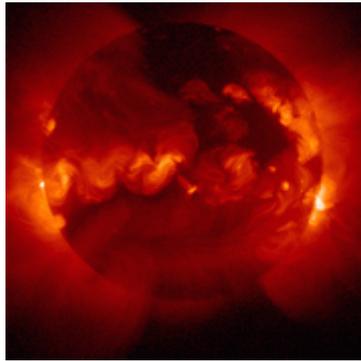


Como Funciona a Propagação



Autor: Cesar Augusto de C. Rodrigues - PY2YP

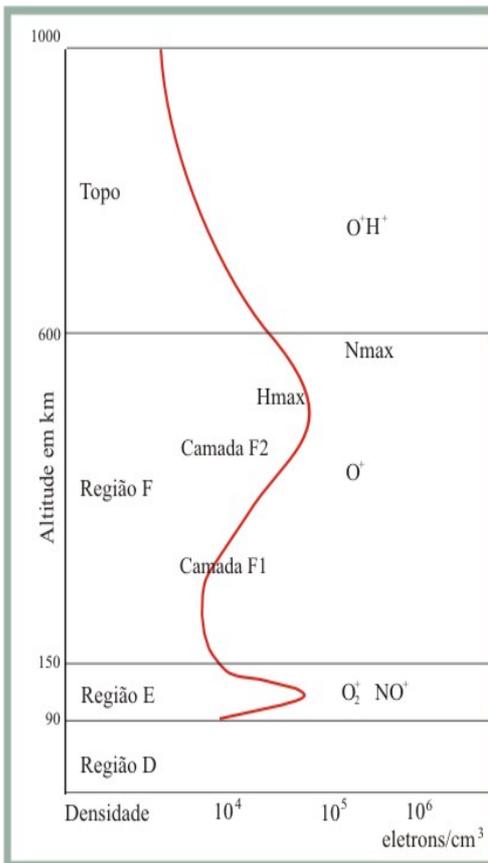
● **Introdução**

O objetivo deste texto é suprir os radioamadores tanto novatos quanto os mais experientes mas que nunca se detiveram a entender os mistérios das propagações. Ou mesmo, entender porque algumas regiões do mundo nunca chegam forte como por exemplo: México, Austrália ou Portugal. Ou então porque as estações do Oceano Índico chegam bem nas bandas baixas mas têm sinais fracos ou são inaudíveis em 10 metros por exemplo.

O texto foi escrito abrangendo apenas os conceitos básicos e não tem, nem de longe, a menor pretensão de aprofundar no assunto. Antes, mal arranha a superfície deste fantástico estudo do fenômeno da propagação, tendo simplesmente a intenção de despertar o interesse de quem o leia.

Se for este o seu caso e tiver a facilidade de ler em inglês, baixe o arquivo prop101.chm, escrito por Robert R. Brown, NM7M, que irá definitivamente esclarecer todas as suas dúvidas.

● **Ionização**



Para entender o fenômeno da propagação das ondas eletro-magnéticas no espectro de HF, isto é, entre 3 e 30 MHz é preciso entender como é constituída a ionosfera.

O Sol emite energia em comprimentos de onda tais que vão desde as ondas de rádio, até os raios gama. A luz visível varia de 400 a 700 nanômetros (1 nm = 1E-9 metro), porém nesta faixa do espectro utiliza-se como unidade de medida de comprimento o Angstrom, representado pela letra A, e que vale 1E-8 centímetro, isto é 1 Angstrom é igual a 10 nanômetros. Apenas para ilustrar, podemos dizer que a frequência da luz é da ordem de 1E+14 Hz, ou seja 1 bilhão de vezes maior do que a faixa de 20 metros, que bem conhecemos.

Para o estudo da propagação nos interessa apenas a faixa do espectro abaixo da luz visível, EUV, extreme ultraviolet e o espectro de raio X. É interessante notar que a energia situada neste espectro de interesse representa apenas 0,001% (um milésimo por cento) da energia total recebida e, como veremos a seguir, é a energia responsável pela formação da ionosfera.

Ainda antes de iniciarmos será importante lembrar o conceito de que para ionizar ou dissociar os elementos constituintes da ionosfera, sejam eles átomos ou moléculas, a energia necessária será maior ou igual à energia potencial de ionização, no caso dos átomos, ou de ligação (associação), no caso das moléculas.

A unidade de medida correta para estes casos é o elétron volt, que é usado em substituição ao Joule, do sistema MKS. Define-se elétron-volt, representado por eV, como sendo a energia adquirida por um elétron quando acelerado através de uma diferença de potencial de 1 Volt, ou seja, é igual a carga Q (1,6E-19 Coulomb) multiplicado pela diferença de potencial V, assim, 1 eV = 1,6E-19 Joule.

A ionosfera, como se vê na figura acima, é constituída de oxigênio molecular e óxido nítrico, na região E, e átomos de oxigênio na região F. A energia necessária para ionizar ou dissociar o hidrogênio, o mais simples dos átomos, é de 13,6 eV e para dissociar as partículas diatômicas, como o óxido nítrico, NO, são necessários 9,5 eV.

O que nos interessa na verdade é saber qual o comprimento de onda da energia emitida pelo Sol, que promoverá a dissociação e ionização dos elementos da ionosfera e, sobretudo, quando ela ocorre.

A lei de Planck diz que a energia de um fóton é o produto da constante de Planck, $k = 6,6E-34 \text{ J*s}$, pela sua frequência expressa em Hertz, Hz. Assim, o comprimento de onda necessário para a ionização ou dissociação será da ordem de 1000A (um mil Angstroms), ou seja quaisquer eventos solares que produzam grandes quantidades de energia nesse comprimento de onda, ou menor do que ele, com frequência mais alta portanto, haverá ionização suficiente para refletir os nossos sinais de rádio.

Em um dia calmo, sem distúrbios, com K e A baixos, o Sol emite EUV (extreme ultra-violet), que está no comprimento de onda de 1000 A, e também raios X e gama, que estão na faixa de 100 a 10 Angstroms, porém em quantidades insuficientes para produzir elétrons em quantidade tal que permita a reflexão das bandas altas. Para que ocorra a ionização em quantidades aceitáveis será necessário que hajam fatos geradores que possibilitem a emissão de energia nos comprimentos de onda adequados.

Devido ao seu enorme tamanho e intensa atividade interior, algumas regiões das camadas altas do Sol, isto é, mais próximas à sua superfície, resfriam-se de maneira não uniforme, além disso, o comportamento mecânico do Sol, para fins de entendimento, obedecem às leis da mecânica dos fluidos. Isto faz com que a parte interna dessas regiões, de resfriamento mais rápido, passe a funcionar como coletor ao passo que as regiões a elas adjacentes passem a trabalhar como estatores. Os distúrbios gravitacionais atuam nessas regiões mais frias, e mais densas portanto, formando vórtices que acabam ao final atuando como um gigantesco dínamo que produz energia eletromagnética de grande magnitude. Parte dessa energia produzida fica armazenada sob forma de energia potencial até que haja o rompimento do equilíbrio das forças atuantes, provocando súbitos e intensos jatos energéticos com radiação abrangendo todo o espectro eletromagnético mas com preponderância nos comprimentos de onda menores do que 1000 Angstrom.

A essas regiões de resfriamento anômalo dá-se o nome de manchas solares e a quantidade de manchas obedece a um ciclo de aproximadamente 11 anos, conhecido como ciclo solar ou ciclo da atividade solar. Assim, quanto maior for a atividade solar maior será a ionização e melhores serão as condições de propagação. Porém, é necessário lembrar que há um custo para a maior atividade solar, e este custo está representado pelas condições adversas, isto é, tempestades de radiação solar, tempestades geomagnéticas e bloqueios das ondas de rádio, conforme está detalhado nas outras páginas sobre os índices solares e sobre as manchas e labawhiteas solares.

Para medir o nível de atividade solar pode-se contar o número de manchas solares e calcular o assim chamado fluxo solar, através da expressão: $SFI = 63,75 + 0,728 N + 0,00089 N^2$, onde N = média do número mensal de manchas solares, ou através da medição do fluxo do ruído solar no comprimento de onda de 10,7 cm. Vale lembrar que a energia medida neste comprimento de onda é da ordem de $1,1E-5 \text{ eV}$ e portanto incapaz de ionizar qualquer coisa. Os valores obtidos nessa

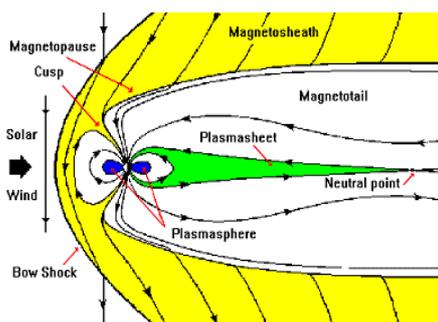
frequência indicam apenas e tão somente o nível de atividade solar e através de valores relativos; é importante não confundir atividade com nível energético. No entanto, este comprimento de onda foi escolhido para medir a atividade solar porque a atmosfera é transparente para a radiação nesta faixa.

Para medir o nível energético capaz de promover a ionização a melhor escolha é medir o fluxo de raios X, que estão no comprimento de onda entre 1 e 8 Angstroms, que produzem energia da ordem de 10 eV. Porém esta medição, devido as absorções da atmosfera só pode ser feita com a precisão exigida nos satélites de órbitas muito altas.

Após a passagem do pico do ciclo solar, quando as condições de propagação começam a diminuir, os radioamadores sempre se perguntam quando o ciclo atingirá o ponto de mínima atividade solar. Para responder a esta importante questão pode-se usar uma fórmula empírica, mas que têm dado resultados práticos. O ponto de mínima do ciclo solar se dá aos 34 meses do primeiro dia de atividade zero após o ponto de máxima. Ou seja, se considerarmos que o pico do ciclo se deu no final do ano 2000, e que o primeiro dia de atividade nula (zero mancha) foi no dia 28 de janeiro de 2004 então o ponto de mínima atividade será ao whiteor de novembro ou dezembro de 2006. O ponto de máxima costuma ocorrer 4 anos após o ponto de mínima, logo o próximo pico será em 2010.

● Variação da ionização

Os elétrons recém libertados da órbita dos seus átomos não ficam soltos por muito tempo, nem tampouco os elementos dissociados ficam solteiros por muito tempo. Há uma constante troca de elementos lá em cima, os elétrons tendem a se recombinar com os íons positivos para formar átomos eletricamente neutros ou moléculas novamente. Assim, se a energia recebida formar mais elétrons do que estes possam ser recombinados haverá um ganho na ionização, se for o contrário haverá decréscimo no nível de ionização.



Na verdade o nível de ionização é desgraçadamente muito pequeno, mesmo nas melhores condições, existe, via de regra, 1 elétron, ou 1 íon positivo, para cada 1 milhão de partículas neutras. Assim, estatisticamente falando, as chances do elétron solto se recombinar é muito grande, ou seja, se o fluxo energético não for grande a ionização cai rapidamente. Por sorte, quanto mais alta for a região da ionosfera, maior será a energia recebida e menor será a densidade de partículas neutras.

Por outro lado, o eixo que passa pelos polos, funciona, eletro-magneticamente falando, como um dipolo, assim, nos polos as linhas de fluxo do campo magnético da Terra, nas regiões polares apresenta uma feição "descabelada", como se pode ver na figura ao acima.

Obviamente essas linhas de fluxo impedem a passagem das ondas eletromagnéticas, o que explica porque a propagação entre os PY2 e os VK é sempre muito difícil. Os sinais entre PY2 e ZL costumam ser fortes em qualquer frequência mas a Austrália é quase sempre impossível, sobretudo nas frequências mais baixas.

Quando a atividade geomagnética está intensa, a plasmafera, assim como a ionosfera, fica mais alongada devido à ação do vento solar. Esta condição faz com que os sinais com caminhamentos oblíquos em relação ao norte magnético, fiquem mais conturbados ou inexistentes. Isto explica o porque, durante os contestes em que ocorrem variações súbitas do índice K, a propagação para a Europa fecha, enquanto que os sinais para a costa Leste dos EUA continuam firmes, ao passo que os da costa oeste ficam mais prejudicados.

● Reflexão

A expressão correta é refração e não reflexão, como costuma-se ouvir. A onda eletromagnética, representada por um vetor, sofre refração na ionosfera, isto é vai "dobrando" à medida em que aumentam os níveis de elétrons soltos das camadas altas, fazendo sucessivas "dobras" até que o vetor retorne em direção à Terra. Contudo, para facilitar o entendimento, será usado neste texto a expressão reflexão, mesmo não sendo correta.

Entende-se por circuito o caminho percorrido pela onda entre a estação transmissora e receptora.

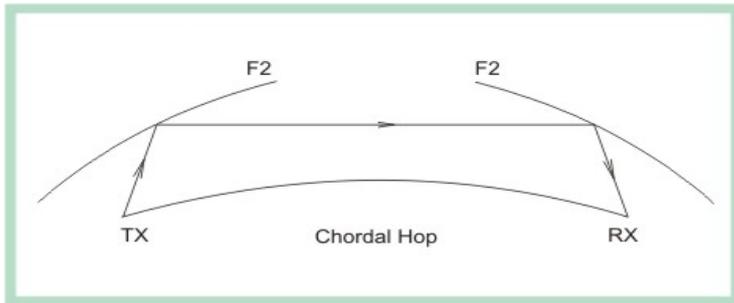
Se uma onda for emitida, na vertical, em direção à ionosfera onde situa-se uma região com N elétrons por metro cúbico, a onda será devolvida para a Terra e a maior frequência refletida, neste caso, e apenas neste caso, a onda sofre reflexão, obedecerá a seguinte expressão: $F_c = 9E6 * \text{SQRT}(N)$, onde N é número de elétrons por metro cúbico, e a frequência é determinada em MHz, esta frequência recebe o nome de frequência crítica.

Obviamente a frequência máxima para sinais emitidos com um determinado ângulo de saída, será $F_{max} = F_c / \cos Z$ e, obviamente a menor frequência a ser propagada será $F_{min} = [(9E6 * \text{SQRT}(N))] / \cos z$. O resultado prático disso é que quanto menor for o ângulo de elevação dos sinais transmitidos maior será a distância atingida após a primeira reflexão. Isto deixa claro que quanto maior for o número de elétrons soltos, decorrente de atividade solar mais intensa portanto, mais alta será a maior frequência utilizada, a assim chamada MUF, maximum usable frequency.

Após o sinal, representado por um vetor, atingir o topo da ionosfera e a sua reflexão, o vetor será refletido na superfície da Terra, aqui sim, a expressão reflexão está correta, e voltará em direção à ionosfera. Os sucessivos saltos, são chamados de Hop ou Hops no plural. Estes hops dão os nomes do tipo de propagação: F2F2, EF2 etc. Para entender corretamente esta designação veja a figura.

Algumas vezes os sinais ao anoitecer ou ao amanhecer, ficam muito fortes durante alguns minutos, possibilitando contatos excelentes até mesmo nas bandas baixas. Os DXers que gostam das bandas baixas ficam sempre à espera desses sinais para conseguir falar com expedições cujos QSOs não seriam possíveis nos horários normais, seja devido aos pile-ups ou seja devido à própria condição de propagação das bandas baixas. Esta situação, é conhecida como gray-line (linha cinza) ou dobra de propagação. O conceito correto de QSO via gray-line contudo é quando o

o sinal caminha pela linha cinza, isto é, acompanhando a zona de penumbra da Terra, ou lusco-fusco.

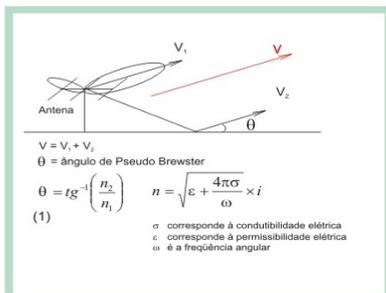


Quando o sinal está perpendicular à zona de gray-line o aumento dos sinais acontece devido à dobra da propagação, como é conhecido o fenômeno entre os operadores de banda baixa, que tanto pode acontecer devido à dobra na ponta transmissora, na ponta receptora ou em ambas as pontas. O nome correto deste tipo de hop (salto) ou simplesmente modalidade de propagação recebe o nome de chordal hop, como ilustrado na figura ao lado mostrando a dobra nas 2 pontas.

Para este tipo de propagação, quanto maior for o ângulo de saída dos sinais, melhor será o aproveitamento desta situação, o que explica que algumas vezes as antenas mais próximas ao solo e menos direcionais têm rendimentos melhores do que as antenas mais altas e com mais elementos. É a vingança do dipolo baixo...

Obviamente quando a dobra ocorrer em apenas uma das pontas, a componente vertical da outra ponta é desconsiderada ou inexistente, e a componente horizontal ficará inclinada em relação ao plano da Terra.

● Ângulo de Pseudo-Brewster



Como se sabe, a onda eletromagnética emitida pela estação transmissora é uma grandeza vetorial cuja componente principal será o vetor preponderante no lóbulo de irradiação mais a soma dos vetores paralelos que sejam originários de superfícies refletoras.

Assim, em um plano eletromagnético a onda frontal incidente no plano limite entre dois meios dielétricos distintos, com diferentes ângulos de refração, o ângulo de incidência que está sendo propagado de um meio para outro é unitário quando a onda está linearmente polarizada e cujos vetores elétricos estão paralelos ao plano de incidência. O ângulo de Brewster é dado pela fórmula (1) constante da figura ao lado, onde n é índice de refração do meio. E que por sua vez é definido pela fórmula (2).

Obviamente a magnitude do coeficiente de reflexão é mínima quando o ângulo de fase está em 90 graus. Nesta situação a onda refletida muda de sinal, portanto quando os vetores transmitidos, via onda refletida no solo, estiverem abaixo do

ângulo de Pseudo-Brewster estes irão diminuir a grandeza do vetor resultante e serão a este adicionados quando estiverem acima do referido ângulo.

Desta forma as condições de solo definem o ângulo de Pseudo-Brewster. Se estas forem pobres o sinal transmitido será diminuído na exata proporção dos sinais que estiverem abaixo do referido limite. Por outro lado, quando as condições de refletividade do meio são boas os sinais são aumentados.

Para melhor ilustrar vejamos os ângulos de Pseudo-Brewster para alguns meios mais comuns:

- Água salgada = 0,2 graus;
- Terrenos alagados = 4 graus;
- Solos ricos em ferro ou alumínio = 8 graus;
- Solos arenosos e secos = 15 graus;
- Zona urbana ou industrial = 30 graus.

● Girofrequência

Os elétrons soltos na ionosfera não ficam espalhados desordenadamente, eles ficam alinhados segundo as equações de Maxwell, isto é, a ionosfera fica "penteada" e os elétrons se movimentam no sentido das linhas de campo entre os polos magnéticos, do sul para norte.

Durante os períodos de conturbação geomagnética, decorrentes da componente B_z do campo magnético interplanetário e do vento solar, os elétrons livres na camada F2 sofrem alterações devido à direção dessas forças fazendo com que os elétrons tendam a escapar das linhas de força. Assim, se a velocidade do elétron estiver perpendicular ao campo geomagnético, a magnitude da força é obtida pelo produto da carga do elétron (e), sua velocidade (v) e a intensidade do campo geomagnético, expressas no sistema MKS; a direção dessa componente é perpendicular ao plano do vetor da velocidade. Desta forma, os elétrons tendem a movimentar-se em movimento translacional, isto é, em movimento circular ao longo da linha de campo geomagnético com velocidade angular igual ao produto da carga do elétron (e) pela intensidade de campo (B_z), dividido pela massa do elétron, ou seja $V_a = e \cdot B_z / m$.

A magnitude da velocidade angular é de cerca de $8,8 \cdot 10^6$ radianos por segundo para valores normais, típicos, da intensidade do campo geomagnético. Quando os índice K, B_z e variações da velocidade solar apontam para variações dos valores do campo geomagnético, o número de translações dos elétrons em torno das linhas de campo aumentam para valores ao redor de 1,4 MHz e recebem o nome de girofrequência.

Pode-se facilmente observar que a girofrequência afeta sensivelmente a propagação dos sinais de rádio nessas frequências devido à absorção dos sinais que esta promove. Assim, durante os períodos de atividade solar, a banda de 160 metros é a mais afetada, e, dependendo da magnitude dessa atividade, até a banda de 80 metros é bastante afetada. Já os 40 metros, não sofrem alterações devido a girofrequência.

● Intensidade dos sinais

Além das características da estação transmissora, isto é, antena e potência, são quatro os fatores que definem a intensidade do sinal em um dado circuito.

- Altura e número de elétrons da camada refletora;
- Número de hops do circuito;
- Largura da faixa do sinal transmitido;
- Condutibilidade do solo.

Os tópicos altura e número de elétrons bem como o número de hops de um circuito já forma devidamente abordados. Também já foi esclarecido como a condutibilidade elétrica do solo influencia a intensidade dos sinais, tanto nas pontas transmissora e receptora e nos locais onde a onda "pisa" para voltar à ionosfera.

Isto explica porque os sinais entre PY2 e o México são sempre fracos, não importando a frequência utilizada. Basta olhar no mapa e verificar que nesse circuito não existe água salgada no caminho, isto é, o sinal nunca "pisa" em água salgada.

Da mesma forma, os sinais entre PY2 e Portugal, numa condição de propagação 2F2, pode-se observar que no primeiro passo a onda pisa no Nordeste do Brasil e no segundo passo, pisa no Saara para só depois chegar em Portugal. Em ambas situações a onda "pisa" em solos secos e de baixa condutibilidade. Observe que, em 40 metros por exemplo, a região norte da França chega forte, assim como a Itália, mas Portugal sempre chega fraco, a menos é claro, das estações grandes que diminuem esse efeito.

Infelizmente a maioria dos softwares de propagação não levam em conta esta condição e por este motivo os resultados vez por outra, não refletem exatamente a realidade.

• Largura da Faixa

Se você opera telegrafia, certamente já notou que os sinais nessa modalidade são muito maiores do que em fonia. Ainda, em fonia, os sinais em AM são mais fracos do que os em SSB. Se ainda assim tiver dúvida, verifique que os sinais nas modalidades digitais como PSK31, são muito mais fortes do que os de RTTY por exemplo. Isto acontece porque a relação sinal/ruído obedece a seguinte equação: $SNR = 10 * \log BW + K$

Onde:

BW, do inglês bandwidth, é a largura da faixa em Hertz;

A constante K é igual a 10 que é o número mínimo de dB que o sinal deve estar acima do ruído. Veja que a escala de S-meter do seu rádio começa em 1 e não em zero.

Para ilustrar veja a largura de banda dos sinais acima relacionados:

-	AM:	6	khZ;
-	SSB:	2,4	kHz;
-	CW:	150	Hz;
-	PSK31:	31 Hertz;	

• Cálculo dos sinais

Considerando-se um circuito com, digamos, 1300 km, isto é, entre São Paulo e Cuiabá como exemplo, e tendo na estação transmissora 100 watts, um dipolo para meia onda e que o QSO seja feito em 20 metros durante o dia, com a propagação tipo 1F2 ou seja um único hop.

Por um momento vamos imaginar que a estação transmissora fosse apenas um ponto e irradiasse os sinais em todas as direções, o que representaria uma antena isotrópica.

Nestas condições os sinais seriam distribuídos igualmente dentro de uma esfera com 1300 km de raio, assim o sinal em Cuiabá seria o equivalente a uma fração da energia que estivesse "enchendo" uma esfera com esse raio. Esta fração seria simplesmente a divisão de 100 watts pela área da esfera, o que nos dá um valor de $4,7E-12$ ou seja $0,0000000000047$ watts por metro quadrado. Contudo no meio radioamadorístico expressamos esse tipo de valor em decibéis dB que pode ser expresso utilizando-se a sua definição $dB = 10 * \log(P1/P2)$ ou $dB = 10 * \log(100/0,0000000000047)$ ou como corretamente deve ser dito, uma vez que os sinais são medidos em dBW ou watt por metro quadrado, o sinal em Cuiabá será de -113 dBW, ou seja, 113 dB abaixo de 1 watt por metro quadrado.

Como se viu, o fato do sinal estar negativo, -113 dB não significa que é preciso chegar no zero para depois começar a contar, significa apenas que é um certo número de vezes menor do que o sinal na antena transmissora.

Neste nosso exemplo, a antena utilizada é um dipolo, que tem um ganho, em relação à antena isotrópica de $2,1$ dB o que melhora o sinal ficando então a relação em $110,9$ dBW.

Ainda, neste sentido, o cálculo inicial foi feito com antena isotrópica no espaço livre, mas a antena está sempre mais próximo do solo, assim o dipolo, a meia-onda de altura, terá, considerando-se a condutibilidade do solo, sinais somados ao vetor principal, na medida em que estes tiverem seus ângulos de irradiação superiores ao ângulo de Pseudo-Brewster. Assim, considerando-se valores médios de condutibilidade e relacionando-os com a antena isotrópica, um ganho adicional de cerca de 6 dB. O que nos dá $-104,9$ dBW como novo valor.

Da mesma forma, no lado receptor teremos um ganho extra de 6 dB, considerando-se o mesmo tipo de solo, e mais $2,1$ dB relativamente ao ganho do dipolo da estação receptora. Logo teremos: $S = -110,9 + 8,1$ ou $S = -106,8$ dBW.

O sinal, para atingir a camada F2 deve antes passar pelas camadas D e E que irão "amortecer" o sinal devido ao número de elétrons livres nessas camadas. Digamos que o pedágio cobrado por essas camadas seja de aproximadamente $1,8$ dB. O sinal então na ponta receptora estará em -105 dBW.

Sabe-se que o sinal S-9 no S-meter corresponde a $50\mu V$, para uma antena com impedância de 50 Ohms, o que corresponde a -103 dBW. Assim, o sinal recebido será $S9 + 2$ dB. Caso a estação transmissora estivesse utilizando uma antena com ganho de 8 dBi ou 8 dB em relação à antena isotrópica, uma monobanda bem ajustada, o sinal seria 10 dB acima de S-9 ou $S9+10$ como dizem os DXers.

Para facilitar o entendimento dos sinais medidos em dBW a tabela abaixo os relaciona com o S-meter do rádio, desde que, obviamente este esteja devidamente aferido.

S DBW	W (50 Ohm)	dBuV	microvolts	S Meter
-43.01	5.00E-05	93.98	50000.000	S9+60 dB
-53.01	5.00E-06	83.98	15811.388	S9+50 dB
-63.01	5.00E-07	73.98	5000.000	S9+40 dB
-73.01	5.00E-08	63.98	1581.139	S9+30 dB
-83.01	5.00E-09	53.98	500.000	S9+20 dB
-93.01	5.00E-10	43.98	158.114	S9+10 dB
-103.01	5.00E-11	33.98	50.000	S9
-109.03	1.25E-11	27.96	25.000	S8
-115.05	3.13E-12	21.94	12.500	S7
-121.07	7.81E-13	15.92	6.250	S6
-127.09	1.95E-13	9.90	3.125	S5
-133.11	4.88E-14	3.88	1.563	S4
-139.13	1.22E-14	-2.14	0.781	S3
-145.15	3.05E-15	-8.16	0.391	S2
-151.18	7.63E-16	-14.19	0.195	S1