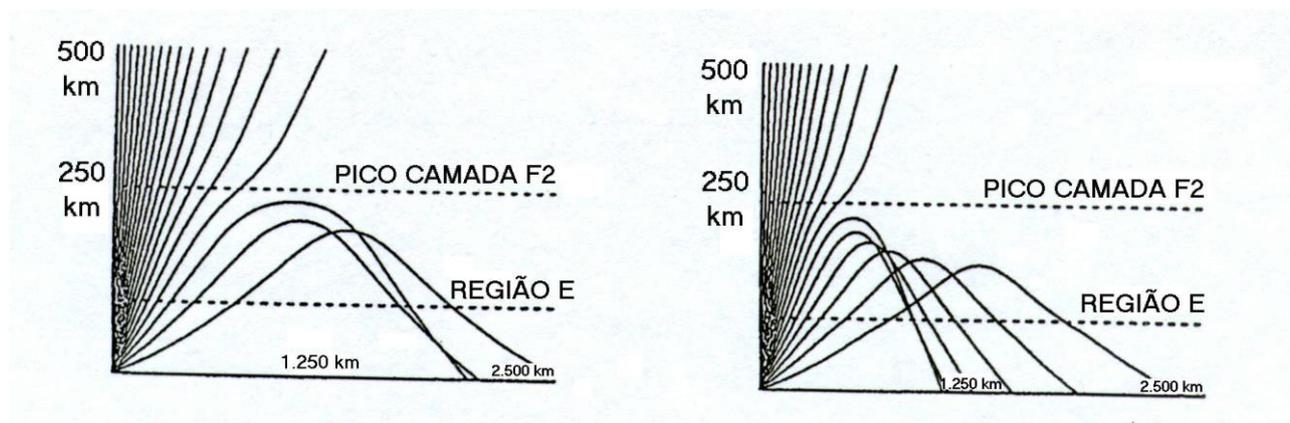
É feita distinção entre a velocidade das duas, a velocidade da onda ou do grupo. O mesmo é verdadeiro a respeito dos índices de refração, do índice de onda e do índice de grupo.

Para o modelo mais simples da ionosfera, os elétrons livres com uma densidade de número variam conforme a altura, como mostrado na **Figura 25**, o índice de onda da refração a uma determinada altura é dado pela equação:

$$n = (1 - (F_p/F)^2)^{1/2} \quad \text{Equação 7}$$

onde F_p é a frequência do plasma naquela altitude, relacionada com a densidade de elétrons N dada pela **Equação 4**, sendo F a frequência de operação. Aquele índice é menor que 1, portanto a velocidade da onda (v) é maior do que a velocidade da luz (c). Isso não constitui uma violação da Teoria Especial da Relatividade pois está lidando apenas com um trem de onda infinito, que é uma construção matemática e não uma realidade física. Poderá ser visto que a velocidade de grupo, envolvida com a transmissão da informação real, é menor do que (c), como deve ser.

Entretanto, o índice de onda é útil e, na óptica geométrica, é utilizado para determinar as propriedades refrativas dos materiais. Nos problemas ionosféricos, fornece resultados com significado a respeito da refração da onda sem entrar em detalhes sobre como os grupos de onda são formados. A esse respeito, usei a expressão acima juntamente com uma forma diferencial da Lei de Snell quando programei algumas plotagens de raios em 1995. Isso foi feito para explorar o método e para obter alguns traçados de raios a serem utilizados no meu livro “Para os Lambaris”. Ele foi usada largamente para as faixas de HF de 14 e 21 MHz, como mostrado nas Figuras 31 e 32, e utilizada variando os ângulos de radiação entre 5 e 90 graus, em passos de 5 graus.



Figuras 31 e 32 – plotagens de raios para sinais em 14 e 21 MHz, com os raios variando entre 5 e 90 graus, em etapas de 5 graus.

Essas figuras se referem ao amanhecer, quando a frequência crítica da região E era de 2,5 MHz e a frequência crítica da região F era de 8 MHz. As figuras mostram o familiar efeito de salto (zona de silêncio) e enfoque encontrado na faixa de HF, assim como informa a distância dos saltos (zona de silêncio) na camada F, entre 1250 e 2500 km. A zona de silêncio ocorre porque os raios de ângulo alto penetram na região F, ao invés de serem devolvidos a pontos próximos à localização do transmissor. Em 160 metros não existe essa zona de silêncio, pois todos os raios são devolvidos pela ionosfera acima, independente do ângulo de radiação.

São possíveis saltos maiores na faixa de HF quando o ângulo de radiação no lançamento é tal que faz com que o raio refratado passe próximo à parte inferior da capa F2, o que é mostrado a seguir no salto de 5.000 km na **Figura 33**:

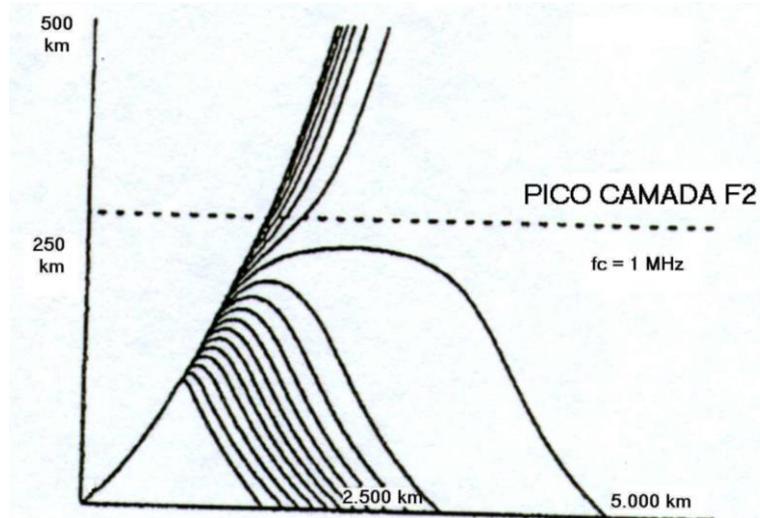
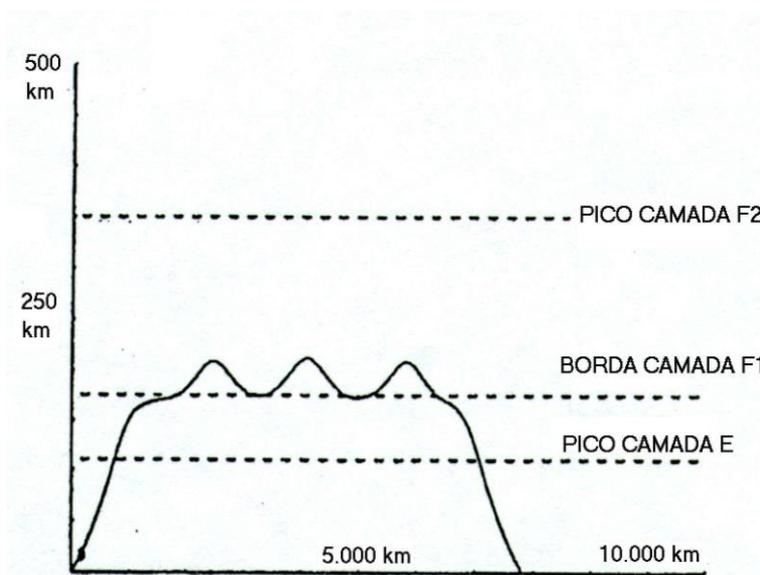


Figura 33 – Traçado de raios para sinais de HF, com a frequência variando entre 2 e 20 MHz em passos de 2 MHz.

Isso é denominado Raio Pedersen, e a figura ilustra as condições durante o período noturno, no entanto como se refere a sinais de HF, é diferente das condições de duto ionosférico mostrado na **Figura 29**, envolvendo sinais de 160 metros em um vale de densidade de elétrons acima da região E.

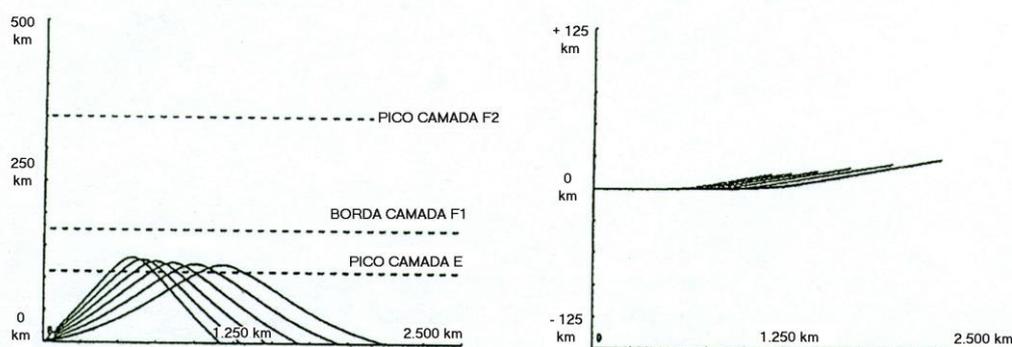
Um outro exemplo de um salto de HF mais longo é encontrado quando um raio acaba de penetrar uma camada com um ângulo ACIMA do Raio Pedersen. Conseqüentemente, poderá ocorrer um salto E-F longo, até mesmo diversos saltos em seguida, criando um duto para o sinal, sem reflexões intermediárias em terra ou trânsitos na absorvente região D. Isso é mostrado a seguir



na Figura 34:

Figura 34 – Outro exemplo de duto ionosférico.

Deverá ser observado que todas as plotagens de raios mostrados até agora o foram em duas dimensões, no plano vertical e ao longo das projeções de terra do raio. Nesses casos, a refração é resultante do trajeto pelo grande círculo. Entretanto, isso é algo pouco realista, pois também existem outros tipos de gradientes, fazendo com que a questão da plotagem dos raios seja em feita em três dimensões. Isso poderá ser incluído nos cálculos caso seja adicionado ao problema um gradiente horizontal, a ionização é maior em um lado do trajeto em relação ao outro, o que resulta nas Figuras 35 e 36:



Figuras 35 e 36 – caminhos de propagação não através do grande círculo, projetados no plano vertical e na superfície da terra.

O gradiente transversal na ionização refrata o trajeto do raio para longe da região de ionização mais alta. A **Figura 35** mostra o trajeto do raio nos saltos que não são pelo grande círculo, projetado sobre o plano vertical, enquanto que a **Figura 36** mostra as projeções dos desvios para os lados dos trajetos que não são pelo grande círculo sobre a superfície da terra.

As plotagens de raios mostrados nas Figuras de 31 a 36 são de meus cálculos pessoais de HF, no entanto servem como bons modelos para os cálculos nas bandas baixas. Esses programas foram projetados para mostrar efeitos físicos, porém não para trajetos, datas ou horários específicos. Isso poderá ser obtido pelo programa PropLab (Oler, 1996), fornecendo as coordenadas para o término do trajeto, data e hora, assim como um número de manchas solares. Em seguida, o programa para plotagem de raios no PropLab utiliza os perfis ionosféricos apropriados ao longo do trajeto e executa todos os cálculos de refração em pequenos passos, ao final plotando o resultado.

Os cálculos anteriores envolveram o mesmo método, mas somente utilizaram a frequência de RF e a frequência do plasma ou densidade de elétrons ao longo do trajeto. Para essa aproximação em duas dimensões, as coordenadas polares (r) e (θ) na **Figura 37**, a teoria mostra a mudança na direção do trajeto $d\theta$ em uma curta distância ds devido à refração varia conforme o gradiente vertical dN/dr da densidade dos elétrons e o inverso do quadrado da frequência F :

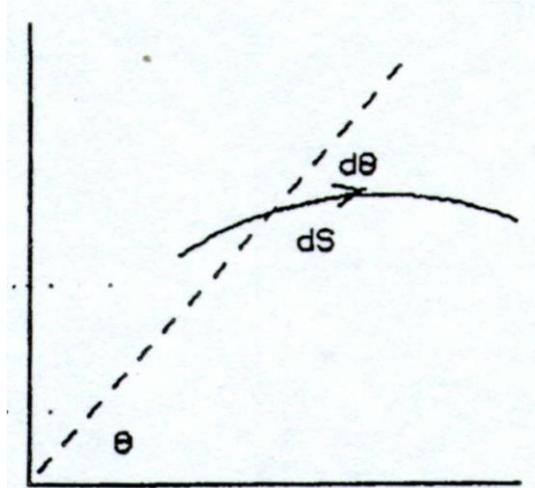


Figura 37 – Ilustração das etapas infinitesimais em ângulo e distância ao longo de um trajeto.

Além disso, a dependência do inverso do quadrado da frequência significa que as mudanças da refração são maiores nas frequências mais baixas.

Isso tem um significado particular para a refração horizontal ou desvio do trajeto devido a gradientes horizontais na ionização, conforme encontrado ao redor do amanhecer do terminator.

Portanto, para a banda de 10 metros, os trajetos do grande círculo servem como uma boa aproximação para os trajetos-rádio conforme os gradientes horizontais aumentam apenas para pequenos desvios de sua direção. Por outro lado, para a banda de 160 metros, um determinado gradiente produziria desvios na direção que seriam 250 vezes maiores. Consequentemente, os gradientes de ionização ao redor da linha de nascer/pôr do Sol dão origem a grandes desvios nos caminhos, **menos na vasta escuridão da noite, onde os trajetos continuam ao longo das direções do grande círculo.**

Retornando às características do programa PropLab, ainda em duas dimensões, deverá ser observado que o desvio do trajeto $d\theta$ radianos por quilômetro de distância ds , na **Equação 8**, assim como a taxa de absorção em dB pela distância em quilômetros ds , na **Equação 1**, inclui a frequência das colisões, F_{coll} , e a plotagem dos raios no PropLab mostra a absorção ao longo de um trajeto. Consequentemente, a **Figura 38** é uma plotagem de raios PropLab para o caminho entre Boulder e Londres em 1,8 MHz com um ângulo de irradiação de 13 graus. A figura mostra um "X" sobre o traço, logo após a marca dos 6.000 km. Isso indica a distância na qual o sinal de 1,8 MHz sofreu absorção de 100 dB ou perda da intensidade do sinal.

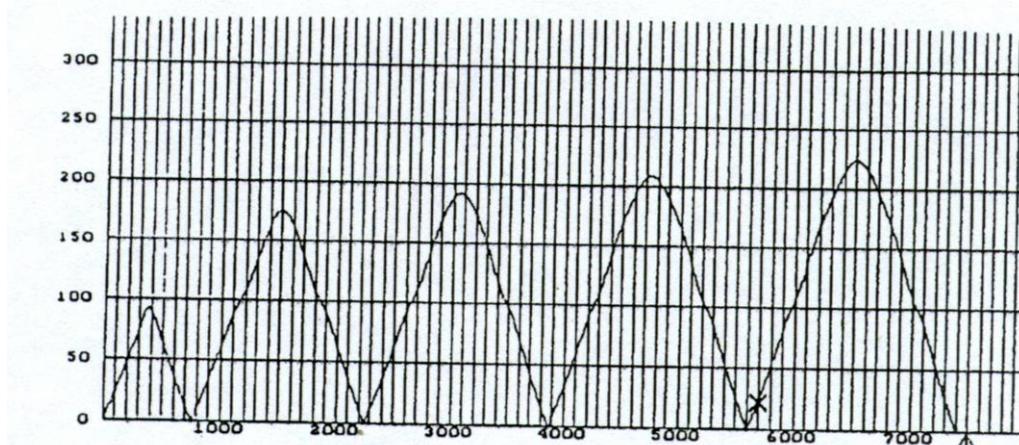


Figura 38 - Uma plotagem de raio para sinais de 1,8 MHz para Boulder-Londres no Solstício do Inverno.

A figura também é interessante pelo fato de que os perfis da densidade de elétrons escolhida pelo programa para o caminho Boulder-Londres resultou em um salto E no início, mas todos os saltos F estão limitados na altura em cerca de 200 km.

Com um ângulo de irradiação mais baixo, 6 graus, o programa mostra saltos E a quase 5.000 km e, em seguida, um salto E-F longo proveniente de um raio Pedersen incidente na região E, como mostrado na **Figura 39**. Essa possibilidade foi levantada em conexão com a **Figura 34**. Na presente circunstância, o programa PropLab modificou os perfis da densidade de elétrons ao longo do caminho e ao redor das 0000 UTC a frequência crítica da camada E ao final do caminho ficou tão baixa que o ângulo de radiação era próximo ao de um raio Pedersen e resultou no salto E-F longo.

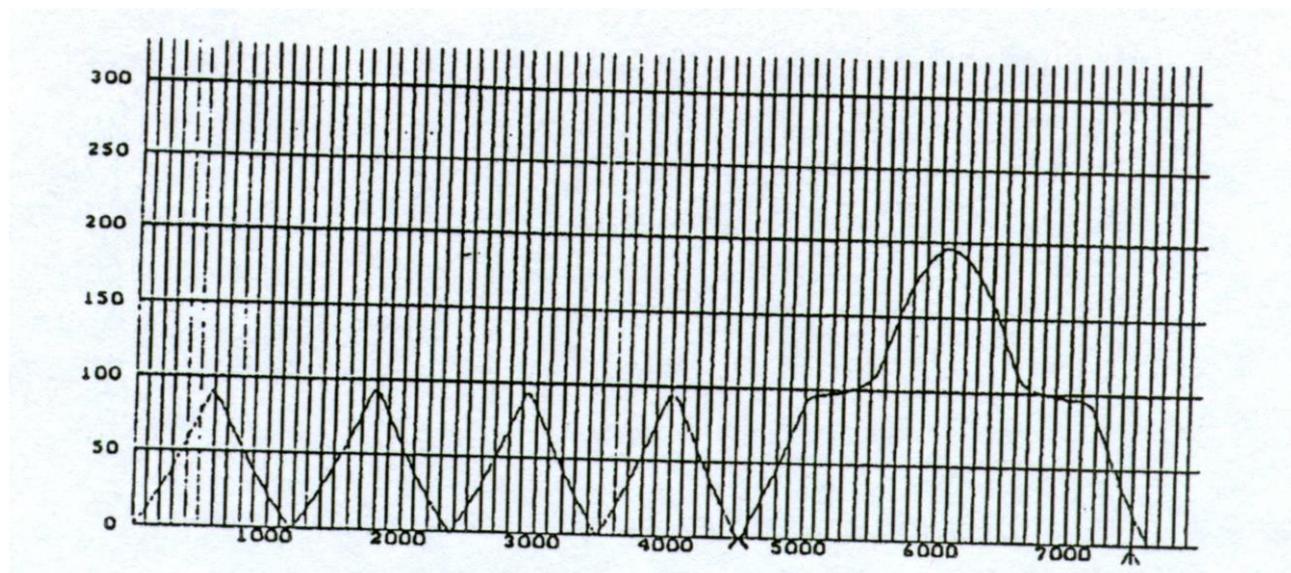


Figura 39 - Saltos E de ângulo baixo em 1,8 MHz, seguidos por um salto E-F longo, no trajeto entre Boulder e Londres.

Outras frequências na parte baixa do espectro incluem 3,5 e 7,0 MHz. Portanto, podemos observar as plotagens dos raios no trajeto entre Boulder e Londres sob as mesmas circunstâncias, apenas aumentando a frequência. Conseqüentemente, a **Figura 40**, mostra uma plotagem de raio para 3,5 MHz, porém o ângulo de radiação foi aumentado para 18 graus. Em contraste com as Figuras 38 e 39, pode ser visto que os sinais de 3,5 MHz atingem um ponto mais alto na ionosfera, acima dos 200 a 250 km. Entretanto, isso está bem distante dos ângulos de radiação e as alturas na região F em uso no topo do espectro de HF.

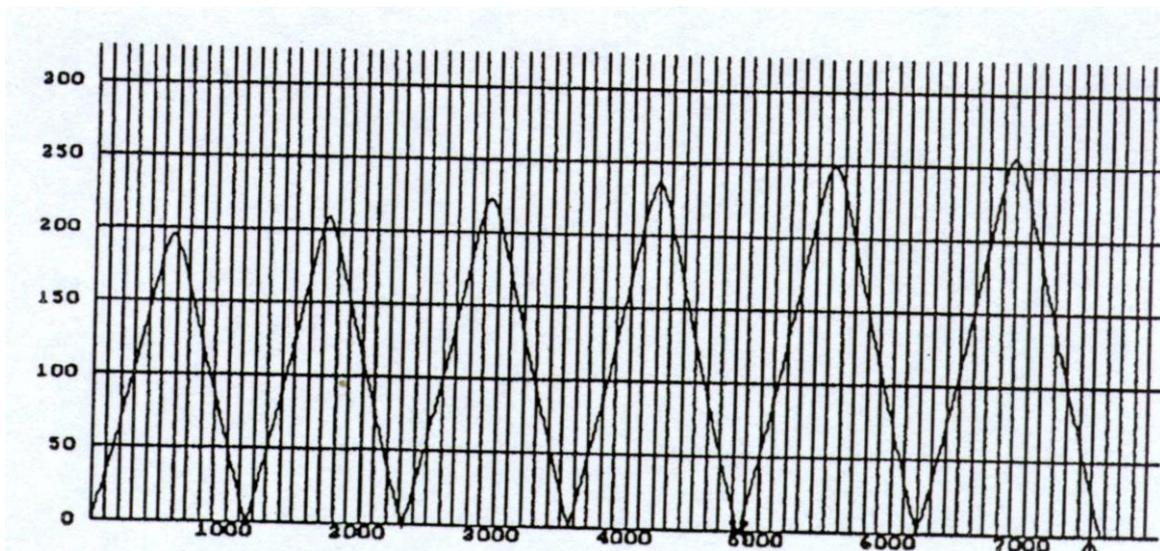


Figura 40 - Traçado de raios para sinais de 3,5 MHz, de Boulder para Londres, com um ângulo de radiação de 18 graus.

Indo para 7,0 MHz e com o mesmo ângulo de radiação, a **Figura 41** mostra que o ângulo é muito agudo ou a EVF é muito alta para a ionosfera pois o sinal escapa, penetrando na região F2 e seguindo para o espaço, exatamente como nas Figuras 31 e 32.

Naturalmente, um padrão de radiação da antena contém raios em muito ângulos, conseqüentemente isso não desconsidera os sinais saindo de Boulder para Londres, apenas um modo diferente será envolvido.

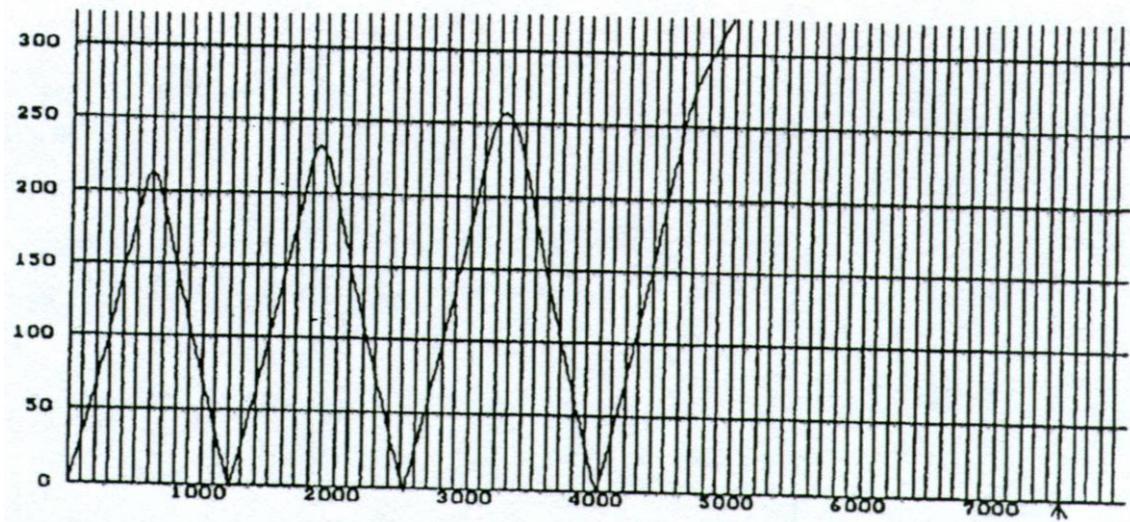


Figura 41 - Traçado de raios para sinais em 7,0 MHz, de Boulder para Londres, com um ângulo de radiação de 18 graus.

Como observado anteriormente, existe ionização mais do que suficiente na região F2 acima para suportar a propagação em 1,8 MHz e, em geral, esses sinais ficam aprisionados na ionosfera. Isso não acontece para as frequências mais altas, como o sinal de 7 MHz na **Figura 42**. No entanto existem outros significados para essa declaração, por exemplo, que o ruído rádio galáctico em 7 MHz pode adentrar na ionosfera inferior à noite. Isso é mostrado na **Figura 42**, onde existe um "o", com os sinais de 7 MHz de ângulo baixo aprisionados à noite, sendo no entanto livres os sinais de ângulo alto para cruzar o pico da região F, seguindo para qualquer direção, para o espaço ou vindo dele.

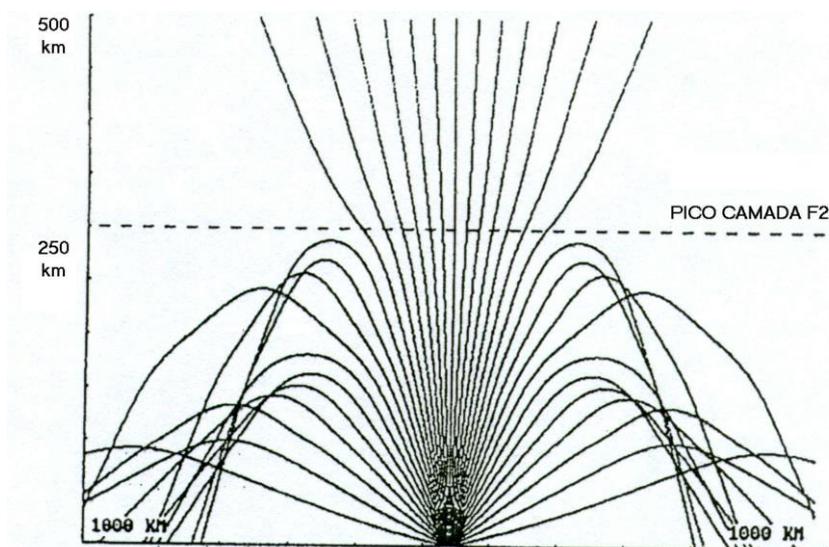


Figura 42 - Traçado de raios para 7,0 MHz com um "íris" de raios penetrando o pico da camada F, ângulos entre 5 e 90 graus em passos de 5 graus.

O orifício se fecha para sinais de 7 MHz durante o dia, mas está aberto para frequências mais altas e rajadas de ruído rádio solar passam de tempos em tempos, com a ocorrência de labaredas solares. O ruído rádio galáctico, digamos ao redor dos 30 MHz, não atravessa a região F, de dia ou de noite, mas não é um problema como pode ser o ruído solar.

Retornando aos 1,8 MHz, esses sinais são aprisionados na ionosfera mais baixa e o mesmo ocorre para os ruídos atmosféricos e artificiais nessa frequência.

6 - Propagação do ruído

O ruído se propaga e é absorvido como qualquer outro sinal. De qualquer forma o ruído atmosférico pode ser um fator limitante, especialmente para as expedições de DX operando nos trópicos.

Em relação ao ruído atmosférico, os mapas CCIR mostram sua energia em 1 MHz e devem ser corrigidos para frequência usando o espectro (Davies, 1989) vide **Figura 43**. Ela mostra valores **decil** para a energia do ruído e frequência de corte na faixa entre 20 e 30 MHz:

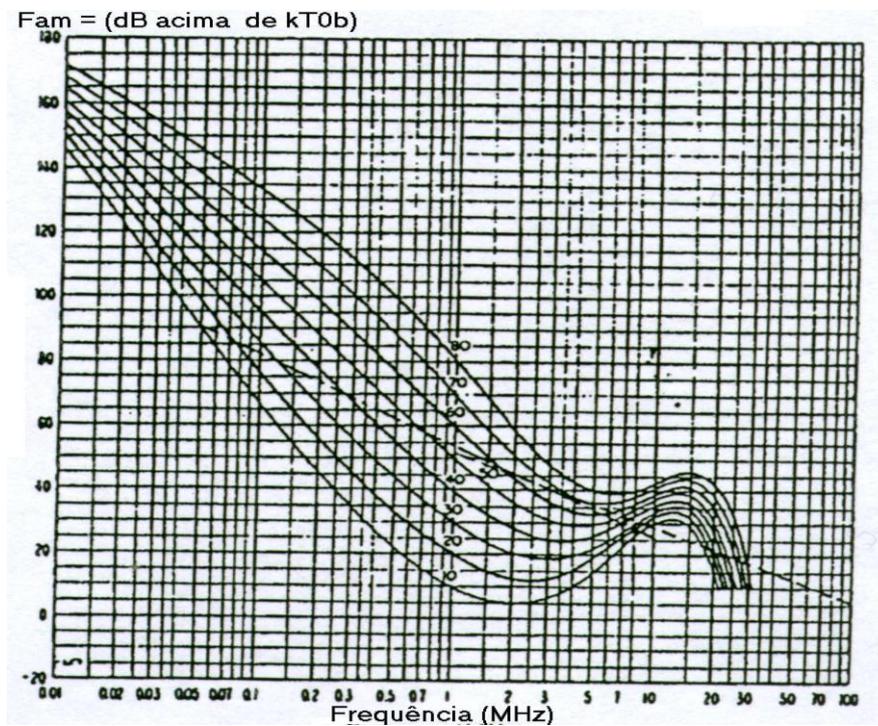


Figura 43 - Energia do ruído atmosférico em unidades decil em função da frequência.

As curvas na **Figura 43** mostram considerável variabilidade em relação à média (50 %) do valor **decil** próximo aos 1,8 MHz. O mesmo é verdadeiro para o ruído artificial (feito pelo homem), no entanto devido ao fato de não ser um fenômeno natural, tem variações mais amplas e imprevisíveis.

Como questão prática, certa manhã um *dx man* da costa oeste poderá experimentar QRM e QRN atmosférico proveniente da costa leste enquanto está trabalhando estações da Ásia e da Oceania no entanto, na medida em que o Sol sobe, esse problema vai diminuindo devido à absorção. O *dx man* da costa leste, trabalhando a Europa, não tem a mesma vantagem; o ruído e os sinais provenientes do leste desvanecem junto com a subida do Sol, enquanto que o QRM e QRN do oeste continuam. No entanto, o ruído artificial local prossegue indefinidamente.

Finalmente deverá ser observado que o ruído rádio galáctico, apesar de que não ser suficientemente forte para se tornar um problema para os receptores dos *dx men* das bandas baixas, poderá prestar um valioso serviço no estudo dos distúrbios ionosféricos.

A esse respeito, as labaredas solares podem emitir partículas de alta energia, os prótons, que atingem a Terra e depositam pesada ionização nos caminhos de DX que cruzam a ionosfera de grande altitude. A presença de tais eventos poderá ser detectada monitorando-se o ruído galáctico nas latitudes polares em relação aos efeitos de absorção. Isso será discutido com mais detalhes em conexão com os diferentes tipos de distúrbios.

Capítulo V - Teoria Magneto-iônica

1 - Geomagnetismo

O campo magnético da Terra vem sendo estudado há séculos - em terra, no mar, por meio de foguetes, satélites e espaçonaves. Consequentemente a intensidade do campo, sua distribuição espacial, variações ao longo do tempo e anomalias são todos fatores bem conhecidos. Entretanto, existem diversos modelos do campo, dependendo tanto da forma como ele é monitorado como da localização para a origem do sistema de coordenadas.

Consequentemente, o modelo mais simples é a aproximação do dipolo centralizado (CD), no qual a origem está no centro da Terra e o momento do dipolo M e o eixo são escolhidos para obter a melhor combinação do campo com aquele de um dipolo.

Essa figura mostra o deslocamento histórico dos polos, porém para outras finalidades, e será feito uso dos dados geomagnéticos atuais mais próximos da Terra, encontrados no Campo de Referência Geomagnético Internacional (IGRF, 1995), disponível em disco no Centro Nacional de Dados Geofísicos dos EUA. Para Boulder, o ponto inicial de nosso caminho até Londres, o IGRF informa:

$$\text{Norte} = +21,106 \text{ nT}$$

$$\text{Vertical} = +50,106 \text{ nT}$$

$$\text{Total} = 54,370 \text{ nT}$$

O componente horizontal do campo é presumido como sendo positivo caso ele aponte na direção norte e o componente vertical é assumido como positivo caso ele aponte para baixo, em direção à Terra, como é o caso no Hemisfério Norte. Consequentemente, o campo em Boulder aponta para o Norte e para baixo em direção à terra com um ângulo de 22,8 graus em relação à vertical, fornecendo os componentes acima relacionados.

Nessa altitude, os elétrons ionosféricos estão em rápido movimento, marcando cerca de 68.000 colisões por segundo com as partículas neutras, de acordo com o perfil de frequência de colisões mostrado na **Figura 13**. Entretanto, com os elétrons em movimento no campo da terra, as forças magnéticas entram em ação e os elétrons espiralam ao redor das linhas do campo com uma taxa alta, de 1.520.000 ciclos por segundo. Consequentemente, no tempo, o campo afeta os movimentos dos elétrons mais do que as colisões e deverá ser incluído na discussão sobre propagação. Esse é particularmente o caso pois a **giro frequência do elétron**, como ela é chamada, é próxima das frequências das bandas baixas, especialmente a dos 1,8 MHz (160 metros).

2 - Giro frequência dos elétrons

Neste ponto, o problema da propagação lida com **quatro frequências** - a radiofrequência F e três outras que são características da ionosfera - a frequência do plasma (F_p), a frequência das colisões (F_c) e agora a giro frequência dos elétrons (F_g). No topo das bandas de HF, apenas a frequência do plasma é importante, pois a frequência F é consideravelmente maior do que a das colisões e a giro frequência dos elétrons. Entretanto, nas bandas baixas, todas as frequências são importantes e afetam a propagação.

Conseqüentemente, ao tratar dos movimentos dos elétrons sob a influência dos sinais das bandas baixas, a equação do elétron em movimento terá de ser expandida para uma [equação] na qual a onda plana incidente exerça apenas força de interesse onde ambas as forças, das colisões e magnéticas, também possam ser incluídas as variáveis em negrito - campo incidente E , velocidade V e campo magnético B - sendo quantidades vetoriais, com componentes no sistema de coordenadas horárias mostradas abaixo na **Figura 44**:

$$\text{Força de excitação} = e \cdot E$$

$$\text{Força de colisão} = -m \cdot F_{\text{coll}} \cdot V$$

$$\text{Força magnética} = e \cdot (V \times B)$$

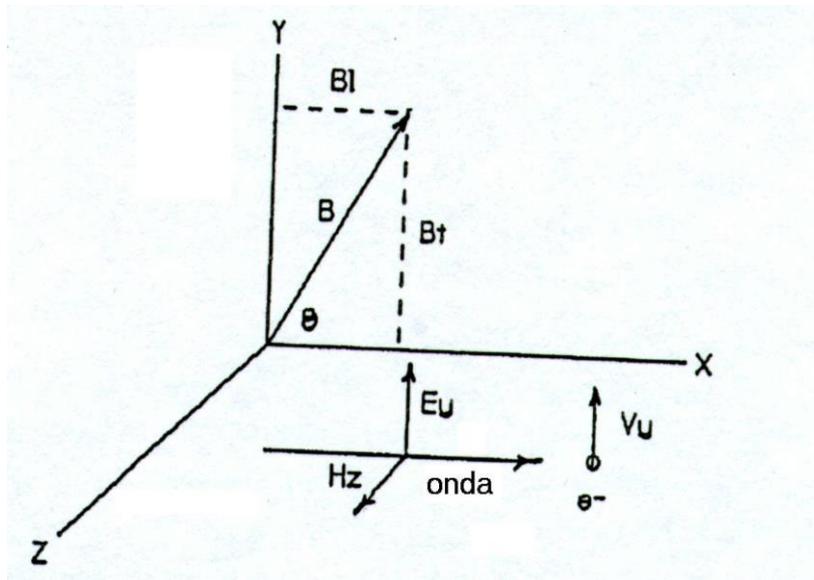


Figura 44 - Sistema de coordenadas retangulares, mostrando os componentes dos vetores de algumas variáveis relevantes.

3 - Polarização circular e elíptica

Quando essas forças são introduzidas na **Equação** do elétron em movimento, o problema então passa a ser encontrar os movimentos mecânicos que ocorrem e a polarização da radiação. Essa não é uma tarefa fácil e é encontrada nos tratados sobre a matéria (Ratcliffe, 1955). Aqui, serão fornecidos apenas os resultados principais e exemplos ilustrativos de como a teoria aborda a propagação das bandas baixas.

O resultado geral é que a ionosfera que suporta a propagação de ondas polarizadas linearmente na região de HF, menos nas bandas baixas, o efeito do campo geomagnético nos elétrons ionosféricos é o de mudá-las para ondas polarizadas elípticamente. Portanto, a natureza vetorial das ondas é modificada, dos vetores E- ou H- oscilando em um plano na medida em que elas avançam, na **Figura 3**, para girar ao redor da direção da propagação, assim como a polarização circular mostrada a seguir na **Figura 45**:

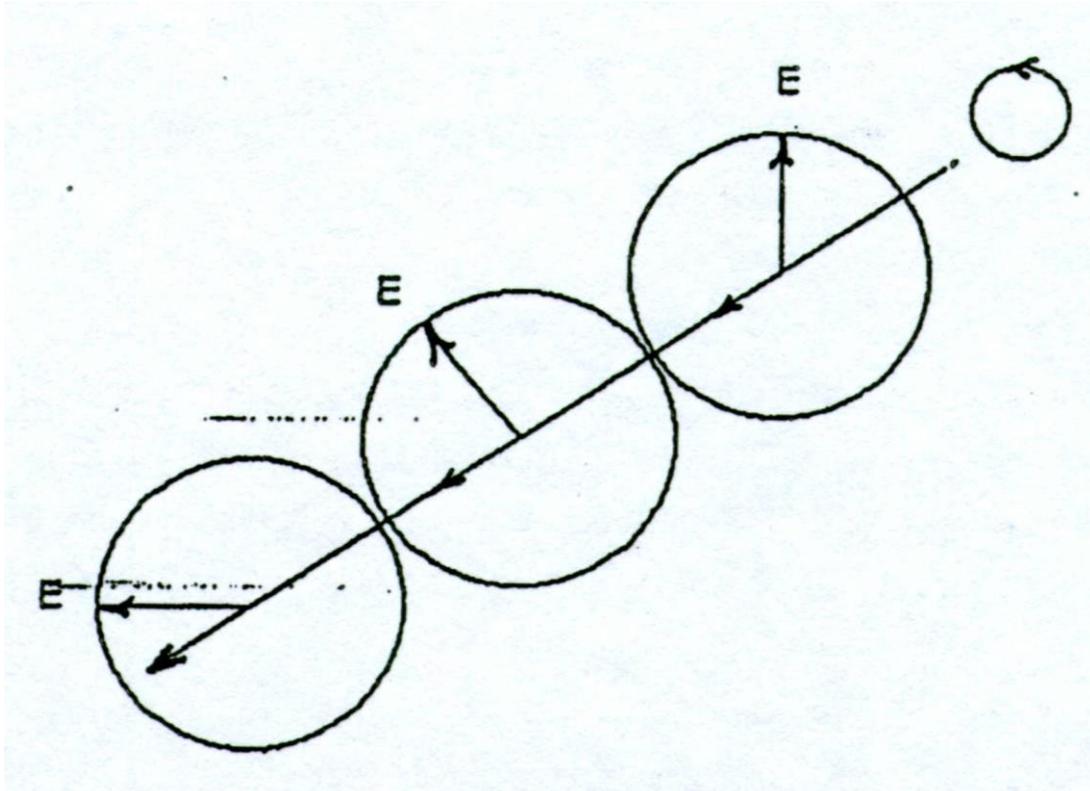


Figura 45 - Diagrama mostrando a rotação do vetor E no avanço de uma onda polarizada verticalmente no sentido direito (horário).

Essa figura para polarização circular mostra um vetor E constante girando no sentido da mão direita (horário) na medida em que um sinal de banda baixa avança ao longo do caminho, do topo da direita para a parte inferior da esquerda da figura.

A polarização elíptica é mostrada na **Figura 46**, um vetor E variável girando no sentido da mão direita na medida em que avança. Observe que o vetor E está no máximo na direção do eixo semi-principal da elipse e no mínimo na direção do eixo semi-secundário. A orientação da elipse está fixada nesta figura.

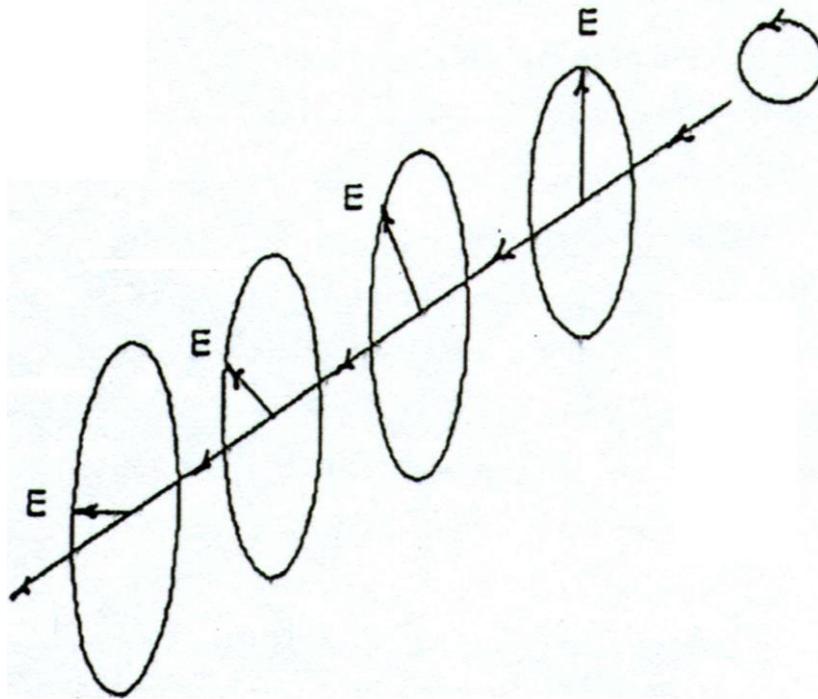


Figura 46 - Diagrama mostrando a rotação do vetor E no avanço da onda polarizada elipticamente, no sentido da mão direita.

Para maior clareza, os vetores H foram omitidos nessas figuras. O vetor segue ao redor de seu próprio círculo na **Figura 45**, no entanto a elipse do vetor H para a situação mostrada na **Figura 46** está girada 90 graus em relação àquela do vetor E.

As antenas para bandas baixas emitem radiação polarizada, digamos com campos E na direção vertical a partir do clássico monopolo vertical de quarto de onda e na direção horizontal lateralmente, para um dipolo horizontal. A questão então é, **de que forma o campo da Terra afeta a entrada da radiação na ionosfera**. Para isso, consideraremos dois casos extremos, no polo de mergulho norte, a localização onde o campo é vertical e o equador geomagnético magnético, localizações na Terra onde o campo é horizontal, com um mergulho de zero com a bússola apontando norte.

Considere a RF que está sendo irradiada por uma antena vertical no polo de mergulho. A RF está avançando perpendicularmente com o campo magnético, no entanto o campo E da onda é vertical, excitando os elétrons ionosféricos na mesma direção. O campo magnético não exerce nenhuma força nos elétrons, como se o campo não estivesse lá, desde que as movimentações deles estejam paralelas com o campo.

Na propagação magneto-iônica as ondas verticais estão em um modo que é chamado Ordinário ou ondas O e a energia da onda é acoplada eficientemente na ionosfera.

Com uma antena horizontal no polo de mergulho, o campo E que avança perpendicularmente ao campo magnético tem maior dificuldade para propagar os sinais mais adiante excitando os elétrons ionosféricos para que se movimentem. Esse é o caso em que a força magnética limita severamente a amplitude do movimento dos elétrons que se desenvolve quando o campo E excita os elétrons em movimento perpendicularmente ao campo magnético. Esse modo, com o campo polarizado perpendicularmente ao campo magnético, é denominado modo extra-ordinário ou modo X e, nesse extremo, a energia é acoplada para dentro da ionosfera.

Vamos agora nos dedicar ao equador geomagnético e considerar a radiação emanada de um dipolo horizontal, a antena orientada na direção magnética N-S. Para propagação E-O, a situação é exatamente igual ao mergulho de polo para uma antena vertical enquanto o campo E proveniente do dipolo for paralelo ao campo magnético horizontal e se acoplar eficientemente nos movimentos dos elétrons na ionosfera como no modo O. Do mesmo modo, a propagação E-O com um monopolo vertical no equador do mergulho é como a de uma antena horizontal no polo de mergulho e não se acopla de forma eficiente nos movimentos dos elétrons como no modo X.

Considere agora a propagação N-S no equador geomagnético onde o campo geomagnético é horizontal, apontando para o Norte. Com essa simetria axial, seria de se esperar que os campos E linearmente polarizados, provenientes de monopolos verticais e de dipolos horizontais, se comportassem da mesma forma quando se trata de energia de RF enviada horizontalmente para a ionosfera. No entanto, existe uma diferença.

Com o campo magnético apontando para o Norte, os elétrons ionosféricos espiralam ao redor das linhas de campo no sentido horário, olhando para o Norte na direção do campo. Agora, uma onda polarizada linearmente de amplitude E poderá ser mostrada como sendo equivalente no sentido vetorial a duas ondas polarizadas circularmente de amplitude $E/2$ que giram em direções opostas, como mostrado a seguir na **Figura 47**:

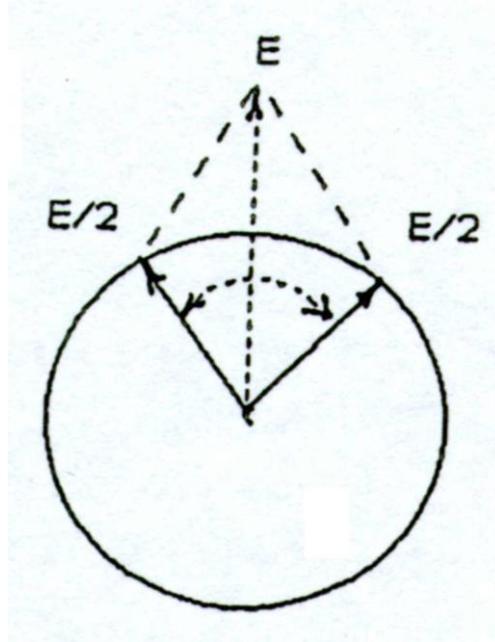


Figura 47 - Diagrama mostrando o equivalente a uma onda polarizada linearmente, de amplitude E , e duas ondas polarizadas circularmente, de amplitude $E/2$ girando em direções opostas.

Enviando sinais polarizados linearmente para o Norte, ao longo da direção do campo, a teoria magneto-iônica mostra que a componente horária da onda, girando da mesma forma que os elétrons ionosféricos, se propaga pessimamente na forma de uma onda X, enquanto que a componente anti-horária sofre muito menor absorção na forma de uma onda O.

Esse ponto será discutido com mais detalhes em conexão com o acoplamento de energia quando os sinais de baixa frequência entram e saem da ionosfera; neste momento, é suficiente dizer que, nos contatos DX de longa distância, o modo X é pesadamente absorvido e somente metade da potência efetivamente irradiada (ERP) se propaga na forma de ondas X na direção do campos, com antenas tanto horizontais como verticais no equador geomagnético. Na direção magnética E-O, uma antena horizontal alta no equador é muito eficiente no modo O, enquanto que uma antena vertical é uma má escolha para propagação no sentido E-O.

Essas mesmas ideias podem ser aplicadas a outras latitudes onde a propagação de sinais polarizados verticalmente colocam o ângulo de radiação proveniente da antena em uma direção na qual o campo E está essencialmente paralelo com o campo magnético local. A cidade de Boulder é um caso em questão.

Como observado anteriormente, o campo magnético em Boulder normalmente aponta para a direção Norte e para baixo, em direção à terra, em um ângulo de 22,8 graus em relação à vertical; conseqüentemente, um ângulo de radiação de cerca de 23 graus, com os sinais seguindo para a direção Norte, seria acoplado de forma eficiente à ionosfera. Outras localidades nas quais isso poderia ser aplicado podem ser vistas em um mapa global que mostre o equador geomagnético, como na **Figura 48**:

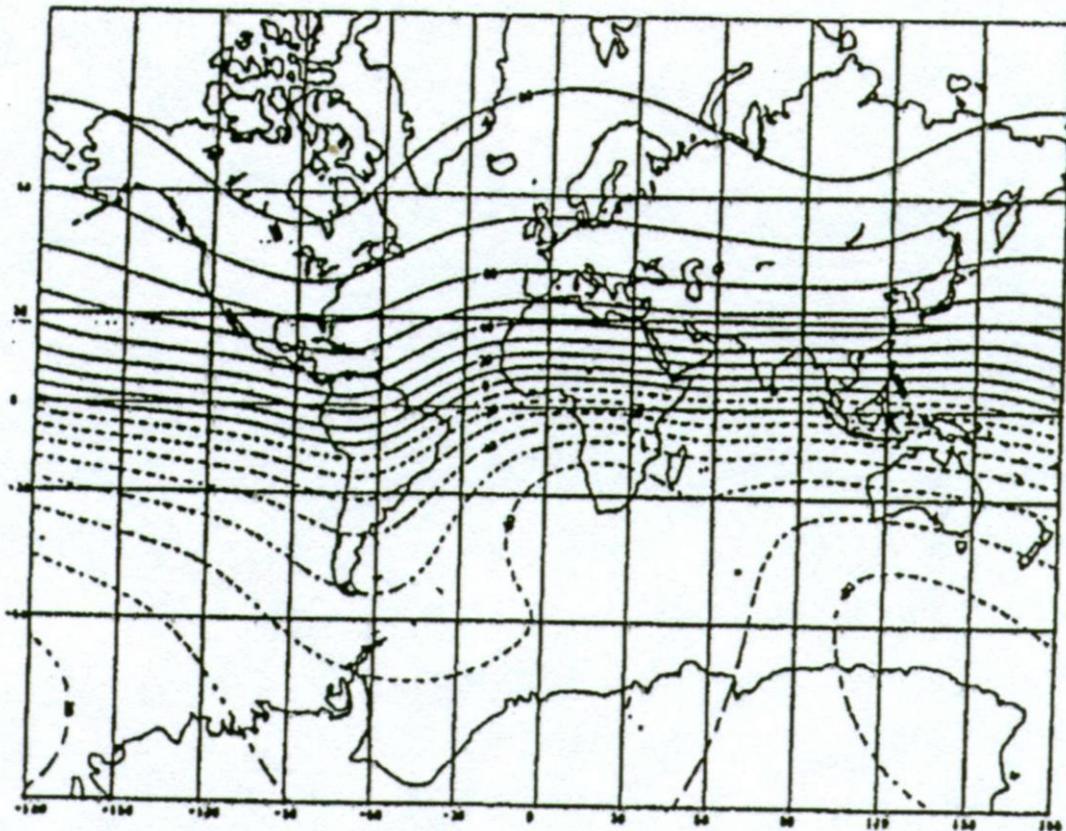


Figura 48 - Mapa global de latitudes para localidades com dip magnético constante em relação à direção horizontal.

4 - Mais orientações gerais

Até o momento a discussão levou em consideração grandes simplificações, com sinais transmitidos horizontalmente em um dos polos de mergulho da Terra e no equador geomagnético .

Para ondas polarizadas linearmente provenientes de monopolos verticais e dipolos horizontais, ficou evidente que esses sinais foram acoplados de forma eficiente na ionosfera na medida em que os campos E irradiados fossem paralelos com o campo magnético local.

Esse foi o caso para o monopolo vertical no polo de mergulho e para um dipolo horizontal orientado N-S no equador geomagnético. Entretanto, tanto para um monopolo como para um dipolo enviando sinais horizontalmente ao longo do campo na direção do equador geomagnético, o resultado é outro. Neste ponto entra em cena a polarização circular.

Agora, se voltarmos à geometria elementar, círculos e linhas retas são simplesmente variações extremas da elipse, como mostrado na **Figura 49**:

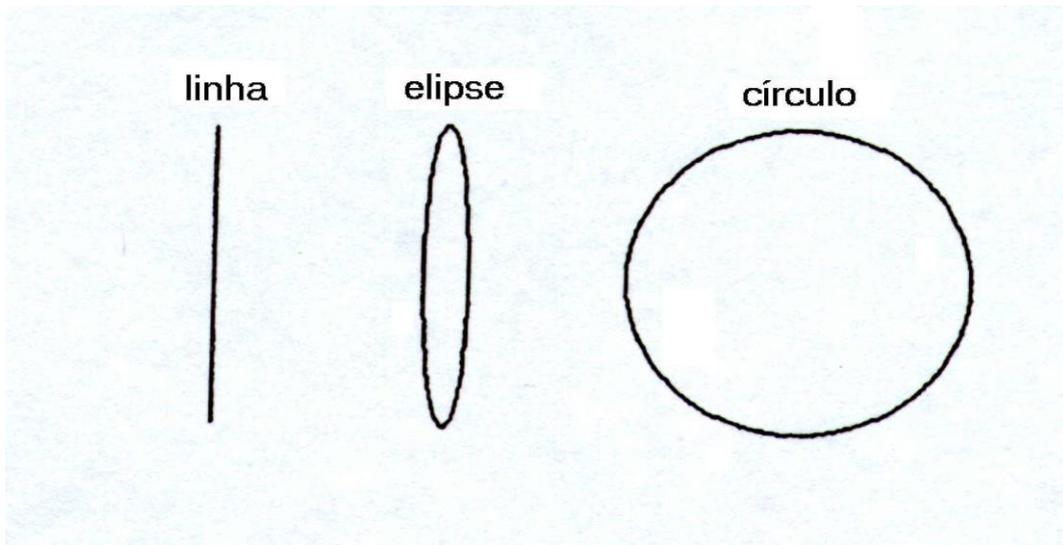


Figura 49 - Várias formas da elipse.

E da mesma forma isso ocorre com a propagação magneto-iônica; as ondas polarizadas linearmente e polarizadas circularmente são variações extremas da forma mais genérica de propagação que é suportada no campo magnético da Terra, a propagação elíptica. Resumindo: depende da direção da propagação da onda em relação ao campo magnético.

Conseqüentemente, vamos ao sistema de coordenadas mostrado na **Figura 44** para ver mais alguns casos gerais. Para um sinal polarizado linearmente seguindo na direção x, a onda propagada na ionosfera quando o campo está quase vertical ($B_1 \ll B$) agora tem alguma polarização elíptica, como mostrado na **Figura 50**.

Ao invés de ondas perpendiculares ou transversais ao campo, como em uma situação polar discutida anteriormente, esta é quase-transversa ou propagação QT, no jargão da propagação magneto-iônica.

De forma semelhante, a onda propagada quando o campo está quase horizontal ($B_t \ll B$) agora tem menos polarização circular, como ilustrado na **Figura 51**. Ao invés de ondas ao longo do campo, como no Equador Geomagnético, isso é denominado propagação quase-longitudinal ou QL.

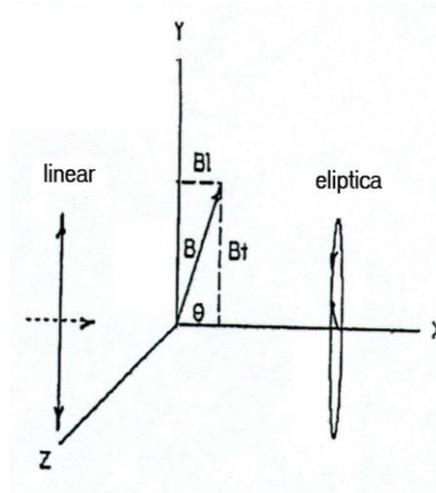


Figura 50 - Polarização elíptica derivada da propagação quase-transversa (QT) ($B_l \ll B$).

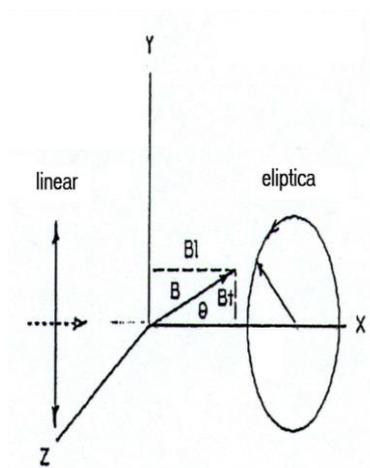


Figura 51 - Polarização próxima a circular derivada de propagação quase-longitudinal (QL) ($B_t \ll B$).

Para propagação de sinais de banda baixa entre o ponto A e o ponto B, a propagação dos sinais pode ser dividida em três partes: injetar os sinais na ionosfera no ponto A, propagação magneto-iônica na ionosfera entre A e B, em seguida, saída dos sinais da ionosfera no ponto B. A parte "de A para B" é realmente muito complicada, pois a intensidade do campo e a direção mudarão constantemente ao longo do trajeto, criando uma tarefa muito difícil o cálculo ou retraçamento dos raios mesmo para computadores. Mesmo assim isso é feito, utilizando modelos para o campo magnético (IGRF) e para a ionosfera (IRI). Dentro dos limites dos modelos, são obtidos alguns vislumbres.

Entretanto a própria teoria nos leva a algumas conclusões interessantes a respeito dos efeitos magneto-iônicos sobre a absorção e a refração. Por exemplo, a expressão teórica para a absorção, em dB por quilômetro ao longo de um trajeto, torna-se mais complicada conforme a frequência é diminuída, da faixa de HF entre 21 e 28 MHz, para a faixa de transição, entre 10 e 18 MHz e descendo para a faixa de bandas baixas, entre 1,8 e 7 MHz. Conseqüentemente, para o caso de HF ela começa como:

$$k = \text{const} * N * F_{\text{coll}} / (2 * \pi * F_{\text{rf}})^2$$

Em seguida muda para:

$$k = \text{const} * N * F_{\text{coll}} / ((2 * \pi * F_{\text{rf}})^2 + F_{\text{coll}}^2)$$

para as bandas de transição e

$$k = \text{const} * N * F_{\text{coll}} / ((2 * \pi * F_{\text{rf}} \pm 2 * \pi * F_{\text{bl}})^2 + F_{\text{coll}}^2)$$

para as bandas baixas, onde:

$$F_{\text{bl}} = F_{\text{b}} * \cos(x) = (e * B/m) * \cos(x)$$

sendo F_{b} a frequência giro do elétron ao redor do campo magnético.

Esse movimento ao redor da linha do campo foi anteriormente citada, apenas para indicar que o campo geomagnético pode cumprir algum papel na propagação. No entanto agora fica evidente que ocupa um papel importante, como sendo um "fator de ressonância" na absorção, da mesma forma que circuitos LCR:

$$((2 * \pi * F_{\text{rf}} \pm 2 * \pi * F_{\text{bl}})^2 + F_{\text{coll}}^2)$$

com o sinal "+" para as ondas O e com o sinal "-" para as ondas X. Portanto, para uma determinada direção relativa ao campo, a absorção magneto-iônica difere de acordo com o modo, com absorção muito maior para o modo X, com o sinal "-", do que para o modo O, com o sinal "+". Isso é visto a seguir na taxa de absorção X/O mostrada na **Figura 52**:

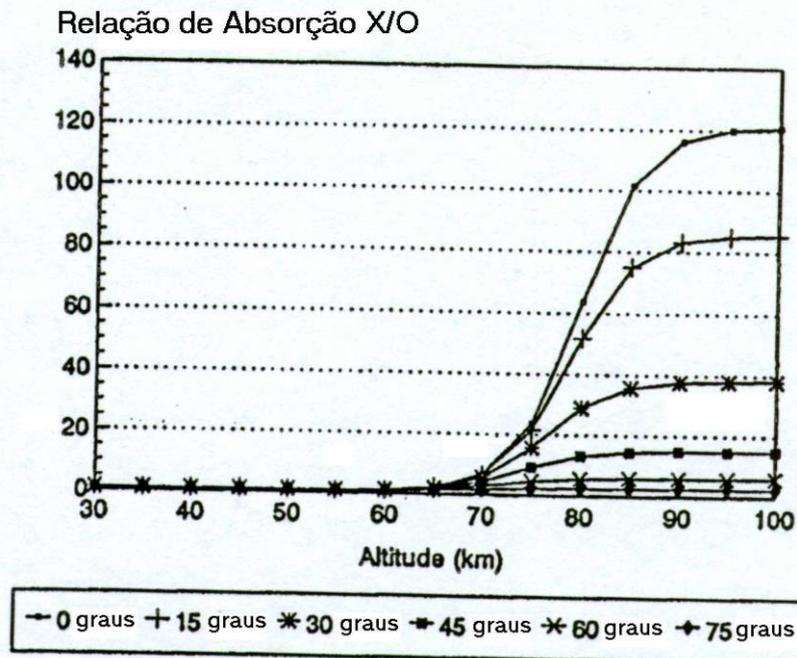


Figura 52 - Taxa de absorção Extraordinária e Ordinária em dB/km em função do ângulo entre a direção da propagação e o campo magnético.

Essa figura é baseada em radiofrequência de 1,8 MHz, usando 1,5 MHz como giro frequência e usando o perfil da frequência de colisão do período noturno mostrado na **Figura 13**. Os ângulos são para a direção da propagação relativa à direção do campo. Desse modo, 0 (zero) graus é para propagação longitudinal ao longo das linhas do campo, assim como para baixos ângulos no equador geomagnético, e ângulos altos vão em direção a 90 graus e propagação transversa, como com uma antena vertical nos polos magnéticos.

Nesse ângulo, o campo E da onda está paralelo ao campo magnético e as movimentações e absorções dos elétrons são como se o campo não estivesse lá, com uma taxa X/O de uma unidade.

A grande proporção X/O em outros ângulos resulta da parte da diferença do denominador e tem o maior efeito nas localidades com intensidades de campo como Boulder, (54.370 nT) que serviu como referência. O mapa global da intensidade magnética na **Figura 53** pode ajudar a esse respeito:

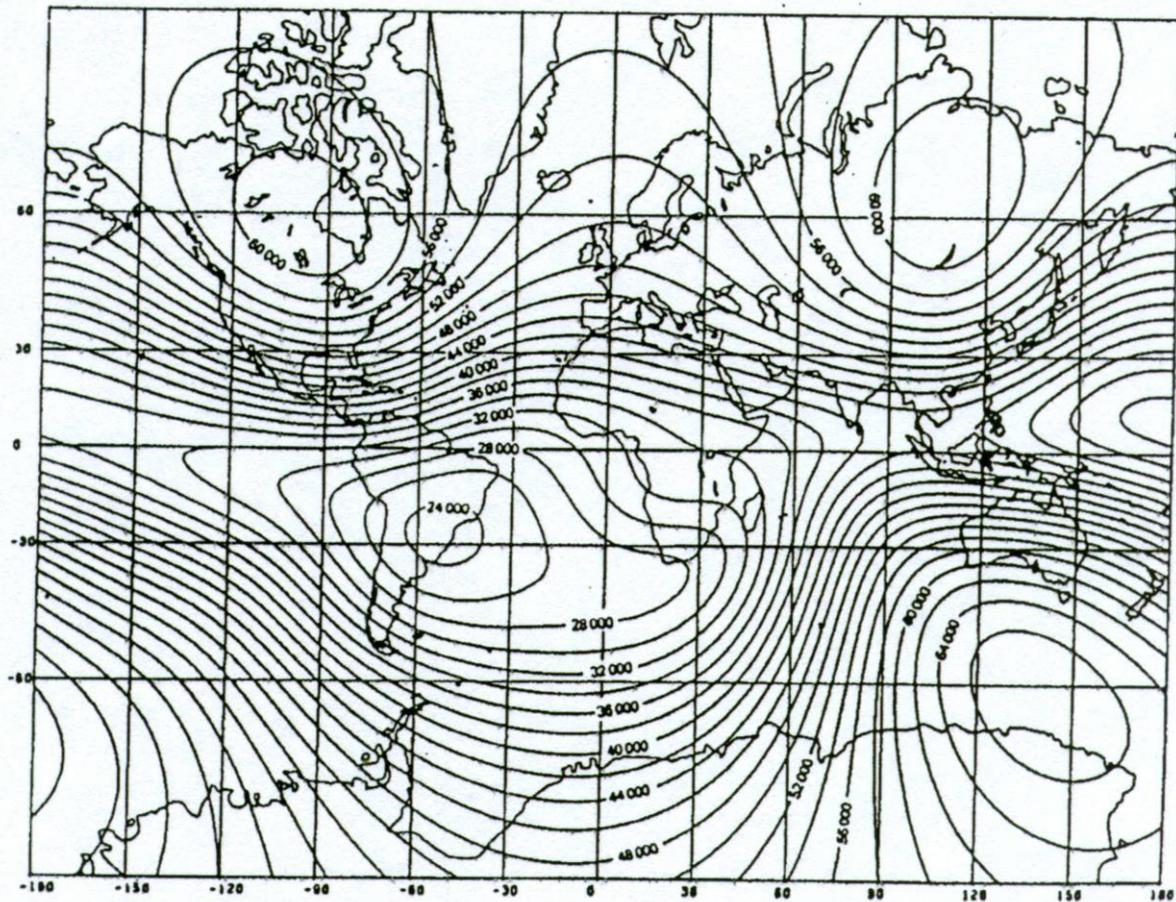
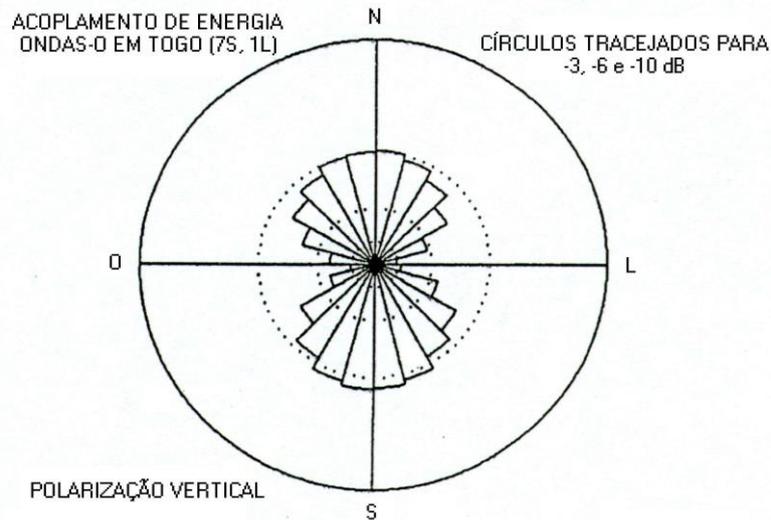


Figura 53 - Mapa global da intensidade do campo magnético (em Nano Teslas - nT).

Por outro lado, a relação X/O em baixas latitudes seria menor em locais na anomalia magnética existente na região do Atlântico Sul, vista claramente nesta figura. De qualquer forma, a alta relação X/O nos 1,8 MHz indica uma rápida perda de propagação no modo X e para contatos DX de longa distância, a potência irradiada no modo X é perdida tão rapidamente até o ponto de não ser eficaz para se conseguir contatos Dx.

Finalmente, os efeitos magneto-iônicos são menores nas frequências maiores do que a frequência do elétron. Desse modo, a relação X/O para propagação longitudinal (0 graus) em 3,5 MHz é 6,25 e 2,40 em 7,0 MHz, respectivamente, em contraste com o valor de 100 em 1,8 MHz.

Um outro exemplo de interesse (Brown, 1998) é para a latitude de Togo (7S, 1L), onde o campo da Terra é quase horizontal na direção N-S. Com uma antena vertical, deverá ser esperada uma grande perda de inserção para as ondas O na direção L-O, como discutido anteriormente. Além disso, na direção N-S, a energia no modo X é eventualmente perdida ou dissipada pela absorção e o



acoplamento de energia é 3 dB abaixo naquela direção, como mostrado na **Figura 55**:

Figura 55 - Acoplamento de energia para uma antena vertical em Togo (&S, 1L)

No entanto, para um dipolo horizontal elevado, na direção N-S, deverá acoplar-se com eficiência na ionosfera naquela latitude baixa e um alto acoplamento de energia para propagação L-O com um dipolo horizontal é mostrado a seguir na **Figura 56**:

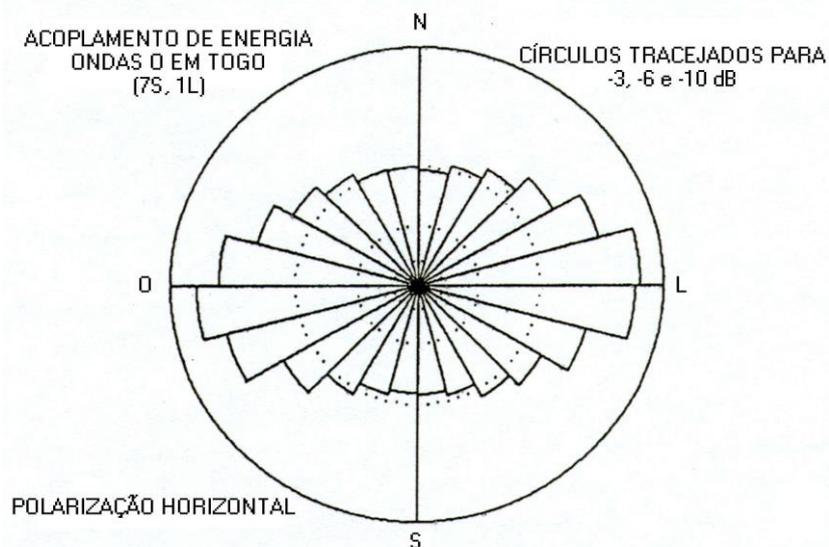


Figura 56 - Acoplamento de energia para diferentes orientações de um dipolo.

6 - Plotagem de raios magneto-iônicos

A plotagem de raios fica mais complexa conforme aumenta o número de características de um modelo ionosférico. Desse modo, a plotagem de raios é bidimensional enquanto a densidade dos elétrons é o único fator, variando em um plano, como mostrado na **Figura 57**:

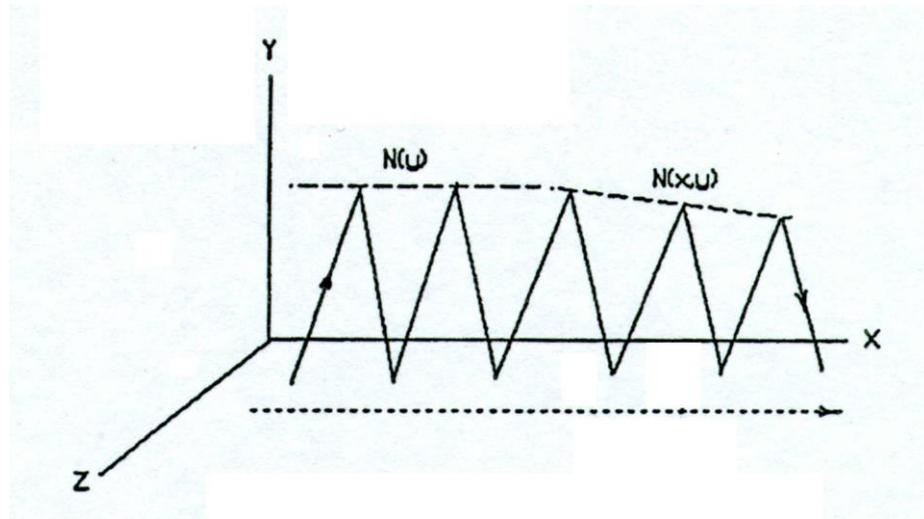


Figura 57 - O efeito de diferentes contornos de densidade dos elétrons.

Nesta figura, o contorno da densidade dos elétrons tendo uma frequência de plasma igual à EVF do trajeto é horizontal quando a densidade varia apenas com a altura, $N(y)$, no entanto é mostrada inclinando-se para baixo quando ela varia com a altura e distância ao longo do trajeto $N(x, y)$. Isso afeta o comprimento dos saltos e os ângulos de recepção ao longo do caminho.

Se a densidade dos elétrons varia para fora do plano, $N(x, y, z)$, como foi o caso nas Figuras 35 e 36, então os traçados dos raios se tornam um traçado em três dimensões e dependem muito mais da natureza e extensão do gradiente transverso na densidade dos elétrons. Algumas estruturas ionosféricas são bem extensas e contínuas no espaço e no tempo, como com um forte gradiente ao longo do terminador, que é a linha divisória entre o dia e a noite (Zona Cinza). Outros podem ser resumidos e altamente variáveis, como a ionização nas auroras boreais/austrais.

Conforme comentado anteriormente, a refração da onda depende das características do índice de ondas da refração. A plotagem de raios envolveu a determinação do caminho dos raios, normal com a frente de onda, e é um problema matemático muito semelhante à dinâmica das partículas, semelhante ao movimento de uma espaçonave.

Portanto, as equações de movimento (Budden, 1966) para o raio parecem-se com aquela das partículas e são resolvidas numericamente, passo a passo, através da ionosfera, usando as reflexões do raio resultante da variação espacial do índice de refração.

O índice de refração (Davies, 1989) torna-se mais envolvido, exatamente como o coeficiente de absorção anteriormente citado, na medida em que a frequência é baixada da faixa de HF para as bandas baixas. Nas frequências das bandas baixas, a força magnética dos elétrons ionosféricos não está sempre no plano do caminho do raio, significando que o caminho do raio estará em três dimensões devido àquele efeito magneto-iônico. Entretanto, ao contrário do gradiente de densidade do elétron transversal responsável pela refração mostrada nas **Figuras 35 e 36**, a força magnética nos elétrons é relativamente constante e de ampla abrangência, como a extensão do campo magnético. Como resultado, quando os efeitos magneto-iônicos estão incluídos nos programas de plotagem de raios como PropLab, sua extensão espacial pode ser bem grande.

Isso pode ser visto nas Figuras 58 e 59, as plotagens de raios em 3D para o trajeto entre Tóquio e Seattle em 1,8 MHz. A **Figura 58** é para uma condição "sem campo" no programa de plotagem de raios (PropLab) e mostra seis saltos na região F inferior.

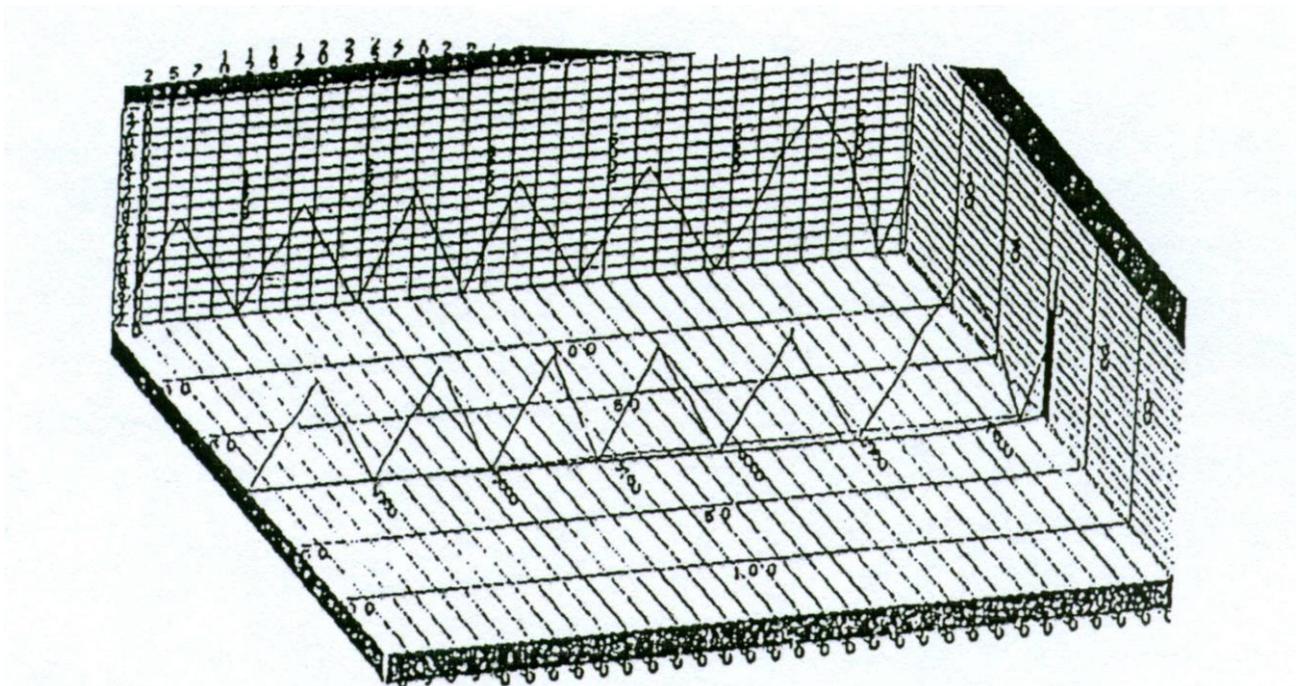


Figura 58 - Plotagem de raios entre Tóquio e Seattle para uma condição "sem campo".

A **Figura 59** é exatamente para o mesmo trajeto e condições, porém foi preparado em uma condição "com campo":

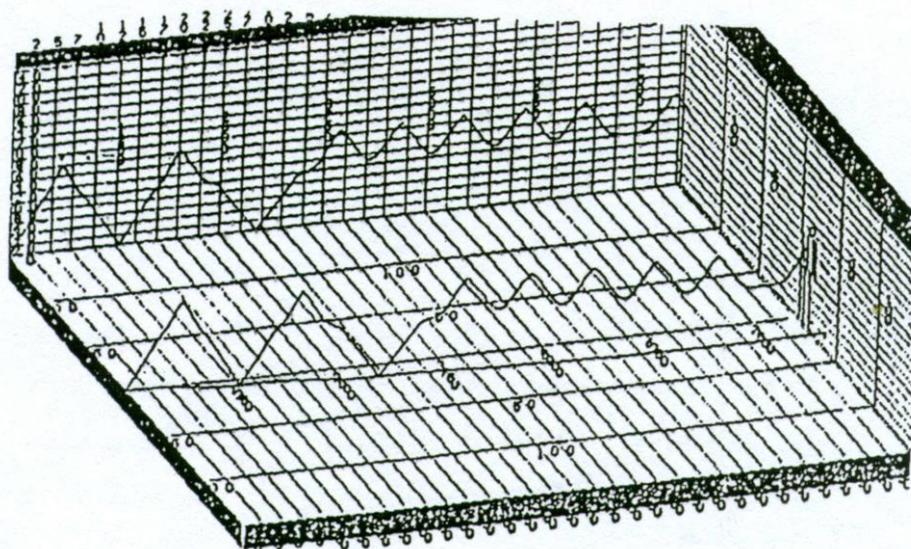


Figura 59 - Plotagem de raios entre Tóquio e Seattle para uma condição "com campo", mostrando dois saltos F seguidos pela súbita emergência de ducto. Esse é uma importante condição para propagação magneto-iônica pois ele aponta para um meio eficiente de propagação, sem perdas devido a reflexões intermediárias do solo ou trânsitos na região D.

Essas figuras tem distâncias marcadas horizontalmente, com intervalos de 2.500 km, e lateralmente, com divisões de 50 km. Observe o traço sobre a superfície da terra; para o caso "sem campo", existe um ligeiro desvio ou inclinação lateral, para longe da maior ionização no Oeste devido ao efeitos da fraca luz solar logo após o amanhecer. Entretanto, no caso "com campo", existe uma desvio algo maior para o Leste, devido aos efeitos do campo da Terra.

Atualmente as instalações amadoras de rádio para a banda de 1,8 MHz não dispõem de antenas suficientes para observar ou medir os efeitos derivados da polarização elíptica devido ao campo da Terra. Desse modo, obtemos informações sobre os efeitos provenientes de outras direções, indiretamente pois também envolvem outros serviços ou simplesmente de forma teórica na origem.

Um bom exemplo de "outros serviços" vem da monitoração de estações de radiodifusão. Neste aspecto, o amador Nick Hall-Patch, VE7DXR, usou sinais da uma estação de Ondas Médias da Coreia (Hall-Patch, 2000) para estudar os reforços do amanhecer nos sinais de bandas baixas. Esse efeito envolveu aumentos na intensidade do sinal logo antes do amanhecer em um caminho Oeste --> Leste.

Este é o momento em que deveria ocorrer uma forte DIMINUIÇÃO na intensidade do sinal, que seria esperada devido à subida do Sol, no entanto foi observado um AUMENTO no sinal, com grande regularidade, como mostrado na **Figura 60**:

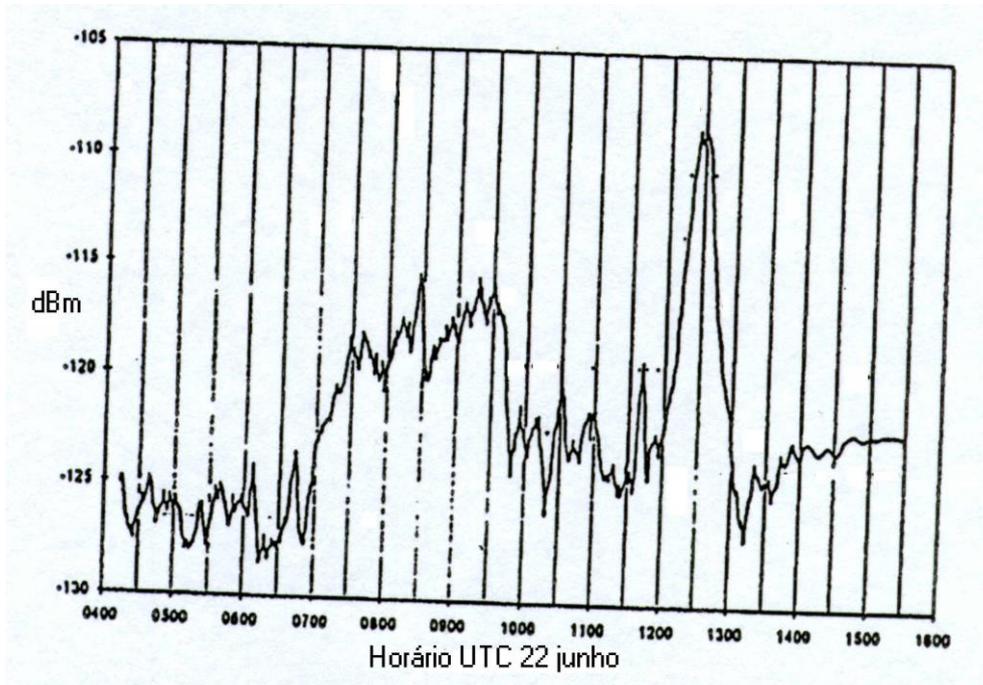


Figura 60 - Aumento da intensidade dos sinais da emissor coreana HLZ, em 1613 kHz, ao amanhecer às 1230 UTC do dia 22 de junho de 1997.

A explicação é que parte do sinal proveniente do transmissor foi conduzida por um duto no início, abandonando os saltos entre a Terra e a Ionosfera, para proporcionar o sinal inicial no receptor. Entretanto, no amanhecer, a ionosfera sobre o receptor está inclinada para baixo durante a subida do Sol e envia o sinal conduzido pelo duto para baixo, somando-o à intensidade proveniente dos saltos entre Terra e Ionosfera.

Outra forma de reforço ao amanhecer está confinado principalmente na região próxima ao transmissor (Kavanagh et al, 2002), devido ao breve duto ionosférico ou aos saltos E-F longos nesse local. Isso foi demonstrado como sendo o caso, pois o aumento na intensidade do sinal foi observado simultaneamente nos caminhos para locais amplamente espaçados, como Ottawa e Victoria, no amanhecer próximo ao transmissor. O registro do sinal de Victoria, ilustrado a seguir na **Figura 61**, é quase idêntico ao traço observado em Ottawa, quase 3.000 km distante:

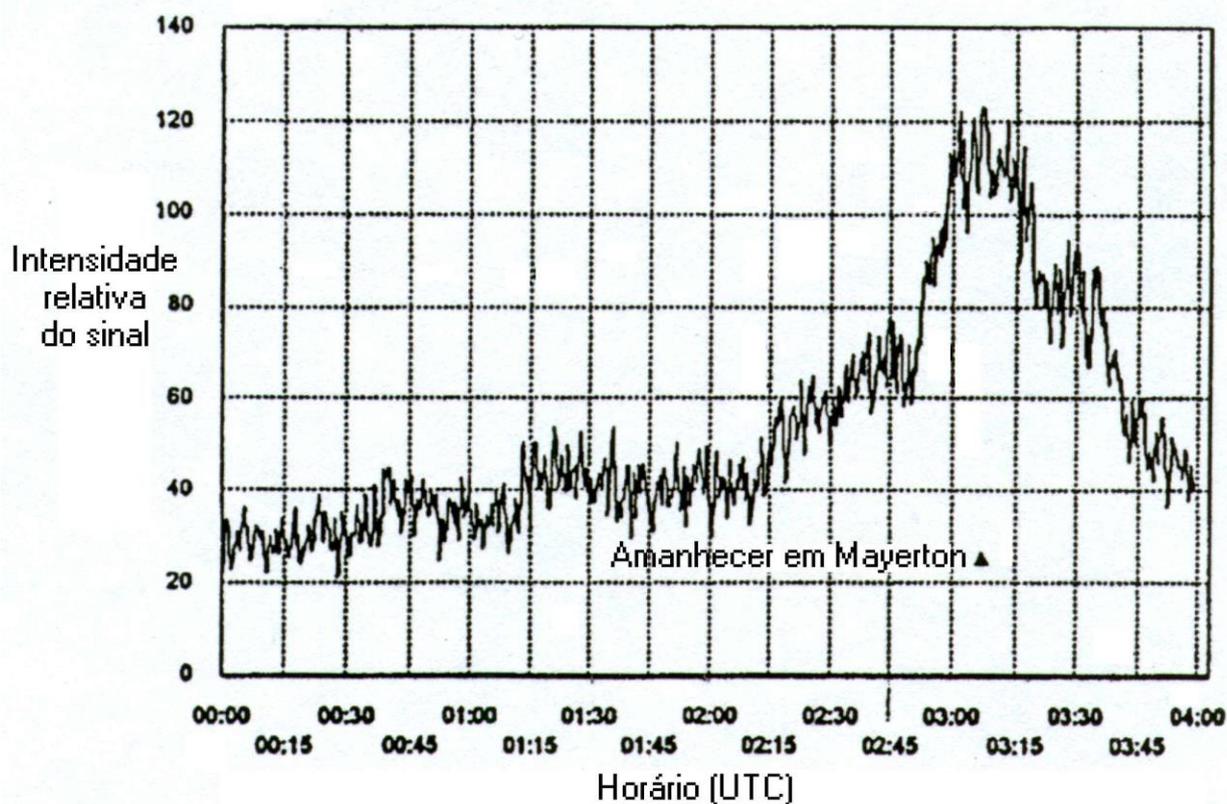


Figura 61 - Reforço do amanhecer de estação Sul-africana em 3.32 MHz às 0312 UTC de 5 de dezembro de 2011.

O caminho mostrado na **Figura 59** mostra uma "conversão de modo", no jargão do VLF, onde saltos entre Terra e ionosfera se transformam em saltos conduzidos por dutos.

Considerando que o efeito duto é mais eficiente do que os saltos resultantes de reflexões no solo, a conversão de modo adiciona um elemento de ambiguidade quando se trata de interpretar contatos DX.

Pegue um contato feito por VK6HD no Oeste da Austrália, com VP9AD, nas Bermudas. Qual(quais) modo(s) está(ão) envolvido(s) nesse caminho de mais de 19.000 km? Esse contato ocorreu em janeiro de 1996, próximo ao mínimo do ciclo solar e, quando os parâmetros de entrada foram ajustados apropriadamente para o programa PropLab, o caminho de ângulo baixo demonstrou ter começado e terminado com saltos E, no entanto foi dividido quase igualmente com 9.000 km de saltos entre Terra e ionosfera e 9.000 km através de dutos, como mostrado na **Figura 62**.

Além de exibir uma possível estrutura de salto para esse contato, o programa PropLab calcula a absorção ionosférica ao longo do caminho. Isso é exibido na **Figura 63**, com efeitos dos saltos E no início e no final do caminho, porém a absorção que é em geral linear durante a porção terra-ionosfera, 5,6 dB / 1.000 km e durante a porção através de duto, de 2.0 dB / 1.000 km.

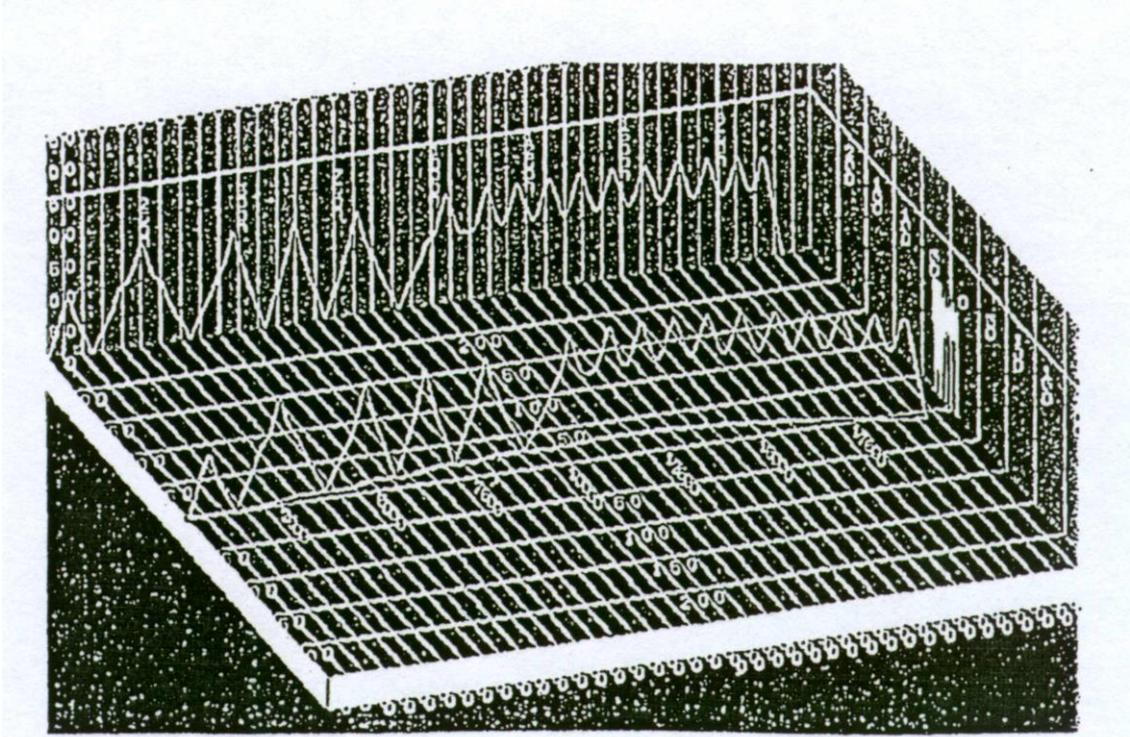


Figura 62 - Plotagem de raios do contato entre VK6HD e VP9AD em 1,8 MHz.

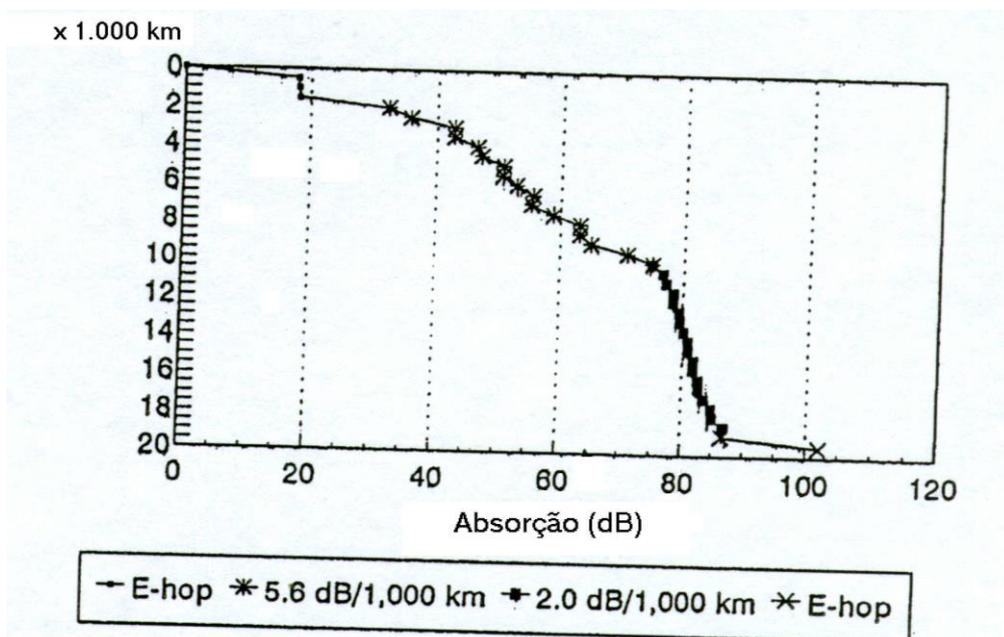


Figura 63 - Absorção do sinal para o contato entre VK6HD e VP9AD.

O programa PropLab é muito útil, digamos para estimar as taxas de absorção do sinal como mostrado acima, e teve seu início com o trabalho de cientistas no Laboratório de Propagação Central Radio (CRPL) em Boulder, Colorado, em meados dos anos 70.

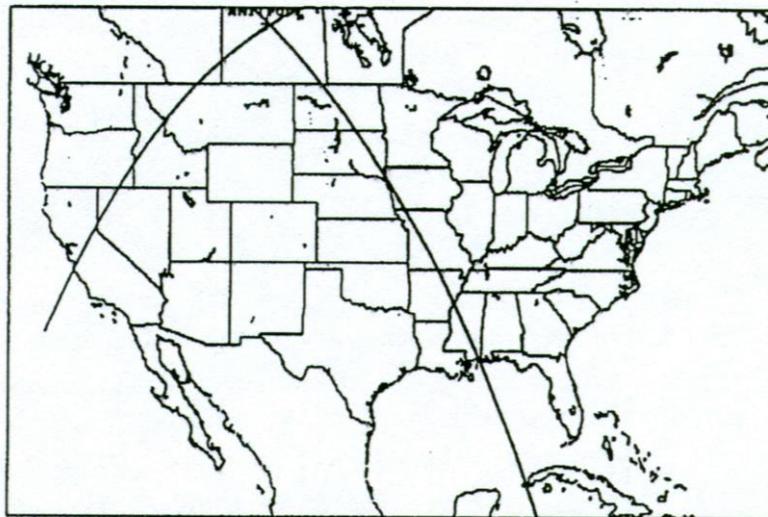
Como o IONCAP, ele teve seu tamanho reduzido, do uso em mainframes para se adaptar aos computadores de mesa. No entanto, dada a limitação determinada pela variabilidade ionosférica, qualquer resultado dele proveniente deverá ser considerado com interesse, porém sempre com cuidado.

Em termos simples, os modelos ionosféricos são médias, no melhor dos casos, e podem variar entre 20 e 40 %. Os modelos do campo magnético também são médias, mas também representam "combinações" para modelos específicos e sistemas coordenados. Portanto, *x*, o *dx man* das bandas baixas deverá entender que, mesmo os melhores modelos de programas de propagação e auxílios como PropLab utilizam dados médios e todos os resultados calculados deverão ser vistos nesse enfoque, sujeito a variações sobre essa média.

De maior importância são as observações bem documentadas, sendo bons exemplos o cuidadoso trabalho de VE7DXR e VE3OSZ sobre os reforços do amanhecer. A isso deverão ser adicionados os registros de curto prazo de numerosas expedições de DX com uma determinada estação, completada com resumos das condições geofísicas naqueles momentos.

Devido ao intenso e global interesse na expedição de DX VK0IR na Ilha Heard, foram revelados interessantes aspectos da propagação nas bandas baixas a partir dos contatos, tanto feitos como não feitos, com VK0IR.

Desse modo, o marcante papel da absorção ficou demonstrado pela completa falta de contatos em 1,8 MHz com operadores localizados em uma "região morta" que cobriu cerca de 40 % dos



EUA durante as horas sob a luz do Sol na Ilha Heard, mostrada na **Figura 64**:

Figura 64 - Zona morta para sinais de VK0IR em 1,8 MHz

A propagação para essa região começou a abrir para os operadores de 3,5 MHz e abriu completamente para 7 MHz, devido ao decréscimo da absorção com o aumento da frequência.

Uma demonstração semelhante do poder da absorção é mostrada no fenômeno das bandas baixas da alternância de caminho equinocial em 1,8 MHz (Ireland et al, 2002), quando a luz do Sol alcança uma calota polar e absorve os sinais, sendo o caminho operacional alterna para a outra calota polar no momento do equinócio. Essa foi determinada como a causa para as localidades que diferem 180 graus em longitude, como VK6HD, no Oeste da Austrália e VE1ZZ na Nova Escócia. Um grande número de contatos ao longo de 20 anos demonstrou que o caminho passava por cima da calota polar do norte entre setembro e março, em seguida, via *short path*, alterna por sobre a calota polar sul entre março e setembro, desta vez via *long path*.

Capítulo VI - DISTÚRBIOS

1 - Ionosfera em dia quieto

A propagação nas bandas baixas é melhor nos momentos quietos da noite durante condições de mínimo solar. Nesse momento, as fontes de ionização são suficientes, porém fracas e em geral estáveis ao longo do tempo - o EUV estelar e os raios X, os raios cósmicos galácticos e o EUV solar são espalhados para dentro do hemisfério no escuro, pela alta atmosfera, a **geo corona**. As exceções são raras, tais como súbitas e intensas erupções de raios gama provenientes de objetos estelares, um "*magnetar*" (Inan, comunicação pessoal), que produziu um súbito evento de absorção em diversos circuitos de VLF em meados de 1998.

O fluxo de fundo de raios cósmicos galácticos é modulado para baixo em reduzido percentual devido à atividade solar, desse modo efetivamente ajudando as condições de propagação nas bandas baixas. Além disso, há momentos em que uma forte atividade solar durante a qual as estruturas magnéticas originadas no Sol podem varrer a Terra de passagem, defletindo os raios cósmicos galácticos da órbita da Terra; esses efeitos variam lentamente, durando cerca de 10 dias e podendo atingir o nível de 10 a 15 % (Brown, 1957). Além disso, labaredas solares enviam ondas de choque através do campo interplanetário, que podem produzir efeitos semelhantes a um súbito início, denominado decréscimo de Forbush, uma diminuição na intensidade dos raios cósmicos durante alguns dias.

Essas fontes de ionização no hemisfério escuro atingem a parte inferior da ionosfera; a fonte da ionização para a alta ionosfera é o Sol, recombinando lentamente a ionização remanescente quando o EUV e os raios X provenientes das regiões ativas desaparecem após o pôr do Sol. Como é bem sabido, as regiões ativas vão e vêm com a atividade solar, portanto influenciam o nível de ionização durante o período noturno dessa forma. A esse respeito, o efeito mais importante na atividade solar é o preenchimento do "vale noturno" acima da região E com alguma ionização, como mostrado na **Figura 1**. De fato, isso reduz a probabilidade de duto dos sinais nessa região.

2 - Distúrbios ionosféricos

Os distúrbios da propagação nas bandas baixas devido ao Sol poderão surgir de súbito devido a fótons de raios X provenientes das labaredas solares ou partículas solares de alta energia originárias de súbitas erupções ou, atrasadas em sua chegada, as tempestades magnéticas e auroras resultantes das ejeções de massa coronal (CME). Essas últimas podem levar um dia ou mais antes de começar a afetar a Terra devido ao longo tempo necessário para viajar do Sol à Terra, movidas pelo vento solar. Por outro lado, as partículas de raios X e de alta energia viajam com a velocidade da luz, ou próximo dela, dando origem aos efeitos na intensidade do sinal minutos após sua ocorrência no Sol.

Além de seus outros papéis na propagação das bandas baixas, o campo geomagnético representa papel importante ao defletir da Terra e do hemisfério escuro alguns raios cósmicos solares.

Em qualquer evento, os raios cósmicos solares, acelerados no Sol no curso de uma labareda solar, representam diversos fatores de distúrbio para a propagação nas bandas baixas. Essas partículas, massivas quando comparadas com os elétrons responsáveis pela aurora, depositam sua ionização profundamente na ionosfera, resultando em grandes efeitos de absorção. Caso o espectro de partículas sejam conhecidos, poderão ser feitos cálculos usando a perda de energia devida à absorção ao longo de suas trajetórias, para determinar a densidade dos elétrons resultante e a absorção ionosférica.

Normalmente não existe tanta informação; ao invés disso, uma estimativa da absorção poderá estar disponível em alguma estação polar. Normalmente os eventos de prótons solares cobrem as calotas polares, portanto os dados, digamos da estação Científica McMurdo na Antártica, poderão ser usados para determinar os efeitos nos sinais das bandas baixas através de qualquer uma das calotas polares.

3 - Eventos de prótons solares

Como exemplo, foi reportado um evento de prótons solares (Rosenberg, comunicação particular) na Estação Científica McMurdo na Antártica em janeiro de 2002. Os prótons solares têm acesso total a McMurdo ao mergulhar abruptamente com as linhas de força magnéticas.

O fluxo de prótons superior a 10 MeV no satélite da NOAA atingiu o pico ao redor de 90 p.f.u. (unidades de fluxo de prótons) entre as 00 e 06 h UTC do dia 10 de janeiro de 2002, e os dados mostraram que o ruído rádio galáctico em 30 MHz foi atenuado de 1,3 dB continuamente através da ionosfera.

Isso ocorreu devido à ionização produzida pelos prótons solares na região D. No entanto, para propagação oblíqua de sinais através da calota polar, isso deverá ser aumentado por um fator ao redor de 3, para levar em conta a maior intensidade de ionização que foi encontrada por sinais em um caminho inclinado, e por outro fator de 2 para um salto completo. Finalmente, uma vez que a absorção varia, grosso modo, segundo o quadrado do comprimento de onda, existe um outro fator de 256 para colocar o cálculo para baixo, da banda de 10 metros para a de 160 metros. Isso resulta em um total ao redor de 2.000 dB, um enorme efeito de absorção.

Esse cálculo foi para a Estação Científica McMurdo na Antártica, uma localidade onde a ionosfera fica totalmente iluminada no mês de janeiro. Por outro lado, para o Polo Norte e outras latitudes polares onde os sinais de 160 metros podem atravessar durante a escuridão, o efeito total da absorção é menor em um fator de 4 a 5, porque alguns elétrons ionosféricos podem ficar agregados às moléculas para formar íons negativos e esses, sendo tão pesados, são removidos do processo de absorção. Seja isso como for, pode-se ver que mesmo um pequeno fluxo de prótons solares ainda conseguirá produzir enormes efeitos de absorção.

Além da ionização direta resultante dos prótons solares sobre a atmosfera, existe também um efeito secundário, as reações nucleares na atmosfera (Bhavsar, 1962), que se soma à ionização afetando os sinais das bandas baixas.

As reações nucleares dos prótons solares energéticos com núcleos N e O produzem raios gama nucleares MeV que penetram muito mais profundamente e ionizam mais para baixo, onde a frequência das colisões neutras é bem alta. Essas mesmas reações são consideradas um risco para a aviação comercial em grandes altitudes, como nos voos polares do Concorde através do Oceano Atlântico.

A passagem de partículas carregadas através da atmosfera dá origem não apenas à ionização e absorção da atmosfera, mas também à excitação dos átomos e moléculas, resultando em emissões ópticas.

As emissões provenientes dos eventos de prótons solares, a aurora boreal polar, são muito fracas quando comparadas às [emissões] provenientes de eventos da aurora observados apenas em localidades remotas, como a Antártica, que estão bem distantes das luzes da civilização. E tem sido observados durante o Ciclo 19 por Sandford (1961, 1962) nas emissões de nitrogênio molecular ionizado do tipo 3914A, sendo que a aurora boreal foi considerada como se comportando, em tempo e extensão, como absorção da calota polar devido aos prótons.

Entretanto, cálculos teóricos das taxas de emissão proveniente do espectro de prótons (Brown, 1964) carecem de observações pelo menos de uma ordem de magnitude. Isso foi aceito no tempo em que existiam incertezas, tanto nas calibrações ópticas como nos coeficientes da taxa ionosférica usados nos cálculos. Com o final do Ciclo 19, eventos de prótons muito intensos se tornaram raros e o interesse na aurora boreal essencialmente terminou.

Finalmente, a duração dos eventos de prótons solares terá de ser mencionado para indicar a extensão em que os sinais horários são interrompidos nas bandas baixas devido à absorção resultante. Esses eventos podem surgir subitamente, como visto no registro de um evento impulsivo que foi observado pelo satélite GEOS 8, veja a **Figura 65**:

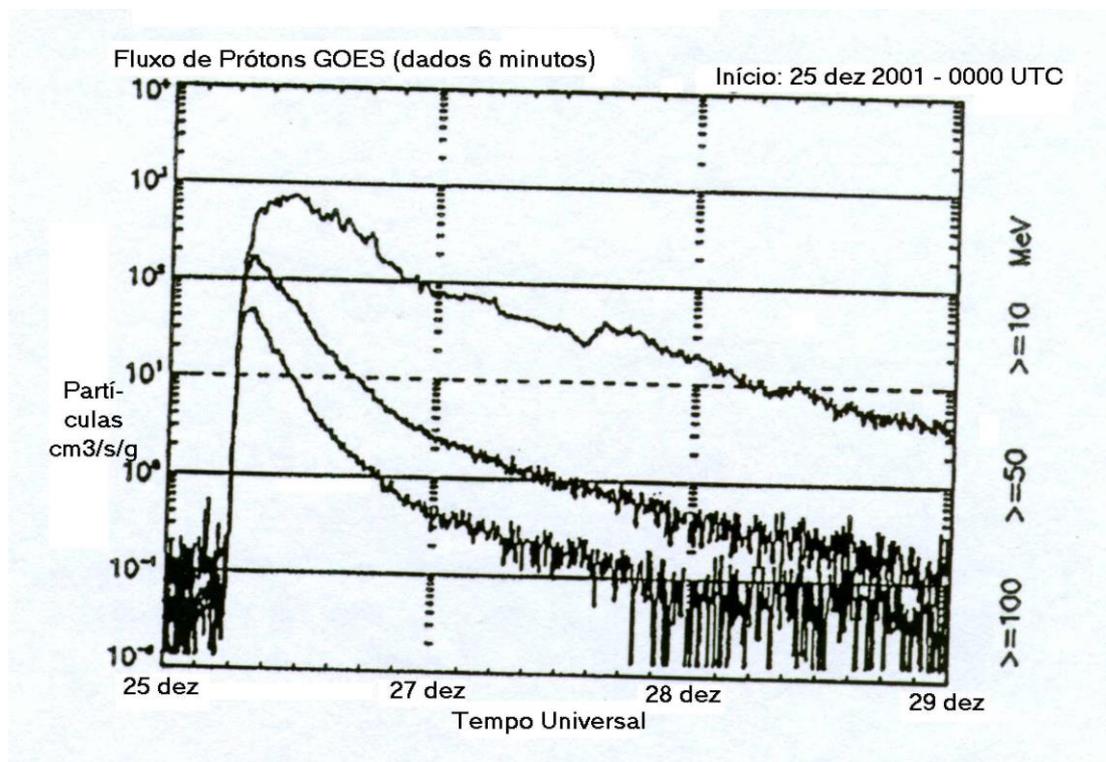


Figura 65 - Os fluxos de partículas em um evento de prótons impulsivos.

Esse evento ilustra um rápido surgimento de prótons de todas as energias, de mais de 10 MeV a até mais de 100 MeV, indicando uma súbita aceleração no processo de labareda. Entretanto, sua duração é devido, em parte, à difusão de partículas nos campos no Sol e também no campo interplanetário, com a difusão de prótons de maior energia para longe mais rapidamente do que os prótons de baixa energia, como esperado.

Como forma de contraste, observe os fluxos de prótons de subida mais lenta na **Figura 66**; esses, levam um dia para atingir intensidade total. Esses são eventos típicos de prótons no hemisfério leste do Sol, e os prótons levam horas para se difundir através do campo interplanetário antes de escapar para as bordas distantes do sistema solar:

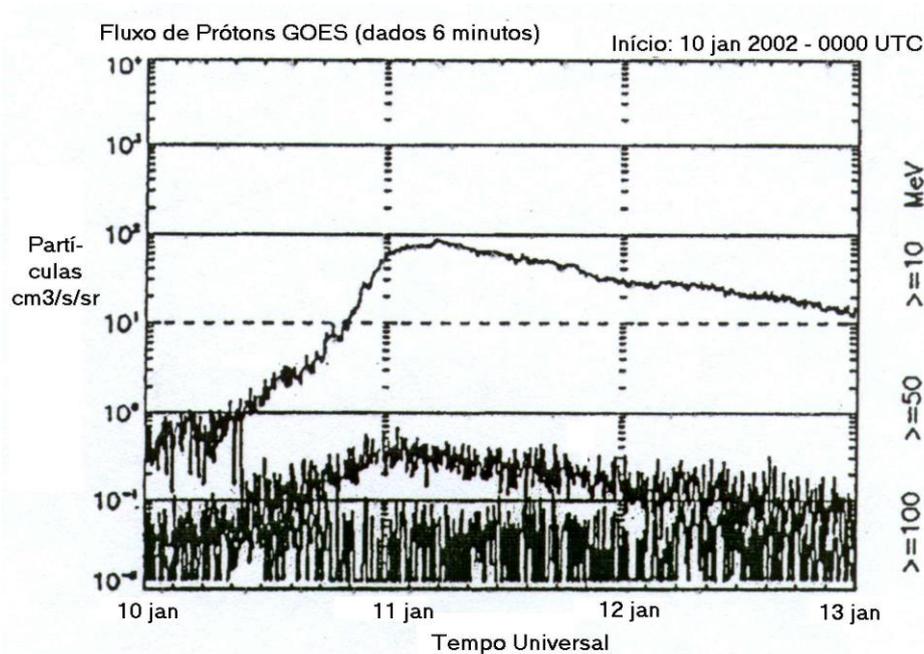


Figura 66 - Os fluxos de partículas em um evento de prótons graduais.

Estas figuras mostram o fluxo de prótons, conforme registrados por um satélite a grande altitude. No entanto, o *dx man* das bandas baixas está lidando com seus efeitos ionosféricos; como ficam estas figuras quando os prótons solares encontram a ionosfera? Um bom exemplo é encontrado no registro entre os dias 22 e 25 de agosto de 1958, um dos eventos durante o Ciclo solar 19, mostrado a seguir na **Figura 67**:

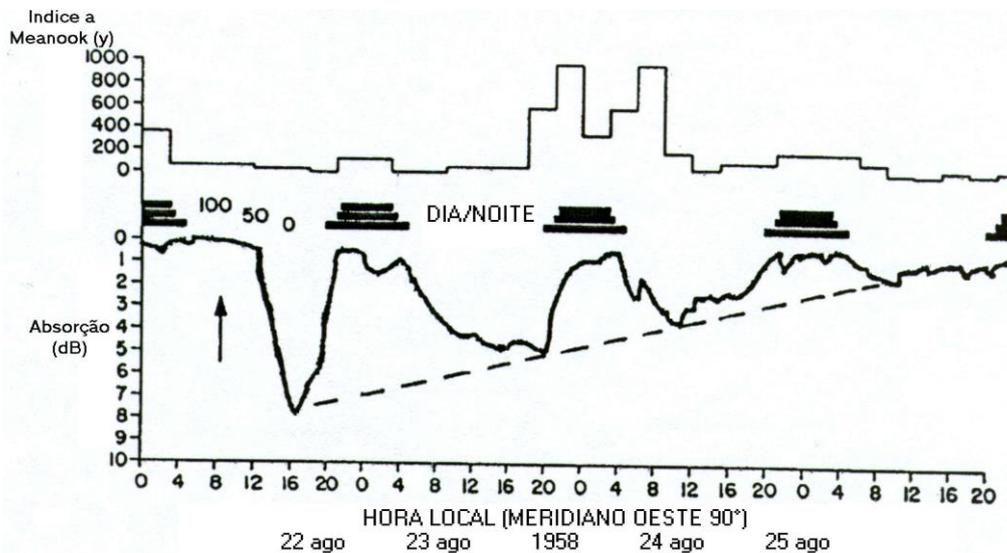


Figura 67 - Absorção ionosférica (abaixo) em um evento de prótons.

Esse evento teve lugar durante o dia, ao redor das 08 hora local (LT) na cidade de Churchill, Canadá (59N, 94O); a absorção ionosférica começou às 12 hora local e teve seu pico com cerca de 8 dB em 30 MHz às 16 hora local. Depois disso, o fluxo de prótons declinou, como mostrado na **Figura 65**, no entanto a curva de absorção mostrou fortes recuperações durante o período noturno. Esses horários são mostrados pelas barras horizontais na cor preta representando a escuridão no nível do solo, a 50 km e a 100 km. A redução na absorção é devida à formação de íons negativos na região D, conforme anteriormente mencionado em conexão com o cálculo baseado nos dados de McMurdo para janeiro de 2002.

É mostrado no topo da figura a atividade magnética horizontal que teve lugar, com um forte distúrbio começando ao redor das 18 hora local do dia 23 de agosto, cerca de 34 horas depois da labareda que provavelmente iniciou o evento. Isso é relativamente comum para eventos de fortes labaredas e a noite entre os dias 23 e 24 de agosto provavelmente apresentava brilhante aurora boreal e intensas e rápidas variações na absorção ionosférica resultantes dos elétrons energéticos precipitando-se na ionosfera. Os registros da absorção para os eventos de prótons solares foram obtidos através de riômetros (medidores de opacidade ionosférica relativa), compostos por receptores de rádio de 30 MHz com antenas Yagi de 3 elementos apontadas para cima, seja verticalmente ou ao longo do eixo de rotação da Terra. Esses registros, feitos tanto em dias quietos como naqueles com altos níveis de ruído de raios cósmicos, são usados para determinar a quantidade da absorção produzida pela ionização.

Entretanto, a Riometria encaminhou-se para outras direções, com painéis de antenas compostos por até 8x8 antenas Turnstile apontadas para cima em diversas localidades no Ártico e na Antártida. Os registros obtidos com essas antenas exibem o que se passa no espaço acima, os prótons solares ou a aurora em sua origem. Com os sistemas de múltiplas antenas, torna-se possível visualizar a estrutura da ionização, apesar de que apenas com uma resolução espacial sem muita precisão. A esperança é combinar registros de múltiplos riômetros com aqueles de muitos fotômetros com múltiplos feixes que monitoram a mesma região. do mais tarde, em conexão com a estrutura espacial das regiões de absorção da aurora. Entretanto, nos dias de hoje, o número de instrumentos individuais que continuam em operação é muito menor, entretanto em localidades-chave como a Base da Força Aérea Norte-Americana na Groenlândia e na Estação Científica McMurdo na Antártica.

Os dados dessas estações são enviados para a NOAA em Boulder e são usadas nos relatórios de atividade solar/terrestre. No entanto, naqueles dias, ao redor do Ano Geofísico Internacional em 1957, os riômetros provaram seu valor, fornecendo perfis de latitude dos eventos de prótons solares através da calota polar.

A teoria daquela época, devido ao famoso físico norueguês estudioso da aurora, Stoermer, foi baseada nos movimentos das partículas no modelo do dipolo do campo da terra e apontava uma grande variação nas energias de corte magnético e absorção através da calota polar durante eventos de prótons. Nada foi encontrado, e isso demonstrou que o modelo do dipolo precisava correção. Esse foi o primeiro passo em direção do atual modelo da magnetosfera, com linhas de campo comprimidas pelo vento solar no lado que aponta para o Sol e uma cauda, para longe da Terra, na outra direção.

Outras funções de monitoração para prótons são agora tratadas por detectores de estado sólido em satélites da NOAA. As intensidades da energia variam de tempos em tempos, no entanto a ideia geral é observar os prótons com energia superiores a 10 MeV, capazes de penetrar nas alturas ionosféricas, e prótons com energias superior a 100 MeV, ao alcance das altitudes de balões.

Além disso, existem poucos detectores que registram eventos ao nível do solo (GLE). Esses detectores envolvem partículas relativísticas na faixa dos GeV que, por sua própria conta produzem poucos distúrbios ionosféricos devido à sua baixa taxa de ionização na região absorvente.

Ocorrem poucos desses eventos a cada ciclo solar e, caso o fluxo seja alto o suficiente, os prótons secundários e os raios gama das reações nucleares podem fazer surgir a absorção.

Deverá ser observado que os eventos com prótons solares mais intensos são capazes de afetar a composição atmosférica, notavelmente o ciclo oxigênio-ozônio na atmosfera mais baixa. Consequentemente uma depleção do ozônio atmosférico foi observada na faixa entre 50 e 70 km após eventos de prótons intensos em 1969 e em 1972; além disso, os satélites da NASA, examinando de cima para baixo a distribuição do ozônio, observaram depleções do ozônio com eventos de prótons no final de 1989. A esse respeito, as variações do ozônio são importantes como um auxílio do ozônio na propagação das baixas frequências devido à proteção contra o destaque dos fótons que ele oferece aos íons negativos no horário ao redor do nascer do Sol.

Normalmente, a discussão dos processos ionosféricos para baixo na região D não considera o transporte, pois as vidas úteis dos íons são relativamente curtas. No entanto, com o bombardeio de prótons de longa duração, como implicado pelos registros da absorção, visto na **Figura 67**, que podem ser importantes para a discussão. Certamente a continuação da atividade auroral nos meses do Inverno resultam na produção, transporte e retenção do NO na calota polar no escuro, apontando as movimentações atmosféricas como outro fator a ser considerado em nossa discussão.

Em outro aspecto, as movimentações atmosféricas são importantes pois a taxa de colisão entre íons e partículas neutras é tão alta na ionosfera mais baixa que a população ionizada é transportada pela atração eletrostática, e a distribuição dos elétrons que determina a refração ionosférica é afetada também pelos ventos neutros. Portanto, temos de esperar os *tilts* ou inclinações das regiões atmosféricas a serem afetadas pelos ventos. E qualquer tipo de turbulência no vento também serviria para reduzir o tamanho da escala das regiões atmosféricas. Portanto, quando se trata de movimentações coerentes e a rerradiação dos elétrons, os ventos podem afetar não apenas sua eficácia nos trajetos de DX, mas também a direção ou a inclinação dos sinais nas bandas baixas. Resumindo, os caminhos da propagação seriam muito mais localizados (pontuais) do que em condições atmosféricas quietas.

4 - Tempestades magnéticas e Aurora - Observações magnéticas

O campo da Terra vem sendo estudado há mais de cem anos, mantendo-se registros sobre como seus componentes variam em magnitude e tempo em cada localidade. Os componentes do campo tipicamente estão no sentido de Xx para o leste (Y) e para baixo, em direção ao solo, Z, sendo as variações expressas em nano-Teslas (nT). As variações são indexadas a cada três horas usando os desvios máximos, positivos ou negativos, em relação às condições quietas.

A atividade magnética é descrita em seis categorias, que vão desde quieta até tempestade severa, e a atividade de cada estação é dada com índices K de 3 horas, variando de 0 a 9.

Cada estação tem seu próprio valor mínimo para condições de tempestade severa, dependendo da latitude, e os índices K são ajustados apropriadamente, de modo que todas as estações reportem usando a mesma escala quase logarítmica de 0 a 9. Esses valores Kk são convertidos para uma escala ak, que atinge 400, como mostrada na **Figura 68**, e os 8 valores ak têm sua média calculada para fornecer um valor, Ak, para o dia.

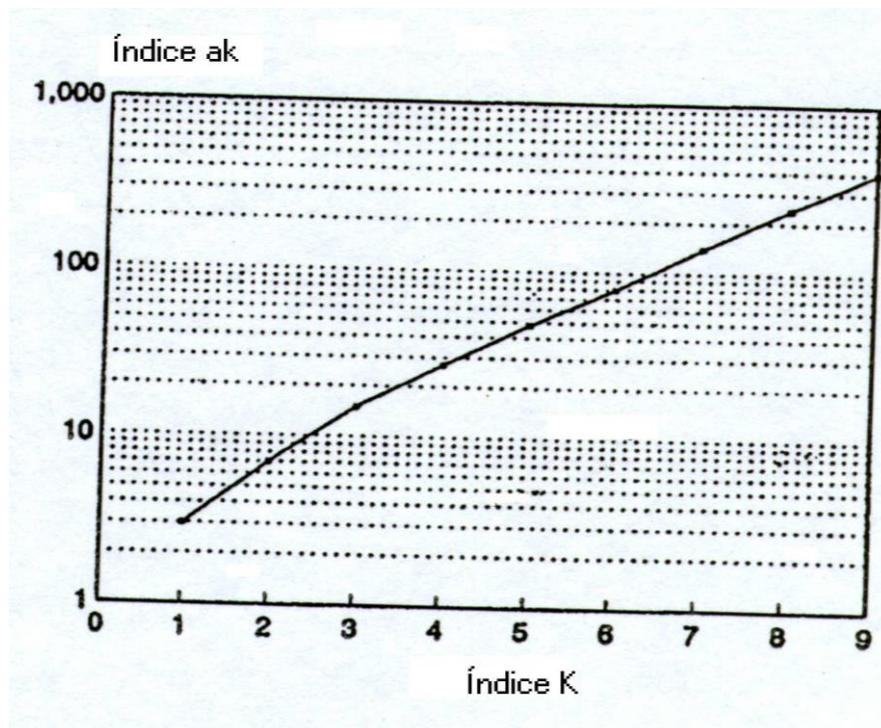


Figura 68 - Relação entre o índice K e o índice ak.

A atividade magnética é descrita, em termos do índice A de 24 horas, da seguinte forma:

Categoria	Faixa do índice A	Valores típicos
Quieta:	$0 < A < 08$	Normalmente não há valor K para índices > 2
Instável:	$08 < A < 16$	Normalmente não há valor K para índices > 3
Ativa:	$16 < A < 30$	Alguns índices K de 4
Tempestade secundária:	$30 < A < 50$	Índices K em sua maioria 4 e 5
Tempestade importante:	$50 < A < 100$	Alguns índices K de 6 ou maiores
Tempestade severa:	$100 < A$	Alguns índices K de 7 ou maiores

Os dados provenientes do observatório magnético da NOAA, em Boulder, CO, são irradiados no 18º minuto de cada hora pela estação WWV nas frequências de 2,5, 5, 10, 15 e 20 MHz.

Essa irradiação informa o índice K das 3 últimas horas obtidas no magnetômetro de Boulder, uma estimativa do índice A atual, a categoria para a atividade magnética atual, assim como a estimativa atual para o fluxo solar em 10,7 cm.

Além das irradiações, a Internet fornece outros formatos de dados magnéticos. Um dos mais úteis é fornecido pelo Geological Survey, do Canadá. Eles operam 12 estações magnéticas espalhadas pelo Canadá, de costa a costa e até o Ártico. Três anos dos dados provenientes das estações estão em arquivos e os registros gráficos com intervalos de 1 minuto para cada um dos elementos como nT, X, Y e Z, podem ser consultados rapidamente.

Além dessas fontes de dados, existe uma outra rede que resume as observações magnéticas em bases planetárias. Desse modo, a **Rede Kp**, constituída por uma dúzia de estações no Hemisfério Norte, do Canadá à Alemanha, mostrada na **Figura 69**, reporta as médias planetárias, Kp e Ap, a cada duas semanas via Internet.

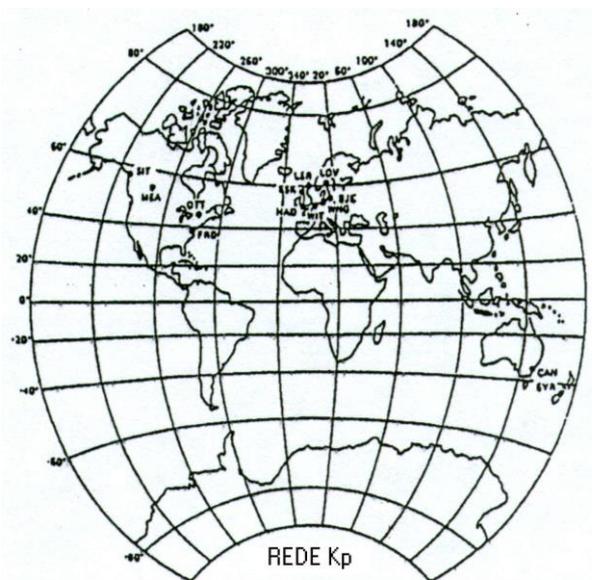


Figura 69 - Locais globais da Rede Kp.

Essas estações, mais duas outras localizadas no Hemisfério Sul, fornecem uma medida da atividade magnética em latitudes próximas à zona auroral, em resposta à entrada de energia proveniente do vento solar.

Uma vez que a aurora ocorre durante atividade magnética significativa, os registros obtidos nos magnetômetros em altas latitudes, digamos a rede canadense ou as estações Kp, poderão ser consultados para observar tendências de recorrência e, desse modo, predizer atividade da aurora ou magnética. Isso presume certo grau de estabilidade nos fluxos solares conforme o Sol gira, com um período de 27 dias. Foram obtidos alguns sucessos usando esse método, ajudando os *dx men* das bandas baixas a encontrar momentos quietos para contatos ao longo de grandes latitudes, sem distúrbios devidos à ionização auroral.

5 - Estatísticas geomagnéticas

Apesar de que condições magnéticas e aurorais quietas são condições desejáveis para o DX nas bandas baixas atravessando altas latitudes, as tempestades magnéticas são capazes de afetar os trajetos através das altitudes menores, e mais ainda devido às tempestades severas com valores altos de A_p .

A esse respeito, a distribuição integral para o número de tempestades sobre os cinco ciclos solares recentes, o Ciclo 17 de 1932 até o Ciclo 21 em 1987, é mostrada a seguir na **Figura 70**.

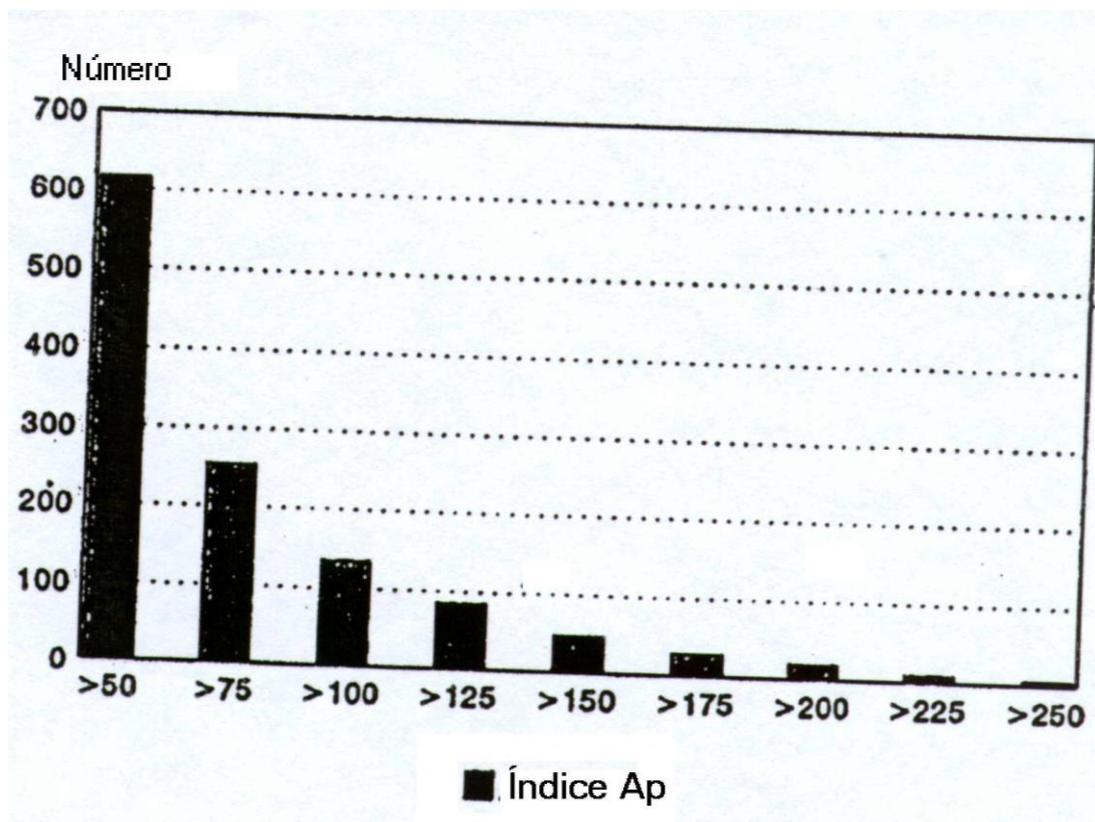


Figura 70 - Distribuição numérica de índices Ap, de 1932 a 1987.

Isso mostra mais de 600 tempestades em 55 anos ou cerca de 1 tempestade importante por mês quando calculada a média ao longo do período. Isso poderá ser visto como um valor muito alto, no entanto o período inclui o Ciclo 19, o ciclo mais ativo na história dos estudos solares/terrestres.

O grau de disrupção depende da frequência de operação. Fisicamente, as tempestades magnéticas reduzem o conteúdo de elétrons ionosféricos na região F, particularmente nos trajetos em latitudes altas.

Desse modo as bandas de HF são perturbadas mais pela redução do valor MUF. Isso poderá persistir por um dia quando Kp estiver ao redor de 50, entretanto para tempestades com um Kp superior a 100, ocorre uma disrupção importante nas frequências de HF e também alguns efeitos negativos nas bandas baixas. A partir de um Kp superior a 150, os elétrons de ionização liberados do cinturão de Van Allen começam a aparecer nas meias latitudes, afetando trajetos que estavam anteriormente imunes.

Essas são ocorrências estatísticas, mais uma questão de registro do que de qualquer significância física. Entretanto, abordar as estatísticas sazonais é outro assunto, fornecendo mais características da dinâmica da atividade magnética, como e porque o campo da Terra responde ao vento solar para criar tempestades magnéticas. Para isso, temos de observar o novo modelo do campo da Terra, mostrado na **Figura 71**:

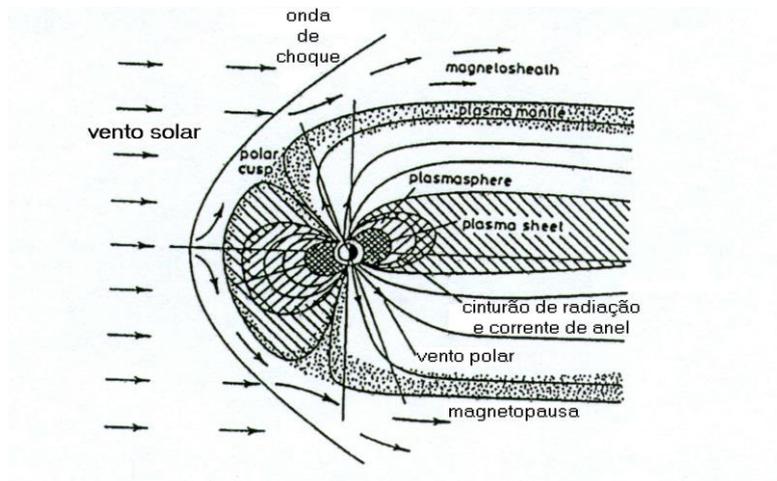


Figura 71 - O novo modelo do campo da Terra.

Esta figura mostra a nova topologia da magnetosfera, muito diferente do que aquela do dipolo clássico - com linhas de campo comprimidas na direção do vento solar incidente e arrastando para longe do Sol.

Essa configuração permanece com a Terra na medida em que ela gira a cada dia. No entanto, o eixo magnético faz uma precessão ao redor do eixo de rotação e esse eixo de rotação está inclinado 23,5 graus ao longo do ano, em uma direção perpendicular ao plano orbital, como ilustrado na **Figura 72**:

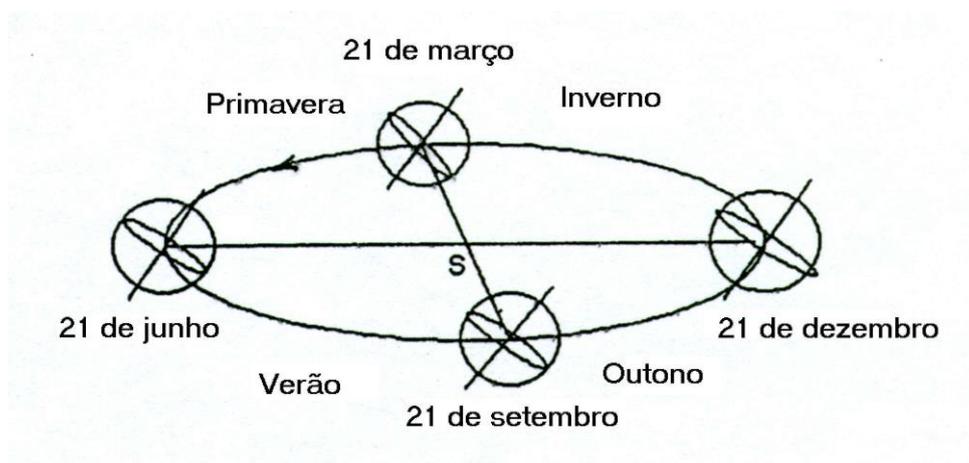


Figura 72 - Mudanças sazonais no relacionamento Terra-Sol.

Consideremos agora a variação sazonal das tempestades magnéticas na **Figura 73**. Essa figura mostra dados derivados de 1475 tempestades ao longo de um período de 124 anos, de 1868 a 1992:

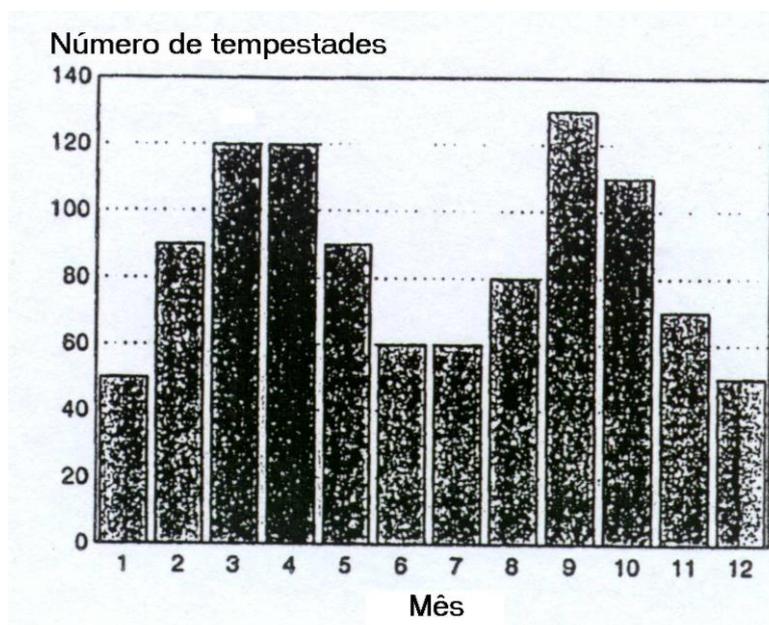


Figura 73 - Distribuição das tempestades magnéticas pelos meses do ano, entre 1868 e 1992.

Os dados têm sua média calculada ao longo de 10 ciclos solares, os Ciclos entre 13 e 22, e mostra que as tempestades são mais prováveis nos equinócios, quando o vento solar se choca diretamente com a magnetosfera, e menos prováveis nos solstícios, quando o vento solar desferia ligeiros golpes no hemisfério que está alinhado em direção ao Sol. Entretanto, as tempestades magnéticas ocorrem ao longo de todo o ano devido ao impacto do vento solar.

6 - Processos geomagnéticos

O entendimento atual entre os especialistas em magnetosfera é um pouco complexo, mas tente compreendê-lo: o vento solar é constituído por prótons e elétrons, com uma densidade entre 5 e 10 partículas por centímetro cúbico, e se desloca para longe do Sol a uma velocidade média de 400 km por segundo. Ele transporta parte do campo magnético ao longo de seu deslocamento, "congelado" no plasma, devido à sua alta condutividade. Quando ele atinge a frente da magnetosfera, a interação que ocorre a seguir depende da direção do campo em relação àquele [campo] da Terra.

O campo externo da Terra, na frente da magnetosfera, se eleva a partir do Hemisfério Sul, cruza o plano equatorial e vai para trás em direção ao Hemisfério Norte, exatamente como as linhas de campo do dipolo mostradas na **Figura 71**.

Se o campo transportado pelo vento solar apontar para o Norte e da mesma forma apontarem os pontos do campo da Terra, nada acontece. No entanto, se o campo apontar para o Sul, então as duas linhas de campo ficarão "conectadas" e o campo no vento solar transportará as linhas do campo terrestre para dentro da "cauda" magnética. Esse processo extrai elétrons da região F espiralando ao redor das linhas de campo de volta para a cauda, diminuindo o conteúdo de elétrons das linhas de campo nas altas latitudes, assim como as MUFs para propagação em HF ao longo dessa região.

Na parte frontal da magnetosfera, as partículas do vento solar sofrem uma separação de carga devido à força exercida sobre elas pelo campo da Terra. Isso dá lugar a um campo elétrico através da magnetosfera, que é "mapeado" de volta para dentro da cauda magnética pelo plasma altamente condutor existente na região. Esse campo elétrico cresce, finalmente liberando energia e excitando os elétrons magnetosféricos para baixo das linhas do campo, para dentro da alta atmosfera, onde criam ionização e excitam átomos e moléculas para que irradiem, o que produz a aurora óptica.

O campo elétrico que corta a cauda é mapeado, por sua vez, para baixo das linhas do campo para a ionização criada pelos elétrons energéticos que excitam a aurora; isso dá lugar a uma corrente ionosférica, o *electrojet* auroral, registrado pelos magnetômetros em terra, como mostrado na **Figura 74**:

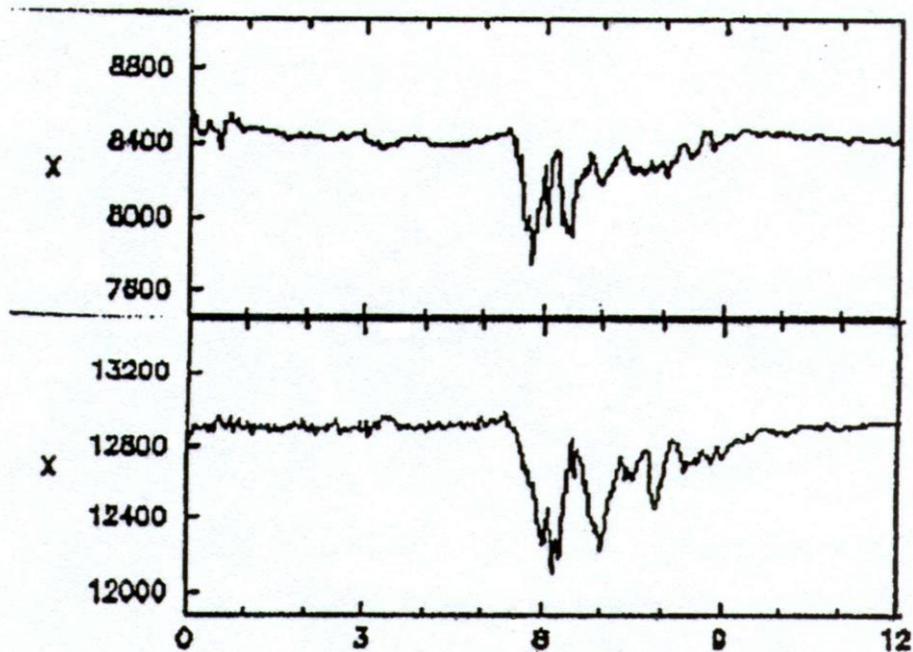


Figura 74 - Variações no componente X, Churchill (superior) e Meanook (inferior). As unidades são nT.

Esta figura mostra um distúrbio X na direção norte em Ft. Churchill (superior), e em Meanook (inferior), localidades do Canadá, no dia 01 de abril de 2001. Nessa data um forte distúrbio no vento solar deu origem a uma atividade de tempestade magnética que resultou em um valor A_p de 190. Os traços do magnetograma mostrados na figura são parte dos registros canadenses.

O distúrbio X em Churchill foi de -700 nT, abaixo da linha de base, enquanto que em Meanook foi de -600 nT. O mesmo tipo de distúrbio, chamado "hay negativo" (devido ao formato da linha costeira) foi detectado em pontos tão distantes como o Oeste de Victoria (-100 nT), Leste de St. Johns, NF (-100 nT) e ao Norte até o Lago Baker (-400 nT).

Com as grandes mudanças no sentido norte, na direção X, também ocorrem mudanças menores no sentido Leste, a direção Y, digamos da ordem de 100 nT. Como resultado, o maior distúrbio X significa que o sistema de corrente do *eletrojet* estava na direção L-O (East-West, em Inglês).

No entanto, um sistema corrente L-O, incorporado na ionização auroral ao redor de 100 km, produz mudanças no campo no sentido para baixo, a direção Z. Essas mudanças produziram -500 nT em Churchill e -500 nT em Meanook; nessas localidades, o sistema de corrente entre as duas estações, conforme mostrado a seguir na **Figura 75**:

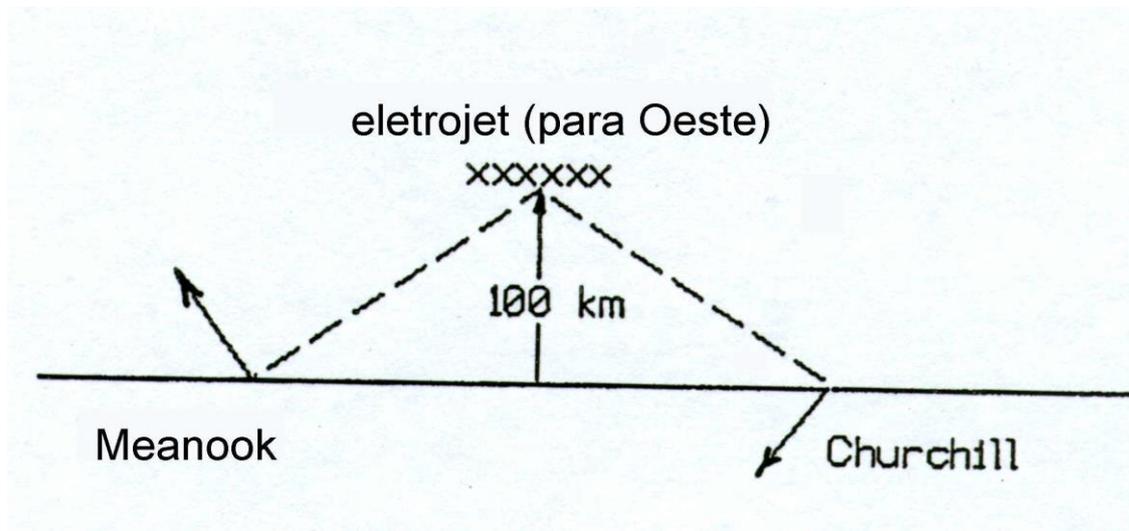


Figura 75 - Distúrbios magnéticos provenientes de um *eletrojet* no sentido Oeste.

Esta figura mostra um *eletrojet* fluindo no sentido Oeste em uma altitude de 100 km e ilustra seu campo de distúrbio em Churchill e em Meanook. Os sinais do distúrbio Z, para baixo em direção a Churchill e para cima, para Meanook, indicam que o sistema de corrente está entre os dois, como mostrado.

As correntes do *eletrojet* não são fixadas em latitude e seus movimentos podem ser estimados a partir das mudanças no distúrbio Z. Desse modo, em horários como 0900 UTC, quando as mudanças no registro Z no magnetômetro em Churchill foram a zero, correspondem a movimentos que colocaram o centro do sistema de corrente exatamente em cima dessa localidade.

7 - Absorção auroral

Como indicado anteriormente, os efeitos nas altitudes ionosféricas resultam do fluxo entrante dos elétrons aurorais energéticos. Isso inclui ionização que absorve os sinais de bandas baixas que esteja cruzando as altas latitudes. Tipicamente, os riômetros em 30 MHz são usados para monitorar o ruído rádio galáctico nas altas latitudes e são capazes de detectar a absorção devido a qualquer ionização auroral que ocorra dentro dos feixes de suas antenas. A ionização auroral se estende ao longo de algumas dezenas de graus de longitude, ou cinco graus ou algo parecido, dependendo do nível do distúrbio.

Tipicamente, as antenas dos riômetros são Yagis de 3 elementos apontadas para cima e têm feixes da antena no nível de 100 km que atinge -3 dB ao redor de 100 km a partir de seu centro.

Os registros dos riômetros foram obtidos em diversas localidades canadenses durante o evento de 01 de abril. Eles eram parte de uma cadeia de instrumentos que monitoraram a atividade ao longo da linha de longitude ao longo de Churchill. Uma estimativa dos padrões de riômetro para Churchill (latitude magnética 70 N), Gillam (latitude magnética 67N) e Island Lake (latitude magnética 65N) é mostrada na figura 76:

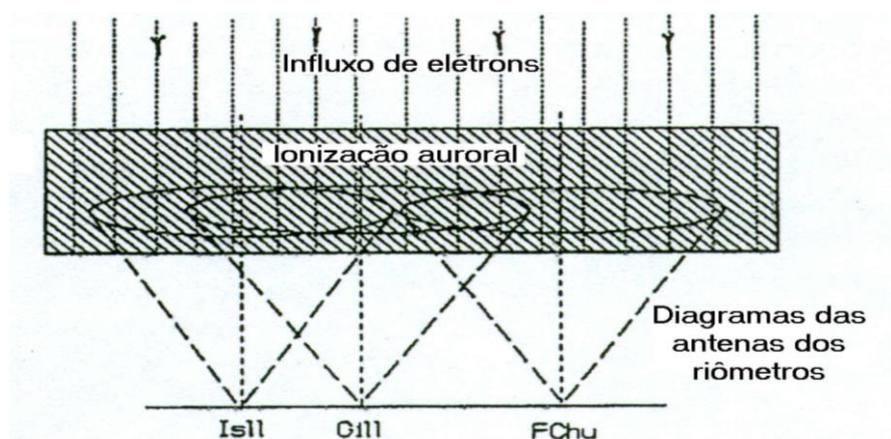


Figura 76 - Ionização auroral em relação às antenas dos riômetros.

Esta figura é uma simplificação relativa, mostrando um bloco uniforme de ionização auroral e um influxo vertical de elétrons. O perfil da densidade dos elétrons nessa região deverá atravessar um pico ao redor dos 120 km, em seguida caindo para valores menores abaixo dos 100 km e o influxo de elétrons deverá espiralar ao redor das linhas do campo no ângulo do mergulho do magnetismo local, próximo aos 80 graus a partir da direção vertical.

Além disso, o influxo de elétrons deverá ser estruturado no espaço, mostrando as formas raiadas características da atividade dinâmica da aurora ao redor da meia noite local.

Esse tipo de atividade pode ser visto nos registros de absorção provenientes dos três riômetros, com excursões de picos para baixo nos registros da tabela, com aumentos de absorção atingindo 3 dB nos 30 MHz na localidade do riômetro mais ao sul, em Island Lake, mostrado na **Figura 77**:

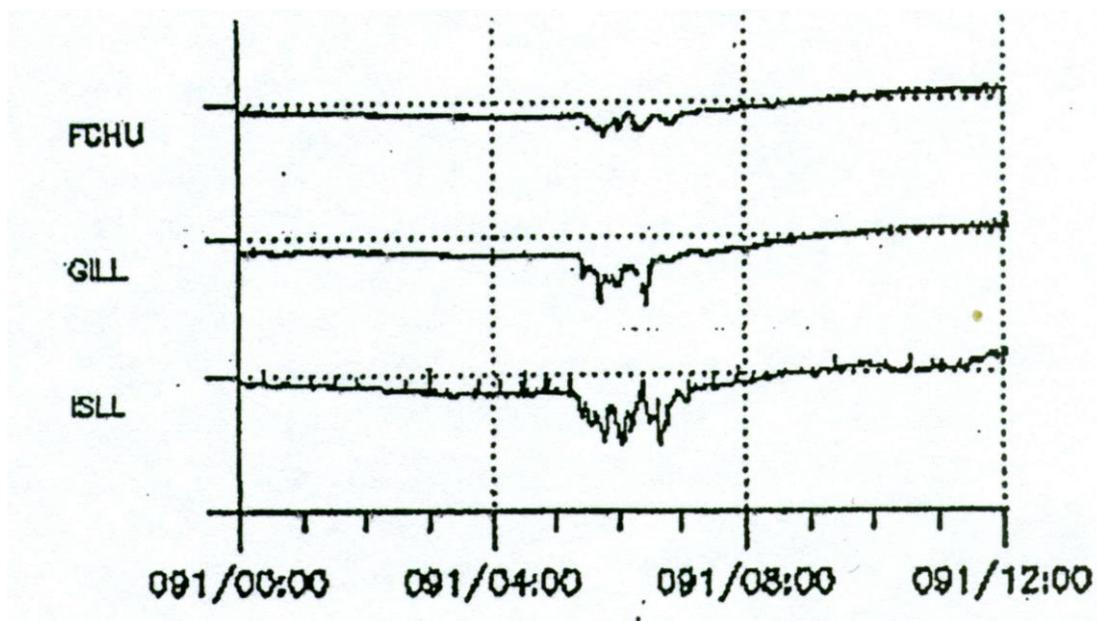


Figura 77 - Registros de absorção ao longo da cadeia de riômetros N-S.

Além disso, os registros mostram alguma estrutura espacial e movimento nas regiões de precipitação na medida em que a absorção começa mais tarde em Ft. Churchill; ademais, os picos na absorção não coincidem com o tempo dos registros.

No entanto, esses registros foram obtidos com riômetros de feixes amplos. A estrutura efetiva das regiões de absorção é obtida utilizando riômetros de imagem, em frequência mais alta e com múltiplas antenas. A esse respeito, a Universidade de Maryland tem operado durante alguns anos (Rosenberg et al, 1991) riômetros de imagem para estudos ionosféricos (IRIS) em certo número de localidades de latitude alta. Apesar de que as configurações variam de lugar para lugar, um painel de dipolos cruzados com polarização circular e 64 elementos, operando em 38,2 MHz, tem estado em operação no Polo Sul (latitude magnética $-74,2$). Os sinais provenientes do painel com 64 elementos são fasados para produzir 49 feixes independentes, mostrados na **Figura 78**, e esses feixes são amostrados por 7 receptores-riômetros.

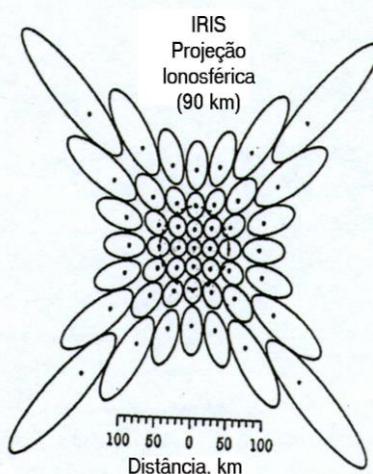


Figura 78 - Projeção do padrão da antena IRIS a 90 km.

O uso de antenas com feixes abertos com riômetros não admite o estudo da distribuição espacial da ionização na região de absorção nem suas movimentações. Com os riômetros de imagem, essa limitação do método é removida e, quando orientados em relação ao campo da Terra, são determinadas as movimentações e as distribuições espaciais, segundo a resolução dos elementos da antena e a sensibilidade do riômetro.

Um exemplo dos resultados das técnicas de imagem são fornecidas em conexão com o evento de absorção auroral no Polo Sul, como mostrado na **Figura 79**. Essa figura ilustra observações de feixe aberto em três frequências e normalmente seria interpretado como sendo uma região de grande precipitação, desenvolvida ou caída desde cima ou movida ao longo dos campos de visualização das antenas de feixe amplo dos riômetros.

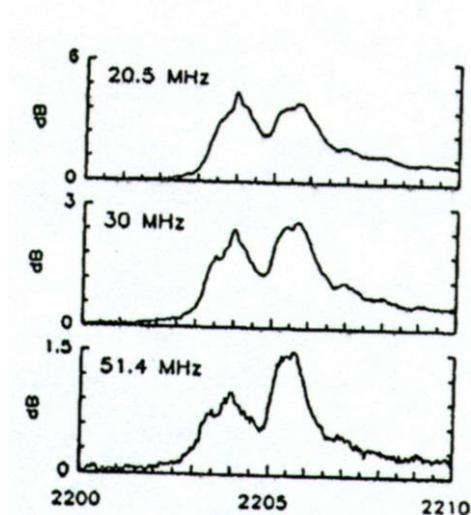


Figura 79 - Registros de absorção proveniente dos riômetros de feixe amplo.

A **Figura 80** mostra, através de contraste, a região de absorção movendo-se através do campo de visualização do riômetro de imagem:

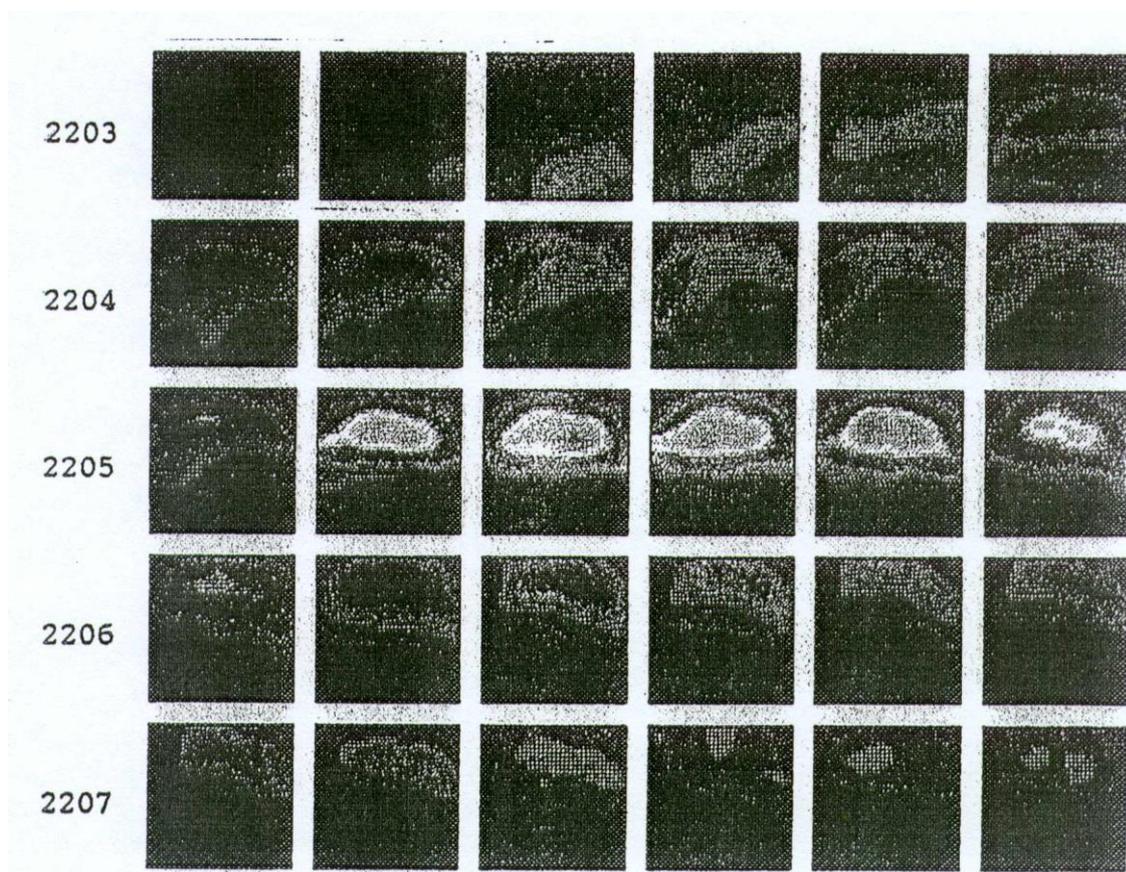


Figura 80 - Um resumo de 5 minutos, com amostras a cada 10 segundos, proveniente do painel IRIS durante o evento de absorção mostrado na Figura 79.

Esta figura mostra imagens obtidas a cada 5 minutos, espaçadas entre si a cada 10 s, com o polo sul magnético no topo, o equador magnético em direção à parte inferior, o leste à direita e o oeste à esquerda, como se a ionosfera estivesse sendo vista desde baixo. As imagens mais brilhantes às 2205 UTC correspondem a 10 dB de absorção, enquanto que as manchas menos brilhantes correspondem a cerca de 2 dB.

Em qualquer caso, a região da absorção se movimenta, mais em latitude do que em longitude, durante este evento simples e suave. Entretanto mais estruturas são encontradas nos eventos de picos de longa duração, como o mostrado na **Figura 77**. Após essas observações, a interpretação dos mapas de satélite relativos à aurora deverá ser feita com cuidado.

Apesar de que os mapas sugerem o bombardeio dos elétrons ao longo de toda a zona auroral, torna-se claro que existe estrutura quando se trata de regiões absorventes e de que elas não são tão imunes aos sinais de bandas baixas como parece.

Agora, retornando à **Figura 70**, pode-se ver que um evento de tempestade com um valor de A_p de 190 não é um evento de todo dia nos ciclos solares. Portanto, as excursões magnéticas são menores para os eventos mais típicos, denominadas sub-tempestades aurorais, e o mesmo é verdadeiro para a absorção ionosférica. Desse modo, os valores comuns estarão ao redor de 100 a 200 nT e 1 e 2 dB. Isso poderá ser visto na **Figura 81**:

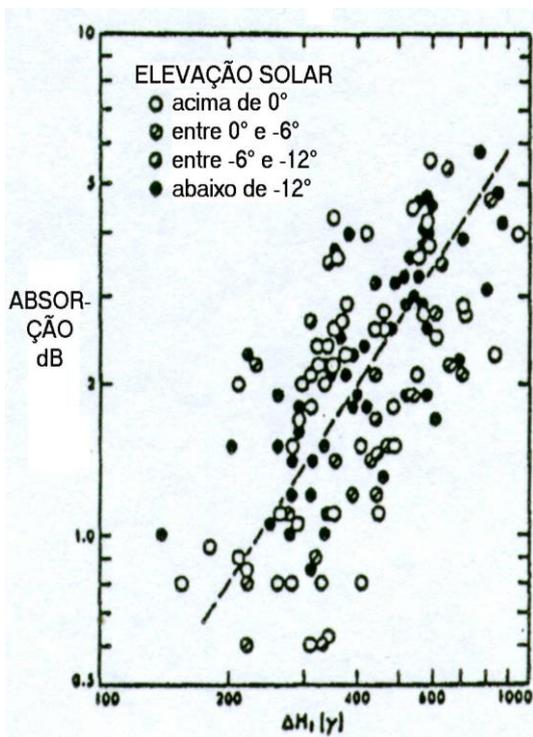


Figura 81 - Absorção versus distúrbio magnético durante campos magnéticos com sistemas de corrente centralizados acima.

Esta figura é para um número de sub-tempestades durante o Ciclo 19 que foram selecionadas pelo fato de seus sistemas de corrente serem centralizados desde cima, como mencionado anteriormente.

O estudo (Brown e Barcus, 1963) foi direcionado examinando se os eventos de absorção auroral mostraram uma taxa dia/noite como eventos de prótons solares, porém no momento ele serve a nossas finalidades aqui, fornecendo valores de campo magnético e mudanças na absorção que são mais típicos da atividade em latitudes aurorais.

Em conexão com a propagação nas bandas baixas, a morfologia auroral é um dos mais importantes aspectos a serem levados em consideração. Akasofu (1964) forneceu uma detalhada discussão sobre o desenvolvimento da aurora durante sub-tempestades, desde quietos arcos antes da meia noite até a ativa fase de surgimento ao redor da meia noite e a fase difusa e pulsátil nas horas da manhã, mostradas na **Figura 82**:



Figura 82 - Formas aurorais surgindo ao redor da meia noite magnética.

As observações nas quais este resumo foi baseado foram obtidas com câmeras do tipo *all-sky*, um outro tipo de técnica de imagem. Uma vez que as câmeras *all-sky* respondem somente à emissão de luz, elas tendem a realçar a precipitação de elétrons com energia menor.

Outra técnica de imagem usando fotômetros pode proporcionar tanto resolução espacial como, devido a sua colocação, também vislumbres (Brown, 2000) sobre como o bombardeio de elétrons começa na cauda magnética (*magnetotail*).

Como foi discutido anteriormente, este é todo o resultado dos campos elétricos, um assunto pouco familiar para os *dx men* das bandas baixas, e que têm os maiores efeitos ao redor da meia noite.

Naturalmente, todas essas matérias são proporcionais ao nível do distúrbio, do bombardeio auroral se movimentar para altitudes mais baixas e para mais longe, tanto nas horas do anoitecer como da manhã com perturbações significativas. No entanto, a maior parte do tempo, essas regiões estão abertas em algumas ocasiões para a propagação transpolar, como será visto em conexão com a propagação via *long path*.

Capítulo VII - Propagação via *long path*

1 - Nas bandas de HF

A propagação pelo trajeto mais longo (*long path*) nas bandas mais altas é bastante simples para discutir - ele é bem comum nos momentos de alta atividade solar, na medida em que as MUFs no caminho sobem então para níveis elevados. Foram escritos, por Carl Luetzelschwab, K9LA, artigos a respeito de experiências via *long path* nas bandas mais altas entre o Japão e a Austrália (Luetzelschwab, 1997) em 10 metros e Jack Emerson, WA7JTE adicionou às informações disponíveis seu recente trabalho (Emerson, 2002) em 15 metros. De minha parte, realizei um estudo com duração de um ano sobre a banda de 20 metros analisando um total de 1.687 contatos via *long path* (Brown, 1992) a respeito dos detalhes do modo, tais como os tipos de trajetos e os efeitos na propagação causados pelas atividades magnética e solar. Nas outras bandas de HF, as informações com as quais estou familiarizado são de natureza mais humorística, não resumidas formalmente nas publicações.

Naturalmente, nas bandas mais altas, a definição de *long path* é relativamente direta - um contato entre o ponto A e o ponto B nas quais os sinais seguem o trajeto mais longo ao redor da Terra, mais de 20.000 km. No topo das bandas de HF, os trajetos do grande círculo são derivados da trigonometria esférica e são utilizados para representar os trajetos-rádio reais, sejam eles na distância mais curta (*short path*) ou na mais longa (*long path*).

2 - *Skewing*

Nas frequências mais baixas, os desvios laterais ou *Skewing* dos trajetos, devido a gradientes horizontais de ionização, variam o quadrado do comprimento de onda, tornando os desvios de trajeto na banda de 40 metros cerca de 16 vezes maiores do que em 10 metros para um determinado gradiente, etc. A questão então se reduz à origem do gradiente horizontal, seja ele radiação solar ao longo do terminador, linha de nascer/por do Sol ou atividade auroral.

O terminador está sempre presente em algum lugar na superfície da Terra, portanto uma conexão via *long path* poderá ser afetada por ele, mesmo aproveitando a propagação ao longo da linha cinza, a escuridão próxima ao terminador para reduzir a absorção ionosférica no trajeto. No entanto, a atividade auroral é coisa esporádica, e deverá subir até o ponto em que a ionização auroral seja capaz de refletir ou refratar os sinais. Ao considerar as duas fontes possíveis, deverá ser observado que o terminador não é estável apenas em termos de tempo, mas também em uma grande escala física. Nenhum desses atributos poderá ser usado em relação à Aurora.

A ionização auroral é bastante variável no tempo e com estrutura espacial variável, particularmente na largura e profundidade das formas raiadas. Assim, uma ampla cortina auroral poderá estar tão pesadamente ionizada que poderá refletir quase como se fosse uma lâmina metálica, sem penetração apreciável na cortina, ou tão levemente ionizada que permitirá a penetração dos sinais produzindo tanto refração como absorção. Portanto dependerá da densidade dos elétrons e sua escala em relação ao comprimento de onda da radiação para escolher entre essas duas.

Nas bandas de transição, onde tanto as MUFs como a absorção são importantes, as conexões via *long path* podem falhar, porque os sinais são desviados para longe do trajeto desejado ou por perda da ionização na região E. Essa última hipótese poderá ocorrer devido a efeitos da magnetosfera, ionização das linhas do campo sendo transportadas de volta para a cauda magnética (*magnetotrail*) conforme as linhas do campo na frente da magnetosfera sejam erodidas e carregadas pelo vento solar. No entanto, é relativamente fácil distinguir entre as duas causas de uma falha; a perda da ionização normalmente envolve diversos dias por pouca, se houver alguma, propagação via *long path* e a região F se recupera ligeiramente conforme ela é preenchida de novo pela fotoionização, enquanto que os efeitos aurorais são mais locais e normalmente de curta duração.

2 - Nas bandas baixas

Nas bandas baixas, a perda da ionização na região F poderá ser uma fonte de falha no *long path* em 7 MHz durante intensa atividade magnética. Esse é o caso, particularmente aqui na América do Norte onde as localizações determinam que a maioria dos trajetos *long path* de interesse cruzem as altas latitudes. Por meio de ilustrações, o estudo do *long path* aqui conduzido no Noroeste entre os anos de 1990 e 1991 teve apenas um caminho sub-auroral de interesse, para a África do Sul (ZS) ; todo o restante dos trajetos *long path* passaram através da zona auroral, até a latitude magnética de 70 S, ou através da calota polar, acima da latitude magnética de 70 S.

A propagação via *long path* em 7 e em 3,5 MHz é bem conhecida e denominada "esporte de Inverno" por muitos *dx men*. Devo admitir que minha própria experiência nessas duas bandas é muito limitada, principalmente quando eu tinha um dipolo alto sobre um ancoradouro, cerca de 22 metros acima de água salgada e um horizonte livre para Europa e África. Tive minha parcela de contatos via *long path*, mas nada comparável à minha experiência nos 20 metros.

Iniciei minhas questões sobre *long path* em 160 metros pelo "caminho das pedras", movendo-me para as bandas baixas ainda mais lentamente. Isso foi por conta de meu interesse na propagação em HF. Comecei oferecendo consultoria sobre propagação para futuras expedições de DX e, quando a expedição terminava, examinava todos seus registros, como se fosse uma recompensa por meu trabalho.

Trabalhei com Bob Schneider, KK6EK, e pudemos observar em primeira mão os resultados das expedições às ilhas Peter I, Easter Island e Heard Island. Devo dizer que os registros da Heard Island continha uma variedade de informações, com a "zona de silêncio" mencionada anteriormente e dados consideráveis sobre propagação via *long path* em 3,5 e 7,0 MHz. Tudo isso ocorreu dentro de um período entre duas tempestades magnéticas, uma tempestade ocorrendo uma semana antes do início da expedição e a outra se iniciando exatamente no último dia de operação.

Em seguida, Jeorg Puchstein trouxe informações sobre sua expedição juntamente com VK9XY, VK9XC, S21XX, P29VXX e ZL7DK. Portanto tive à minha disposição um bocado de registros sobre 160 metros naquela condição que chamaria de "grande atividade", quando o mundo inteiro estava procurando por uma estação como, por exemplo, VK0IR.

Entretanto, examinando os registros disponíveis, nunca encontrei um único contato via *long path* em 160 metros, SIMPLEMENTE NENHUM!

Após a experiência de VK0IR com aquela gigantesca "zona de silêncio" resultante da absorção ionosférica em 1,8 MHz, comecei a pensar que os contatos via *long path* eram uma "causa perdida" em 160 metros. Desse modo, parecia que os sinais de 1,8 MHz ficavam aprisionados dentro do hemisfério escuro, incapazes de refratar em direção ao topo, com a ampla ionização acima, bloqueados pela luz do Sol que iluminava além do terminador. Resumindo, não parecia ser possível um trajeto *long path* em 160 metros; os efeitos da absorção atmosférica eram tão grandes para que os sinais conseguissem sair do hemisfério escuro.

Entretanto, devo dizer que têm havido afirmações, de tempos em tempos, de contatos via *long path* em 1,8 MHz, no entanto esses contatos não têm ocorrido na direção clássica, que seria o oposto do *short path*. Uma breve menção desses contatos foi encontrada em uma publicação dedicada a radioescutas (SWL) (Tippett, 1991), com apenas um contato em 1,8 MHz antes da data da publicação. Esse contato foi entre W0ZV, no Colorado, e UA9UCO, na Sibéria, em 29 de setembro de 1987. Presume-se que o caminho tenha sido conduzido pelo terminador, como mostrado na **Figura 83**:

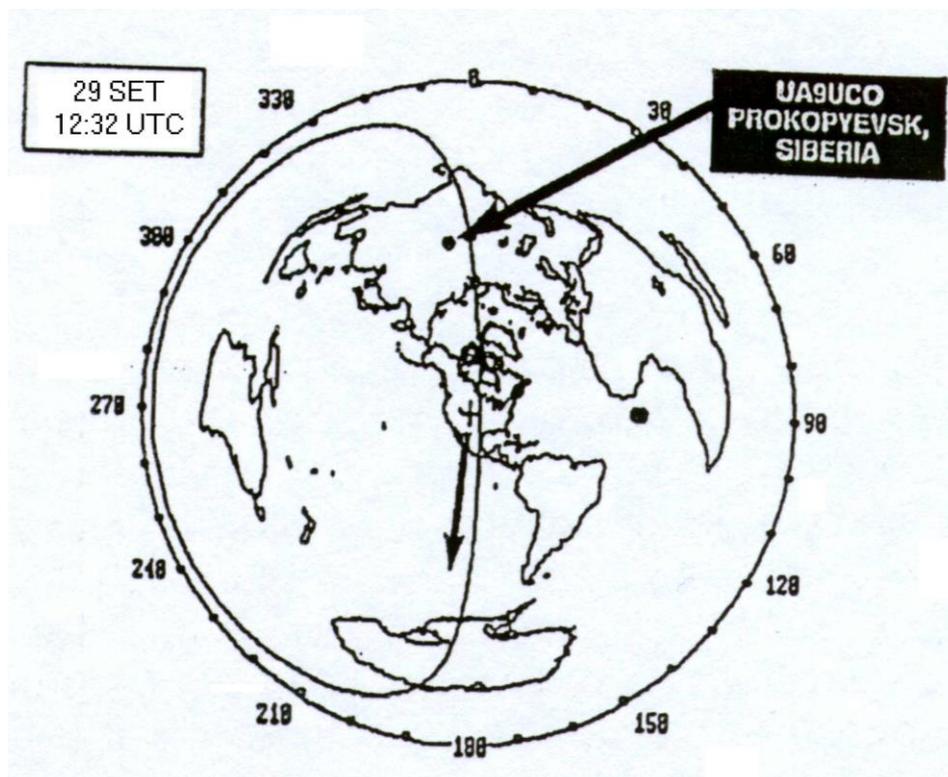


Figura 83 - Mapa azimutal com flecha indicando o caminho sugerido entre W0ZV, no Colorado, e UA9UCO, na Sibéria.

Desde aquela época, foram reclamados sete outros contatos via *long path* de natureza semelhante, começando com W0ZV - JJ1VKL/4S7 no final de 1991 e, mais recentemente, um contato entre N7UA - 5B4ADA no final de 2001. Todas essas datas e horários podem ser encontrados no *website* de W4ZV:

http://users.vnet.net/btippett/dx_aid_plots.htm

sendo encontrados outros exemplos em uma publicação mais recente (Brown, 2000), uma atualização de minha publicação anterior sobre *long path*.

Na condição de físico, esse trajetos propostos, conduzidos pelo terminador, não encontram eco tanto em meu treinamento e experiência, nem na intuição de físico. Portanto, ao longo dos anos, W4ZV, K1ZM, N4KG e eu, mantivemos acaloradas discussões a respeito do assunto.

Os argumentos deles defendem suas observações dos sinais provenientes do nascer do Sol na direção SSW, como mostrado na **Figura 83**, ou nas direções SSE no pôr do Sol. Meu argumento era o efeito que os sinais sofreriam pesada absorção ao longo do terminador e não o seguiriam muito antes de refratar para o hemisfério escuro e que não havia nenhum argumento oferecido sobre como os sinais atingiram as extremidades distantes.

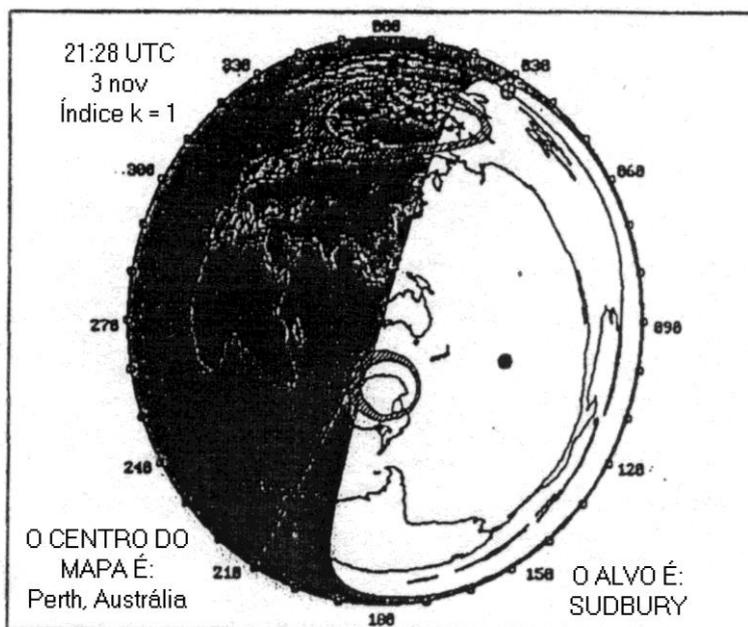
Com o objetivo de encerrar a discussão, escrevi os motivos que me levavam a não aceitar sua interpretação e publiquei-os na revista QEX (Brown, 2001). Disse que não duvidava de seus dados, mas que oferecia uma explicação alternativa das observações deles, e do fato de que eles não estavam recebendo sinal do *short path* espalhados de volta dessas direções. Creio que dediquei tudo o que podia ao problema usando a física da refração do sinal.

Tenho de admitir um outro aspecto dessa visão da propagação via *long path* que recentemente veio a meu conhecimento - alegações excessivas sobre a intensidade do sinal no contato entre N7UA e 5B4ADA. Assim, me foi dito por N7UA que os sinais via *long path* provenientes da direção SSW eram entre 5-8 e 5-9 no Nordeste do Pacífico no dia 16 de dezembro de 2001. Novamente, isso soou contra minha intuição, uma vez que terminei recentemente um estudo sobre a perda do sinal, usando o contato VK6HD e VP9AD anteriormente discutido e mostrado na **Figura 63**.

A distância via *short path* para o contato de N7UA e Chipre é de 10.000 km e, se esse contato tivesse sido via "*long path*", ele teria cerca de 25.000 km de comprimento, ou cerca de 15.000 km mais distante do que o caminho *short path*. Isso significaria que 15.000 km sofreriam uma perda de 6 dB a cada 1000 km para os saltos entre Terra e ionosfera no caminho adicional, e 2 dB a cada 1000 km para qualquer parte do caminho conduzida por duto. Dependendo do "*mix*" de modos [de propagação], isso significa que sinais via *long path* com intensidade entre S8 e S9 eram entre 30 e 90 dB (ou entre 5 e 15 unidades S) MAIS FRACOS do que os sinais via *short path*. Por qualquer padrão, essa seria uma estimativa conservadora e essa incrível intensidade de sinais a 10.000 km de distância coloca a questão fora da realidade efetiva.

No entanto todas essas perguntas sobre a realidade do *long path* em 160 metros chegam a um final com um artigo de Steve Ireland, VK6VZ, na edição de março de 2001 da revista CQ (Ireland, 2001), incluindo um QSL de um QSO com o finado K1MEM.

Verifiquei cuidadosamente todas as circunstâncias desse contato, da cidade de Perth, na Austrália, até Sudbury, MA, e fiquei absolutamente convencido de boa fé que foi um contato via *long path*; exceto por curtas distâncias nas extremidades, o caminho foi no escuro o restante do caminho, enquanto no *short path*, envolveu quase 20.000 km dentro da luz do Sol, como mostrado



na **Figura 84**.

Figura 84 - Mapa azimutal mostrando o trajeto *long path* entre VK6VZ e K1MEM.

Então, conversei com Stevie e Mike, VK6HD, para descobrir quais outros segredos eles poderiam estar tentando esconder "debaixo da manga", e eles gentilmente me forneceram seus registros de 160 metros por um período de 20 anos.

Não demorou muito para perceber que tinha em minhas mãos uma verdadeira "mina de ouro" ; entretanto, não era exatamente o que eu pensava sobre contatos via *long path* (Ireland et al, 2002). Constatei que os registros de VK6HD continham dois tipos de contatos DX de longa distância, a maioria com VE1ZZ, na Nova Scotia e outros com localizações na parte nordeste dos EUA, como no contato entre K1MEM e VK6VZ.

A maioria dos contatos com VE1ZZ foram *short path*, no período após o equinócio de Outono, entre os meses de setembro e março, quando a calota polar Norte está no escuro. Esses contatos foram mais de 150, mas também havia alguns contatos no registro após o equinócio de Primavera, entre abril e setembro. A calota polar Norte está então debaixo da luz do Sol, portanto esses contatos somente poderiam ter sido feitos via calota polar Sul, pelo *long path*. Portanto, estava procurando na alternância equinocial de caminho (Ireland et al, 2002), uma nova ideia relativa à propagação, especialmente nos 160 metros.

Os contatos de ambos os VK6 tiveram com o nordeste dos EUA provaram ter sido via *long path*, mesmo entre setembro e março; a diferença foi devido às longitudes e como isso influenciou os trajetos. Portanto ali estavam, finalmente alguns contatos via *long path* em 1,8 MHz, no entanto o que era intrigante, estavam ali o tempo todo, foram descobertos simplesmente revisando os dados existentes no registro, sem a necessidade de fazer quaisquer especulações sobre sua possibilidade. Eram genuínos!

Mas agora a pergunta era: "quão distantes podiam ser?". A experiência VK6-VE1 demonstra propagação *long path* em 1,8 MHz a uma distância de 22.000 km, alguns milhares de quilômetros dentro da luz do Sol além do hemisfério escuro. Além disso, pode continuar existindo um limite físico para a propagação nas bandas baixas - uma distância onde absorção ionosférica, ruído e sensibilidades do receptor não podem mais continuar proporcionando sinais legíveis. Precisamos de mais alguns contatos de longa distância, de natureza não auroral, para terminar a análise. Portanto, o próximo mínimo solar deverá ser muito interessante.

No entanto, as expedições de DX serão a chave, particularmente se forem escolhidas localizações que levem em consideração a demografia da questão. Para dar um exemplo, ao redor do equinócio de 2001, Roger, G3SXW (comunicação pessoal) fez uma viagem para a Ilha Chatham e operou de lá em 3,5 MHz, do amanhecer até o anoitecer. Os resultados foram mais de 150 contatos via *long path* com a Europa e o Reino Unido.

A distribuição dos contatos é mostrada na **Figura 85**:

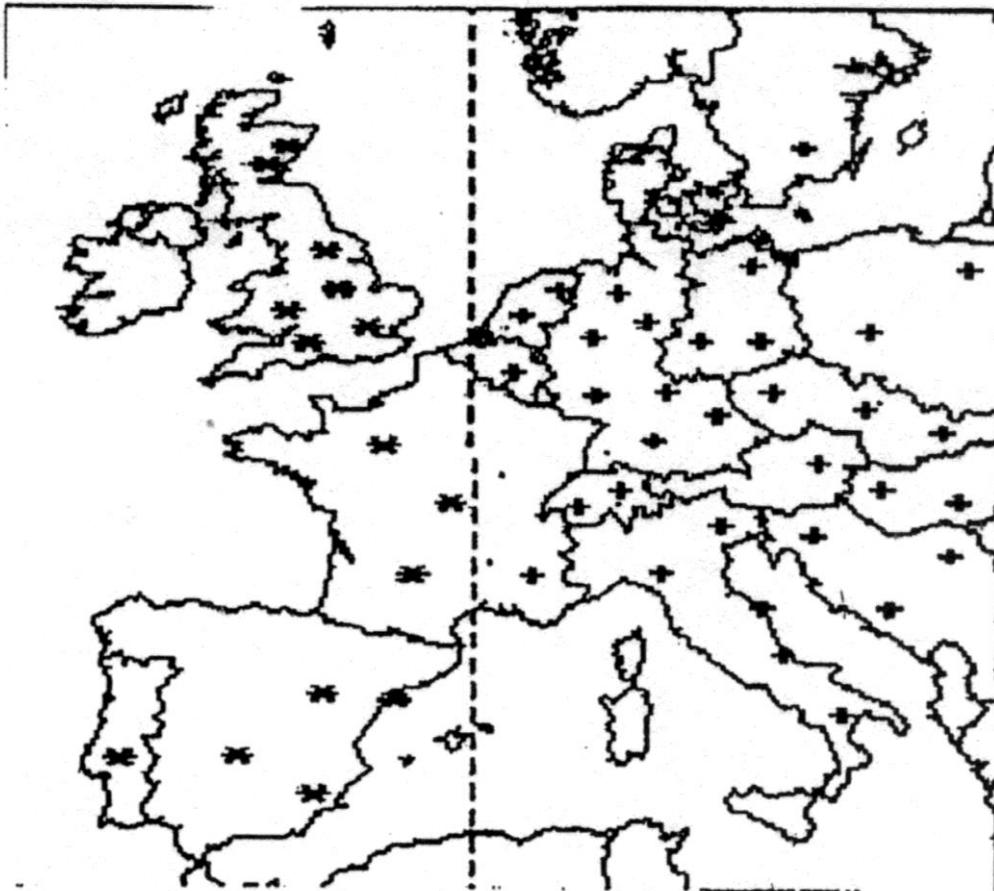


Figura 85 - Contatos *long path* em 3,5 MHz desde ZL7/G3SXW ao amanhecer em ZL7 (à direita, com sinal +) e no anoitecer em ZL7 (à esquerda, com sinal -).

Comparando, a expedição anterior de K5K para Kingman Reef não trabalhou nenhum contato via *long path* nessa banda; ela esteve muito próxima de populações amadoras significativas e não encontrou nada disponível em contatos *long path*.

Capítulo VIII - Química e Propagação nas Bandas Baixas

1 - Íons, Átomos e Moléculas

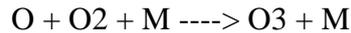
O DX nas bandas baixas é melhor à noite durante o ciclo solar mínimo. Nesses momentos, a ionosfera está mudando lentamente, após o pôr do Sol e antes do próximo amanhecer. Na ionosfera inferior, onde os sinais das bandas baixas são propagados, as principais reações ionosféricas à noite estão relacionadas com a recombinação dos remanescentes dos processos iniciados quando o Sol estava visível, como a fotoionização e a fotodissociação dos constituintes permanentes, nitrogênio molecular e oxigênio, como discutido anteriormente.

Além disso, as mudanças na propagação das bandas baixas ocorrem em outras escalas de tempo lento, mudanças com as estações e com os ciclos solares. Essas são de origem astronômica ou astrofísica e não são nenhum grande mistério, pelo menos à primeira vista. Entretanto, essas mudanças envolvem a química dos constituintes secundários, como o ozônio e o vapor d' água. Portanto, a química do H-N-O da atmosfera e as escalas de tempo para suas reações químicas são importantes, assim como de que forma o espectro solar muda ao longo do tempo e dos ciclos solares.

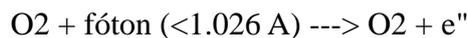
Entretanto, o *dx man* enfrenta essas mudanças baseado em sua confiança ou longa experiência, não se preocupando de que forma o ozônio e o UV solar afetam a ionosfera e o DX nas bandas baixas, muito menos nas escalas de tempo usadas para todas as outras reações químicas importantes. A esse respeito, o *dx man* tem sorte, no sentido de que as proporções das reações relevantes são todas rápidas, quando comparadas a essas escalas de tempo, conseqüentemente a atmosfera e a ionosfera do *dx man* estão passando por uma situação de quase equilíbrio no curso de um dia, mês, ano, estação do ano ou ciclo solar.

O *dx man* também enfrenta o espectro solar com confiança, sabendo que ele irá produzir a atmosfera e ionosfera adequados para o DX dia sim, dia não. Perdidos no meio desse processo estão os detalhes de que os fótons solares de menor energia quebram as moléculas como ozônio e nitrogênio molecular ($< 1.270 \text{ \AA}$), onde $10 \text{ \AA} = 1 \text{ nanômetro}$. Além disso, são necessários fótons solares com energia muito maior para ionizar as moléculas, como o nitrogênio e oxigênio ($< 796 \text{ \AA}$ e $< 1.026 \text{ \AA}$, respectivamente) e óxido nítrico e oxigênio atômico ($< 1.340 \text{ \AA}$ e 911 \AA , respectivamente) do que romper as moléculas até seus átomos constituintes.

No entanto, tornam-se importantes as escalas de tempo dos processos químicos e a energia dos fótons solares quando ocorrem as mudanças mais rapidamente do que aqueles lentos eventos astronômicos conhecidos dos *dx men*, como por exemplo se um eclipse solar bloqueia a radiação solar por breve período ou se acontece uma labareda solar com raios X solares energéticos eliminando os sinais ao ionizar a parte iluminada de metade da Terra. Nesse momento é formado mais ozônio na parte escura do eclipse solar através de um processo de combinação com três elementos:

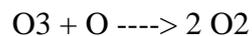


sendo M uma partícula neutra (N₂ ou O₂) ou os principais constituintes da ionosfera são ionizados:

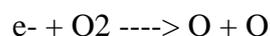
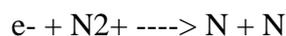


através de rajadas de raios UV e X solares.

Quando for este o caso, a taxa de tempo do ganho dos produtos como O₃ e os íons criados são então determinados examinando ambas as taxas de produção, como informado acima, e a taxa de perda das reações de destruição como, por exemplo, a perda de ozônio devida a colisões com oxigênio atômico e a dissociação por fótons infravermelhos:



e a perda de íons positivos pela recombinação com elétrons:



Então, tudo o que precisamos é uma equação simples dizendo:

taxa de ganho = taxa de produção - taxa de perda.

2 - Modificação Ionosférica

Se consultarmos a literatura atual, por exemplo o livro de Davies sobre Rádio Ionosférico (1990), existe nele uma série de outros tópicos capazes de modificar as propriedades da ionosfera, alguns de origem natural - atividade auroral, eventos de prótons solares (como aqueles de novembro de 2001) e cinzas produzidas por atividade vulcânica - que se propagam até ou através, das altitudes ionosféricas para afetar as camadas de ionização ou bloquear a radiação solar que cria a ionosfera.

Frequentemente a atividade auroral afeta a distribuição e o nível de ionização, aumentando a densidade dos elétrons na estreita faixa de latitudes aurorais o que, por sua vez, aumentará a absorção e produzirá desvios ou reflexões na onda. Essas modificações têm uma "assinatura", uma diminuição no campo magnético na superfície da Terra, facilmente reconhecida nos registros dos magnetômetros na zona auroral.

Por outro lado, os eventos de prótons solares, são capazes de perturbar calotas polares inteiras, colocando a ionização profundamente para baixo na região D e enfraquecendo a propagação ao aumentar enormemente a absorção. Além disso, os eventos de prótons solares podem durar dias até terminarem, ao invés de apenas uma hora, se tanto, como os eventos aurorais. Sua "assinatura" é definida através de um completo "*black-out*" da propagação através das calotas polares.

Muito menos aparentes para nós são os deslocamentos ou inclinações das camadas ionosféricas devido a efeitos que vem subindo desde baixo; o problema é que simplesmente não temos nenhuma medição de ventos nessas altitudes para nos informar o que está ocorrendo. Isso faz parte dos aspectos imprevisíveis da propagação nas bandas baixas (Brown, 2001).

Quanto às mudanças de origem artificial que persistem ao longo do tempo isso é outra matéria. Nesse aspecto estamos normalmente lidando com alguns eventos de larga escala, como uma explosão química ou nuclear, poluição atmosférica ou o lançamento de algum veículo espacial importante no meio de um conteste de DX. A primeira modificação artificial foi um caso de um dia e uma noite, o Efeito Luxemburgo, na década de 1930, quando um poderoso sinal de rádio modulou a ionosfera que estava transportando um outro sinal do ponto A para o ponto B.

Devido a esse evento, uma poderosa estação de radiodifusão (200 kW em 252 kHz) em Luxemburgo foi escutada por modulação cruzada de sinais que iam da Suíça para a Holanda em 650 kHz. Essa modulação ocorria nas frequências de áudio e praticamente todos os amadores ouviram falar a respeito desse efeito. O que é menos conhecido é que a análise mostrou que isso envolveu mudanças no índice de refração da ionosfera devido ao aquecimento dos elétrons pelo campo elétrico do sinal de Luxemburgo. Os dias de poderosas estações de radiodifusão, como os 500 kW da WLW da cidade de Cincinnati, já se foram.

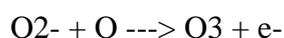
Entretanto, os campos elétricos em frequências abaixo da faixa de radiodifusão dão origem a outro tipo de aquecimento ionosférico, devido a poderosas estações de VLF operadas pelo governo [dos EUA] em localidades espalhadas pelo globo, que servem a suas necessidades de comunicações militares. Uma recente investigação teórica (Rodriguez e Inan, 1994) a respeito dessa questão, até mesmo demonstrou que a extensão da região acima da estação de VLF produz aquecimento dos elétrons ou melhoria na frequência das colisões entre partículas neutras e elétrons na ionosfera.

Por exemplo, transmissores como a NAA (1.000 kW) na cidade de Cutler, ME, ou a NLK (850 kW) na cidade de Jim Creek, WA, aquecem faixas da ionosfera acima, com um formato cônico, dobrando a frequência de colisões entre os elétrons e os constituintes neutros a 87 km. A frequência das colisões cai então para os valores ambientes nas altitudes maiores ao redor dos 200 km a partir do centro da antena transmissora.

O aquecimento dos elétrons de uma parte da ionosfera modifica ali a química dos íons. Para aquecimento por VLF, a região D é afetada, dando origem a uma redução na densidade dos elétrons. O mecanismo é devido ao aumento na perda de elétrons pela formação de íons negativos a partir da agregação em três componentes de elétrons com o oxigênio molecular:



(onde M é O₂ ou N₂) em competição com o desligamento colisional pelo oxigênio atômico:



O aquecimento dos elétrons aumenta a taxa das colisões entre os elétrons e as partículas neutras, desse modo incrementando a taxa de desligamentos dos três componentes. Entretanto, a taxa de desligamentos colisionais pelo oxigênio atômico neutro não é afetada pelos campos elétricos, portanto a densidade dos elétrons diminui devido à maior taxa de formação dos íons negativos. O aquecimento dos elétrons é, por si só, muito rápido, porém a constante de tempo para a agregação dos elétrons e as mudanças na composição química da região é próxima a 100 segundos, portanto esta é a escala de tempo para a redução da densidade dos elétrons quando o campo E do VLF é LIGADO.

Para o transmissor de 1.000 kW em Cutler, (NAA), os campos E acima do transmissor atingem entre 50 e 100 mV/metro e a perda da densidade dos elétrons é de cerca de 25 % em um estado estável. A extensão da região aquecida acima de NAA é mostrado na **Figura 86** em relação ao trajetos de 2.000 km na região nordeste da América do Norte. Com transmissões sendo ligadas e desligadas para Gander, os efeitos de aquecimento afetando a amplitude e a fase dos sinais em 21,4 kHz provenientes de NSS foram observados em 1992.

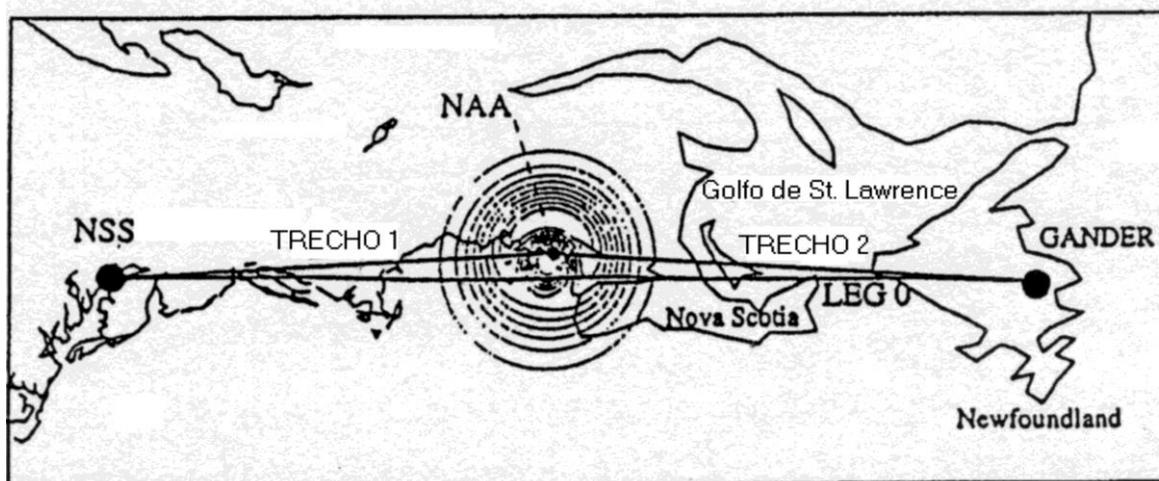


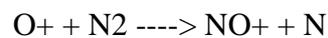
Figura 86 - Região aquecida por VLF sobre o transmissor NAA.

3 - Modificação auroral

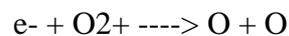
São igualmente bem conhecidas as modificações aurorais, quando a densidade dos elétrons aumenta devido ao bombardeio auroral. No entanto, muito menos conhecidas são as diminuições na densidade dos elétrons que podem resultar do aquecimento dos íons positivos pelos campos E aurorais.

Esses campos E, que atingem entre 50 e 100 mV por metro, são comparáveis em magnitude àqueles dos transmissores de VLF de megawatts, estendendo-se além das regiões de alto influxo de elétrons e cedendo energia para os íons O⁺ entre as colisões com partículas neutras acima da região E.

Isso aumenta a efetiva temperatura dos íons até aproximadamente 1.500 K, no que diz respeito às interações químicas, o que resulta em enorme aumento na troca de cargas entre moléculas de nitrogênio e oxigênio e aumentos nas densidades dos íons moleculares:



Esses íons recombinaem com elétrons:



em uma taxa que é muito mais rápida do que a recombinação radioativa dos elétrons com o O⁺. Como resultado, a recombinação reforçada proveniente do aquecimento dos íons poderá reduzir a densidade dos elétrons em até 25 %, produzindo "buracos polares" (Kelley, 1989).

Tendo isso em mente, poderemos entender de que modo campos elétricos de CC podem reduzir as densidades dos elétrons acima do nível de 100 km nas regiões polares. Isso, por sua vez, aumenta os contornos de isofrequência da frequência do plasma na região, aumentando os saltos dos sinais dos *dx men* das bandas baixas de uma determinada EVF que esteja cruzando as calotas polares e, em alguma extensão, reduz a absorção ionosférica aqui também.

Os íons positivos são aquecidos mais por CC do que por CA. Os campos E, como podem ser muito massivos para responder ao campos E rapidamente variáveis no tempo, no espectro rádio de VLF. A escala de tempo para as reduções de densidade dos elétrons em baixas altitudes, devido aos efeitos dos íons positivos, é mostrada na curva inferior da **Figura 87**.

Entretanto nas altitudes maiores, onde as colisões com as partículas neutras são muito menos frequentes devido à menor densidade, os elétrons não respondem à CC. Os campos E tem sua temperatura aumentada ao redor de 2.000 K, bem acima daquela dos íons positivos.

As taxas de recombinação dos elétrons com os íons NO^+ e O_2^+ são reduzidas nas temperaturas mais altas, com o resultado da densidade dos elétrons não mais diminuir, porém, ao invés de aumentar nas altitudes mais altas, como mostrado pela curva superior na **Figura 87**.

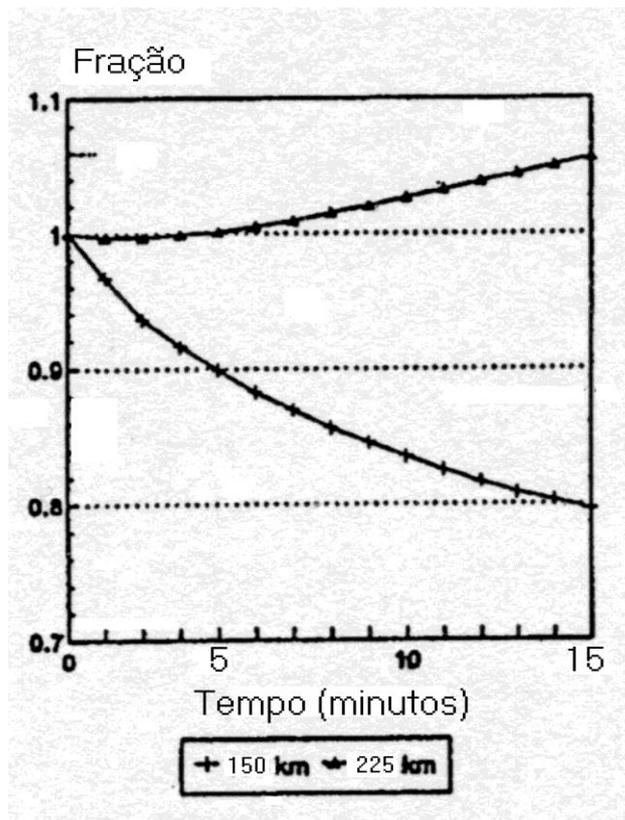


Figura 87 - Variações da densidade dos elétrons devido aos campos E aurorais.

Os "hot spots" ionosféricos devido a transmissores de VLF, são provavelmente em número tão reduzido para afetar o DX nas bandas baixas, no entanto sua detecção nos circuitos de VLF reconhece a redução nas densidades dos elétrons nas camadas polares devido aos campos elétricos comparáveis de origem auroral. No entanto, um suporte ainda maior vem dos contatos em 160 metros através das calotas polares para VE1ZZ por VK6HD e VK6VZ (Brown, 2001); a maioria desses contatos foi em trajetos entre anoitecer e amanhecer, livres da região de interrupção na **Figura 82** e não apenas limitada ao mínimo solar, como mostrado na **Figura 88**:

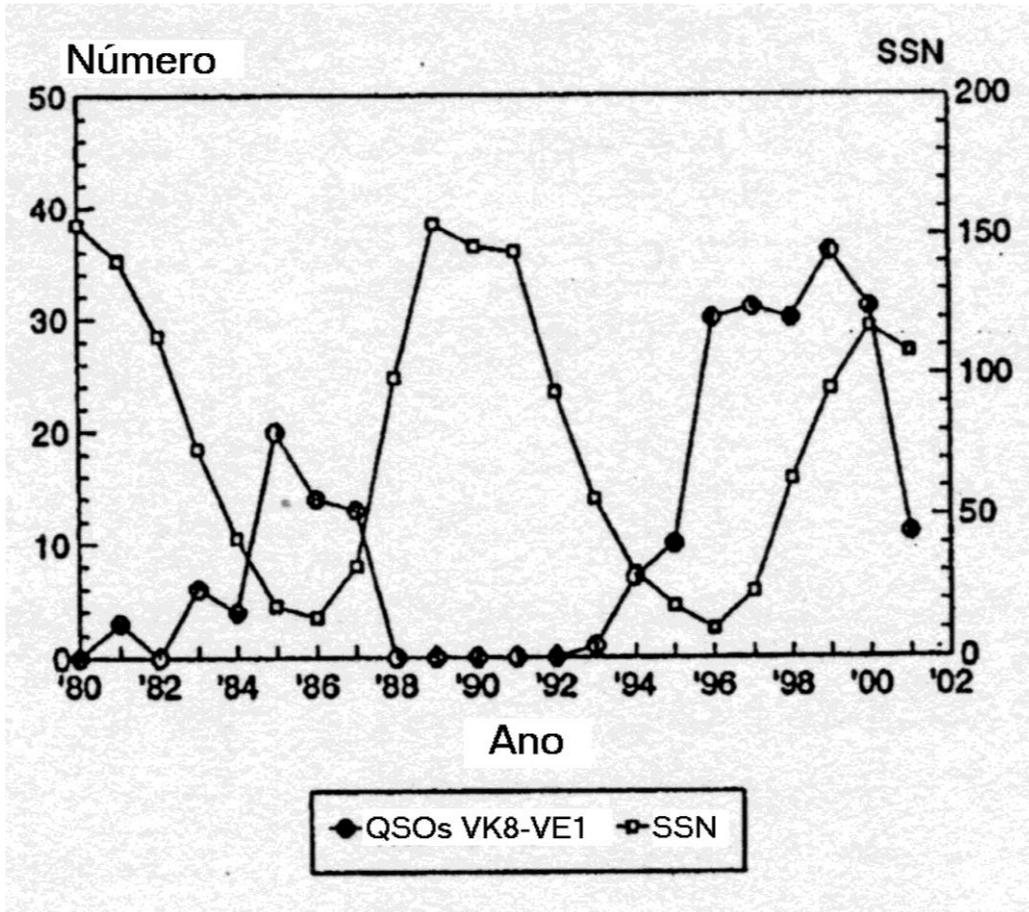


Figura 88 - Variações SSN relativas às datas dos contatos VK6-VE1.

4 - Íons negativos

A química dos íons é importante para a propagação nas bandas baixas, não apenas nas regiões polares, mas também nas meias latitudes, com o efeito que a química dos íons negativos tem na absorção ionosférica. Como mencionado anteriormente, a densidade dos elétrons no horário noturno na região D é abaixada pela formação de íons negativos e as taxas entre elétrons e íons negativos podem atingir valores altos entre 10 e 100 antes do amanhecer. Esses íons negativos removem elétrons dos processos de absorção pois são muito massivos para responder aos sinais que passam. Com o amanhecer, os elétrons sofrem destaque dos fótons, mas como estão muito ligados, requerem fótons UV para esse processo. Assim, o *dx man* das bandas baixas ganha um "atalho", uma janela entre 15 e 30 minutos antes do começo da absorção com o nascer do Sol, pois os elétrons poderão permanecer ligados até que o UV solar suba além da camada de ozônio, a cerca de 40 km acima do nível do solo.

Os eventos aurorais são outra forma através da qual uma fonte natural pode depositar ionização na ionosfera e afetar o DX nas bandas baixas. No entanto, as partículas são diferentes, elétrons versus prótons, e as altitudes onde a ionização é depositada, região E versus região D, cada uma delas, tem sua própria química. Assim, os elétrons depositam ionização acima do nível dos 100 km, uma região rica em oxigênio atômico.

Retornando ao esquema das reações na **Figura 89**, fica claro que o oxigênio atômico trabalha contra a formação dos íons negativos. E foi descoberto ser este o caso (Brown e Barcus, 1963), com os dados fornecidos na **Figura 81**, mostrando nenhum efeito dia/noite quando se trata de absorção auroral. Conseqüentemente, em contraste com os eventos de prótons solares, não ocorre nenhuma redução na densidade dos elétrons nos eventos aurorais devido à formação de íons negativos, pois isso é algo que acontece apenas nas altitudes menores, na região D, uma região na qual não existem grandes quantidades de oxigênio atômico.

5 - Íons positivos

Os íons positivos são encontrados espalhados ao longo da ionosfera mais baixa porém, como os íons negativos, sofrem uma mudança na composição na natureza da região D. Desse modo, ao invés de sempre aparecerem como íons de O₂, N₂ ou NO, abaixo dos 80 km eles aparecem como íons de agrupamentos de água, H⁺ (H₂O)_n. Esse resultado causou grande surpresa em 1965, porém nosso conhecimento progrediu a ponto de agora eles serem incluídos nas ionosferas de referência.

A produção desses íons começa com reações como:



e é seguida pelo agrupamento com outras moléculas de água. Os íons do vapor d'água não são constituintes primários nesta altitude menor, assim as reações com O₂⁺ são também importantes (Reid, 1978) e também podem resultar em agrupamentos de íons. Além das reações de formação, as taxas de recombinação dos íons agrupados foram estudadas e determinadas grosso modo como um fator de 20 vezes maior do que as taxas para os íons moleculares, O₂⁺, N₂⁺ e NO⁺.

Para os *dx men* das bandas baixas, a formação de íons negativos e maiores taxas de recombinação de elétrons em agrupamentos de água nas menores altitudes durante momentos quietos servirá para reduzir a densidade dos elétrons, em benefício dos *dx men* das bandas baixas. No entanto, a abundância desejada dos constituintes principais é muitas ordens de magnitude maior do que aquela do vapor d'água. Como resultado, durante situações sem equilíbrio, tal como nos eventos de prótons solares, a taxa de ionização das moléculas de água na região D é muito menor do que para as moléculas primárias, deslocando a altitude de transição para agrupar íons para baixo, ao redor dos 10 km.

Capítulo IX - Predições sobre propagação

1 - Modos básicos

Existem três modos através dos quais as ondas de rádio são propagadas - refração, reflexão e espalhamento. A refração da onda pela ionosfera é o modo mais comumente utilizado e o melhor compreendido, pelo menos na faixa de HF. Assim, existe uma variedade de programas de propagação que usam entradas básicas como data, horário, número de manchas solares e caminho para fornecer predições para o usuário utilizando a refração. Para os radioamadores, tudo começou com o programa MINIMUMUF, ao redor de 1982, baseado no trabalho de Raymond Fricker da BBC no início dos anos 80 e evoluiu para o IONCAP e seus derivados como Capman, VOACAP e ICEPAC.

O algoritmo da camada F no trabalho de Fricker serviu de base para diversos programas de MUF, incluindo MINIPROP, IONSOUND e DXAID. Mais recentemente, as ionosferas de referência da CCIR e URSI a partir do IRI 90 têm sido usadas diretamente na Versão 5.0 do DXAID e mesmo isso será atualizado em futuro próximo agora que o IRI 2001 foi lançado.

Para o *dx man*, os programas de MUF são de grande ajuda, utilizando mapas globais das frequências críticas, foE e foF2, e métodos sensíveis baseados em pontos de controle para prever as MUFs nos trajetos. Também são incluídos ruídos artificiais e perda de sinal e o usuário de HF obtém uma razoável estimativa de quando um trajeto abre e fecha.

Porém não se pode perder de vista o fato de que essas são previsões estatísticas, baseadas em valores médios (50%) das frequências críticas; podem ocorrer flutuações da ordem entre 15 e 20 %. No entanto, a falha na MUF nas bandas altas pode ser contornada em diversos horários usando o espalhamento lateral dos sinais.

Naturalmente, os programas de MUF não são necessários para trabalho nas bandas baixas, portanto o *dx man* das bandas baixas se sentiria sem orientação quando se trata de questões de propagação. Entretanto, a elevada absorção torna necessário que se opere nos horários noturnos, e o utilitário de mapeamento LoProp do software DXAID faz uso disso, permitindo que o usuário veja quando um trajeto abre e fecha com o avanço da escuridão. Isso é feito fazendo com que o hemisfério escuro avance no tempo, digamos um mapa azimutal e uma taxa [de avanço] escolhida pelo usuário; dessa forma, o usuário será capaz de ver quando o trajeto se abriria, quando se fecharia devido ao nascer do Sol, além da disponibilidade de outros trajetos.

Na região das bandas baixas, a propagação dos sinal se divide em dois componentes básicos, estável ou de fundo e variável. O componente de fundo resulta da reflexão ou espalhamento dos sinais por estruturas fixas ao longo dos caminhos - montanhas, planaltos, oceanos calmos e outros. As reflexões podem ser especulares, como em um espelho, ou difusas, seguindo em todas as direções a partir de uma superfície áspera próxima ao espalhamento. No entanto, como cerca de 80% da superfície da Terra é coberta por água, essas reflexões e espalhamentos representam grande parte dos caminhos no DX das bandas baixas.

O componente variável atua mais nas alturas ionosféricas, porém inclui a reflexão e o espalhamento juntamente com a refração. Entretanto, a reflexão ionosférica e o espalhamento são ambos esporádicos no tempo e caóticos em sua natureza - desde a ionização durante uma aurora raiada e irregularidades ionosféricas, devida ao aquecimento auroral durante fortes tempestades magnéticas; o que deixa poucas perspectivas para se fazer previsões são os aspectos da refração.

Para isso, a ionosfera tem de ser eletricamente neutra, com a mesma densidade de íons positivos que a densidade dos elétrons; no entanto, os íons positivos são superados em número em uma relação de, pelo menos, um milhão para um, e com uma alta taxa de colisões entre as duas partículas, é simplesmente inescapável a possibilidade de que íons positivos seguirão em seus movimentos e os elétrons tag ao longo da atração Coulomb.

Portanto, a densidade dos elétrons na ionosfera inferior é de caráter ou natureza meteorológica, nem sempre em repouso, nem sempre paralelos à superfície da Terra.

A refração ionosférica pode continuar sendo vista como um processo ordenado enquanto a densidade dos elétrons variar lentamente sobre uma região que se estenda, pelo menos, um comprimento de onda em todas as direções. Nos 1,8 MHz essa distância é de pelo menos 160 metros e demanda uma estabilidade muito maior da ionosfera do que quando as mesmas ideias são aplicadas na banda dos 10 metros.

Além das questões de estabilidade, a abordagem teórica para refração nas bandas baixas terá de incluir o campo geomagnético pois a frequência de operação, particularmente nos 1,8 MHz, é muito próxima das giro frequências do elétron no campo da Terra. Os programas de predição acima mencionados chegam a frequências ao redor de 3 MHz, mas dizem respeito apenas com ondas que tenham polarização linear e não à polarização elíptica resultante dos efeitos do campo da Terra. No entanto, foi encaminhado pelos cientistas no Laboratório Central de Rádio Propagação (CRPL) em Boulder e seu trabalho é agora encontrado no programa PropLab Pro (Oler, 1996).

Esse programa é mais um auxílio, não uma ferramenta de predição, que é utilizado na interpretação da propagação nas bandas baixas. Com ionização mais do que suficiente acima, as MUFs não são uma preocupação nas bandas baixas, e o programa PropLab é utilizado para mostrar plotagens de traços resultantes da propagação magnetoiônica, dutos e desvios, e calcula a absorção do sinal, como foi feito anteriormente com o QSO VK6HD e VP9AD.

Essas observações realmente apontam para a ideia de que a propagação nas bandas baixas é imprevisível porque, no presente momento, falta-nos conhecimento das variáveis que descrevam as movimentações atmosféricas nas altitudes onde os sinais de bandas baixas são refratadas. Entretanto, as predições olham para a frente no tempo e é possível conseguir um pouco disso com as condições solares/terrestres que têm influência na ionosfera, como resultado dos impactos do vento solar na magnetosfera.

2 - Nowcasting

Para visualizar isso, temos de examinar a atividade magnética e os índices K usados para descrevê-la. Os valores desses índices provenientes da Rede Kp são levados em consideração para fornecer uma medida da entrada de energia proveniente do vento solar para as regiões aurorais. No entanto, o vento solar atinge a órbita da Terra seguindo uma Espiral de Arquimedes com linhas do campo interplanetário com origem no Sol, como mostradas na **Figura 90**, e o Sol varre essas linhas de campo para além da Terra na medida em que ele gira com um período com aproximadamente 27 dias. O fluxo do vento solar ao longo dessas estruturas é denominado "mangueira de jardim" e, na medida em que o vento solar varia sua velocidade e densidade, a entrada de energia na Terra aumenta e diminui com a rotação do Sol.

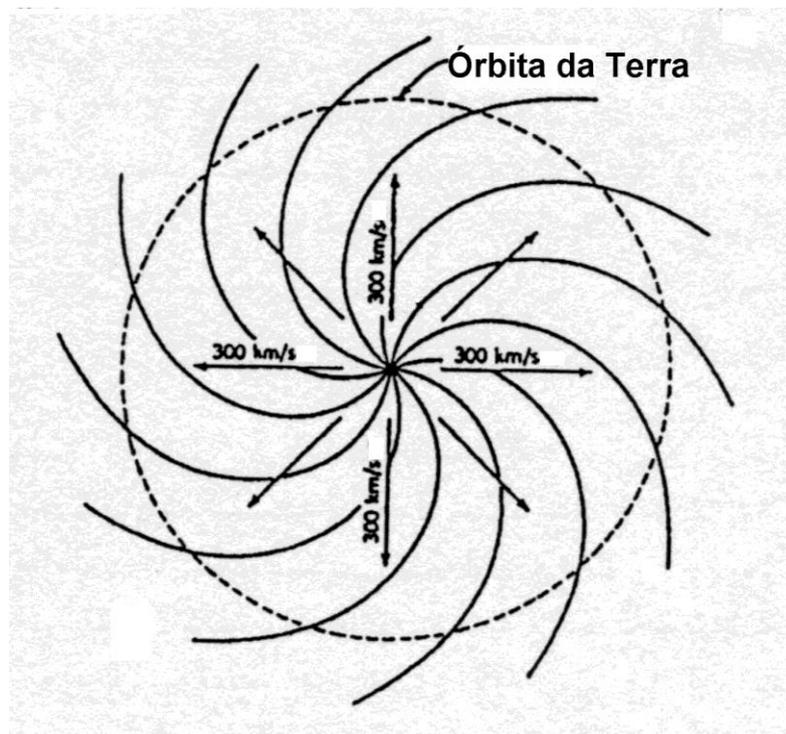


Figura 90 - Espiral de Arquimedes das linhas de campo interplanetário.

Entretanto, nem sempre os fluxos solares são de curta duração, da mesma forma as recorrências se desenvolvem nos registros da atividade magnética e podem ser usados para prever níveis altos e baixos de distúrbio na Terra. As recorrências estão associadas aos fluxos solares provenientes dos orifícios coronais no Sol e tendem a ser mais frequentes nas fases declinantes de um ciclo solar.

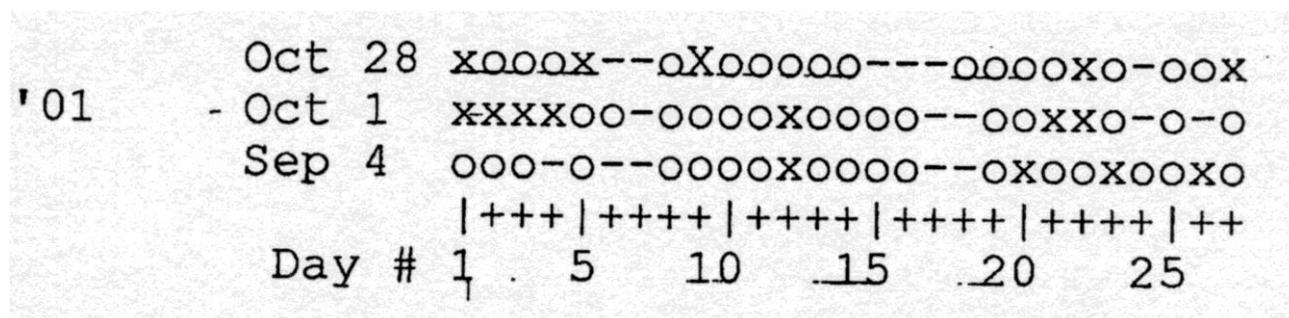
Entretanto, podem ocorrer em outros momentos, como pode ser observado a partir dos dados atuais.

Isso traz à baila a ideia do "Nowcasting", que trabalha com séries curtas de pontos de dados atuais, ao invés de tentar "prever" a partir de séries muito maiores de observações. Assim, usando séries curtas de somas K ou valores A provenientes de um magnetômetro auroral, poderão ser utilizadas tendências de recorrência para prever apenas quando distúrbios ionosféricos de origem magnética/auroral estarão no mínimo para o DX nas bandas baixas em trajetos através de altas latitudes.

O sucesso na predição usando séries curtas de pontos de dados melhora com qualquer reorganização da análise dos dados que se aproveite de até mesmo uma sugestão de recorrência já registrada no registro curto. É fornecido abaixo um exemplo que examina a distribuição dos valores planetários Ap para a atividade magnética e ilustra aquele aspecto do método para a temporada de DX nos 160 metros nos anos de 2001 e 2002.

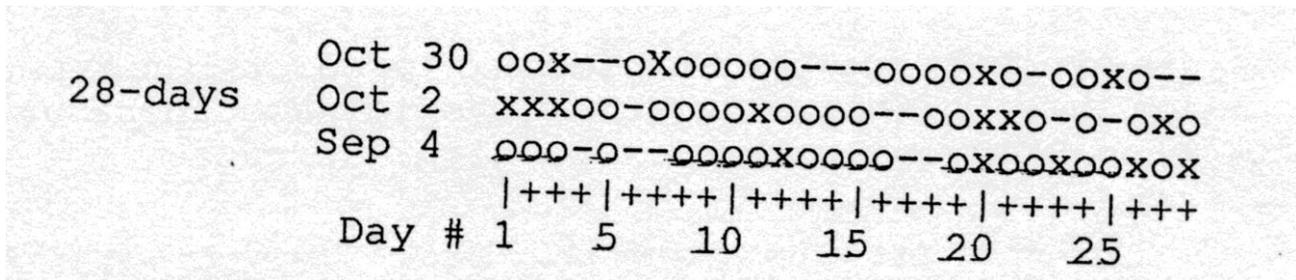
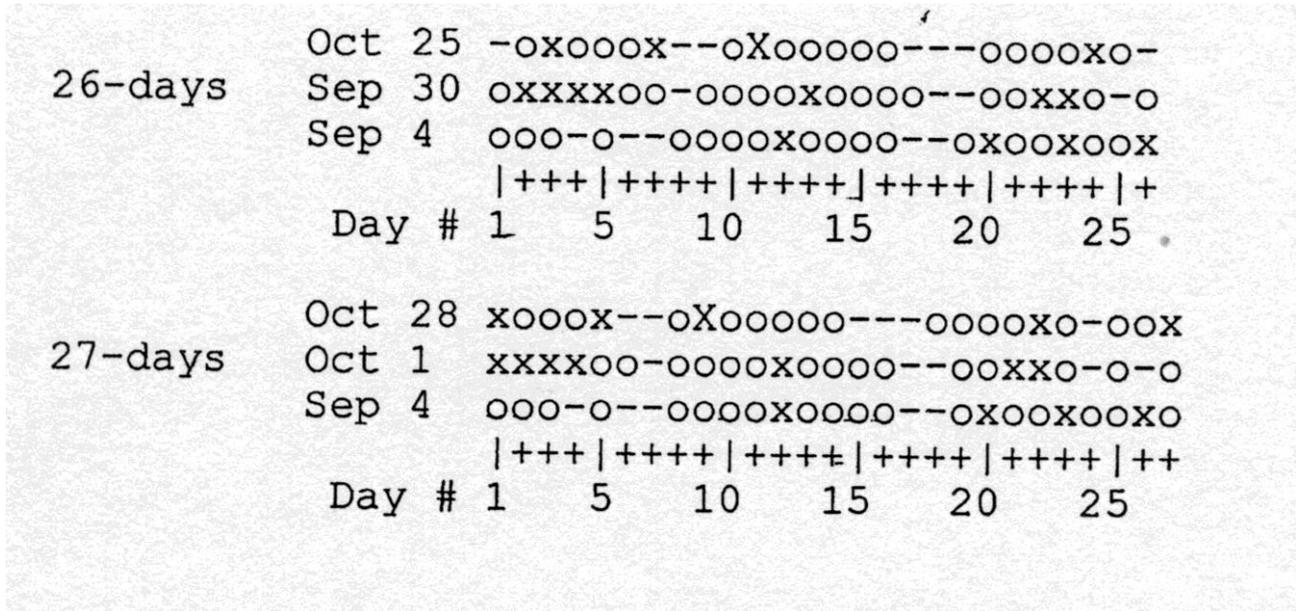
A temporada de DX nos 160 metros começa no equinócio de Outono. Usando os índices Ap provenientes das altas latitudes, podemos constatar três níveis de distúrbio ionosférico: baixo ($Ap < 10$), de médio para fraco ($10 < Ap < 50$) e alto ($Ap > 50$). Com uma análise de época superposta sobre a base de 27 dias, os níveis de atividade durante as três primeiras rotações da temporada podem ser distinguidas simbolicamente utilizando "X" para $Ap > 50$, "x" para $Ap > 25$, "o" para valores entre 10 e 25 e "-" para $Ap < 10$.

Para as três primeiras rotações solares de 27 dias em 2001 temos:

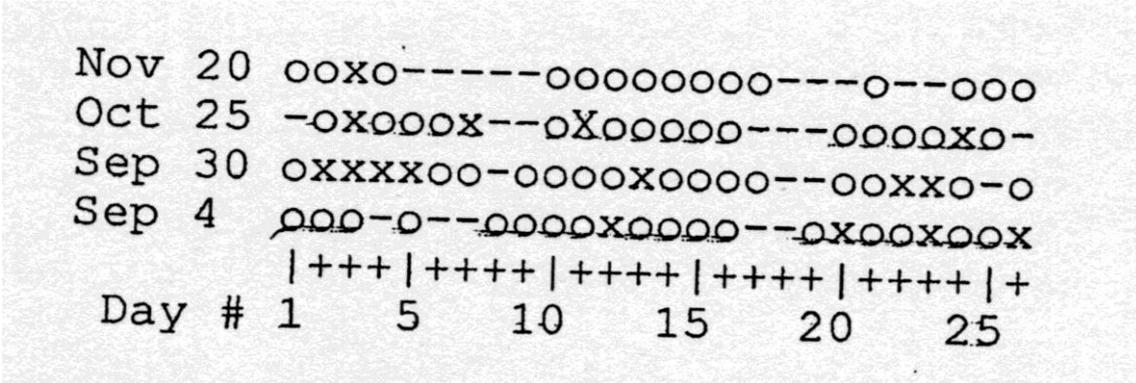


Esta curta tabela mostra a recorrência de um momento quieto durante dois dias, n° 7 e 17.

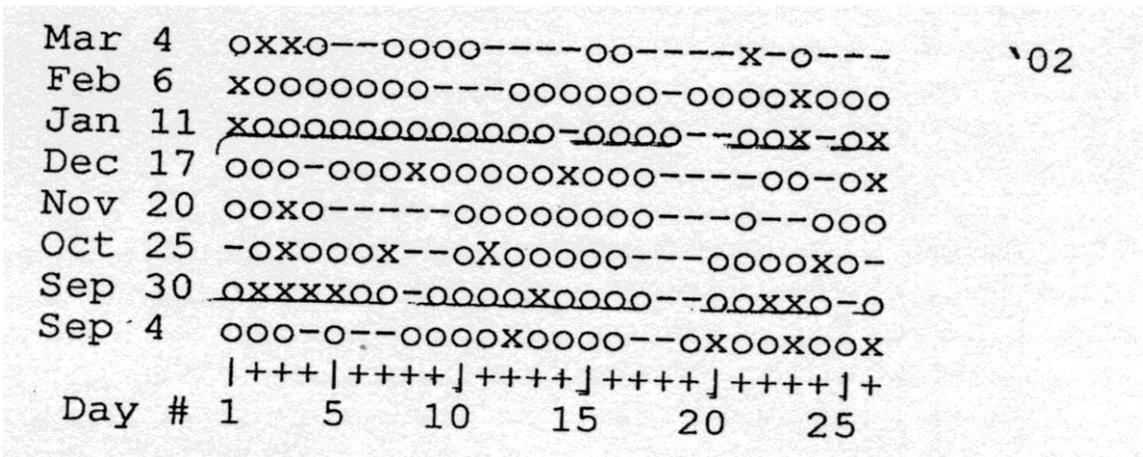
Entretanto, os efeitos geofísicos nas altas latitudes são resultantes do impacto do vento solar na parte frontal da magnetosfera. Isso poderá variar devido ao efeito da velocidade do vento solar no ângulo da "mangueira de jardim" do vento solar na latitude solar de origem na medida em que varia a velocidade da rotação, a partir de 24 dias nas latitudes solares baixas e até 33 dias na latitude de 75 graus. Portanto, para uma visão completa, são mostradas tabelas de época superpostas para rotações solares de 26, 27 e 28 dias:



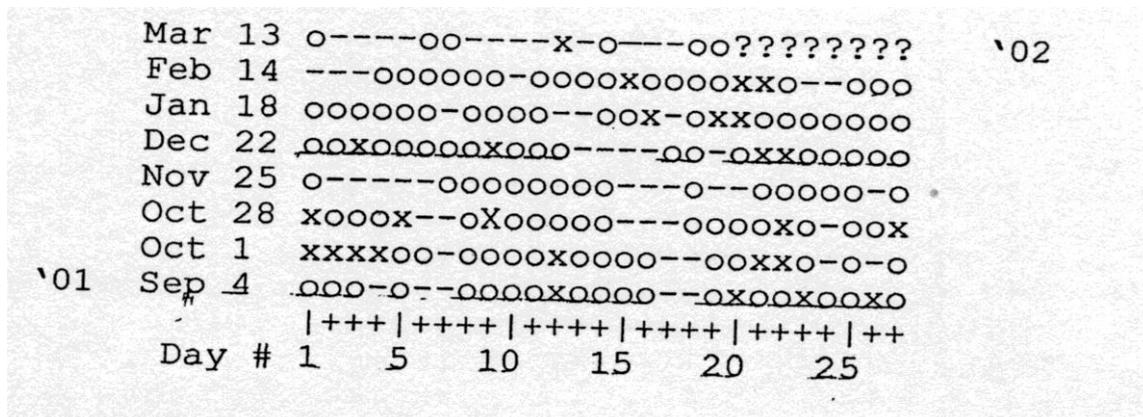
Após três das rotações de 27 dias, ocorre uma boa demonstração da tendência de recorrência, com expectativas de quietude magnética ou ionosférica na próxima rotação ao redor do dia nº 7 (27 de novembro) ou ao redor do dia nº 18 (07 de dezembro). Por outro lado, o registro de 26 dias proporciona um "nowcast" que é um pouco melhor no início de dezembro do que nos últimos dias de novembro.



Para a temporada do conteste de DX em 160 metros, do início de dezembro até o final de janeiro, a recorrência do dia 18 continua sendo um pouco mais consistente quando os dados são organizados em bases de 26 dias:



em seguida em bases de 27 dias:



Além disso, para toda a temporada de DX de 2001 e 2002, a organização os dados Ap em ambas as bases, de 26 dias e de 27 dias, mostra que a recorrência do dia 18 continuou ativa para 8 rotações solares enquanto que a quietude para o dia 7 essencialmente terminou após 4 rotações.

Essas foram previsões da quietude magnética/auroral em altas latitudes, onde o vento solar tem seu impacto na magnetosfera. Nas bandas de HF, a técnica de observar as tendências de recorrência pode ser usada para encontrar horários de frequências críticas altas, simplesmente plotando o ruído solar em 10,7 cm proveniente de regiões ativas na medida em que giram ao longo do disco solar. A base física para isso é diferente, EUV proveniente do Sol e não o vento solar, portanto o método da análise de época superposta não pode ser usado pois os dados de 10,7 cm deixa maiores margens de interpretação, com valores de fluxo variando entre 65 e 300. Entretanto, as recorrências continuam sendo uma boa forma de se procurar por dias com MUFs altas.

3 - Estudos feitos por satélites

Uma outra abordagem para examinar a atividade magnética/auroral envolve a obtenção de estimativas de entrada de energia nas altas latitudes a partir de dados do influxo de elétrons dos satélites NOAA ao invés dos qualitativos dados obtidos do Kp. Neste respeito, satélites como o NOAA 14 transportam instrumentos sensíveis para a faixa de energia dos elétrons que dão origem à aurora até cerca de 20 keV.

Passagens individuais dos detectores através de ambas as calotas polares podem ser examinadas, porém resultados estatísticos provenientes de milhares de passagens são mais úteis para a compreensão do nível de atividade, como mostrado a seguir na **Figura 91**:

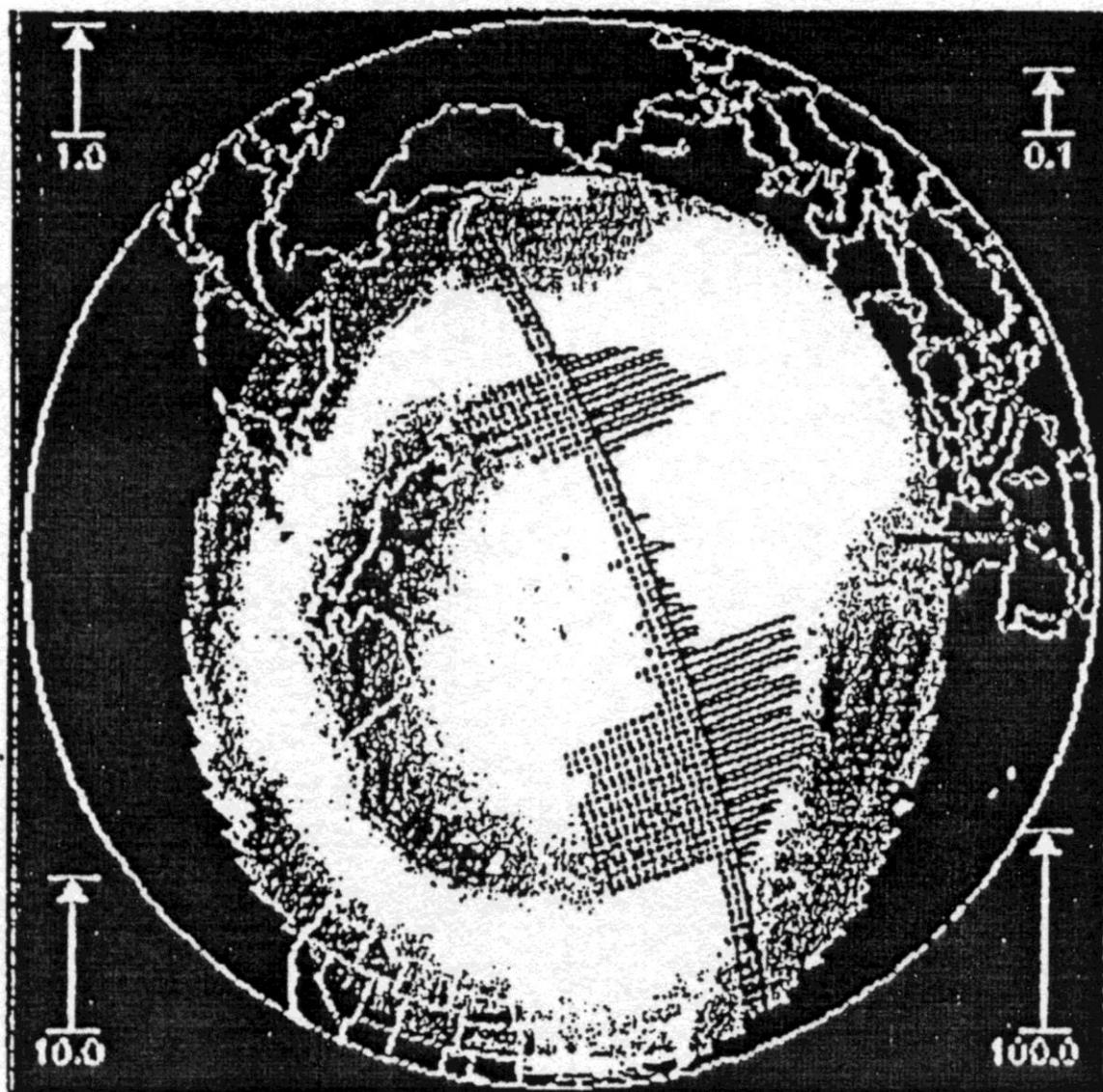


Figura 91 - Passagem do satélite NOAA 14 através da calota polar Norte.

Esta figura mostra os dados do detector para uma passagem através da calota polar entre a ilha Novaya Zemlya e a Nova Escócia. As linhas pontilhadas à esquerda da rota do satélite dão uma medida da energia dos elétrons registrados pelo detector naquele ponto, enquanto que a linha contínua à direita da rota dão uma medida da quantidade do fluxo de energia para dentro da atmosfera naquele momento. A passagem mostrada nesta figura teve uma entrada de energia de 75 GW.

A partir das estatísticas de milhares de passagens polares, os dados são convertidos para uma estimativa da potência total (em GigaWatts) que é depositada pelas partículas em toda a região auroral; essa energia, por sua vez, é convertida em um índice de atividade, variando entre 1 e 10, relativo ao índice Kp:

Energia (em GW)	Índice de atividade	Índice Kp
entre 4 e 6	3	1+
entre 10 e 16	5	2+
entre 24 e 69	7	3+
entre 61 e 96	9	5-

Essa passagem em particular foi às 1150 UTC e, com o Sol bem acima do oeste da Europa, a passagem do satélite através da calota polar foi do entardecer para o amanhecer e a maior entrada de energia auroral está acima do oeste do Canadá e Alasca.

O leitor poderá ver as passagens atuais visitando o site:

<http://sec.noaa.gov/pmap>

e selecionando qual hemisfério se deseja observar. Além disso, existe disponível material básico para explicar como são criados os padrões de atividade auroral.

Uma nota de aviso: os padrões aurorais PMAP são de natureza estatística, predizendo a entrada de energia para a zona auroral, mesmo a entrada de energia para as partículas aurorais, variam entre 0 e 10 erg/centímetro quadrado. Entretanto, as probabilidades são apenas isso, médias, e não revelam a estrutura auroral efetiva em um determinado momento, visto pelo olho e por técnicas de imagens, tais como câmeras *all-sky*, fotômetros e painéis de riômetros.

Portanto, as cores cheias nos padrões PMAP são algo que pode confundir. Eles não são impenetráveis; existem aberturas nas "cortinas aurorais" e os sinais podem passar por elas. O melhor exemplo que posso apontar, para apoiar essa ideia, são os mais de 200 contatos entre entardecer e amanhecer ao longo de um período de 20 anos, com índices K com média de 2 mas que chegam até a 4.

4 - Latitudes menores

A discussão até o momento tem lidado primariamente com altas latitudes. A propagação nas bandas baixas cruzam as baixas latitudes pode ser perturbada, porém não na mesma extensão que nas altas latitudes, pois as linhas de campo contendo ionização são mais profundas na magnetosfera e mais imunes aos efeitos do vento solar. Isso pode ser dito de outra forma: a atividade auroral é resultante de sub-tempestades iniciadas pelo vento solar quando o campo magnético que ele gera na frente da magnetosfera aponta para o sul.

Por outro lado, os distúrbios que atingem as menores latitudes resultam de importantes tempestades geomagnéticas que são disparadas por ondas de choque no vento solar. Então, ao invés de começar gradualmente, a tempestade se inicia com uma súbita mudança ou começo impulsivo no campo horizontal da Terra, tipicamente um aumento positivo no componente horizontal, visto ao redor do mundo e durando ao redor de cinco minutos.

O que acontece então, é que as partículas existentes nos cinturões de radiação de Van Allen são precipitadas (Brown et al, 1961) para dentro da atmosfera em um padrão semelhante a um anel. Isso é breve e não percebido pelos *dx men* das bandas baixas, porém, além disso, as zonas aurorais se movem mais em direção ao Equador e é observado um desvio no sinal, a partir da borda interna da zona auroral, agora mais nas latitudes menores.

Um bom exemplo disso está no relatório feito por W0ZV (Tippett, 1991) em conexão com um contato com SM6CPY em 1988. Nessa ocasião o índice Ap era de 103 e no momento do contato o índice Kp era 5+, logo mais atingindo 7+. Para W0ZV, os sinais provenientes da Suécia estavam desviados para 110 graus, ao invés do apontamento usual de 30 graus e, para SM6CPY, os sinais dos EUA provinham da direção da América do Sul. Claramente, a estação sueca estava localizada dentro da calota polar, não na borda em direção ao Equador da zona auroral, e as reflexões, ao invés de refração, estavam ocorrendo ali.

Capítulo X - Conclusão

1 - Primeiras considerações

Ao rever os capítulos precedentes, fica evidente que este trabalho, ao contrário de ser um "Guia sobre a Propagação nas Bandas baixas", acaba sendo exatamente o contrário, ao citar um cenário "caótico" mencionado no Prefácio. Assim, quando a frequência de operação usada cai abaixo da frequência crítica para a ionosfera acima, o "Guia para o DX em HF" oferecido pelas MUFs se vai junto com elas e tudo isso é perdido e as operações nas bandas baixas mergulham em um "oceano escuro do ruído", com pouca informação para orientar o caminho. Esta é uma visão bem pessimista, não compartilhada por mim, na medida em que está ocorrendo um grande progresso em nossa compreensão do que ocorre por trás da propagação, mesmo nas bandas baixas onde a Física é bem mais complexa. Permita-me dar alguns exemplos recentes, começando com meus amigos australianos, VK6VZ e VK6HD.

Com a ajuda deles, *long path* em 1,8 MHz significa um bocado mais do que antes de 2001, e seus registros forneceram-me os dados que revelaram algo novo e diferente (Ireland et al, 2002), a alternância de trajeto equinocial e diurnal. Portanto, continuamos a estudar novos fatos sobre propagação nas bandas baixas, mesmo nesta data tardia. Entretanto, ferramentas melhores sempre ajudam. A esse respeito, quando encontrei alternância de trajeto nos registros deles, brinquei dizendo para Steve que "ele e Mike estavam voando às cegas", usando as tabelas de nascer e pôr do Sol não aproveitando os benefícios de um bom utilitário de mapeamento. Coloquei-os em contato com Peter Oldfield e ele os presenteou com cópias do DXAID. Agora, eles estão muito mais felizes, enxergando mais claramente o Universo do DX diante deles.

Entretanto, esta não foi a primeira vez em que consegui socorro da "turma lá de baixo". Recentemente, na terça-feira, dia 5 de março de 2002, celebrei o 40.o aniversário de um dos mais excitantes dias em minha carreira científica, o dia 5 de março de 1962. Naquele dia, meu grupo de pesquisa estava na Ilha Macquarie (VK0), ocupado voando balões de grande altitude transportando detectores de radiação. Ao mesmo tempo, o grupo de pesquisas de meu colega, o Professor Kinsey Anderson, da UC Berkley, estava no Alasca (KL7) fazendo a mesma coisa. Nossa esperança era observar simultaneamente o bombardeio dos elétrons (Anderson et al, 1963) nas regiões aurorais em ambos os hemisférios.

Apesar das terríveis condições meteorológicas em terra, nossos balões subiram sem incidente e prontamente adentraram em um enorme evento auroral em ambas as localidades, diferentes extremos das linhas de força do campo magnético que emergiam da Ilha Macquarie, cruzaram o plano equatorial a cerca de 5,2 raios terrestres e desceram no Alasca. Enquanto os efeitos da radiação que observamos nos excitaram, permitindo-nos obter uma plotagem dos fluxos de raios X aurorais bem em cima dos outros e ver a estreita concordância nos dois hemisférios, também houve outras excitantes características do evento.

A esse respeito, das observações do evento por riômetros, tanto na Ilha Macquarie como em Kotzebue, Alasca, como ilustrado na **Figura 92**, 106 têm sentido também para os *dx men* das bandas baixas:

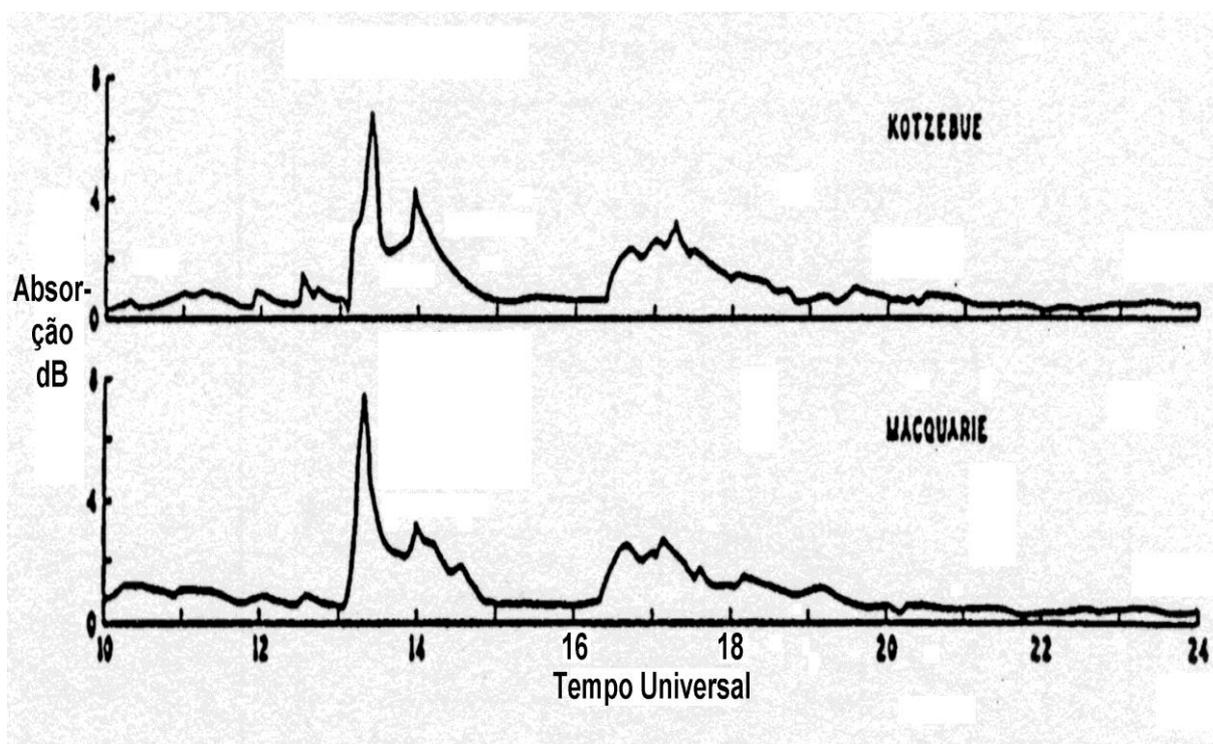


Figura 92 - Os registros de absorção dos riômetros localizados em pontos conjugados no campo geomagnético.

Os registros dos riômetros indicam para o *dx man* das bandas baixas que os efeitos da radiação auroral, que afetam a propagação através das latitudes altas, na realidade se originam em uma fonte na região equatorial, bem fora da magnetosfera, e os elétrons aurorais se encaminham para baixo nas linhas do campo em ambas as direções, como mostrado na **Figura 93**:

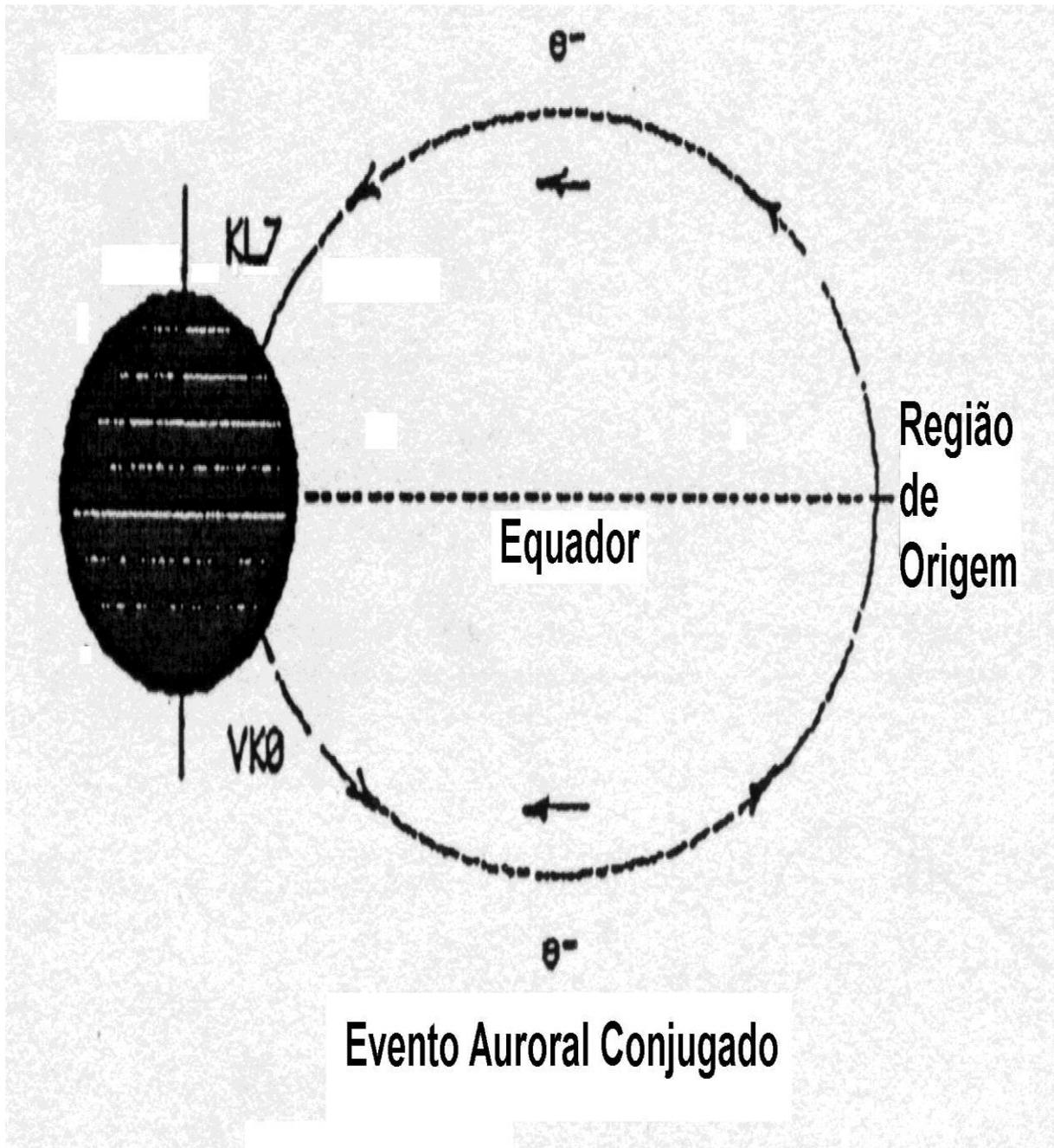


Figura 93 - Diagrama mostrando uma linha de força indo de S para N, com uma região fonte de elétrons enviando partículas para baixo e para dentro da atmosfera em pontos conjugados.

Isso ocorreu há 40 anos e continua sendo novidade para muitas pessoas ainda hoje.

Meus amigos canadenses, VE3OSZ e VE7DXR forneceram-me há um par de meses algumas "novidades" de interesse dos *dx men* das bandas baixas. Assim, monitorando sinais ao redor de 3,3 MHz provenientes da África do Sul, observaram (Kavanagh et al, 2002) aumento simultâneo dos sinais em Ottawa, ON e em Victoria, BC, em distâncias respectivamente de 13.200 km e 16.500 km, como ilustrado a seguir na **Figura 94**:

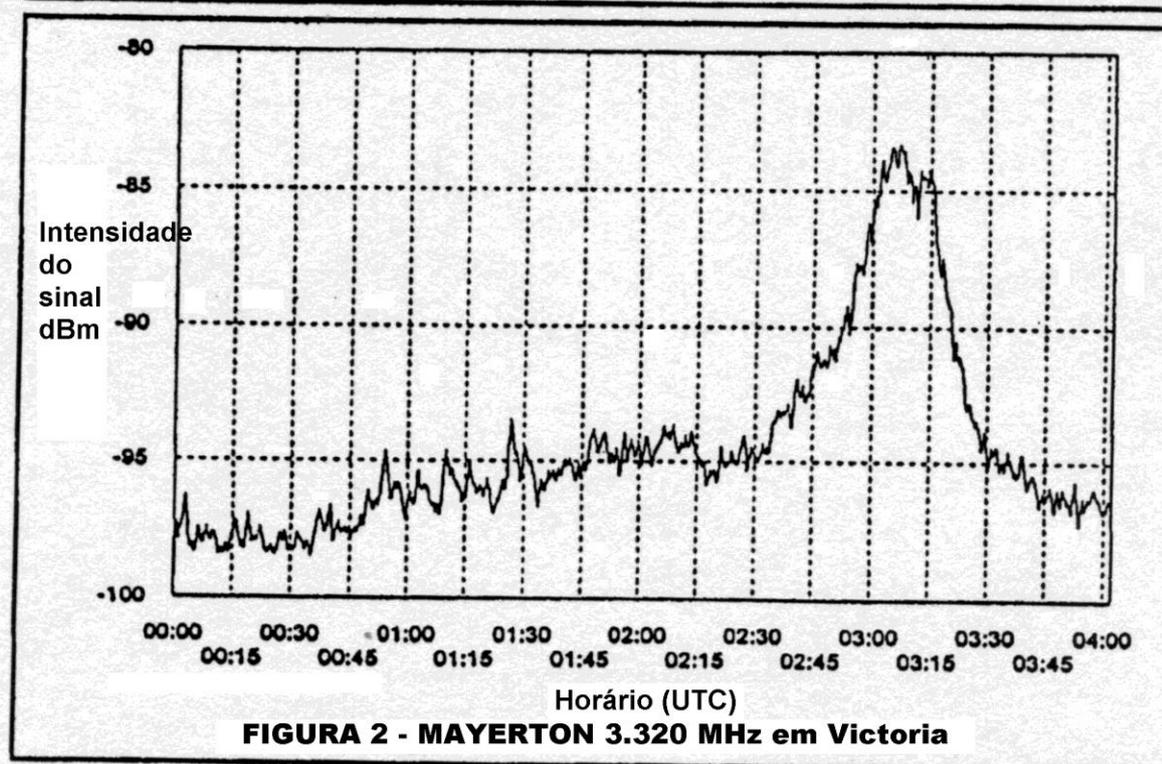
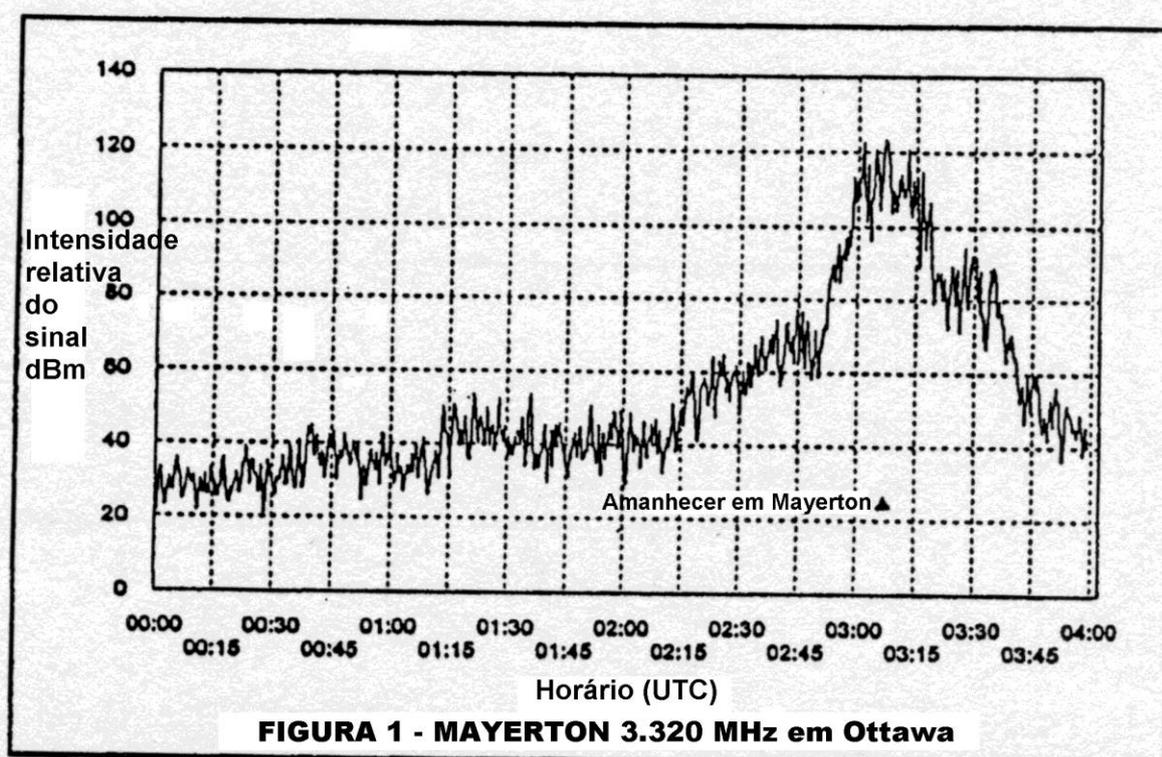


Figura 94 - Aumento simultâneo de sinais observados tanto em Ottawa como em Victoria, Canadá. As condições de propagação eram tais que os sinais de 3,3 MHz sofreram aumento ao amanhecer na região de origem, próximo ao transmissor na África, e se propagaram a partir de lá.

Esta é a única forma que explica a simultaneidade das observações em localidades receptoras separadas 3.300 km.

Existe um outro tipo de aumento ao amanhecer de origem magneto-iônica (Hall-Patch, 1999) ao invés de origem ionosférica, como foi o caso dos sinais ZS. Esses outros aumentos ocorrem ao amanhecer para um local de recepção e não há nenhuma simultaneidade envolvida. Eles são devidos aos sinais conduzidos por dutos, enviados de volta para o solo devido a um reflexo para baixo na ionosfera ao amanhecer, e são capazes de propagar os sinais eficientemente através de grandes distâncias sem perdas de solo intermediárias.

2 - Considerações finais

Novos resultados continuam surgindo no que diz respeito à propagação nas bandas baixas. Como já sugeri, muitos aspectos meteorológicos da propagação nas bandas baixas permanecem sem explicação, apesar de sem dúvida continuarem presentes.

Entretanto, quais são as melhores maneiras de pesquisar novos efeitos? A utilização de expedições de DX de alto nível é uma delas; isso certamente valeu a pena no caso de VK0IR. Os registros representaram, sem a menor dúvida, um "baú do tesouro", amostrando a propagação em todas as direções. Outra forma envolve o uso de radiofaróis ("*beacons*"), seja utilizando as estações de radiodifusão, da forma que fizeram VE3OSZ e VE7DXR, ou estabelecendo algum tipo de rede de *beacons* nas bandas baixas.

A esse respeito, existiu um bocado de "lendas" desde o início do rádio, a respeito de estações de radiodifusão escutadas em condições absurdas durante condições meteorológicas anormais, particularmente no Ártico. Essas histórias não podem ser simplesmente desconsideradas e deveriam ser reestudadas, agora com melhores sistemas de registro meteorológico e rádios aprimorados.

Entretanto, caso você precise de mais encorajamento, permita-me sugerir-lhe que leia a publicação da ARRL, "200 metros e abaixo", escrito por Clinton B. DeSoto, particularmente as seções que falam dos primeiros dias do Radioamadorismo. Ele conta a odisseia sobre como os amadores se aventuraram das bandas baixas para a região do VHF e do CW para o AM, deixando os estudos sobre propagação abandonados por décadas.

Hoje em dia no entanto os "caçadores do dx" estão de volta, operando exatamente logo abaixo dos 200 metros e ficando excitados quando ocorre boa propagação para a Europa nas bandas baixas, exatamente como nos primeiros tempos! Só que agora eles compartilham o evento usando o Refletor da Top Band ao invés de enviarem telegramas. E, quando no passado os amadores ingleses contataram "as Antípodas" usando baixas potências e equipamentos muito rudimentares naqueles primeiros dias, nós tentamos fazê-lo hoje com a máxima potência legal e sistemas de antenas do tipo 4-square...

No entanto, após 75 anos, continuamos sem saber "como explicá-lo". Ao menos já sabemos que a baixa atividade magnética e auroral, nos dias com os menores índices K, ajudam a propagação transpolar. No entanto, esses índices não são de ajuda quando se trata de propagação transcontinental; durante nossa vida não seremos capazes de dizer se haverá propagação ou não em um determinado dia. E também parece que a propagação Transequatorial ocorre no Verão e no Inverno independentemente do que o vento solar esteja fazendo.

Existem também condições inusitadas, como de que a propagação nas bandas baixas é mais favorável para o DX no mínimo solar do que no máximo. Uma vez que o fluxo solar em 10,7 cm é um índice mais adequado para controle abaixo do pico da região F do que o número de manchas solares R (Bilitza, 2001) e que a propagação de HF DX se correlaciona melhor com valores ALTOS do fluxo, talvez o inverso da correlação com o fluxo em 10,7 cm e valores BAIXOS são melhores para o DX nas bandas baixas. Fica evidente também que agiremos muito bem voltando a nossas "raízes de radioescutas", corujando mais o DX e procurando ver quais fatores correlacionam ou não se relacionam com a melhor propagação nas bandas baixas, ou quais fatores não o fazem.

De certo modo, este é o "lado prático" do DX nas bandas baixas, mas que também depende da disponibilidade de quantidades "observáveis" [de dados] que se relacionem com a região onde os sinais das bandas baixas se propagam. Esses dados estão em falta, como já comentei anteriormente (Brown, 2001), quando abordei os aspectos não previsíveis da propagação nos 160 metros. Entretanto também existem aspectos teóricos, assim uma melhor compreensão desde será de grande valia. Ao afirmar isso, estou realmente chegando na questão sobre qual é o modo ideal de propagação no qual confiar quando se opera nas bandas baixas em busca de DX; serão os saltos Terra-ionosfera tradicionais, apenas saltos dentro de dutos ou uma combinação ideal entre ambos?

Não existe muita novidade a respeito dos saltos entre Terra-ionosfera. Eles são o que "ocorre naturalmente" e deveriam ser bem confiáveis, aparte dos problemas com ruído artificial e caso a ionosfera ao longo do caminho esteja calma e nivelada. Mas calma e nivelada podem não ser condições tão fáceis de se obter nem de imaginar que essas condições fiquem estáveis por longos períodos de tempo. A ionização poderá estar em movimento - até mesmo subindo, descendo ou inclinando as camadas da ionosfera - mas ela nunca desaparecerá totalmente devido à recombinação durante as horas de escuridão, desde que ela permaneça na região onde foi criada ou em regiões onde as fracas fontes do horário noturno estejam operando. Portanto uma ionosfera calma, nivelada e "totalmente ionizada" deveria proporcionar uma propagação normal e ideal. No entanto a inclinação poderá ocorrer caso as camadas estejam inclinadas e possa ocorrer perda do sinal.

Do mesmo modo que para saltos dentro de um duto, qualquer tipo de movimento de onda poderá indicar propagação por duto - ondas eletromagnéticas, sonoras, aquáticas, ou qualquer outro de sua escolha. Nas bandas baixas, os sinais através de dutos são principalmente de origem magneto-iônica. Enquanto que o modo via duto não é facilmente identificável, pelo menos sem antenas sensíveis a mudanças na polarização do sinal, sua presença se torna bem aparente em contatos de muito grande distância, quando as perdas seriam um problema para os saltos entre terra-ionosfera, digamos acima dos 15.000 km.

A constatação da presença de um modo através de dutos dependerá da experiência com uma ferramenta de propagação que seja sensível ao campo da Terra, como o PropLab Pro. Esse programa tanto poderá utilizar as ionosferas de referência CCIR ou URSI como representar as condições ionosféricas médias, o melhor que alguém poderá esperar de um banco de dados ionosféricos.

A esse respeito, o usuário deverá observar o fato de que os ângulos de radiação para o modo duto têm muitos valores, em contraste com o valor único para os dutos ionosféricos (Kavanagh et al, 2002) no ângulo para os Raios Pedersen. Além disso, o usuário deverá observar que poderão ocorrer ambos os modos, quase-longitudinal e quase-transverso, transformando o ângulo de declinação magnética (IGRF, 1996) tanto no transmissor como no receptor.

Diante da discussão acima, podemos constatar que o DX de longa distância [nas bandas baixas] poderá ser a "onda do futuro", pelo menos para nosso entendimento teórico.

Isso soará como música para os ouvidos dos *dx men* das bandas baixas, uma outra motivação para se dedicar com mais afinco às bandas baixas.

Portanto, anote os índices, tanto do fluxo magnético como solar, anote a declinação magnética de qualquer contato de longa distância, mantenha registros detalhados e compare suas anotações com outros colegas interessados; mais cedo ou mais tarde, algo vai obter e outra página será virada, trazendo mais progresso no objetivo de desvendar o "Mistério do Rádio nas Bandas Baixas".

Referências

- Anderson, K.A., C.D. Anger, R.R. Brown and D.S. Evans, Simultaneous Electron Precipitation in the Northern and Southern Auroral Zones, *J. Geophys. Res.* Vol. 68, No. 9, 1963.
- Bhavsar, P.D., Gamma rays from the solar-cosmic-ray produced nuclear reactions in the earth's atmosphere and the lower limit of the energy of solar protons observed at Minneapolis, *J. Geophys. Res.* 67, p. 2627, 1962.
- Bilitza, D., International Reference Ionosphere, Goddard Space Flight Center, NASA, 2001.
- Brekke, A., Physics of the Upper Polar Atmosphere, Wiley-Praxis Series on Atmospheric Physics, 1997.
- Brown, R.R., The Superposition of Cosmic-Ray Effects on February 23, 1956, *J. Geophys. Res.*, Vol. 62, No. 1, 1957.
- Brown, R.R., T.R. Hartz, B. Landmark, H. Leinbach and J. Ortner, Large-Scale Electron Bombardment of the Atmosphere at the Sudden Commencement of a Geomagnetic Storm, *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, No. 4, 1961.
- Brown, R.R., On the relationship between polar-glow aurora and solar cosmic ray fluxes, *J. Atm. Terr. Phys.*, Vol. 26, p. 805, 1964
- Brown, R.R., Long-Path Propagation, private publication, 1992.
- Brown, R.R., Demography, DXpeditions and Magneto-Ionic Theory, p. 44, *The DX Magazine*, March/April 1998.
- Brown, R.R., Signal Ducting on the 160 Meter Band, p. 65, *Communications Quarterly*, Spring 1998.
- Brown, R.R., Negative Ion Basics, *Low Band Monitor*, February 1999.
- Brown, R.R., Power Coupling on 160 Meters, *Communications Quarterly*, p. 95, Spring 1999.
- Brown, R.R., On the South-Southwest Path and 160 Meter Propagation, *QEX*, December, 2000.

- Brown, R.R., On the Plasma Sheet of the Magnetosphere and Low-Band DXing, The Low Band Monitor, January 2000.
- Brown, R. R., Long-Path Propagation: Revisited in Year 2000, private publication, 2000.
- Brown, R.R., Crossing the Polar Cap on 160 Meters, The Low Band Monitor, June, 2001.
- Brown, R. R., Equinoctial Path-Switching on 160 Meters, CQ Magazine, February and March issues, 2002.
- Campbell, W.H., Introduction to Geomagnetic Fields, Cambridge University Press, 1997.
- Davies, K., Ionospheric Radio, Peter Perigrinus Ltd, London, 1990.
- Hall-Patch, N., Some thoughts on sunrise enhancements of MF Trans-Pacific signals, Low-Band Monitor, November, 1999.
- Hargreaves, J. K., The Solar-Terrestrial Environment, Cambridge University Press, 1992.
- IGRF, International Geomagnetic Reference Field, Utility Programs for Geomagnetic Fields, National Geophysical Data Center, Boulder, CO. 1995.
- International Reference Ionosphere (IRI 90), D. Bililitza, Editor, National Space Data Center, Greenbelt, MD, 1990.
- Ireland, Steve, Go Surf the Grey and Dark Lines, CQ Magazine, March 2001.
- Kavanagh, R., N. Hall-Patch and R. R. Brown, Dawn Enhancement of Signals from South Africa, Low-Band Monitor, Jan. 2002.
- Kelley, M. C., The Earth's Ionosphere, Academic Press, 1989.
- Luetzelschwab, R.C., An Investigation into Propagation Modes and Absorption on 160 m., Appendix in Long-Path Propagation: Revisited in Year 2000, by R.R. Brown, private publication.
- Oler, C., PropLab Pro, A High Frequency Radio Propagation Laboratory, Solar Terrestrial Dispatch, Canada, 1994.
- Philips, G.J. and P. Knight, Effects of polarization on medium frequency sky-wave service, Proc. I.E.E., Vol. 112, Jan. 1965

- Reid, G.C., Ion chemistry in the D region, *Advances in Atomic and Molecular Physics*, Vol. 12, p. 375, 1976.
- Rodriguez, J.V., and U.S. Inan, Electron density changes in the night-time D-region due to heating by very-low-frequency transmitters, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 93-96, 1994.
- Rosenberg, T.J., D.L. Detrick, D. Venkatesan and G. Van Bavel, A Comparative Study of Imaging and Broad-Beam Riometer Measurements: The Effect of Spatial Structure on the Frequency Dependence of Auroral Absorption, *J. Geophys. Res.* Vol. 96, No. A10, p. 17,793, Oct. 1991.
- Taylor, K., Earth's Grand Light Show, *National Geographic*, p. 48, Nov. 2001.
- Terman, F.E., *Radio Engineer's Handbook*, McGraw-Hill, 1943.
- Tippett, B., Long Path and Skewed Path Propagation on the lower Frequencies, *Proceedings of Fine Tuning*, 1991.