

## TEMA 2: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.

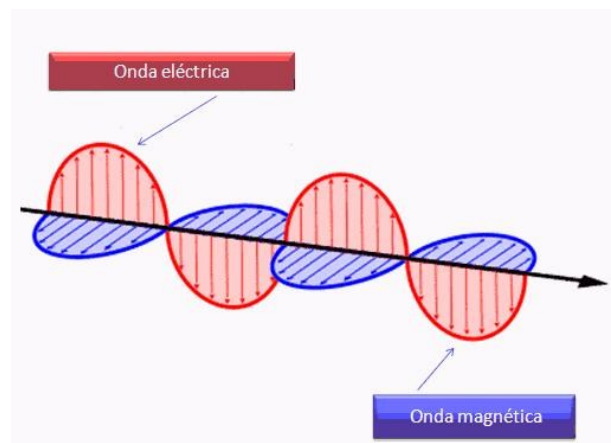
### CONTIDOS

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. AS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS .....                                  | 2  |
| FRECUENCIA ( $f$ ) .....                                               | 2  |
| LONGITUD DE ONDA ( $\lambda$ ) .....                                   | 3  |
| VELOCIDADE DE PROPAGACIÓN ( $c$ ) .....                                | 3  |
| AMPLITUDE .....                                                        | 3  |
| POLARIZACIÓN .....                                                     | 3  |
| 2.2. O ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....                                 | 4  |
| 2.3. O ESPECTRO RADIOELÉCTRICO .....                                   | 5  |
| 2.3.1. BANDAS DE RADIODIFUSIÓN SONORA E DE TELEVISIÓN .....            | 5  |
| 2.3.2. XESTIÓN DO ESPECTRO RADIOELÉCTRICO. O CNAF. ....                | 6  |
| 2.3.3. INTERFACES REGULAMENTADAS .....                                 | 8  |
| 2.4. PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.....                      | 9  |
| 2.4.1. AS PERDAS NO ESPAZO LIBRE.....                                  | 9  |
| 2.4.2. EFECTOS DURANTE A PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS ..... | 11 |
| 2.5. MODOS DE PROPAGACIÓN .....                                        | 18 |
| 2.5.1. ONDAS DE SUPERFICIE .....                                       | 19 |
| 2.5.2. ONDAS ESPACIAIS .....                                           | 20 |
| 2.5.3. ONDAS DE CEO .....                                              | 22 |
| 2.6. RUÍDO ELÉCTRICO.....                                              | 25 |
| 2.6.1. RUÍDO NON CORRELACIONADO .....                                  | 26 |
| 2.6.1.1. RUÍDO EXTERNO.....                                            | 26 |
| 2.6.1.2. RUÍDO INTERNO. ....                                           | 27 |
| 2.6.2. RUÍDO CORRELACIONADO.....                                       | 28 |
| 2.7. A RELACIÓN SINAL RUÍDO .....                                      | 28 |
| 2.7.1. FACTOR DE RUÍDO E ÍNDICE DE RUÍDO DUN AMPLIFICADOR .....        | 29 |
| 2.7.2. TEMPERATURA DE RUÍDO NUN AMPLIFICADOR. ....                     | 31 |

## 2.1. AS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Estamos familiarizados coas vibracións ou oscilacións de varias formas: Un péndulo, unha árbore movéndose co vento, as cordas dunha guitarra, un sinal electrónico periódico son exemplos de oscilacións. O que teñen en común é que algo, como un medio ou un obxecto, está vibrando de forma periódica, con certo número de ciclos por unidade de tempo. Este tipo de onda as veces é denominada onda mecánica, posto que son definidas polo movemento dun obxecto ou do seu medio de propagación. Cando esas oscilacións viaxan (isto é, cando as vibracións non están limitadas a un lugar) falamos de ondas propagándose no espazo. Por exemplo, un cantante crea oscilacións periódicas das súas cordas vocais ao cantar. Estas oscilacións comprimen e descomprimen o aire periodicamente, e ese cambio periódico da presión do aire sae da boca do cantante e viaxa a velocidade do son. Unha pedra arroxada a un lago causa unha alteración que viaxa a través do mesmo como unha onda.

Unha onda electromagnética é unha perturbación dos campos eléctrico e magnético que se propaga no espazo, xa sexa nun medio material ou no baleiro.



Algunhas das propiedades máis importantes das ondas electromagnéticas que nos axudarán a caracterizalas son:

### FRECUENCIA ( $f$ )

A frecuencia é a cantidade de ciclos completos da onda que se completan nun segundo. A frecuencia mídese en ciclos por segundos (ou Hertz, abreviado Hz).

### LONXITUDE DE ONDA ( $\lambda$ )

A lonxitude de onda é a distancia percorrida pola onda durante unha oscilación completa. A lonxitude de onda mídese en metros (m).

### VELOCIDADE DE PROPAGACIÓN (c)

As ondas electromagnéticas propáganse polo espazo a unha velocidade. No baleiro e no aire esta é igual á chamada velocidade da luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

En xeral, para calquera medio de propagación cumprírase:

$$c = \lambda \cdot f$$

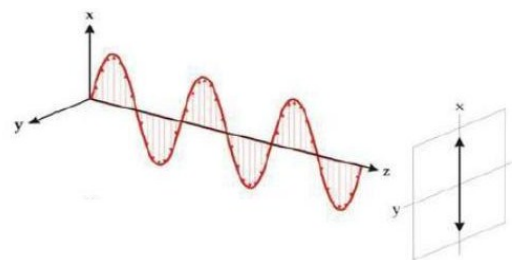
### AMPLITUDE

As ondas tamén teñen unha propiedade denominada amplitude. Esta é a variación da magnitude oscilante dende cero ata o extremo dun dos seus picos. A amplitude das ondas electromagnéticas esta directamente relacionada coa potencia que transportan. Xeralmente ao referirnos a amplitude dunha onda electromagnética referirémonos á amplitude do seu campo eléctrico E.

### POLARIZACIÓN

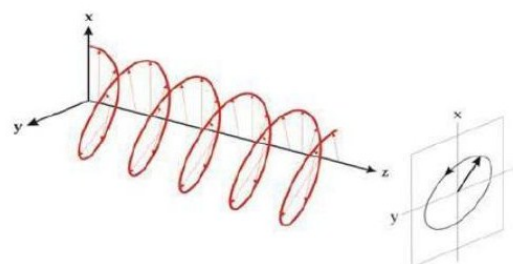
A polarización describe a variación da dirección do campo eléctrico durante a propagación da onda.

Nunha antena dipolo aliñada verticalmente (un anaco de arame recto), os electróns móvense só de arriba a baixo, non cara aos lados (porque non hai lugar cara onde moverse) e, por conseguinte, os campos eléctricos só apuntan cara arriba ou cara abaixo verticalmente. O campo que abandona o arame e viaxa como unha onda ten unha polarización estritamente lineal (neste caso vertical).



Dentro da polarización lineal distiguimos vertical e horizontal pero tamén son posibles todos os ángulos intermedios.

O caso mais xeral é a polarización elíptica onde o campo eléctrico describe unha elipse ao longo da propagación da onda, se



o campo se move en dirección horaria visto dende “diante” falaremos de polarización elíptica dextroxira ou CW (clock work) e no caso contrario de polarización levoxira ou CCW (counter clock work).

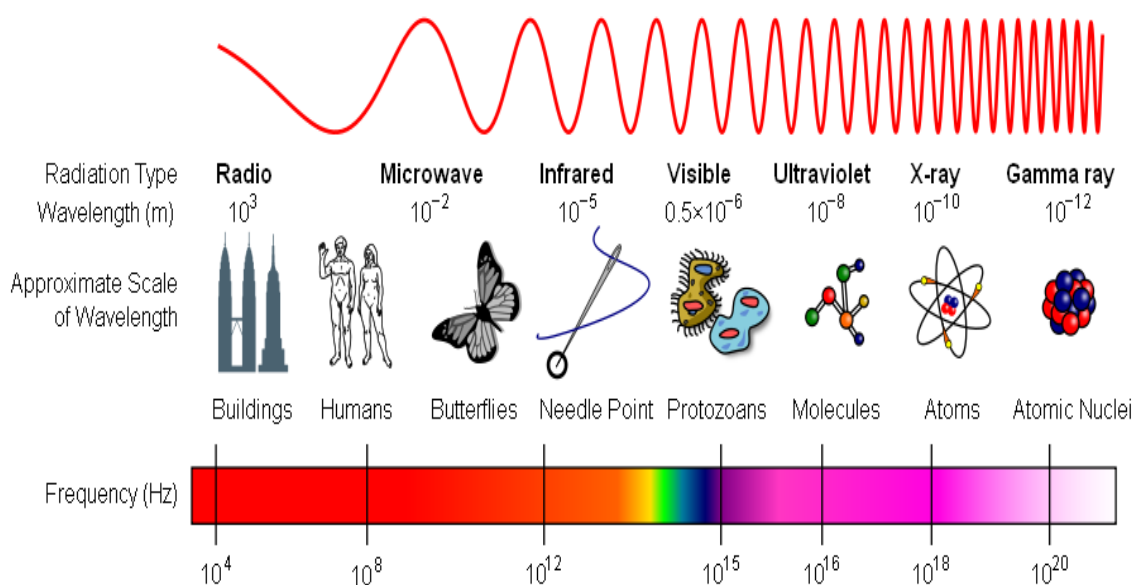
Un caso particular moi importante da polarización elíptica é a circular onde o vector campo eléctrico describe unha traxectoria circular, de novo falaremos de polarización circular dextroxira ou CW e levoxira ou CCW

A polarización é moi importante cando aliñamos as antenas. Se ignoramos a polarización, podemos obter moi pouco sinal aínda empregando excelentes antenas.

## 2.2. O ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

O espectro electromagnético é a gama de todas as frecuencias posíbeis de radiación electromagnética.

O espectro electromagnético estendese dende as frecuencias baixas utilizadas para comunicacións por radio ata a radiación gamma producida por elementos radioactivos. Este rango cubre lonxitudes de onda dende miles de quilómetros ata fraccións do tamaño do átomo. No medio destes dous extremos sitúase a luz visíbel que non é máis que unha parte do espectro electromagnético, concretamente as lonxitudes de onda no rango de 400nm a 800nm ou, o que é o mesmo, frecuencias entre 450 THz e 750 THz.



## 2.3. O ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

O espectro radioeléctrico, de radiofrecuencia ou RF, é a porción menos enerxética do espectro electromagnético, situada entre uns 3 kHz e uns 300 GHz. As ondas electromagnéticas desta rexión do espectro, pódense transmitir aplicando a corrente alterna orixinada nun xerador a unha antena.

O espectro radioeléctrico esta dividido nas denominadas bandas de frecuencia. Isto faise así para poder delimitar o acceso dos usuarios a estas bandas. Esta clasificación non é global xa que algúns países difiren na súa delimitación, pero en xeral, podemos aceptalas como xerais.

| Nome                                                       | Abreviatura | Banda ITU | Frecuencias          | Lonxitudes de onda      |
|------------------------------------------------------------|-------------|-----------|----------------------|-------------------------|
| Frecuencia extremadamente baixa<br>Extremely Low Frequency | ELF         | 1         | 3Hz<br>30 Hz         | 100.000 km<br>10.000 km |
| Súper baixa frecuencia<br>Super Low Frequency              | SLF         | 2         | 30 Hz<br>300 Hz      | 10.000 km<br>1.000 km   |
| Ultra baixa frecuencia<br>Ultra Low Frequency              | ULF         | 3         | 300 Hz<br>3.000 Hz   | 1.000 km<br>100 km      |
| Moi baixa frecuencia<br>Very Low Frequency                 | VLF         | 4         | 3 kHz<br>30 kHz      | 100 km<br>10 km         |
| Baixa frecuencia<br>Low Frequency                          | LF          | 5         | 30 kHz<br>300 kHz    | 10 km<br>1 km           |
| Media Frecuencia<br>Medium Frequency                       | MF          | 6         | 300 kHz<br>3.000 kHz | 1 km<br>100 m           |
| Alta frecuencia<br>High Frequency                          | HF          | 7         | 3 MHz<br>30 MHz      | 100 m<br>10 m           |
| Moi alta frecuencia<br>Very High Frequency                 | VHF         | 8         | 30 MHz<br>300 MHz    | 10 m<br>1 m             |
| Ultra alta frecuencia<br>Ultra High Frequency              | UHF         | 9         | 300 MHz<br>3.000 MHz | 1 m<br>100 mm           |
| Súper alta frecuencia<br>Super High Frequency              | SHF         | 10        | 3 GHz<br>30 GHz      | 100 mm<br>10 mm         |
| Frecuencia extremadamente alta<br>Extremely High Frequency | EHF         | 11        | 30 GHz<br>300 GHz    | 10 mm<br>1 mm           |

### 2.3.1. BANDAS DE RADIODIFUSIÓN SONORA E DE TELEVISIÓN

En televisión y radiodifusión sonora empréganse outras denominacións como banda I, banda II, banda III, banda IV e banda V. Esas denominacións, as súas frecuencias correspondentes e as canles nas que se dividen aparecen na seguinte táboa:

| Banda      | Frecuencia mínima | Frecuencia máxima | Canles      |
|------------|-------------------|-------------------|-------------|
| <b>I</b>   | 47 MHz            | 68 MHz            | 2 a 4 VHF   |
| <b>II</b>  | 88 MHz            | 108 MHz           | Radio FM    |
| <b>III</b> | 174 MHz           | 230 MHz           | 5 a 12 VHF  |
| <b>IV</b>  | 470 MHz           | 606 MHz           | 21 a 37 UHF |
| <b>V</b>   | 606 MHz           | 862 MHz           | 38 a 69 UHF |

Na banda das microondas empréganse outras denominacións que proveñen dos primeiros tempos do radar, poden verse na seguinte táboa:

| Banda     | Frecuencia a mínima | Frecuencia a máxima | $\lambda$ máxima | $\lambda$ mínima |
|-----------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| <b>L</b>  | 1 GHz               | 2 GHz               | 30 cm            | 15 cm            |
| <b>S</b>  | 2 GHz               | 4 GHz               | 15 cm            | 7.5 cm           |
| <b>C</b>  | 4 GHz               | 8 GHz               | 7.5 cm           | 3.75 cm          |
| <b>X</b>  | 8 GHz               | 12.4 GHz            | 3.75 cm          | 2.42 cm          |
| <b>Ku</b> | 12.4 GHz            | 18 GHz              | 2.42 cm          | 1.66 cm          |
| <b>K</b>  | 18 GHz              | 26.5 GHz            | 1.66 cm          | 1.11 cm          |
| <b>Ka</b> | 26.5 GHz            | 40 GHz              | 11.1 mm          | 7,5 mm           |
| <b>mm</b> | 40 GHz              | 300 GHz             | 7.5 mm           | 1 mm             |

### 2.3.2. XESTIÓN DO ESPECTRO RADIOELÉCTRICO. O CNAF.

O Cadro Nacional de Atribución de Frecuencias (**CNAF**) é o instrumento legal; dependente do Ministerio de Industria, Comercio e Turismo; empregado para asignar aos distintos servizos de radiocomunicacións as diferentes bandas de frecuencias, estas bandas esténdense dende 9 KHz. até 105 GHz. O **CNAF** foi editado por primeira vez en 1990, tivo varias edicións, a última edición foi en 2010. Debido ao seu contido regulador e técnico, todas as edicións, á súa vez foron sometidas a numerosas revisións parciais.

A xestión do espectro radioelétrico que o **CNAF** dita segue os Tratados e Acordos internacionais en materia de planificación do espectro radioelétrico nos que España forma parte, atendendo á normativa aplicable na Unión Europea e ás resolucións e recomendacións da Unión Internacional de Telecomunicacións (**UIT**), a Conferencia Europea de Administracións Postais e de Telecomunicación (**CEPT**), Comisión Europea e Parlamento Europeo (**CE**) e o Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (**ETSI**).

A marxe de actuación esta limitado porque España non pode tomar decisións vía **CNAF** que contradigan as disposicións emanadas do **ITU-R** e que son plasmadas no Regulamento de Radiocomunicacións (**RR**), que ten carácter de tratado internacional e do que España forma parte. Con elas lógrase a harmonización no uso de espectro.

Cada páxina do **CNAF** divídese en dous cadros, o da esquerda, contén a atribución de bandas de frecuencias segundo a **ITU-R**, esta atribución indícase para o tres rexións nas que foi dividido o mundo a efectos de atribución de bandas de frecuencias segundo o **RR**. España pertence á rexión 1.

O segundo cadro, o da dereita, contén a atribución de bandas de frecuencias en España. A primeira columna contén o marxe de frecuencias ao que afecta e a súa atribución, na segunda columna figuran os tipos de uso que se corresponden. Finalmente, na terceira columna, aparecen as notas do **RR** da **ITU-R** que lle son de aplicación, as notas de Utilización Nacional (**UN**) e, no seu caso, información ou comentarios adicionais en relación á correspondente banda de frecuencias.

Na seguinte figura pode verse unha páxina do **CNAF**:

| ATRIBUCIÓN A LOS SERVICIOS según el RR de la UIT                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                         | ATRIBUCIÓN NACIONAL                                                                                                           | USOS       | OBSERVACIONES                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 890 - 1300 MHz                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                         | 890 - 1300 MHz                                                                                                                |            |                                                                                                      |
| Región 1                                                                                                     | Región 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Región 3                                                                |                                                                                                                               |            |                                                                                                      |
| 890 - 942<br>FIJO<br>MÓVIL, salvo móvil<br>aeronáutico 5.317A<br>RADIODIFUSIÓN<br>5.322<br>Radiolocalización | 890 - 902<br>FIJO<br>MÓVIL, salvo móvil<br>aeronáutico 5.317A<br>Radiolocalización<br>5.318 5.325<br><br>902 - 928<br>FIJO<br>Alicionados<br>Móvil, salvo móvil<br>aeronáutico 5.325A<br>Radiolocalización<br><br>5.150 5.325 5.326<br><br>928 - 942<br>FIJO<br>MÓVIL, salvo móvil<br>aeronáutico 5.317A<br>Radiolocalización | 890 - 942<br>FIJO<br>MÓVIL 5.317A<br>RADIODIFUSIÓN<br>Radiolocalización | 890 - 942<br>MÓVIL, salvo móvil aeronáutico                                                                                   | M          | ATRIBUCIÓN PARA SISTEMAS<br>MÓVILES<br>5.317A 5.322<br>UN - 40, UN - 41<br>UN - 73<br>UN - 104 CT1-E |
| 5.323                                                                                                        | 5.325                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5.327                                                                   | 942 - 960<br>MÓVIL, salvo móvil aeronáutico                                                                                   | M          | ATRIBUCIÓN PARA SISTEMAS<br>MÓVILES<br>5.317A 5.322<br>UN - 41, UN - 73                              |
| 942 - 960<br>FIJO<br>MÓVIL, salvo móvil<br>aeronáutico 5.317A<br>RADIODIFUSIÓN<br>5.322<br><br>5.323         | 942 - 960<br>FIJO<br>MÓVIL 5.317A                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 942 - 960<br>FIJO<br>MÓVIL, 5.317A<br>RADIODIFUSIÓN<br><br>5.320        | 960 - 1164<br>RADIONAVEGACIÓN<br>AERONÁUTICA                                                                                  | R          | 5.317A 5.328                                                                                         |
| 1164 - 1215                                                                                                  | RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA 5.328<br>MÓVIL AERONÁUTICO (R) 5.327A                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                         | 1164 - 1215<br>RADIONAVEGACIÓN<br>AERONÁUTICA<br>RADIONAVEGACIÓN POR<br>SATELITE (espacio-Tierra)<br>(espacio-espacio) 5.328B | R<br><br>M | 5.328 5.328A 5.328B<br><br>UN - 122: GALILEO                                                         |
| 5.328A                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                         |                                                                                                                               |            |                                                                                                      |

En canto aos usos empréganse as seguintes abreviaturas cos seguintes significados:

**C → Uso común:** O uso común xeral é o que corresponde por igual a todos, e corresponderán ás bandas do espectro que sinale o CNAF como de uso común e para aplicacións industriais, científicas e médicas. Non precisan de título habilitante (licenza). O usuario non ten dereito a solicitar protección fronte a outras emisións na mesma banda nin a indemnización no caso de que se modifiquen as frecuencias asignadas pola CNAF para este servizo.

**E → Uso especial:** O seu uso corresponde por igual a todos os cidadáns, pero diferénciase do anterior en que existen circunstancias especiais de perigo, intensidade de uso (concorrenza) ou similares. É o caso dos radioaficionados ou doutros con fins de entretemento ou lecer sen contido económico. Este uso común especial require de título habilitante (autorización).

**P → Uso privativo:** Supón a ocupación dunha porción do dominio público de modo que limita ou exclúe a utilización dos demais interesados.

Inclúe o que se fai en réxime de auto prestación, é dicir, para uso privado sen dar servizo a terceiros. Por exemplo, para as comunicacións internas dunha frota de taxis ou de vehículos de transporte.

Tamén inclúe o orientado a dar servizos a terceiros. É o caso de operadores de telefonía móbil, titulares de emisoras de radiodifusión sonora ou de Televisión. Este uso privado para dar servizo a terceiros require de título habilitante (concesión). Quen solicite este tipo de uso privativo deberá acreditar a súa condición de operador.

**R → Uso reservado ao Estado.**

**M → Uso mixto que comprende os usos P e R.**

### 2.3.3. INTERFACES REGULAMENTADAS

O regulamento que establece o procedemento para a avaliación de conformidade dos aparellos de telecomunicacións establece que a Secretaría de Estado de Telecomunicacións e para a Sociedade da Información publicará, como resolución

no Boletín Oficial do Estado, as interfaces regulamentadas (**IR**) en España. O cumprimento dos requisitos establecidos nas **IR** é necesario para o uso dos sistemas que operen en España. A concesión de títulos habilitantes para o uso do dominio público radioeléctrico, no seu caso, está suxeita ao cumprimento dos requisitos mínimos especificados nas interfaces radioeléctricas correspondentes aos tipos de equipos utilizados.

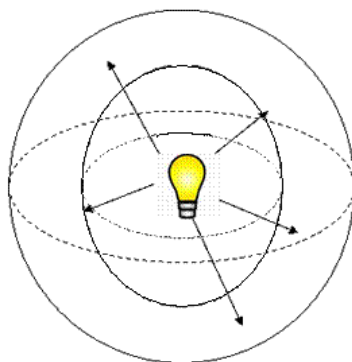
Na web: <http://www.mityc.es/telecomunicaciones/Espectro/Paginas/CNAF.aspx> poden consultarse o cadro do **CNAF**, as notas do artigo 5 do **RR**, as Interfaces Radioeléctricas regulamentadas (**IR**) e as notas de Utilización Nacional (**UN**) incluíndo información sobre as decisións da Conferencia Europea de Administracións de Correos e Telecomunicacións e da Comisión Europea.

## 2.4.PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

### 2.4.1. AS PERDAS NO ESPAZO LIBRE

É un feito experimental ben coñecido por nos, que cando unha onda viaxa polo espazo a súa intensidade vai decaendo, este é o motivo polo que a Galiza non chegan as emisoras de TV terrestre de EEUU ou, a menor escala, polo que temos que ter un repetidor de sinal preto para poder ver a TV.

A primeira vista poderíamos pensar que isto é debido á absorción das ondas polos gases da atmosfera pero en realidade este non é o factor dominante, alomenos non para todas as frecuencias de ondas EM. Pensemos nunha lámpada incandescente, se colocamos un sensor de luz preto de ela a lectura daranos un valor enorme mentres que se nos afastamos o valor será máis pequeno, isto débese a que a potencia luminosa repártese, a medida que nos afastamos, nunha superficie cada vez maior mentres que o tamaño do noso sensor é sempre o mesmo. A figura da dereita ilustra este efecto, pensemos que a potencia que atravesa a primeira esfera será a mesma que atravesa a segunda e polo tanto a potencia por unidade de superficie na primeira esfera será maior que na segunda.



Supoñamos un elemento que radia ao espazo unha potencia  $P_e$  de ondas EM de que se propaga en todas direccións, a potencia por unidade de superficie  $P_s$  será a potencia total radiada dividida entre a superficie entre a que se reparte:

$$P_s = \frac{P_e}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

A potencia recibida dependerá da cantidade de radiación que a antena captura. Unha antena captura potencia nunha superficie que se estende ao seu redor, a esta chámasele superficie aparente da antena. Sabemos que o tamaño dos dipolos e outras antenas elementais depende da lonxitude de onda de xeito que canto menor é a lonxitude de onda menor é tamén o tamaño da antena. Resulta lóxico pensar que unha antena de menor tamaño presentará tamén unha menor superficie aparente, este razoamento pode aplicarse ás antenas elementais e de fio pero non funciona coas antenas parabólicas. Para unha antena isotrópica como a que se supón nesta análise, é igual a:  $S_{ap} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$

Deste xeito a potencia recibida ( $P_r$ ) será:  $P_r = P_s S_{ap} = \frac{P_e}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$

E as **perdas** no espazo libre, FSL, serán:

$$FSL = 10 \log \left( \frac{P_e}{P_r} \right) = 10 \log \left( \frac{4^2 \cdot \pi^2 \cdot d^2}{\lambda^2} \right) = 20 \log \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right) = 20 \log \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{c} \right)$$

$$FSL = 20 \cdot \log \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{c} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{4 \cdot \pi}{c} \right) + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d)$$

Onde, aínda que descompoñamos o logaritmo en varios termos que ter de manter a coherencia entre as unidades empregadas. Tomando unidades do S.I.U. teremos:

$$FSL = -147,56 + 20 \cdot \log(f(\text{Hz})) + 20 \cdot \log(d(\text{m}))$$

Habitualmente empregase a frecuencia en MHz e a distancia en km polo que teremos que expresar c en km/ $\mu$ s (0,3km/ $\mu$ s). Facéndoo obtemos:

$$\boxed{FSL = 32,44 + 20 \cdot \log(f(\text{MHz})) + 20 \cdot \log(d(\text{km}))}$$

Que é a forma máis usual de calcular as perdas no espazo libre.

**Moi importante:** As perdas no espazo libre **crecen ao aumentar a frecuencia**, este é o motivo polo que as bandas de frecuencias baixas son tan cobizadas, nunha banda de frecuencia máis baixa, coa mesma potencia de emisión, a cobertura acadada será maior. Observamos tamén que as perdas no espazo libre aumentan ao aumentar a distancia como é lóxico segundo o visto na primeira parte de este apartado.

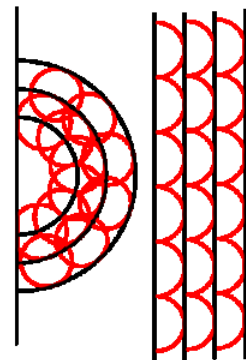
#### 2.4.2. EFECTOS DURANTE A PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

##### *Principio de Huygens*

Para entender o principio de Huygens debemos definir primeiro o concepto de fronte de onda. A fronte de onda é unha superficie que pasa por tódolos puntos do medio alcanzados pola onda no mesmo instante. As liñas perpendiculares a os sucesivos fronts de onda denomínanse raios e correspóndense coas liñas de propagación da onda.

O principio de Huygens é un método de análise aplicado aos problemas da propagación. Establece que cada punto dun fronte de onda que avanza é, de feito, o centro dunha nova perturbación e a fonte dun novo tren de ondas que se estenden en toda direccións coa mesma velocidade, frecuencia e lonxitude de onda que a fronte de onda da que proceden. A nova fronte de onda será a suma de todas estas ondas elementais. Esta visión da propagación de ondas axuda a comprender mellor algúns fenómenos que teñen lugar durante a propagación das ondas. Este principio aplicase tanto para as ondas de radio como para as ondas na auga, o son ou a luz.

Este principio é coñecido como o ***Principio de Huygens***, nomeado en honor de Christiaan Huygens, matemático, físico e astrónomo holandés que viviu entre 1629 e 1695.

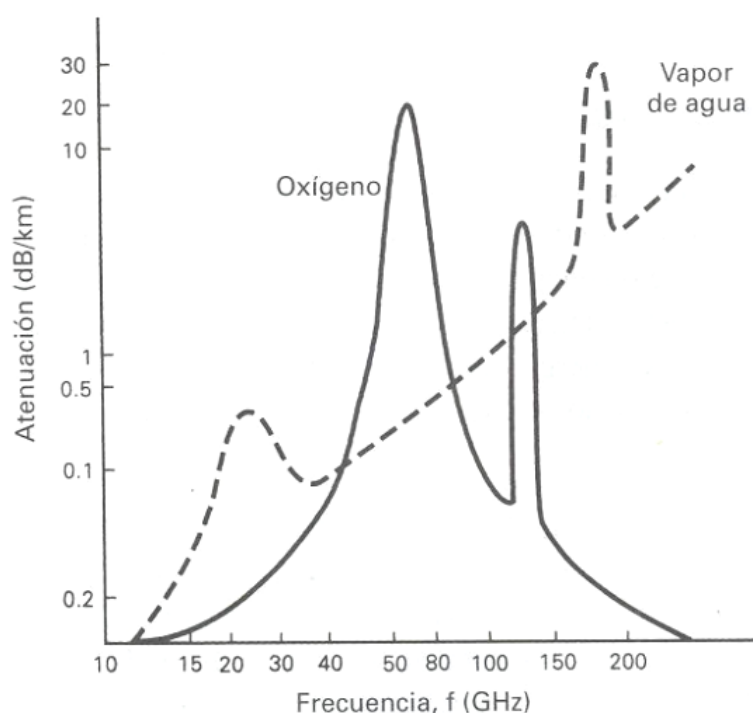


##### *Absorción*

Cando as ondas electromagnéticas atravesan algún material, xeralmente debilítanse ou atenúanse. A cantidade de potencia perdida vai depender da súa frecuencia e, por suposto, do material. O vidro dunha fiestra obviamente é transparente para a luz visible, mentres que o vidro utilizado nos lentes de sol filtra unha porción da intensidade da luz e bloquea a radiación ultravioleta.

De cotío utilízase o coeficiente de absorción para describir o impacto dun material na radiación, este coeficiente exprésase xeralmente en dB/km ou en dB/m.

Na figura de debaixo podemos ver os coeficientes de absorción para os compoñentes máis relevantes na absorción da atmosfera terrestre, o vapor de auga e o osíxeno. Pensemos ademais que esta absorción será variábel coas condicións climáticas( neboeiras, chuvias...). Entre 10 MHz e 10 GHz a absorción atmosférica pode considerarse desprezable.

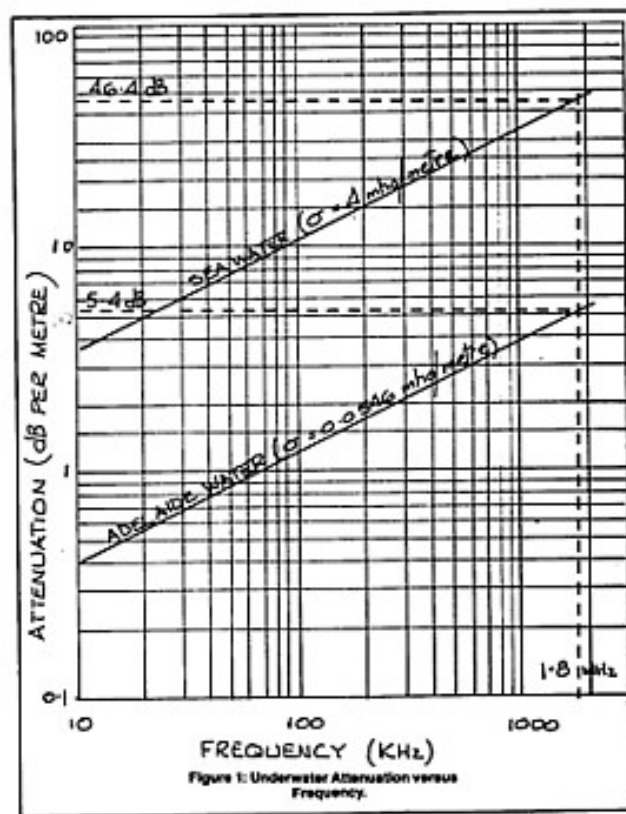


Os materiais construtivos e a terra tamén absorben ondas EM nunha proporción que dependerá do material e da frecuencia. Pensemos que as paredes de ladrillo, pedra ou formigón das nosas vivendas deixan pasar as ondas de radio, dende as de radiodifusión en onda media (AM) ás de WiFi e sen embargo en tódolos casos a recepción é mellor sen paredes de por medio, este é un dos motivos polos que as antenas se colocan no tellado e non nos garaxes.

En xeral **os materiais máis absorbentes** para as ondas EM son **os condutores** xa que os electróns poden moverse libremente e son capaces de oscilar e polo tanto absorber a enerxía duna onda que os atravesa. Fixémonos por exemplo no mal que funcionan os teléfonos móbiles nos ascensores.

Outra cuestión importante é que para as ondas EM unha malla metálica con buratos máis pequenos que a súa  $\lambda$  representa unha absorción practicamente igual de grande que unha lámina metálica. Por iso as portas dos fornos de microondas levan unha malla metálica na porta e, a pesar dos buratos, as microondas saen moi atenuadas do forno. Os microondas traballan en torno a 2,4 GHz ( $\lambda = 12,5$  cm).

**A Auga.** A auga (non destilada) é un medio condutor polo que ten un coeficiente de absorción relativamente alto que depende ademais do seu contido en sales que será o que determine a súa condutividade. No gráfico de debaixo pode verse a atenuación en dB/m para auga mariña (curva superior) e doce (curva inferior) para diferentes frecuencias.



Este efecto é moi acusado nas microondas e é o principio de funcionamento dos fornos de microondas. Para nos, en radiocomunicacións, é un problema.

Existen outros materiais que teñen un efecto máis complexo na absorción de radiación. Os animais estamos compostos maiormente de auga polo que podemos descritos a efectos de absorción de ondas EM como grandes bolsas cheas de auga. Para as árbores e a madeira, a cantidade de absorción depende tamén da cantidade

de auga que conteñen. A madeira vella e seca é máis ou menos transparente e a madeira fresca e húmida vai absorber moito.

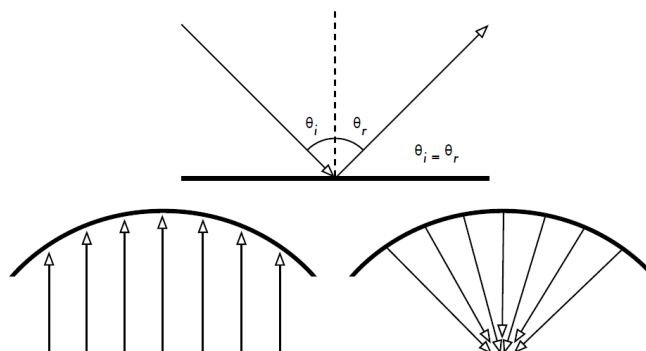
### *Reflexión*

Ao igual que a luz visible, as ondas de radio son reflectidas cando entran en contacto con materiais que son apropiados para iso: para as ondas de radio, as principais fontes de reflexión son os condutores: os metais e as superficies de auga. A reflexión nos materiais caracterízase polo coeficiente de reflexión  $\Gamma$ , que relaciona as amplitudes da onda incidente e a reflexada e que depende da frecuencia, do ángulo de incidencia e da polarización das ondas.

Parece que isto pode entrar en conflito co que dixemos no apartado anterior xa que se algo é reflectido non pode ser absorbido, a clave é que a reflexión case nunca é total salvo nos moi bos condutores e, polo tanto, unha fracción da enerxía incidente entra no material e se propaga polo seu interior. Lonxe de entrar en conflito son dous efectos que se complementan para facer dos condutores unha barreira insuperable para as ondas EM, en primeiro lugar unha gran parte da potencia incidente é reflectida na superficie e despois a fracción que si pasou sofre unha forte absorción ao pasar polo material de xeito que ao outro lado da barreira condutora non queda case practicamente na onda EM.

De novo para as ondas EM unha malla metálica con buratos máis pequenos que a súa  $\lambda$  presenta un coeficiente de reflexión practicamente igual ao dunha lámina metálica.

A regras para a reflexión son bastante simples: o ángulo no cal unha onda incide nunha superficie é o mesmo ángulo no cal é desviada.



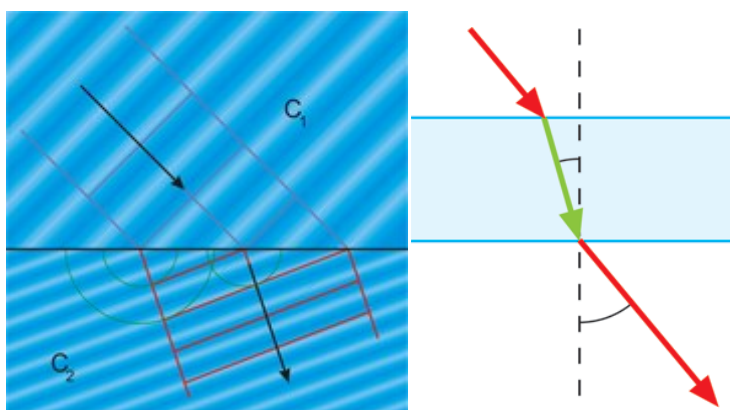
A pesar de que as regras de reflexión son bastante simples, as cousas poden complicarse moito cando imaxinamos unha situación real con obxectos reflectantes de formas diversas e irregulares.

Isto explica o efecto da multitraxectoria (multipath) que consiste en que as ondas cheguen ao receptor a través de diferentes camiños e, polo tanto en tempos diferentes. Este efecto é moi importante nas radiocomunicacións e é responsable, por exemplo, das imaxes dobres que se vían as veces na TV analóxica.

Tamén utilizamos a reflexión en vantaxe nosa na construción das antenas: por exemplo, colocando grandes parábolas detrás do noso transmisor/receptor para recoller as ondas de radio e centralas nun punto.

### Refracción

Segundo vimos no apartado anterior unha parte da potencia incidente entra no material. A refracción é a desviación das ondas cando atopan un medio con composición diferente. Cando unha fronte de onda pasa dun medio a outro diferente, cambia de velocidade e en consecuencia, de dirección. Este efecto pódese demostrar graficamente a partir do principio de Huygens.



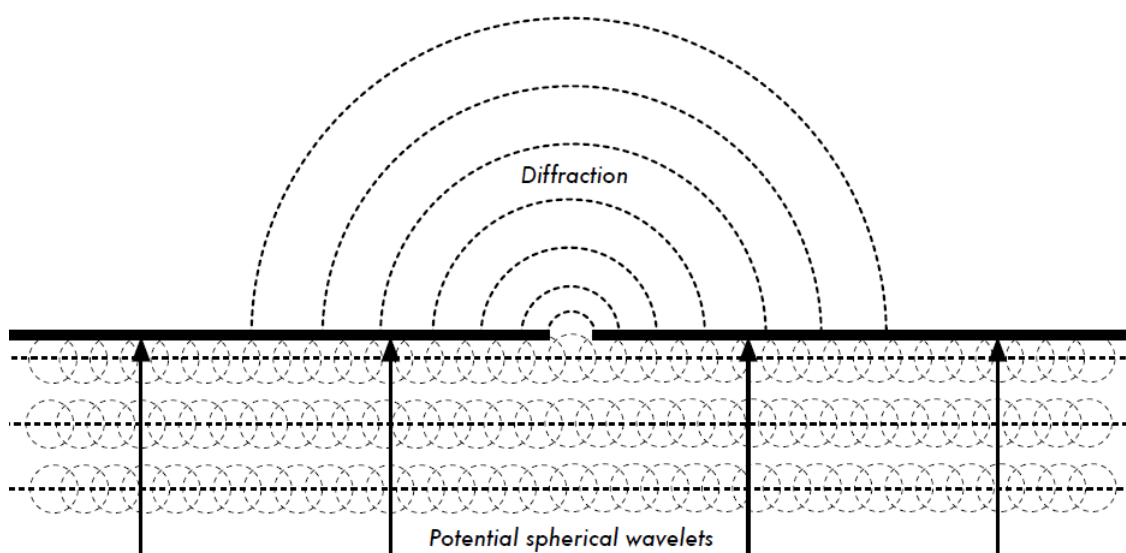
As liñas azuis representan a fronte de onda entrante mentres que as vermellas representan a fronte de ondas desviada pola refracción. A velocidade de propagación no medio 1,  $c_1$ , é maior un que a do medio 2,  $c_2$ . O ángulo que forman ambas frontes de onda depende das características dos medios entre os que se propaga a onda.

Este efecto é o responsable do aparente cambio de forma que experimentan os obxectos nun vaso de auga.

## Difracción

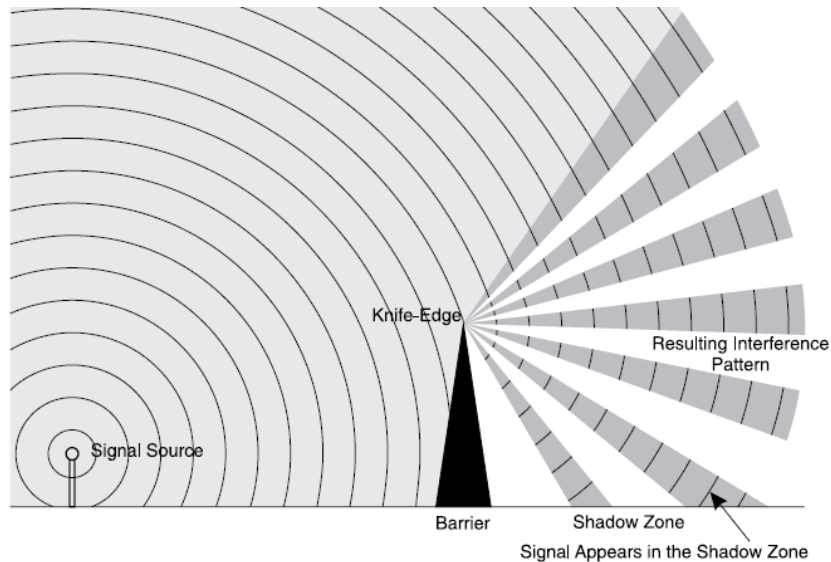
Difracción é o comportamento das ondas cando, ao incidir nun obxecto, dan a impresión de rodealo.

Imaxinemos unha onda na auga viaxando nun fronte de onda plano, tal como unha ola achegándose cara unha praia. Agora, interpoñemos no seu camiño unha barreira sólida para bloqueala. Imaxinemos que esa barreira ten unha abertura, dende esta abertura vai a comezar unha nova onda circular, e por suposto vai alcanzar puntos que están nunha liña directa detrás desa abertura, pero tamén a ambos lados dela. Este efecto podemos explicalo empregando o principio de Huygens como se mostra na seguinte figura.



É por medio do efecto de difracción, que as ondas van a dobrar as esquinas, ou van a atravesar unha abertura nunha barreira. O efecto da difracción é máis intenso cando dimensións dos obstáculos son menores que a  $\lambda$ . Por tanto as ondas con  $\lambda$  grande serán máis eficientes esquivando os obstáculos grandes como as montañas. Este é outro factor que fai que as ondas de **frecuencias máis baixas** dean unha **mellor cobertura** que se suma as menores perdas por propagación en espazo libre.

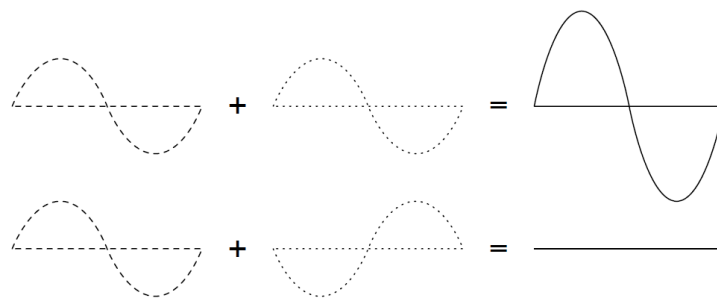
Cando a difracción se produce por un obxecto (edificio, montaña...) en lugar dunha fenda o que aparecerá ao outro lado é un patrón de interferencias con zonas de sinal e de sombra alternadas. A isto chámase difracción de filo de navalla (knife-edge) e pode verse na seguinte figura.



### Interferencia

Como xa vimos en temas anteriores cando traballamos con ondas, un máis un non é necesariamente igual a dous, incluso pode resultar cero.

Isto é sinxelo de entender cando debuxamos dúas ondas sinusoidais e sumamos as amplitudes. Cando un pico coincide con outro pico, temos un resultado máximo ( $1 + 1 = 2$ ). Isto é denominado interferencia construtiva. Cando un pico coincide cun val, temos unha completa aniquilación ( $1 + (-)1 = 0$ ), e denomínase interferencia destrutiva. Este fenómeno dependerá tamén da polarización das ondas.

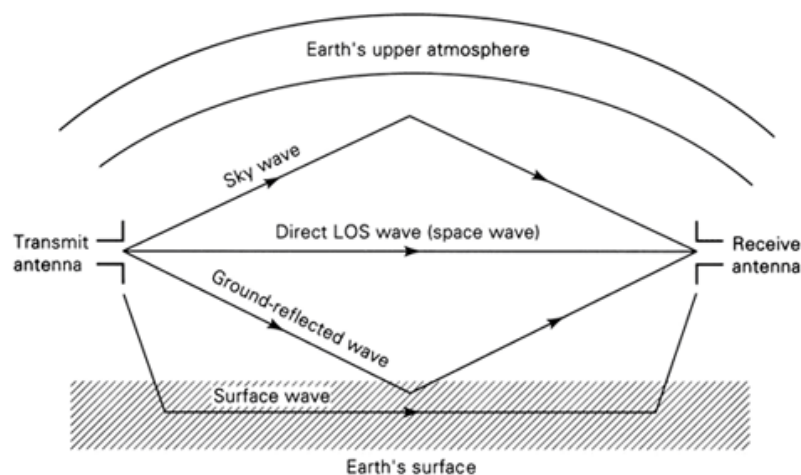


Para que os trens de ondas se sumen ou cancelen perfectamente, teñen que ter exactamente a mesma lonxitude de onda e polarización e unha relación de fase fixa; isto significa posicións fixas desde o pico dunha onda ata a outra. Estes son casos extremos que só existen en condicións moi precisas, o caso máis común na realidade é que as ondas se combinen xerando unha nova forma de onda que non pode ser utilizada efectivamente para a comunicación.

## 2.5. MODOS DE PROPAGACIÓN

Nos sistemas de comunicación por radio, as ondas pódense propagar de varias formas, dependendo do tipo de sistema e o ambiente. Ademais, como se explicou anteriormente, as ondas electromagnéticas viaxan en liña recta, excepto cando algún obstáculo, a Terra ou a súa atmosfera alteran a súa traxectoria. Hai tres modos de propagación das ondas electromagnéticas: **ondas de terra**, **ondas espaciais** (que inclúen tanto ondas directas como ondas reflectidas a terra), e **ondas de ceo**.

A figura seguinte mostra os modos normais de propagación entre dúas antenas de radio. Cada un destes pode existir en un sistema de radio; con todo, algúns son desprezables en certos rangos de frecuencias ou sobre un tipo de terreo en particular. En frecuencias por debaixo de 1,5 MHz, as ondas de terra proporcionan a mellor cobertura. Isto débese a que as perdas na terra incrementáanse rapidamente coa frecuencia. As ondas do ceo utilízanse para aplicacións de alta frecuencia, e as ondas espaciais utilízanse para frecuencias moi altas (VHF) e superiores.



**Surface wave** – Onda de superficie ou de terra.

**Sky wave** – Onda de ceo.

**Direct LOS wave** – Onda directa con liña de visión (Onda espacial).

**Ground reflected wave** – Onda reflexada no chan (Onda espacial).

### 2.5.1. ONDAS DE SUPERFICIE

Unha onda de terra é unha onda electromagnética que viaxa pola superficie da Terra. Por tanto, as ondas de terra ás veces chámanse ondas superficiais. A superficie da Terra ten resistencia e perdas dieléctricas. Por tanto, as ondas de terra atenúanse conforme se propagan. As ondas de terra propáganse mellor sobre unha superficie que sexa un bo condutor, como auga salgada ou as áreas desérticas moi áridas. As perdas de ondas de terra increméntanse rapidamente coa frecuencia. Por tanto, a propagación de ondas de terra límtase xeralmente a frecuencias por debaixo dos 2 MHz.

As ondas de terra propáganse ao redor da Terra, permanecendo preto da súa superficie. Se se transmite suficiente potencia, a fronte de onda podería propagarse máis aló do horizonte ou até ao redor da circunferencia completa da Terra.

A propagación de ondas de terra utilízase comunmente para comunicacións entre barcos ou entre barcos e terra, para radionavegación e para as comunicacións marítimas móbiles. As ondas de terra utilízanse a partir de frecuencias tan baixas como 15 kHz.

As desvantaxes da propagación de ondas de terra son as seguintes:

- ✓ As ondas de terra requiren dunha potencia relativamente alta para a transmisión.
- ✓ As ondas de terra están limitadas a frecuencias, moi baixas, baixas e medias (VLF, LF e MF) que requiren de antenas grandes.
- ✓ As perdas por terra varían considerablemente co material da superficie.
- ✓ É obrigado empregar só polarización vertical.

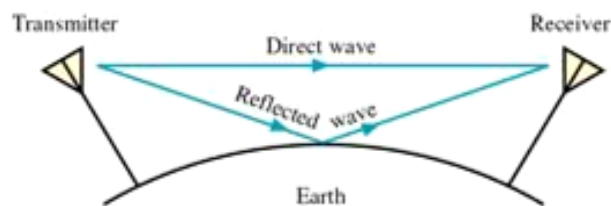
As vantaxes da propagación de ondas de terra son as seguintes:

- ✓ Con suficiente potencia de transmisión, as ondas de terra pódense utilizar para comunicarse entre dúas localizacións calquera no mundo.
- ✓ As ondas de terra non se ven apenas afectadas os cambios nas condicións atmosféricas.

### 2.5.2. ONDAS ESPACIAIS

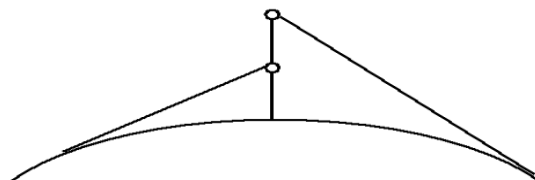
A propagación de ondas espaciais inclúe enerxía radiada que viaxa na parte inferior da atmosfera da Terra. As ondas espaciais inclúen ondas directas e reflectidas de terra. As ondas directas viaxan esencialmente en liña recta, entre as antenas transmisora e receptora. A propagación de ondas espaciais con ondas directas chámase comunmente transmisión de liña de vista (LOS). Por tanto, a propagación de ondas espaciais estará limitada pola curvatura da Terra.

A seguinte figura mostra a propagación de ondas espaciais, entre dúas antenas.



A potencia recibida na antena receptora dependerá da distancia que hai entre as dúas antenas (atenuación e absorción) e da relación de fase entre as ondas directa e reflectida (interferencia).

A curvatura da terra presenta un horizonte para a propagación de ondas espaciais comunmente chamado radio horizonte ( $rh$ ). Debido á refracción atmosférica, o radio horizonte esténdese algo máis aló do horizonte óptico xa que esta tende a curvar os raios cara abaixo. O radio horizonte pode alargarse simplemente elevando as antenas, transmisora ou receptora (ou ambas), por encima da superficie da Terra. Isto faise mediante torretas ou colocándoas encima de montañas ou edificios altos. A figura mostra o efecto que ten a altura da antena no horizonte óptico, o radio horizonte ira un pouco máis aló en ambos casos.

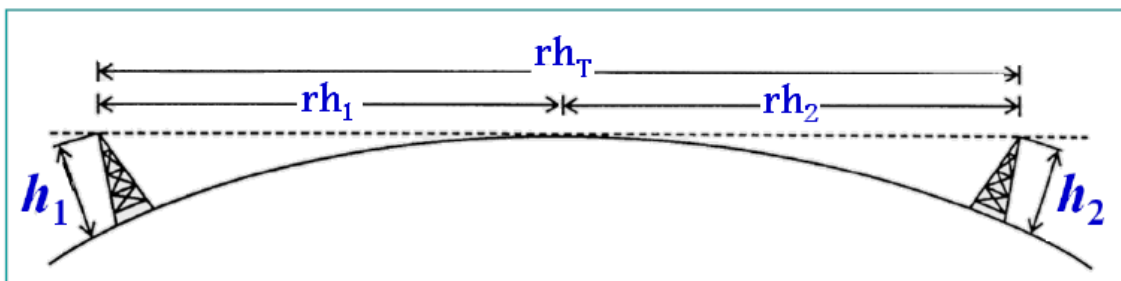


O radio horizonte de liña de vista para unha soa antena dáse como:

$$rh(km) = 4,12 \cdot \sqrt{h(m)} = \sqrt{17 \cdot h(m)}$$

Para o enlace completo teremos, supoñendo que a superficie da terra sexa suficientemente lisa:

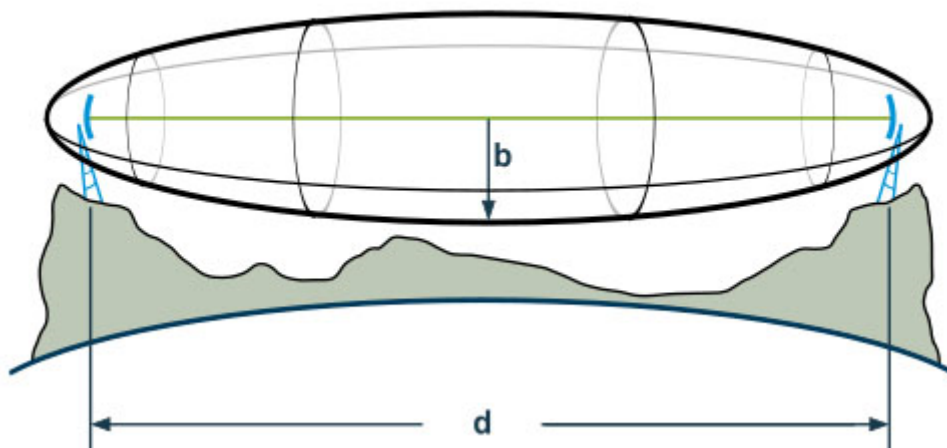
$$rh_T(km) = rh_1(km) + rh_2(km) = \sqrt{17 \cdot h_1(m)} + \sqrt{17 \cdot h_2(m)}$$



Pode verse que a distancia da propagación de ondas espaciais pode estenderse simplemente incrementando a altura das antenas.

Outro concepto esencial nos enlaces LOS é o da **primeira zona de Fresnel**. A teoría exacta das zonas de Fresnel é algo complicada. Sen embargo, o concepto é facilmente entendible a través principio de Huygens. Como cada punto do espazo alcanzado pola onda é un novo reemisor non toda a potencia que chega á antena receptora ven dos puntos situados na liña de visión directa, contribuirán a esta potencia recibida tamén os puntos situados ao redor de ela.

A maior parte da potencia recibida provén da primeira zona de Fresnel que é un elipsoide que ten como eixo maior a liña de visión directa como pode verse na seguinte figura.



O radio da primeira zona de Fresnel pode calcularse mediante a seguinte fórmula:

$$r = 17,31 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}}$$

onde  $r$  é o radio da primeira zona en metros,  $d_1$  e  $d_2$  son as distancias dende o punto no que queremos calcular aos extremos do enlace en metros,  $d$  é a distancia total do enlace en metros, e  $f$  é a frecuencia en MHz.

É habitual tomar o radio máximo da primeira zona de Fresnel que é o que ten no punto medio do enlace cando  $d_1$  e  $d_2$  son  $d/2$ , neste caso:

$$r_{max} = 17,31 \cdot \sqrt{\frac{d}{4 \cdot f}}$$

Entón, cando planeamos un radioenlace, debemos asegurar de que esta zona vai a estar libre de obstáculos. Na práctica, conformámonos con que alomenos o 60% da primeira zona de Fresnel estea libre.

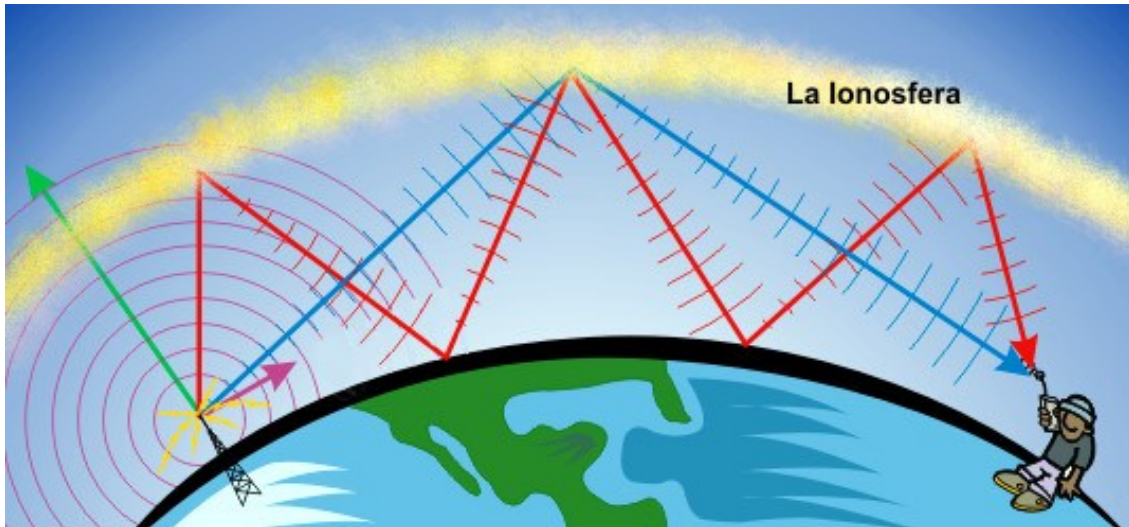
Este modo de propagación é operativo en todo o espectro radioeléctrico e é o que se emprega maioritariamente nos sistemas de radiocomunicacións: radioenlaces, telefonía móbil, radiodifusión terrestre de radio e TV, redes wifi...

### 2.5.3. ONDAS DE CEO

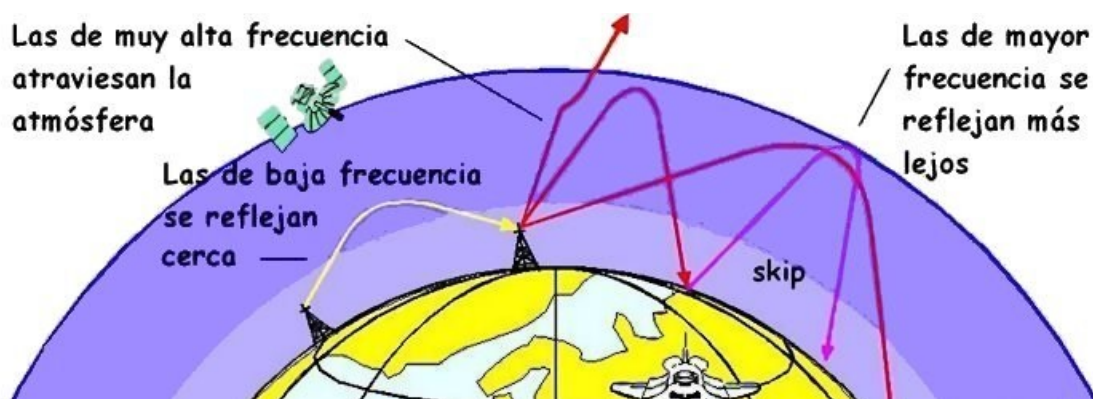
As ondas electromagnéticas que se dirixen por encima do nivel do horizonte chámanse ondas do ceo. As ondas de ceo envíanse cara ao ceo, onde son reflectidas ou refractadas novamente a Terra pola ionosfera ou por satélites.

#### *Propagación por refracción ionosférica*

A ionosfera é a rexión de espazo localizada aproximadamente entre 50 e 400 km por enriba da superficie da Terra. A ionosfera absorbe grandes cantidades da enerxía radiante do sol, que ioniza as moléculas do aire, creando electróns libres. Estas capas ionizadas poden facer que as ondas electromagnéticas se refracten ou que sexan fortemente atenuadas dependendo da densidade de ionización e da frecuencia das ondas EM.



Para as bandas MF e HF, a ionosfera compórtase coma un espello, reflectíndose nas capas máis altas canto maior é a frecuencia. En realidade tratase dunha refracción progresiva a medida que a onda vai entrando na ionosfera de xeito que ao final sae “reflexada” de xeito similar ao que pasa cos espellismos. O comportamento da ionosfera varia moito dependendo da hora do día e da época do ano. Durante a noite a ionosfera diminúe notablemente o seu espesor. Cando transmitimos un sinal de 5MHz polo día, o sinal electromagnético reflíctese a uns 50 km de altura, mentres que pola noite a mesma onda pode alcanzar uns 200 km antes dirixirse cara a terra, polo que a zona a cubrir será moito máis afastada.



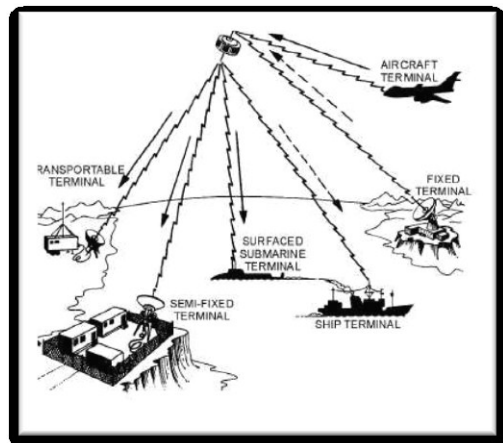
A propagación por reflexión ionosférica está determinada pola frecuencia utilizada, polo ángulo de apuntamento e polo nivel de ionización da ionosfera. Cunha frecuencia grande a refracción ionosférica será menor. Ademais se o ángulo de apuntamento e demasiado alto o raio son se refractara o suficiente e, polo tanto, non será devolto de novo á terra.

A figura a continuación mostra o efecto na distancia de salto dos cambios na ionosfera durante a noite. O teito formado pola ionosfera elévase, permitindo que as ondas de ceo viaxen máis altas antes de ser refractadas novamente á Terra. Este efecto explica como, ás veces, durante a noite escóitanse algunhas estacións que están moi afastadas e que non se escoitan durante as horas do día. Este mecanismo permite conectar puntos que non teñen liña de vista e transmitir a distancias enormes.

### *Reflexións ou retransmisións máis aló da atmosfera*

Para atravesar a atmosfera é necesario empregar frecuencias altas, en principio bastaría con traballar en UHF ou superior, algúns satélites operan tamén na parte máis alta da banda de VHF a partir de 120 MHz. Os satélites que emiten sinais de radiodifusión de televisión traballan na banda de SHF, na orde de 1GHz a 30GHz.

Existen dous tipos de reflexión, a primeira é a propagación por reflexión na lúa, a cal utiliza ao satélite natural como reflector, para que este tipo de propagación funcione é necesario que a lúa se poida ver entre as dúas estacións tanto transmisora como receptora. A segunda forma de propagación é a que utilizan os satélites artificiais.



Existen dous tipos de satélites artificiais:

- ✓ **Satélites pasivos:** Estes satélites atópanse en órbita ao redor da Terra e serven como espellos, reflectindo a onda de radio e regresandoa á Terra. Estes foron os primeiros tipos de satélites que se empregaron.
- ✓ **Satélites activos:** Estes satélites funcionan igual que os satélites pasivos, pero a diferenza é que estes reciben o sinal e a amplifican para mandala de regreso á Terra. A gran maioría dos satélites actuais son de este tipo.

Este tipo de ligazóns non requiren dunha liña de vista entre a estación transmisora e a estación receptora. Para poderse comunicar unha estación con outra é necesario crear a ligazón por medio dun satélite, de modo que o receptor sexa capaz de recibir o sinal do emisor. Existen moitos fenómenos que alteran

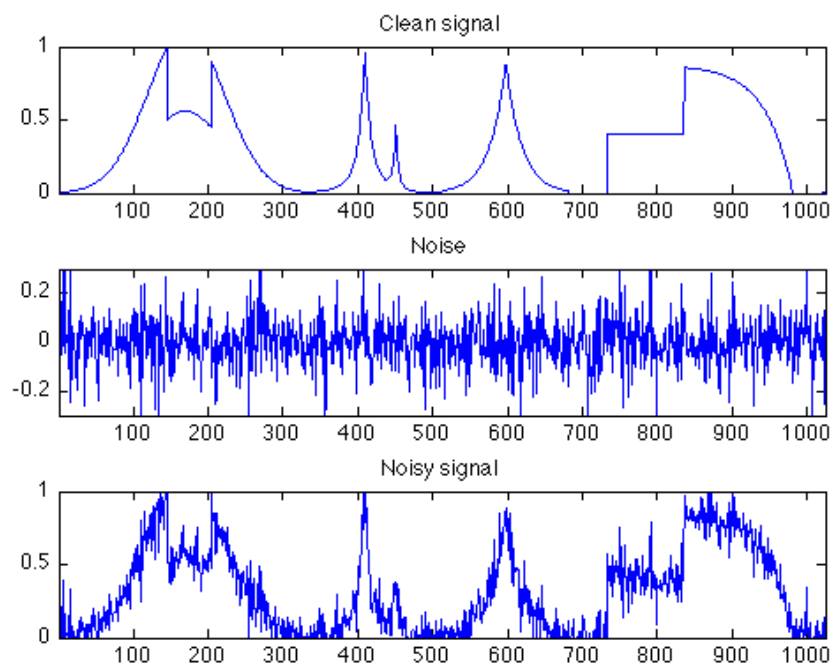
facilmente as ondas de RF nos sistemas satelitais, é por isto que para realizar comunicacións, xa sexan satélite - terra ó terra - satélite, os sinais teñen que sortear todos os fenómenos xerados pola Terra e a atmosfera na propagación:

- ✓ Perdas de espazo libre.
- ✓ Perdas por fenómenos atmosféricos e climático (humidade, vapor, choiva...).
- ✓ Ruídos provocados pola radiación solar e as súas reflexións na lúa.

## 2.6.RUÍDO ELÉCTRICO

En xeral, o ruído eléctrico defínese como calquera enerxía eléctrica non desexada presente na banda útil dun circuío de comunicacións. Por exemplo, nunha gravación de audio calquera sinal non desexado que cae na banda de frecuencias audíbles, entre 50Hz e 20kHz, é perceptible e interferirá coa información de audio. Consecuentemente, para os circuítos de audio, calquera enerxía eléctrica non desexada na banda de frecuencias entre 50Hz e 20kHz considérase ruído.

Como mostran as figuras, o sinal que foi contaminada con ruído é distorsionada e obviamente contén outras frecuencias ademais das da orixinal.



### 2.6.1. RUÍDO NON CORRELACIONADO

O ruído non correlacionado está presente sen importar se hai un sinal presente ou non. O ruído non correlacionado pódese dividir en dúas categorías xerais: externo e interno.

#### 2.6.1.1. RUÍDO EXTERNO

Os sinais externamente xeradas considéranse ruído, só se as súas frecuencias caen dentro da banda útil do circuíto, existen tres tipos principais de ruído externo: atmosférico, extraterrestre e feito polo home.

**Ruído atmosférico-** O ruído atmosférico é a enerxía eléctrica que se orixina dentro da atmosfera da Terra. A fonte da maioría deste ruído son perturbacións eléctricas naturais, tales como lóstregos, centellas... O ruído atmosférico propágase pola atmosfera da terra da mesma maneira que as ondas de radio. Por tanto, a magnitude do ruído estático recibido depende das condicións de propagación no tempo e, en parte, nas variacións diúrnas e estacionarias do ano.

Das medidas realizadas sobre este tipo de ruído dedúcese que en frecuencias por enriba de 30 MHz é insignificante

**Ruído extraterrestre-** O ruído extraterrestre orixínase fóra da atmosfera da terra e, por tanto, ás veces é chamado ruído do espazo profundo. O ruído extraterrestre orixínase da vía láctea, outras galaxias e o sol O ruído extraterrestre divídese en dúas categorías: solar e cósmico (galáctico).

O ruído extraterrestre contén frecuencias dende 8 MHz a 1.5 GHz, aínda que as frecuencias menores a 20 MHz raramente penetran a atmosfera da Terra e son por tanto xeralmente insignificantes.

**Ruído feito polo home-** As fontes do ruído feito polo home inclúen mecanismos que producen faíscas tales como os conmutadores nos motores eléctricos, sistemas de ignición de automóbiles, equipo de conmutación de potencia e luces fluorescentes. Devandito ruído contén un rango amplo de frecuencias que son propagadas polo espazo da mesma maneira que as ondas radio. Este ruído é máis intenso nas áreas máis poboadas, metropolitanas e industriais, e ás veces chámasele ruído industrial.

### 2.6.1.2. RUÍDO INTERNO.

O ruído interno é a interferencia eléctrica xerada dentro dun dispositivo. Existen principalmente tres tipos de ruído xerado internamente; térmico, de disparo e tempo de tránsito.

**Ruído térmico-** Os electróns dentro dun condutor están nun constante movemento debido á enerxía térmica de modo que a súa velocidade media dependerá da temperatura. Os electróns levan unha carga negativa unitaria e, consecuentemente cada movemento dun electrón constitúe un pulso curto de corrente. Debido a que o movemento de electróns é totalmente aleatorio e en todas direccións, a voltaxe media producida na sustancia polo seu movemento é de 0V. Por tanto este ruído térmico será un sinal alterno.

Recibe varios nomes, os cales inclúen ruído térmico, o ruído Browniano, ruído Johnson, ruído aleatorio, ruído resistivo e ruído branco.

Suponse até aquí que o ruído térmico ten un ancho de banda infinito e unha densidade de potencia constante o cal non é lóxico xa que indicaría unha potencia infinita, en realidade a súa densidade decrece apreciablemente a partir de  $10^{12}$  Hz ou 1000 GHz o que queda fóra das frecuencias que a nós nos interesan en radiocomunicacións.

A potencia total de ruído térmico calculase como:

$$N = k_B \cdot BW \cdot T$$

Onde:

$k_B$      Constante de Boltzmann –  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K

BW     Ancho de banda de interese (Hz)

T        Temperatura (K)

**Ruído de disparo e ruído de tempo de transito-** Son mecanismos de xeración de ruído que teñen lugar nos semicondutores e que polo tanto terán importancia nos compoñentes activos dos circuítos de comunicacións: amplificadores, filtros activos...

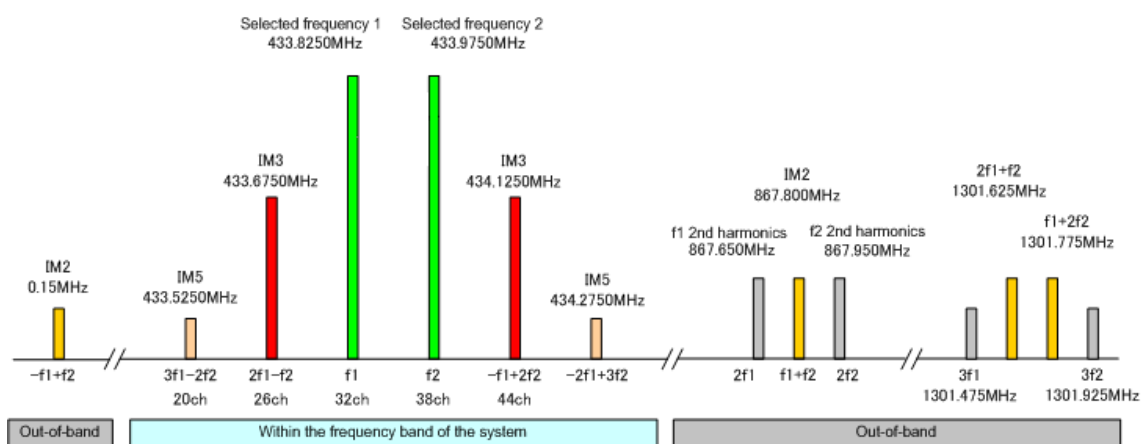
### 2.6.2. RUÍDO CORRELACIONADO

O ruído correlacionado é unha enerxía eléctrica non desexada que está presente como un resultado directo do sinal. As distorsións harmónica e de intermodulación son producidas pola amplificación cando esta non é perfectamente lineal. As distorsións harmónica e de intermodulación cambian a forma da onda e o seu contido espectral en frecuencia.

**Distorsión harmónica-** Cando unha onda sinusoidal se amplifica nun dispositivo que non é perfectamente lineal, como un amplificador de alta ganancia, aparecen na saída outras ondas sinusoidais con frecuencias iguais aos múltiplos enteiros da frecuencia fundamental. A esta distorsión lla chama distorsión harmónica e aos sinais con frecuencias iguais a múltiplos enteiros da fundamental, harmónicos.

**Ruído de intermodulación-** Cando dous ou máis sinais sinusoidais son amplificados nun dispositivo que non é perfectamente lineal aparecen á súa saída outras compoñentes sinusoidais con frecuencias iguais a sumas e restas das súas frecuencias e os seus harmónicos.

Na seguinte figura poden verse, no dominio da frecuencia, a distorsión harmónica e de intermodulación para un sistema alimentado por dous tons puros.



### 2.7. A RELACIÓN SINAL RUÍDO

A relación sinal ruído (S/N) é unha relación matemática sinxela do nivel do sinal con respecto ao nivel de ruído nun punto dado do circuío, amplificador ou o sistema. A relación de sinal ruído pode expresarse como unha relación de voltaxes ou unha relación de potencias.

Matematicamente, S/N é:

$$S/N = \frac{P_{Sinal}}{P_{Ruido}}$$

Sen embargo o máis habitual é expresala en dB:

$$(S/N)_{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{Sinal}}{P_{Ruido}}\right) = P_{Sinal}(dBm) - P_{Ruido}(dBm)$$

$$(S/N)_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{Sinal}}{V_{Ruido}}\right) = V_{Sinal}(dB\mu V) - V_{Ruido}(dB\mu V)$$

A relación de sinal ruído probablemente sexa o parámetro máis importante e frecuentemente usado para avaliar o funcionamento dun sistema completo de comunicacións de radio ou para comparar o funcionamento dun amplificador ou sistema con outro. Canto máis alta sexa a relación sinal ruído, mellor será o funcionamento do sistema. Da relación sinal ruído, pódese determinar a calidade xeral dun sistema.

Nos sistemas de radiocomunicación onde os sinais se modulan, “imprimen” sobre frecuencias maiores ás que denominamos portadoras. Falaremos de relación portadora ruído (C/N) cando os sinais están modulados. En realidade o parámetro ten o mesmo significado pero o S/N acadado por un sistema de comunicacións a partir dun C/N dependerá do xeito de modular empregado xa que existen esquemas de modulación máis robustos e máis eficientes que outros.

#### 2.7.1. FACTOR DE RUÍDO E ÍNDICE DE RUÍDO DUN AMPLIFICADOR

O factor de ruído (F) e o Índice de ruído ou figura de ruído (NF) son índices que indican a degradación na relación sinal ruído conforme o sinal propágase por un amplificador sinxelo, unha serie de amplificadores ou un sistema de comunicacións. O factor de ruído é a relación entre a relación sinal ruído na entrada e a relación sinal ruído na saída.

Matematicamente, este factor escríbese como:

$$F = \frac{(S/N)_{Entrada}}{(S/N)_{Saída}}$$

O índice de ruído ou figura de ruído é esta relación expresada en dB:

$$NF = 10 \cdot \log \left( \frac{(S/N)_{Entrada}}{(S/N)_{Saída}} \right) = (S/N)_{Entrada,dB} - (S/N)_{Saída,dB}$$

De modo que é unha **medida directa de canto empeora** un amplificador ou sistema **a relación sinal ruído**:

$$(S/N)_{Saída,dB} = (S/N)_{Entrada,dB} - NF$$

Un amplificador amplificará igualmente todos os sinais e ruído presentes na entrada que caen dentro da súa banda. Por tanto, se o amplificador é ideal e libre de ruído, o sinal e o ruído se amplifican polo mesmo factor e a relación sinal- ruído na saída do amplificador será igual á relación sinal ruído na entrada. Sen embargo, na realidade, os amplificadores non son dispositivos ideais libres de ruído. Por tanto, aínda que o sinal de entrada e o ruído se amplifican igualmente, o dispositivo agregará á forma de onda un ruído xerado internamente, reducindo a relación xeral sinal ruído.

Cando dous ou máis amplificadores ou dispositivos están conectados en cascada, o total do factor de ruído é a acumulación dos factores de ruído individuais. Matematicamente, o factor de ruído total está expresado como:

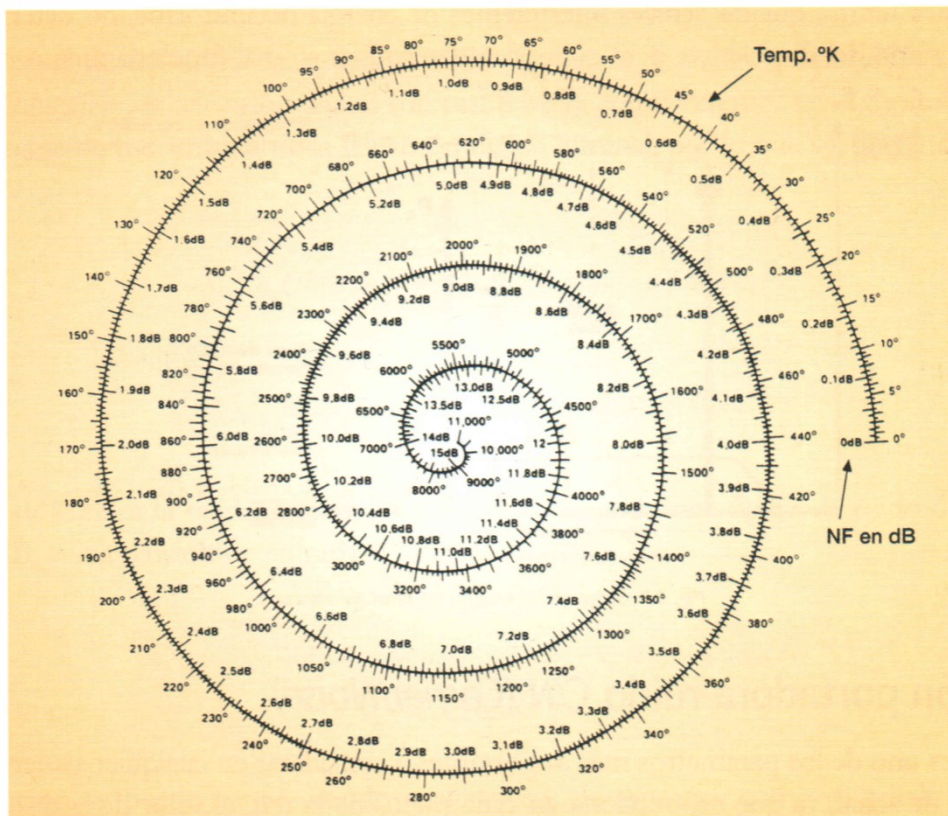
$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_N - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdots G_{N-1}}$$

Pode verse na ecuación que o factor de ruído do primeiro amplificador  $F_1$  contribúe, na súa maioría, o índice de ruído xeral  $F_T$ . Isto débese a que o ruído introducido na primeira etapa é amplificado por cada etapa subseguinte. Por tanto, cando se compara co ruído introducido na primeira etapa, o ruído agregado por cada etapa subseguinte é efectivamente reducido por un factor igual ao produto das ganancias das etapas precedentes.

### 2.7.2. TEMPERATURA DE RUÍDO NUN AMPLIFICADOR.

Na maior parte dos circuítos convencionais, o concepto do factor ou da figura de ruído é adecuado para describir o seu comportamento. Con todo, co desenvolvemento de amplificadores e circuítos de baixo ruído, en que o factor de ruído é lixeiramente maior que 1, é máis conveniente utilizar o concepto de temperatura de ruído. Esta defínese como a temperatura  $T_r$  dunha resistencia ficticia á entrada do circuíto, considerado estea libre de ruído, que xeraría a mesma potencia de ruído que o circuíto real. A temperatura de ruído esta directamente relacionada coa figura de ruído dun equipo xa que ambas dan conta da cantidade de ruído que engade o amplificador na súa saída.

Na seguinte gráfica poden determinarse as figuras de ruído a partir das súas correspondentes temperaturas de ruído e viceversa.



Tamén se poden calcular N e NF a partir de  $T_r$  mediante as expresións:

$$F = \frac{T_r}{T_0(290k)} + 1 \quad \Rightarrow \quad NF = 10 \cdot \log(F)$$