

TEMA 2: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.

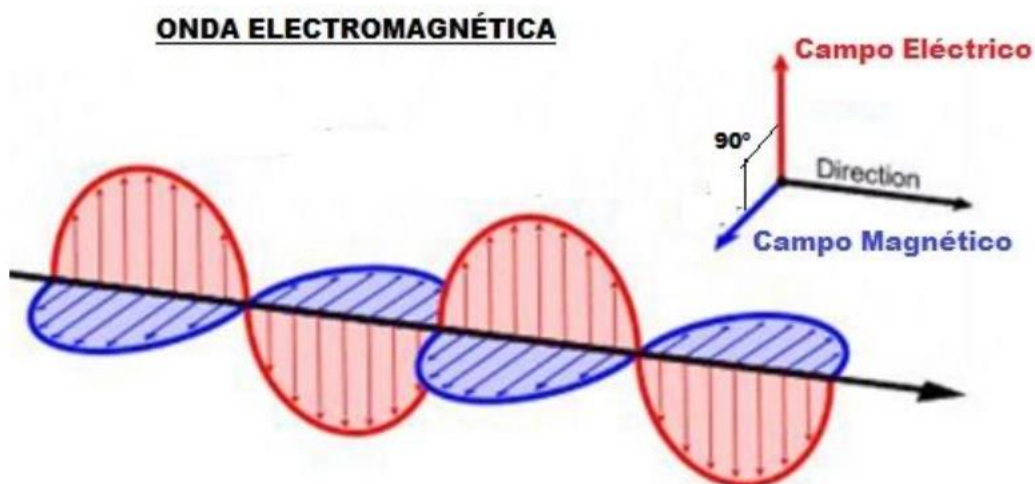
CONTIDOS

2.1.	AS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	2
	FRECUENCIA (f)	2
	LONGITUD DE ONDA (λ)	3
	VELOCIDADE DE PROPAGACIÓN (c).....	3
	AMPLITUDE.....	3
	POLARIZACIÓN.....	3
2.2.	O ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	7
2.3.	O ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	8
2.3.1.	ANCHO DE BANDA E BANDAS DE FRECUENCIA.....	10
2.3.2.	FRECUENCIAS E CANLES	12
2.3.3.	XESTIÓN DO ESPECTRO RADIOELÉCTRICO. O CNAF.....	13
2.4.	PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	16
2.4.1.	AS PERDAS NO ESPAZO LIBRE.....	17
2.4.2.	EFFECTOS DURANTE A PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	18
2.5.	MODOS DE PROPAGACIÓN.....	29
2.5.1.	ONDAS DE SUPERFICIE.....	30
2.5.2.	ONDAS ESPACIAIS.....	31
2.5.3.	ONDAS DE CEO.....	35
2.6.	RUÍDO ELÉCTRICO.....	38
2.7.	A RELACIÓN SINAL RUÍDO	39
2.7.1.	FACTOR DE RUÍDO E ÍNDICE DE RUÍDO DUN AMPLIFICADOR.....	40
2.7.2.	TEMPERATURA DE RUÍDO NUN AMPLIFICADOR	41

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.



Ondas electromagnéticas máis básicas (Seno y Coseno):

<https://www.youtube.com/watch?v=vpd0uTDYxrg>

Algúns 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 (λ)

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 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 está directamente relacionada coa potencia que transportan. Xeralmente ao referirnos a amplitude dunha onda electromagnética referirémonos á amplitude do seu campo eléctrico E.

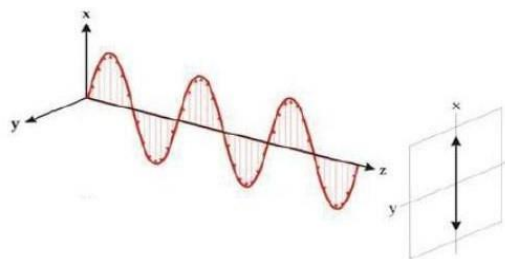
Relación frecuencia, periodo, longitud de onda:

<https://www.youtube.com/watch?v=gECno80glu4>

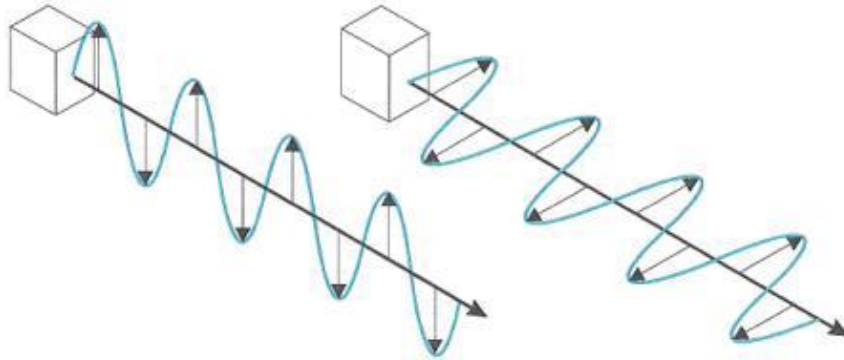
POLARIZACIÓN

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

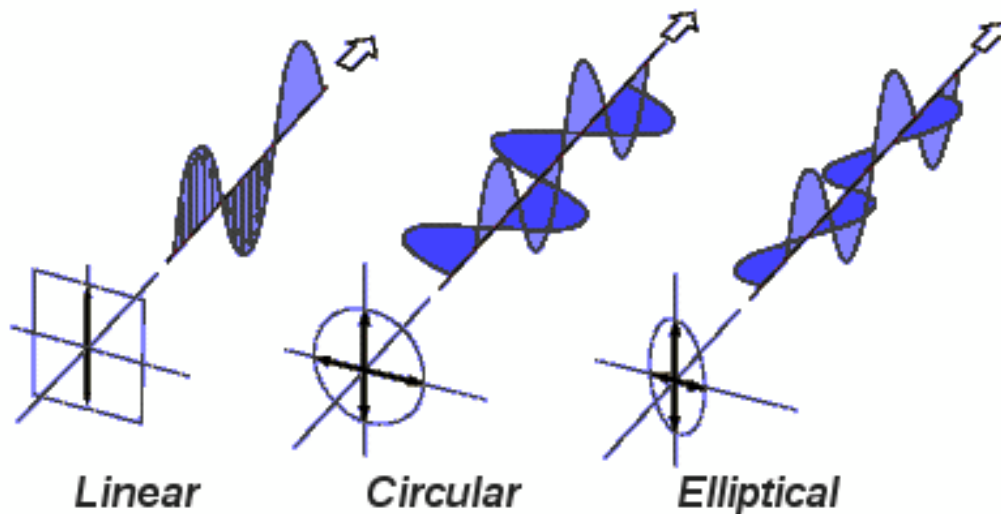
Nunha antena dipolo aliñada verticalmente (un anaco de arame recto), os electróns móvense só de arriba a baixo, non cara aos lados (porque non hai lugar cara onde moverse) e, por conseguinte, os campos eléctricos só apuntan cara arriba ou cara abaixo verticalmente. O campo que abandona o arame e viaxa como unha onda ten unha polarización estritamente lineal (neste caso vertical). Se deitamos a antena no chan (horizontal) teremos unha polarización lineal horizontal.



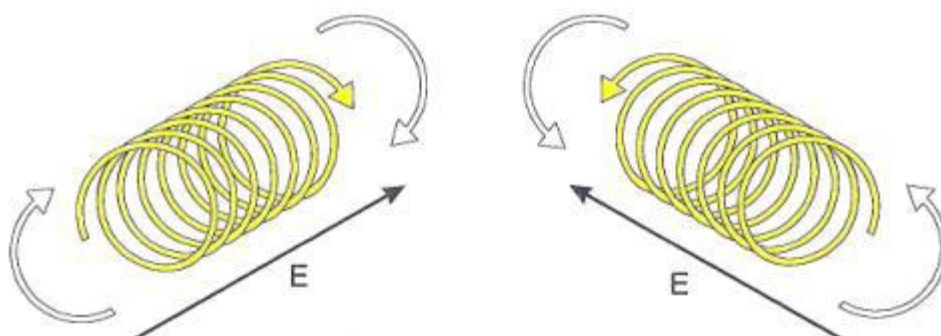
Podemos encontrar polarizacións nas que os campos manteñen a súa posición durante todo o traxecto, as que chamaremos “**polarizacións lineais**”.



Polo contrario, existen “**polarizacións elípticas e circulares**”, nas que os campos van xirando a medida que avanza polo aire, e polo tanto observaremos un ángulo diferente de polarización segundo o momento e o punto no que midamos. Poderá ser no sentido das agullas do reloxo ou ben en sentido contrario.



Comparación das polarizacións lineal, circular e elíptica.



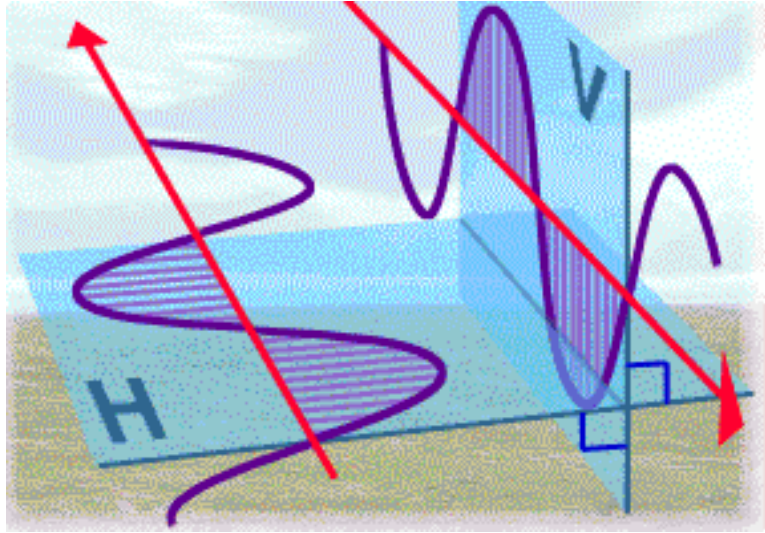
Movement do campo nas polarizacións circulares.

⇒ POLARIZACIÓN LINEAL:

As polarizacións lineais descríbense polo seu ángulo de orientación no plano, supoñendo que a dirección de propagación é paralela ao chan:

- A dirección vertical V, é a perpendicular ao chan.
- A dirección horizontal H, é a paralela ao chan.

As polarización distintas ás vertical e horizontal, descríbense segundo o ángulo de inclinación da dirección co eixo horizontal en graos.

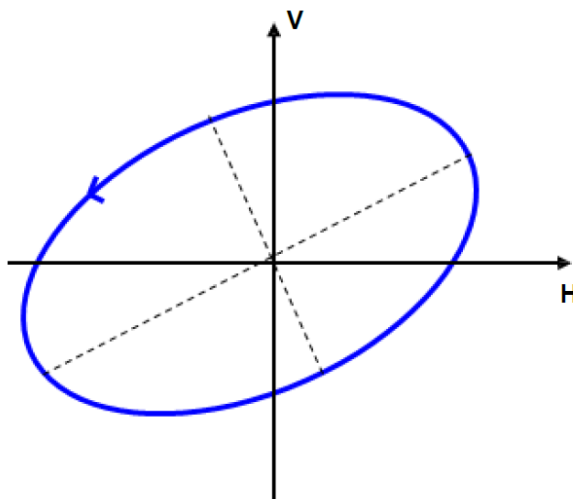


Representación das polarizacións vertical e horizontal respecto ó chan

⇒ POLARIZACIÓN ELÍPTICA:

A polarización elíptica descríbese por:

- A relación entre as lonxitudes dos eixos da elipse, relación axial AR
- A orientación do eixo maior da elipse respecto ao eixo H
- O sentido de recorrido da elipse, ou senso de xiro:
- Cara a esquerda (CCW, LHC)
- Cara á dereita (CW, RHC)



Podemos entender todos os diferentes casos de polarización como o resultado de combinar dúas ondas da mesma frecuencia con polarizacións H e V:

- Se entre ambas hai unha diferenza de fase de 0° ou 180° , a resultante ten polarización lineal. A orientación dependerá da relación entre as dúas amplitudes.
- Se ambas teñen a mesma amplitude e a diferenza de fase é 90° ou 270° , resulta unha polarización circular.
- Nos casos restantes resulta unha polarización elíptica.

A polarización lineal é so un caso especial, e nunca é perfecta: en xeral sempre temos algúns compoñentes do campo tamén noutras direccións. O caso máis xeral é a polarización elíptica, cuxos extremos son a polarización lineal (unha soa dirección) e a polarización circular (ambas direccións con igual intensidade). Como se pode imaxinar, a polarización é importante cando aliñamos as antenas. Se ignoramos a polarización, podemos ter moi pouco sinal aínda tendo as mellores antenas. Isto denomínase ***Desadaptación de Polarización***.

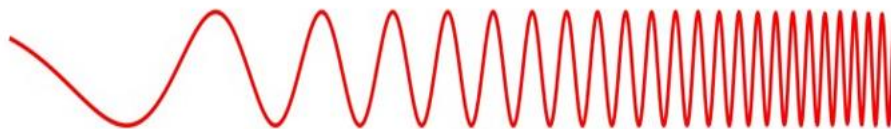
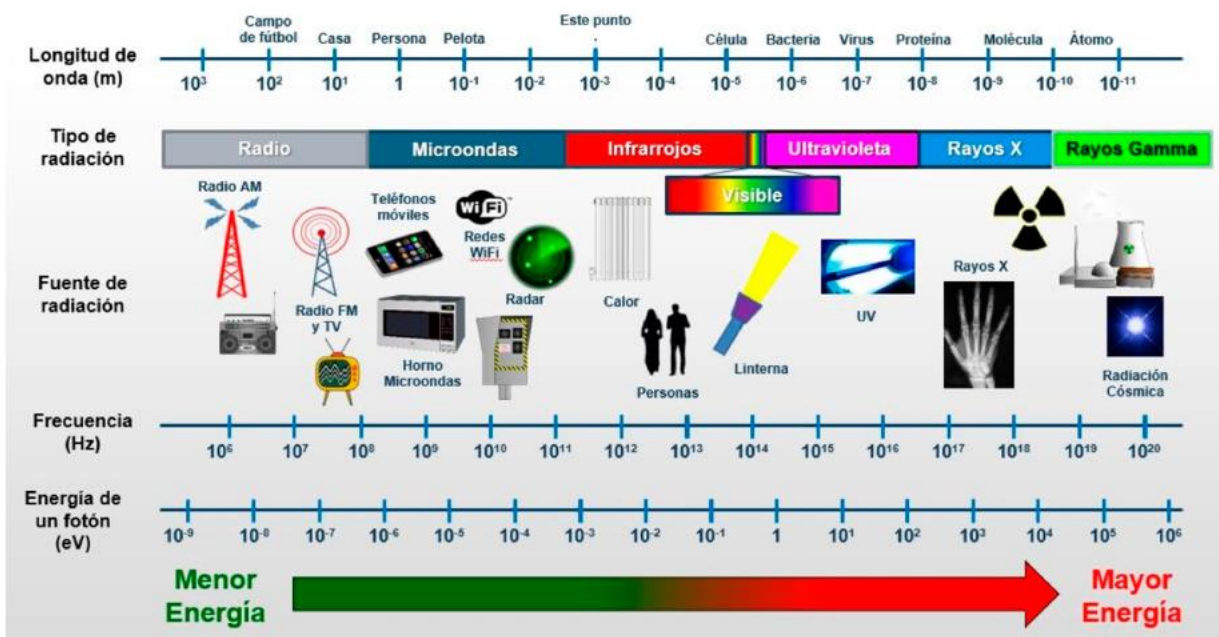
Polarización lineal y circular: <https://www.youtube.com/watch?v=4rl3zxH73IQ>

2.2. O ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

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

O espectro electromagnético esténdese 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 visible** que non é máis que unha parte do espectro electromagnético, concretamente as lonxitudes de onda no rango de 400nm (violeta/azul) a 750nm (vermello) ou, o que é o mesmo, frecuencias entre 450 THz e 750 THz.

<https://www.youtube.com/watch?v=K-up0o96Vhw&list=PLdOrfY1avFIQTPnMysct-iMvg99Mkg8Z>



2.3. O ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

O espectro radioelétrico, de radiofrecuencia ou RF, é a porción menos enerxética do espectro electromagnético, situada entre uns 3 kHz e uns 300 GHz. **Radio** é o termo utilizado para a porción do espectro electromagnético no cal as ondas poden transmitirse aplicando corrente alterna a unha antena. Inda que o rango abarca de 3KHz a 300GHz, normalmente se considera entre os 3 KHz e poucos GHz..

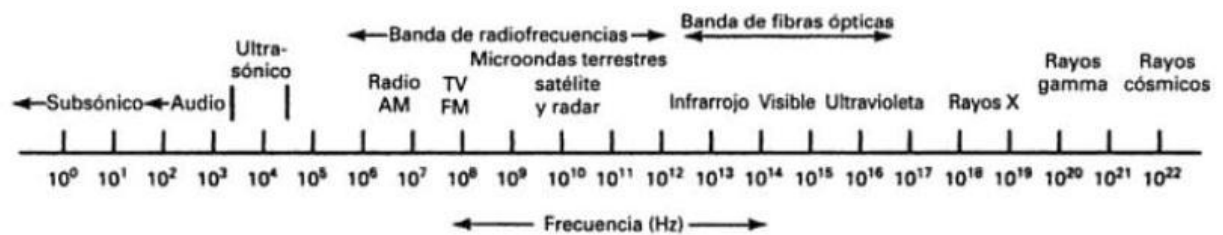
Cando falamos de radio, a maioría da xente pensa na radio FM, que usa unha frecuencia de ao redor de 100 MHz. Entre a radio e o infravermello atopamos a rexión das microondas, con frecuencias de 1 GHz a 300 GHz, e lonxitudes de onda de 30 cm a 1 mm. O uso máis popular das microondas pode ser o forno de microondas que, de feito, traballa exactamente na mesma rexión que algúns estándares inalámbricos (2,4 GHz). Estas rexións caen dentro das bandas que se están mantendo abertas para o uso xeral, sen requirir licenza. Esta rexión é chamada **banda ISM** (ISM Band), que significa Industrial, Científica e Médica, polas súas siglas en inglés. A maioría das outras rexións do espectro electromagnético están altamente controladas pola lexislación mediante licenzas, sendo os valores das licenzas un factor económico moi significativo. Isto incumbe especificamente a aquelas partes do espectro que son útiles para a difusión masiva (como o son a televisión e a radio), así como tamén para comunicacións de voz e datos. Na maioría dos países, as bandas ISM están reservadas para o uso libre.

O espectro radioelétrico está 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.

O *comité consultivo internacional de radio* (CCIR) realiza as designacións das bandas da seguinte maneira:

- *Frecuencias extremadamente baixas (ELF, de extremely low frequencies)*. Son sinais no intervalo de 30 a 300 Hz, e comprenden os sinais de distribución eléctrica (50 Hz, 60 Hz) e as de telemetría de baixa frecuencia.
- *Frecuencias de voz (VF, de voice frequencies)*. Son sinais no intervalo de 300 a 3000 Hz, e inclúen as que xeralmente se asocian á voz humana. As canles telefónicas normais teñen un ancho de banda de 300 a 3000 Hz, e con frecuencia chámanse canles de frecuencia de voz ou canles de banda de voz.

- *Frecuencias moi baixas (VLF, de very low frequencies)*. Son sinais no intervalo de 3 a 30 KHz, e comprenden o extremo superior do intervalo audible humano. As VLF úsanse nalgúns sistemas especiais (do goberno e militares USA), como por exemplo as comunicacións con submarinos.
- *Frecuencias baixas (LF, de low frequencies)*. Son sinais no intervalo de 30 a 300 KHz, e úsanse principalmente na navegación marítima e aeronáutica.
- *Frecuencias intermedias (MF, de medium frequencies)*. Son sinais no intervalo de 300 KHz a 3 MHz, e úsanse principalmente para emisións comerciais de radio AM (535 a 1605 KHz).
- *Frecuencias altas (HF, de high frequencies)*. Son sinais no intervalo de 3 a 30 MHz, e tamén se lles chama ondas curtas. A maioría das comunicacións en dous sentidos usa este intervalo, e a Voz de América e a Radio Europa Libre transmiten nel. Tamén os radioaficionados e a banda civil (CB) usan sinais de HF.
- *Frecuencias moi altas (VHF, de very high frequencies)*. Son sinais no intervalo de 30 a 300 MHz, e úsanse en radios móbiles, comunicacións mariñas e aeronáuticas, emisión comercial de FM (de 88 MHz a 108 MHz) e nas emisións de TV nas canles da 2 a 13 (54 a 216 MHz).
- *Frecuencias ultra altas (UHF, de ultrahigh frequencies)*. Son sinais no intervalo de 300 MHz a 3 GHz, e as usa a emisión comercial de TV nas canles da 14 a 83, os servizos móbiles de comunicacións terrestres, os teléfonos celulares ou telefonía móbil, algúns sistemas de radar e de navegación, e os sistemas de radio por microondas e por satélite. En termos xerais, considérase que as frecuencias maiores que 1 GHz son de microondas, e iso inclúe o extremo superior do intervalo de UHF.
- *Frecuencias super altas (SHF, de superhigh frequencies)*. Son sinais no intervalo de 3 a 30 GHz, e case non son usadas para radiocomunicacións, a excepción de aplicacións moi complicadas, custosas e especializadas.
- *Infravermello*. Son sinais no intervalo de 0,3 a 300 THz, e polo xeral non son consideradas como ondas de radio. Infravermello indica unha radiación electromagnética que en xeral asóciase coa calor. Os sinais infravermellos úsanse en sistemas de guía de proxectís con brancos térmicos, ou coa fotografía electrónica e a astronomía.
- *Luz visible*. Na luz visible inclúense as frecuencias electromagnéticas captadas polo ollo humano. As comunicacións con ondas luminosas úsanse nos sistemas de fibra óptica.
- *Raios ultravioletas, raios X, raios gamma e raios cósmicos*. Teñen pouca aplicación nas comunicacións electrónicas e polo tanto non serán descritos.



2.4. ANCHO DE BANDA E BANDAS DE FRECUENCIA

As dúas limitacións mais importantes no funcionamento dun sistema de comunicacións son o ruído e o ancho de banda. O ancho de banda é simplemente unha medida do rango de frecuencia. Se un rango de 2400 MHz a 2480 MHz é usado por un dispositivo, entón o ancho de banda sería de 80MHz. De aí que o termo **Banda** sexa precisamente ese rango de frecuencias. Entenderase por banda un rango de frecuencias pertencente a un espectro determinado; é dicir, os espectros están compostos por bandas de frecuencia, cada unha comprendida dentro dunha frecuencia mínima (**f_{min}**) e unha máxima(**f_{max}**), de tal modo que o ancho de banda (**B** ou **BW**) obtense como a resta da frecuencia máxima menos a mínima:

$$B = f_{\max} - f_{\min}$$

A **capacidade de información (I)** é unha medida da cantidade de información que se pode transferir a través dun sistema de comunicacións nun determinado tempo, e pódese medir en **Bits por segundo (bps)**. Segundo a lei de Hartley a capacidade de información é unha función lineal do ancho de banda e o tempo de transmisión:

$$I \propto B \cdot t$$

Esta ecuación indica que a capacidade de información (**I**) é directamente proporcional (o símbolo matemático $\propto$ significa proporcional a) tanto ao ancho de banda (**B**) como ao tempo de transmisión (**t**). E dicir, se duplicamos o ancho de banda tamén se duplicará a capacidade de información; e se o tempo de transmisión aumenta ou diminúe, a capacidade de información tamén aumentará ou diminuirá proporcionalmente.

⇒ BANDAS DO ESPECTRO DE FRECUENCIAS RADIOELÉCTRICAS

O espectro de frecuencias radioeléctricas é o conxunto de ondas radioeléctricas cuxa frecuencia está comprendida entre 3kHz e 300 GHz, é dicir do VLF ó EHF. Isto exclúe as bandas mais baixas (ELF e VF) e as mais altas a partir do infravermello. Na seguinte táboa descríbense as bandas que o compoñen:

ESPECTRO DE FRECUENCIAS RADIOELÉCTRICAS			
BANDA (MARXE DE FRECUENCIA)	LONXITUDE DE ONDA	DESIGNACIÓN DA BANDA	Ancho da banda (B)
3-30 kHz	100-10 km	VLF (Very low frequencies) (moi baixa frecuencia). Ondas miriamétricas – Ondas ultralongas	27 KHz
30-300 kHz	10-1 km	LF (low frequencies) (baixa frecuencia). Ondas kilométricas - Ondas longas	270 KHz
300-3000 kHz	1-0,1 km	MF (medium frequencies) (media frecuencia). Ondas hectométricas – Ondas medias	2700 KHz
3-30 MHz	100-10 m	HF (high frequencies) (alta frecuencia). Ondas decamétricas – Ondas curtas	27 MHz
30-300 MHz	10-1 m	VHF (very high frequencies) (moi alta frecuencia). Ondas métricas – Ondas ultracurtas	270 MHz
300-3000 MHz	100-10 cm	UHF (ultra high frequencies) (ultra alta frecuencia). Ondas decimétricas – Ondas ultracurtas	2700 MHz
3-30 GHz	10-1 cm	SHF (super high frequencies) (super alta frecuencia). Ondas centimétricas - Microondas	27 GHz
30-300 GHz	10-0,1 mm	EHF (extremely high frequencies) (extra alta frecuencia). Ondas milimétricas - Microondas	270 GHz

As bandas de frecuencias mais baixas dentro da **MF** resérvanse para as emisións que transmiten en **AM**, mentres que as de **FM** transmiten sobre os 100 MHz; a radio dixital **DAB** (digital audio broadcasting) ocupa as frecuencias 195-223 MHz. As únicas bandas que están libres para calquera uso (como radiocontrol) e para calquera persoa son as bandas **ISM** (2400 a 2500 MHz con frecuencia central 2450 MHz; 5725 a 5875 MHz con frecuencia central 5800 MHz; 24,00 a 24,25 GHz con frecuencia central 24,125 GHz; 61,00 a 61,50 GHz con frecuencia central 61,250 GHz), pero como consecuencia disto están bastante saturadas e so é conveniente utilizalas para montaxes de pouco alcance (non mais de 100 m). A mais coñecida é a primeira delas por ser utilizada para as redes locais inalámbricas, a famosa **WiFi**.

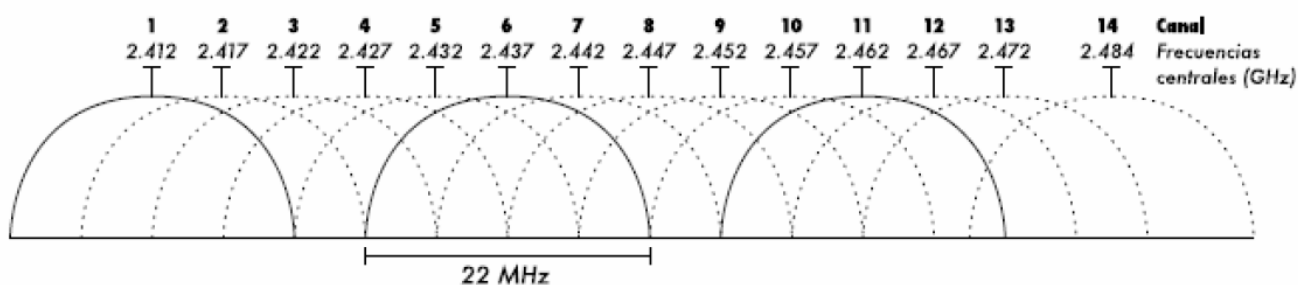
No espectro de frecuencias radioeléctricas (na táboa anterior) pódese observar que a TV e a FM están nas coñecidas bandas do UHF e VHF, pero se só se fai alusión ó espectro de TV entón utilízase outra división en bandas: banda I, banda II, banda III, banda IV e banda V. A banda II corresponde a FM, e no resto están as canles de TV:

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

2.5. FRECUENCIAS E CANLES.

Miremos un pouco mais de preto cómo se utiliza a banda 2,4 GHz no estándar 802.11b.

O espectro está dividido en partes iguais distribuídas sobre a banda en **canles** individuais. Note que os canles son dun ancho de 22MHz, pero están separados só por 5 MHz. Isto significa cos canles adxacentes superpóñense, e poden interferir uns cos outros. Isto está representado visualmente na seguinte figura.



Canles e frecuencias centrais para 802.11b. Note cos canles 1, 6, y 11 non se superpoñen.

E dicir, así como o espectro divídese en bandas, as bandas divídense en canles. Sendo entón a canle o menor rango de frecuencias, que normalmente é utilizado para enviar unha información. Así por exemplo, na banda de FM as canles están ocupadas polas emisoras comerciais de FM, pero no todas ás canles están en uso, cada emisora ocupa unha canle, pero hai canles desocupadas, que son mantidas así para evitar interferencias entre as emisoras.

2.6. 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 está limitada 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 as 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	Banda Atribución Tipo de uso Comentario Artigos do RR Notas de Utilización Nacional		
890 - 942 FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico 5.317A RADIODIFUSIÓN 5.322 Radiolocalización	890 - 902 FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico 5.317A Radiolocalización 5.318 5.325 902 - 928 FIJO Aficionados Móvil, salvo móvil aeronáutico 5.325A Radiolocalización 5.150 5.325 5.326 928 - 942 FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico 5.317A Radiolocalización	890 - 942 FIJO MÓVIL 5.317A RADIODIFUSIÓN Radiolocalización	890 - 942 MÓVIL, salvo móvil aeronáutico	M	ATRIBUCIÓN PARA SISTEMAS MÓVILES 5.317A 5.322 UN - 40, UN - 41 UN - 73 UN - 104 CT1-E
5.323	5.325	5.327	942 - 960 MÓVIL, salvo móvil aeronáutico	M	ATRIBUCIÓN PARA SISTEMAS MÓVILES 5.317A 5.322 UN - 41, UN - 73
942 - 960 FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico 5.317A RADIODIFUSIÓN 5.322 5.323	942 - 960 FIJO MÓVIL 5.317A	942 - 960 FIJO MÓVIL, 5.317A RADIODIFUSIÓN 5.320	960 - 1164 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	R	5.317A 5.328
1164 - 1215	RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA 5.328 RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE (espacio-Tierra) (espacio-espacio) 5.328B 5.328A		1164 - 1215 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE (espacio-Tierra) (espacio-espacio)	R M	5.328 5.328A 5.328B UN - 122: GALILEO

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 sinala 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.

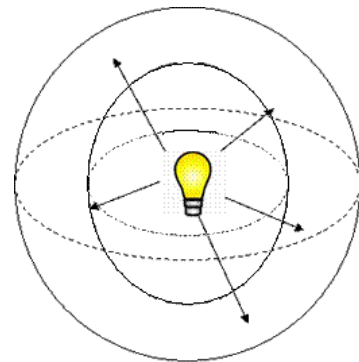
M → Uso mixto que comprende os usos P e R.

2.4 PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

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.

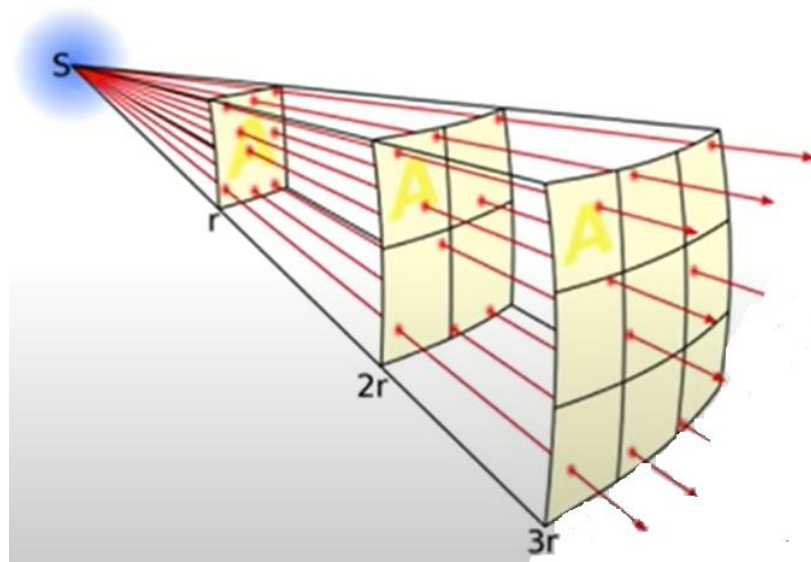
A primeira vista poderíamos pensar que isto é debido á absorción das ondas polos gases da atmósfera pero en realidade este non é o factor dominante, alomenos non para todas as frecuencias de ondas EM. Pensemos nunha lámpada incandescente; se colocamos un sensor de luz preto dela a lectura daranos un 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 que se propagan 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.

$$S_{ap} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$$

A antena emisora encárgase de radiar o sinal electromagnético cunha intensidade que depende da tensión aplicada a dita antena. A intensidade do sinal sofre unha atenuación a medida que se propaga camiño da antena receptora.

Deste xeito a potencia recibida (P_r) será:

$$P_r = P_s S_{ap} = \frac{P_e}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$$

2.4.1 AS PERDAS NO ESPAZO LIBRE

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, temos que ter de manter a coherencia entre as unidades empregadas. Tomando unidades do S.I. 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/ μ s (0,3km/ μ s). Facéndoo obtemos:

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

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. Este efecto é visto a miúdo na radio FM, cando comparamos o rango dun transmisor de radio FM a 88MHz co rango a 108MHz. Os transmisores de frecuencia mais baixa tenden a alcanzar distancias moito mais grandes á mesma potencia. 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.

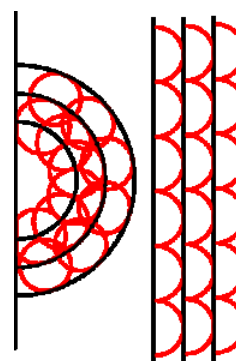
2.4.2 EFECTOS DURANTE A PROPAGACIÓN DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

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 frontes 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 dunha 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 todas 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 aplícase 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.



Vídeo explicativo del “Principio de Huygens:

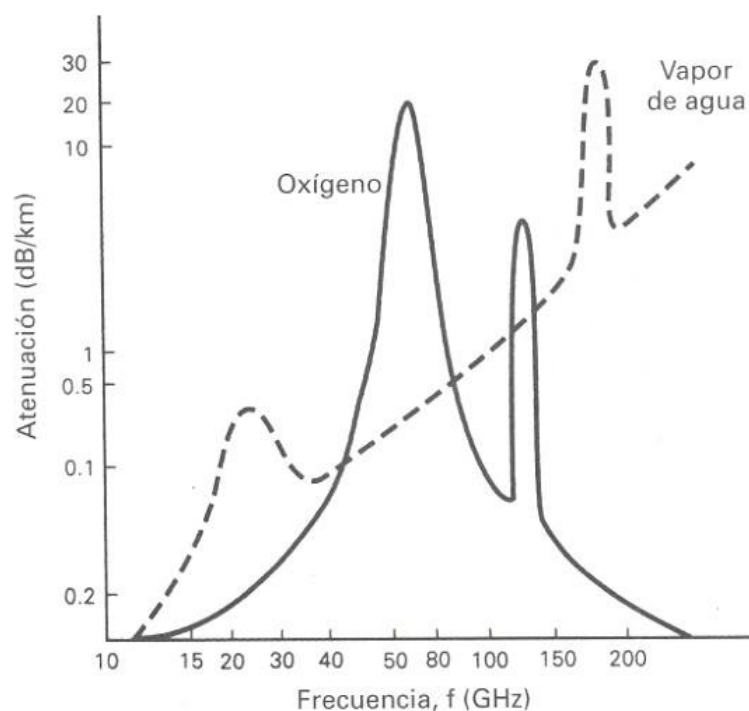
https://www.youtube.com/watch?v=gT_v38Sn40Q

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 variable coas condicións climáticas (neboeiras, chuvias...). Entre 10 MHz e 10 GHz a absorción atmosférica pode considerarse desprezable.



Propagación de ondas EM en la atmósfera:

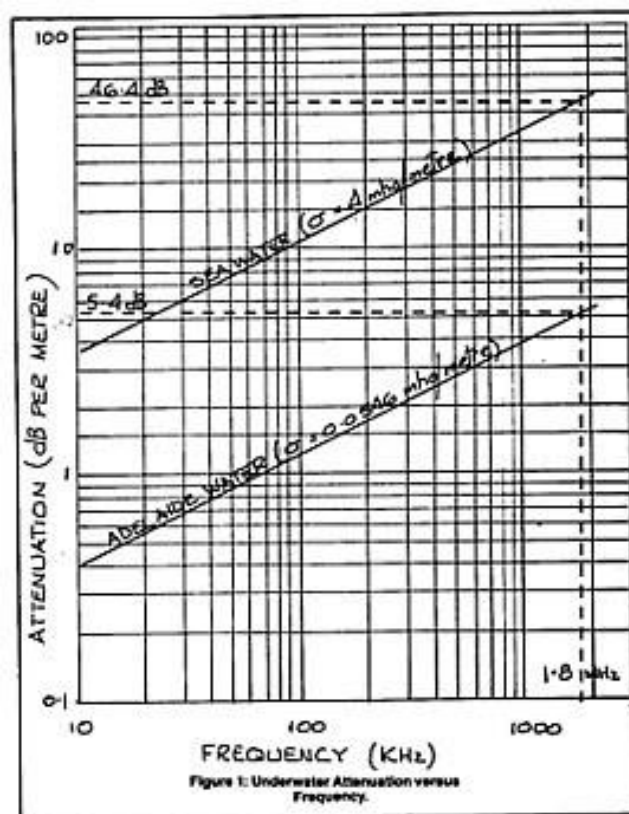
<https://www.youtube.com/watch?v=mfPvec3ld0o>

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 dunha 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 λ 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.

Principio de funcionamento de un forno microondas:

https://www.youtube.com/watch?v=G1c_iBleNjc

Existen outros materiais que teñen un efecto máis complexo na absorción de radiación. Os animais estamos compostos maiormente de auga polo que podemos ser 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.

Os **plásticos** e materiais similares, xeralmente non absorben moita enerxía de radio, pero isto varía dependendo da frecuencia e o tipo de material. Antes de construír un compoñente de plástico (por exemplo, unha protección climática para os dispositivos de radio e as súas antenas), é sempre unha boa idea verificar que o material non absorba a enerxía de radio. Os **humanos** (como outros animais) estamos compostos maiormente de auga. No que a redes inalámbricas refírese, podemos ser descritos como grandes bolsas cheas de auga, coa mesma forte absorción. Orientar un punto de acceso nunha oficina de forma que o seu sinal pase a través de moita xente é un erro clave cando instalamos redes en oficinas. O mesmo sucede en cafés, bibliotecas e instalacións externas.

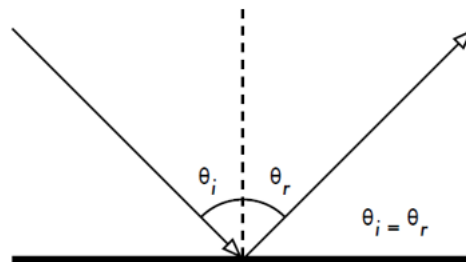
Reflexión

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 Γ , 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 onda EM.

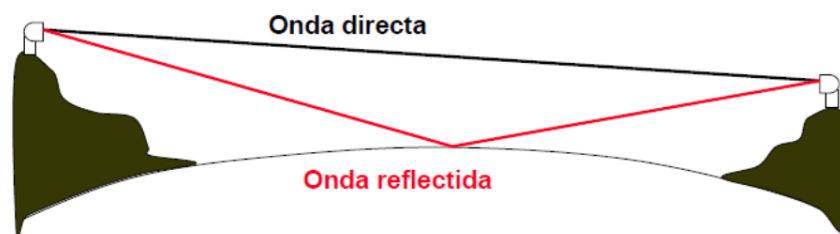
De novo para as ondas EM unha malla metálica con buratos máis pequenos que a súa λ presenta un coeficiente de reflexión practicamente igual ao dunha lámina metálica.

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



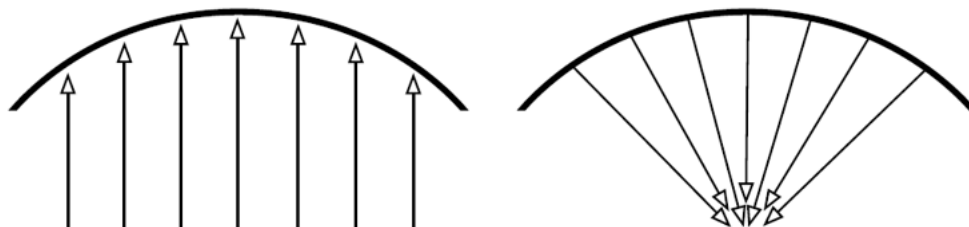
A pesar de que as regras de reflexión son bastante simples, as cousas poden complicarse moito cando imaxinamos unha situación real con obxectos reflectantes de formas diversas e irregulares.

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. A superficie da auga, con olas e encrespaduras que cambian a súa orientación todo o tempo, fai que sexa practicamente imposible calcular de forma precisa a reflexión. Debemos agregar que a polarización ten un impacto: as ondas de diferente polarización en xeral van reflectirse de forma diferente.



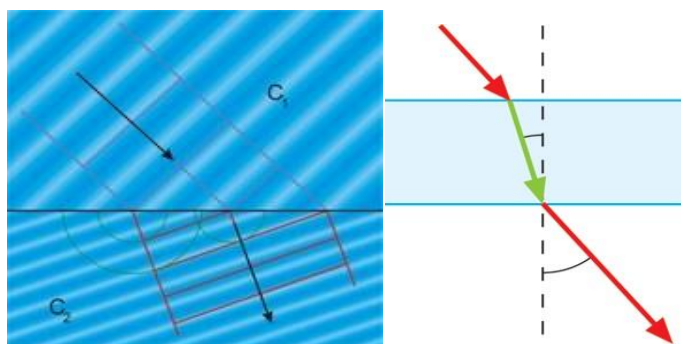
Reflexión que produce un efecto multitraxectoria..

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 claras representan a fronte de onda entrante mentres que as escuras representan a fronte de ondas desviada pola refracción. A velocidade de propagación no medio 1, C_1 , é maior que a do medio 2, C_2 (a velocidade da luz depende do medio polo que viaxen as ondas electromagnéticas, sendo mais baixa canto mais denso é o medio). O ángulo que forman ambas frontes de onda depende das características dos medios entre os que se propaga a onda.

A relación entre a velocidade de propagación da onda no baleiro e a velocidade no medio do que se trate denomínase índice de refracción (n).

$$n = \frac{C}{V}$$

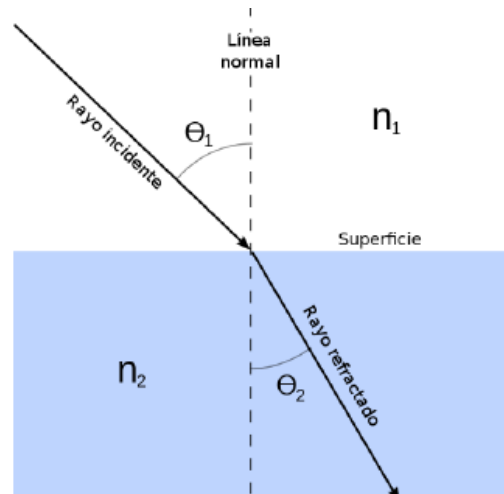
Onde,

C é a velocidade da luz no baleiro,

V é a velocidade da luz no medio.

Por exemplo, o índice de refracción do aire é $n_{\text{aire}} = 1$ e o da auga $n_{\text{auga}} = 1,33$.

A refracción réxese pola lei de Snell, que permite determinar o ángulo de refracción a partir do ángulo de incidencia e dos índices de refracción dos medios polos que pasa a onda electromagnética:



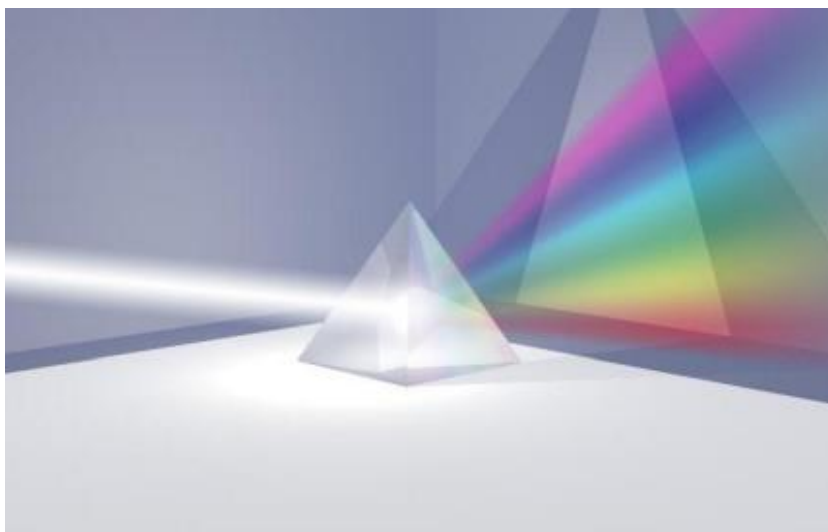
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- n_1 : índice de refracción do primeiro medio
- θ_1 : ángulo de incidencia
- n_2 : índice de refracción do segundo medio
- θ_2 : ángulo de refracción

O diagrama anterior mostra a traxectoria dun raio de luz que se despraza dende un medio con índice de refracción n_1 a outro con índice de refracción n_2 , onde $n_2 > n_1$, polo que o raio cúrvase hacia a normal.

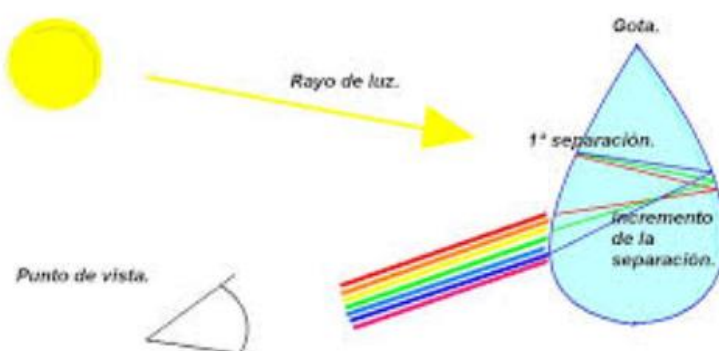
Pódese deducir que se o raio incidente está ó longo da normal, non se producirá refracción e o raio refractado tamén estará ó longo da normal.

O índice de refracción tamén depende da frecuencia da onda electromagnética. Así, ondas de distinta frecuencia poden presentar diferentes ángulos de refracción. Isto é o que ocorre cando un prisma é usado para descompoñer a luz branca nas distintas cores que a compoñen. A luz branca é unha mestura de ondas electromagnéticas de diferente frecuencia (que podemos ver como as distintas cores), a dobre refracción que produce o seu paso polo prisma da lugar a separación destas ondas polo diferente ángulo no que son refractadas:



Ó fenómeno polo cal o índice de refracción varía coa frecuencia coñecémolo como **dispersión**. Isto quere dicir que o índice de refracción pode ser diferente para diferentes lonxitudes de onda (cores) da luz. Dependendo do material, o índice de refracción ás veces pode aumentar coa frecuencia e outras, disminuir.

O arco da vella débese á dispersión da luz solar polas gotas de auga na atmósfera. Neste caso o índice de refracción diminúe a medida que aumenta a frecuencia. O arco da vella se forma cando a luz branca emitida polo sol entra na gota de auga producíndose a refracción; dentro da gota, a luz branca descompóñese nas súas cores (dispersión); despois na superficie oposta á que ingresou á luz, esta refréxase na parte posterior da gota, se refracta ao pasar da gota ao aire e é cando podemos observar as cores características do arco.



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

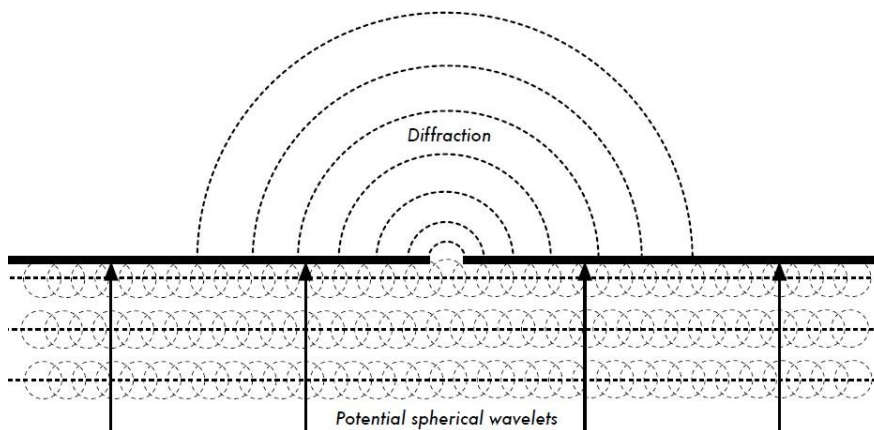
(Vídeo explicativo del “Principio de Huygens”, la Reflexión y la Refracción:
<https://www.youtube.com/watch?v=vvqyjZ3KMRQ>)

Difracción

(Vídeo sobre a difracción: <https://www.youtube.com/watch?v=fkTeFy9Lllw>)

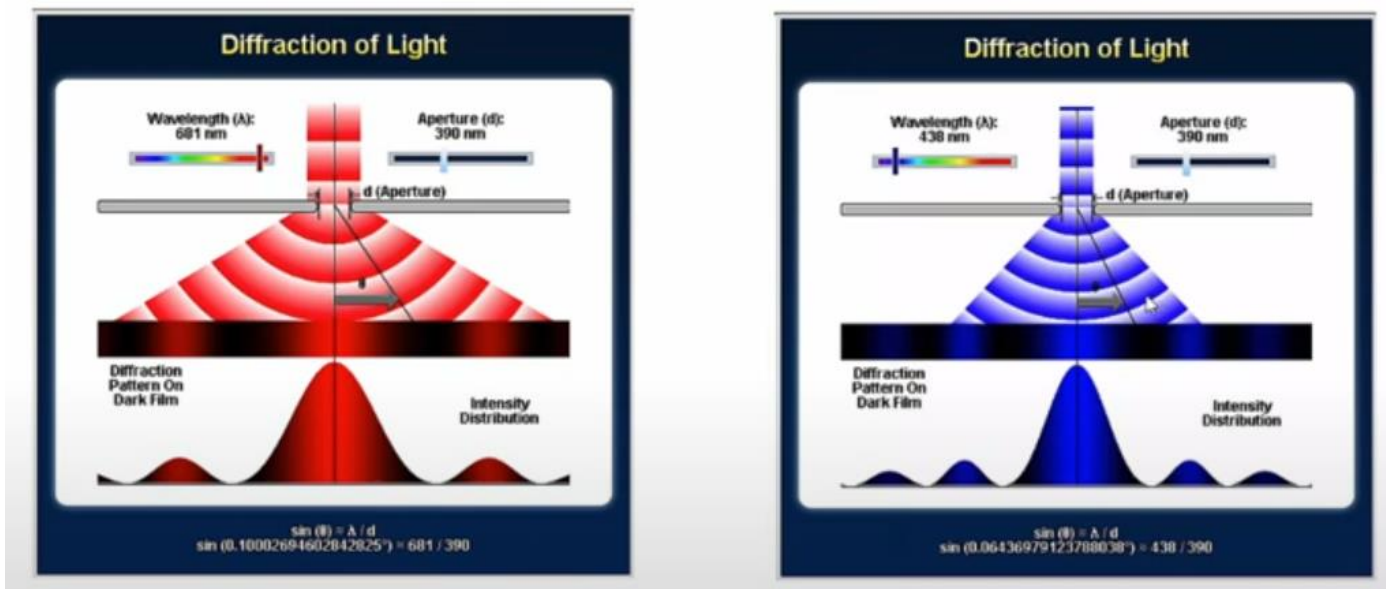
Difracción é o comportamento das ondas cando, ao incidir nun obxecto, dan a impresión de rodealo.

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 as dimensións dos obstáculos son menores que a λ . Por tanto as ondas con λ 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.

Na figura seguinte represéntase unha comparativa entre a difracción de unha luz vermella (de lonxitude de onda mais grande) e de unha luz azul (de lonxitude de onda mais pequena).



O ángulo co que se abre o patrón de difracción é maior na luz vermella que na luz azul porque:

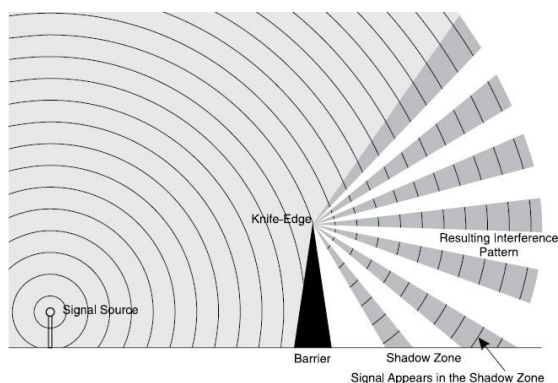
$$\text{Sen } \theta = \frac{\lambda}{d}$$

sendo d o tamaño da abertura.

Logo dependendo da relación entre a lonxitude de onda e o tamaño da ranura se abrirá mais ou menos o patrón de difracción.

Hai que considerar que na difracción xérase unha perda de potencia: a potencia da onda difractada é significativamente menor que o fronte de onda que a provoca. Pero nalgúns aplicacións moi específicas, pódese aproveitar o efecto da difracción para rodear obstáculos.

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.



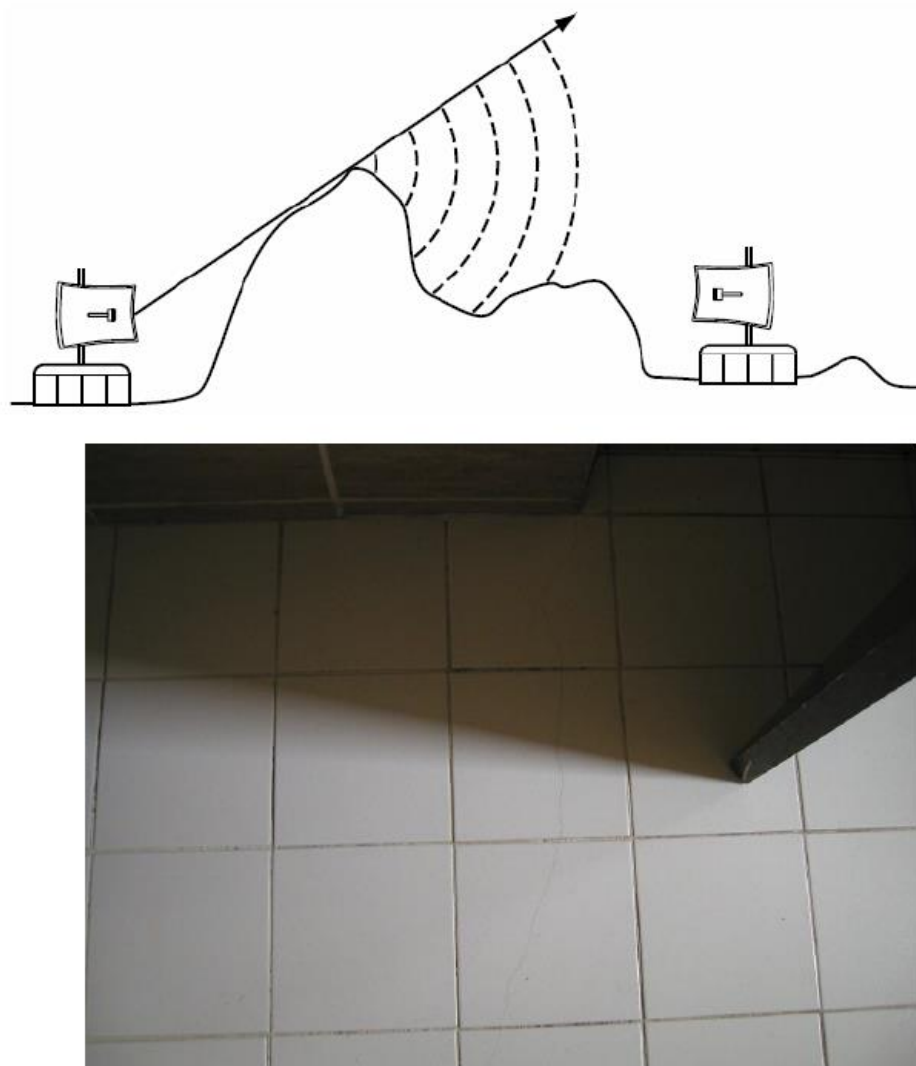
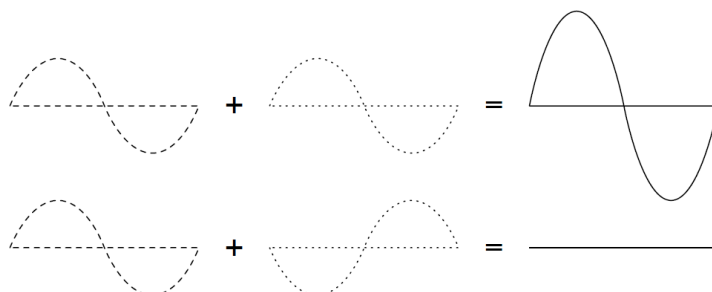


Figura 21: Arriba: Difracción na cima dunha montaña.
Abaixo: Difracción da luz na esquina dunha porta.

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.

Na tecnoloxía inalámbrica, a palabra Interferencia é usada comunmente nun sentido amplo, para disturbios desde outras fontes RF (radio frecuencia), por exemplo canles adxacentes. A interferencia é unha das fontes de dificultades principais no despregamento de enlaces inalámbricos, especialmente en ambientes urbanos, ou en espazos pechados (como nun local para conferencias) onde moitos sinais poden competir polo uso do espectro. Sempre que as ondas de igual amplitude e fases opostas se crucen no camiño, son eliminadas e non se poden recibir sinais. O caso mais común é que as ondas se combinen e xeren unha nova forma de onda que non pode ser utilizada efectivamente para a comunicación. As técnicas de modulación e o uso de canles múltiples axudan a manexar o problema da interferencia, pero non o eliminan completamente.

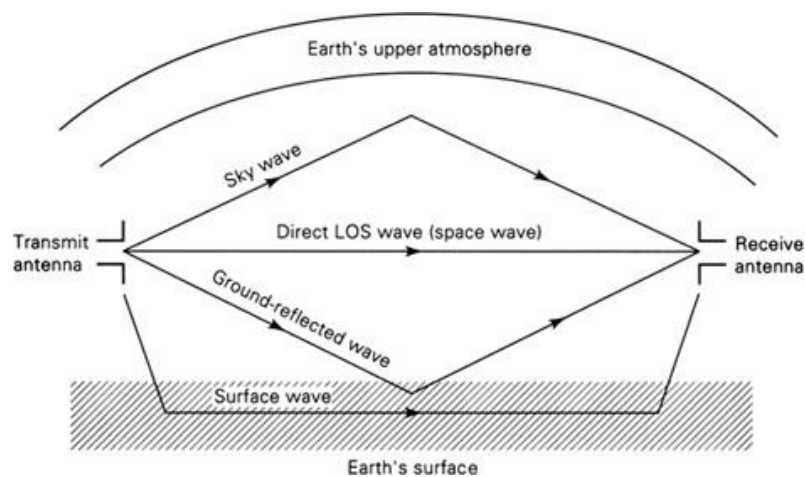
2.5. MODOS DE PROPAGACIÓN

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**.

(Vídeo: [https://www.youtube.com/watch?v=je\[c193cWZ0](https://www.youtube.com/watch?v=je[c193cWZ0))

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 incrementáanse 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.

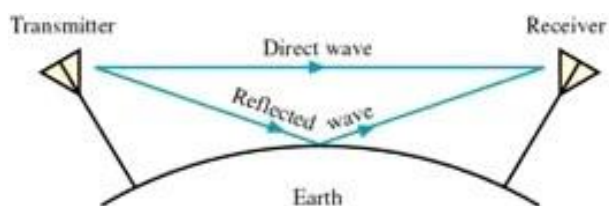
As vantaxes da propagación de ondas de terra son as seguintes:

- ✓ 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 cos cambios nas condicións atmosféricas.

2.5.2. ONDAS ESPACIAIS

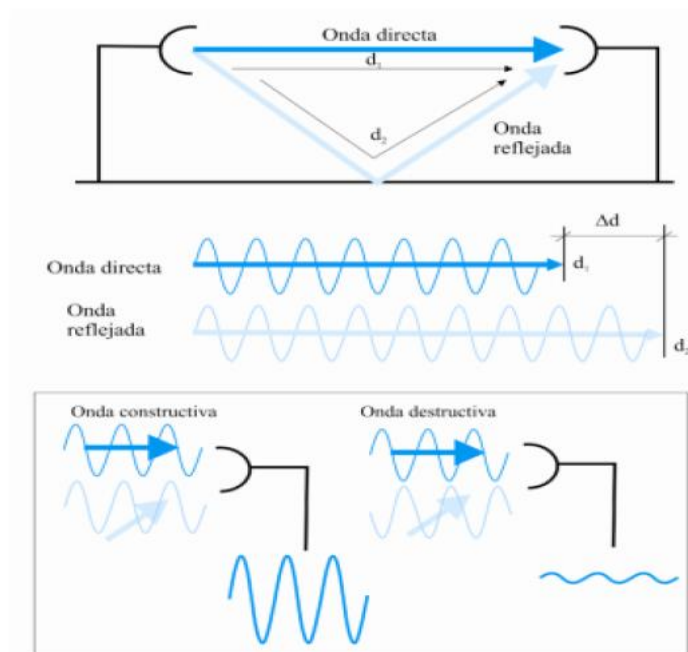
A propagación de ondas espaciais inclúe enerxía radiada que viaxa na parte inferior da atmósfera da Terra. As ondas espaciais inclúen ondas directas e reflectidas de terra. As ondas directas viaxan esencialmente en liña recta, entre as antenas transmisora e receptora. A propagación de ondas espaciais 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 superposición da onda directa e a onda reflectida dá lugar a denominada onda de espazo que, segundo caso, permite un maior alcance ou pode anular completamente o sinal transmitido. Debido a este fenómeno é posible que a antena receptora capte, nun instante determinado, sinais iguais procedentes do mesmo emisor, unha directa e outra reflectida, producindo o que se coñece, nos equipos de imaxe, como efecto de dobre imaxe.



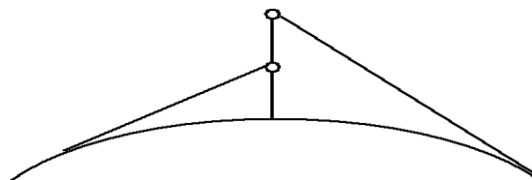
Exemplo: Supoñamos que a onda reflectida percorre un traxecto de lonxitude 1,2 Km , e a onda directa 1 Km. Como ambas percorren eses traxectos á velocidade da luz, a onda reflectida tarda 4 μ s en chegar ao receptor, e a onda directa 3,33 μ s. A reflectida ten un retardo temporal de $4 - 3,33 = 0,66 \mu$ s respecto a onda directa.

Dependendo da frecuencia da onda ese retardo pode supoñer unha interferencia destrutiva (desfase entre ambas de 180° ou múltiplo impar) ou construtiva (desfase de 360° ou múltiplo):

- Cando $f = 1,5 \text{ MHz}, 3 \text{ MHz}, 4,5 \text{ MHz}$ a interferencia é construtiva e os sinais súmanse en fase ($360^\circ \cdot f (\text{MHz}) \cdot 0,66 (\mu\text{s}) = 360^\circ \cdot K$, K é enteiro)
- Cando $f = 0,75 \text{ MHz}, 2,25 \text{ MHz}, 3,75 \text{ MHz}$ a interferencia é destrutiva e os sinais réstanse ou tamén se di que se suman en contrafase.

O exemplo amosa que se o espectro transmitido ocupa unha banda entre 0,75 MHz e 4,5 MHz, no espectro do sinal recibido aparecerán unha serie de nulos e picos equiespaciados polo multitraxecto.

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 irá un pouco máis aló en ambos casos.

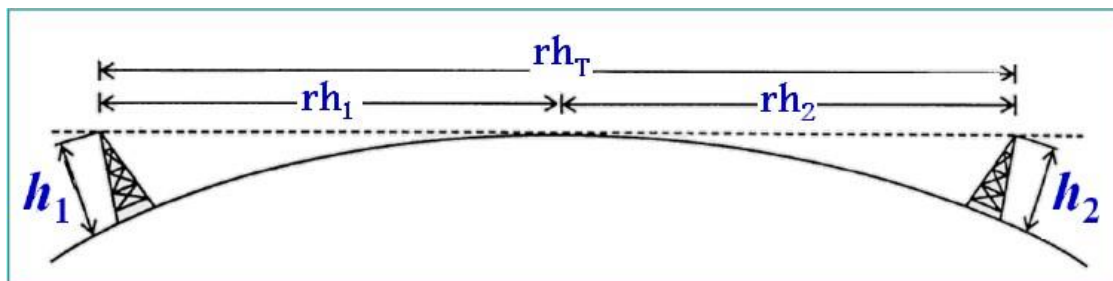


O radio horizonte de liña de vista para unha soa antena dáse como:

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

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

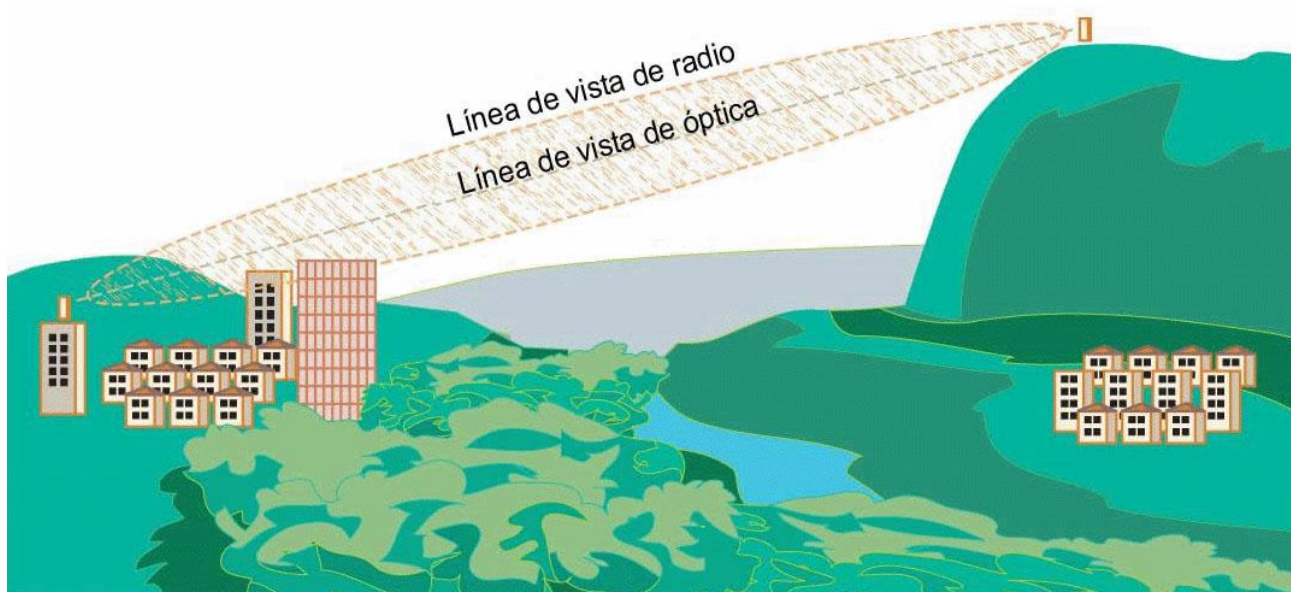
$$rh_T(km) = rh_1(km) + rh_2(km) = \sqrt{17 \cdot h_1(m)} + \sqrt{17 \cdot h_2(m)}$$



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**.

Para entender a zona de Fresnel:



A teoría exacta das zonas de Fresnel é algo complicada. Sen embargo, o concepto é facilmente entendible a través do principio de Huygens.

Sabemos que os feixes de microondas se ensanchan. Tamén sabemos que as ondas a unha frecuencia concreta poden interferir unhas coas outras. A teoría de zona de Fresnel simplemente examina a liña dende A ata B e logo o espazo ao redor desa liña que contribúe ao que está chegando ao punto B. Algunhas ondas viaxan directamente dende A ata B, mentres que outras fano en traxectorias indirectas. Consecuentemente, o seu camiño é mais longo, introducindo un desprazamento de fase entre os raios directos e indirectos.

Sempre que o desprazamento de fase sexa dunha lonxitude de onda completa, obtense unha interferencia construtiva: os sinais súmanse de maneira óptima.

Tomando este enfoque, e facendo os cálculos, atopámonos con que hai zonas anulares ao redor da liña directa de A ata B que contribúen ao sinal que chega ao punto B.

Hai que ter en conta que existen moitas zonas de Fresnel, pero a nos interesáanos principalmente a zona 1. Se esta fora bloqueada por un obstáculo, como unha árbore ou un edificio, o sinal que chega ao destino afastado será atenuado.

Entón, cando planeamos enlaces inalámbricos, debemos asegurar que esta zona vai a estar libre de obstáculos. Na práctica, conformámonos con que polo menos o 60% da primeira zona de Fresnel estea libre.

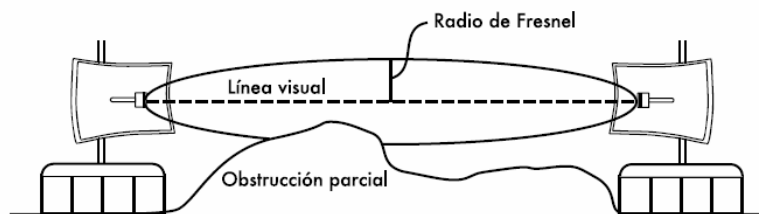


Figura 2.10: La zona de Fresnel es bloqueada parcialmente en este enlace, aunque la línea visual no está obstruida.

Aquí podemos utilizar dúas fórmulas para calcular a primeira zona de Fresnel:

Fórmula sen obstáculos:

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{d}{f}}$$

Fórmula con obstáculos:

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



onde **r** é o radio da primeira zona en metros, **d1** e **d2** son as distancias dende o obstáculo aos extremos do enlace en metros, **d** é a distancia total do enlace en metros (**d** = **d1**+ **d2**), e **f** é a frecuencia en MHz. Esta fórmula calcula o radio da zona. Para calcular a altura sobre o terreo, debe restarse este resultado dunha liña trazada directamente entre a cima das dúas torres.

Exemplo: Calcular o tamaño da primeira zona de Fresnel no medio dun enlace de 2 km, transmitindo a 2437 MHz (802.11b canal 6):

$$r = 17,31 \cdot \sqrt{\left(\frac{1000 \cdot 1000}{2473 \cdot 2000}\right)} = 7,84 \text{ metros}$$

Supoñendo que ambas torres teñen 10 metros de altura, a primeira zona de Fresnel vai a pasar xusto a 2,16 metros sobre o nivel do chan no medio do enlace. Pero, ¿Como de alta pode ser unha estrutura neste punto para despexar o 60% da primeira zona?

$$r = 0,6 \cdot 17,31 \cdot \sqrt{\left(\frac{1000 \cdot 1000}{2473 \cdot 2000}\right)} = 4,70 \text{ metros}$$

Restando o resultado dos 10 metros, podemos ver que unha estrutura de 5,30 metros de alto no centro do enlace aínda permite despexar o 60% da primeira zona de Fresnel. Isto é normalmente aceptable, pero no caso de que houbera unha estrutura mais alta, habería que levantar mais as nosas antenas, ou cambiar a dirección do enlace para evitar o obstáculo.

Vídeos explicativos zona de Fresnel:

<https://www.youtube.com/watch?v=yhn5PI0Uwig&t=287s>

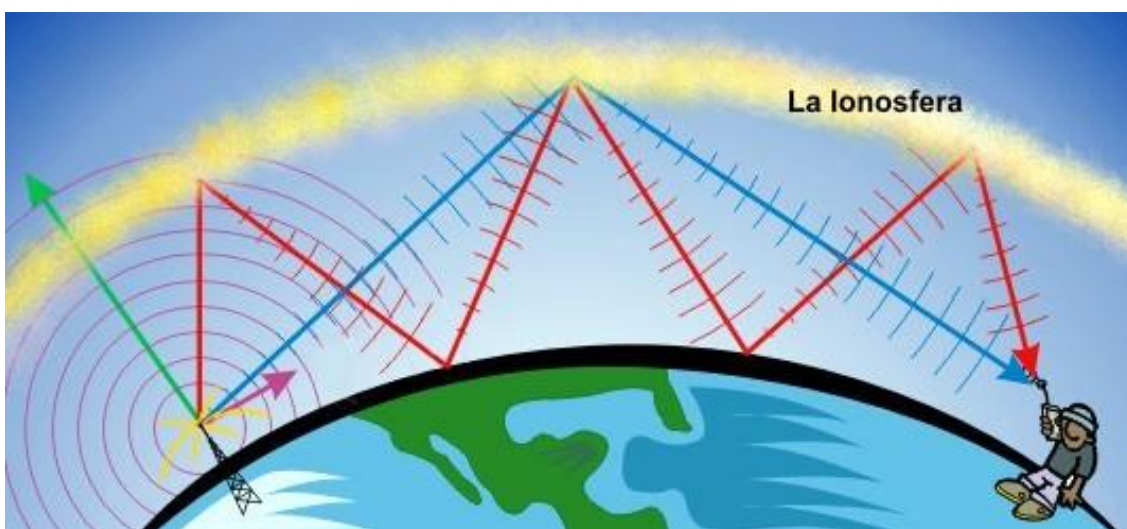
https://www.youtube.com/watch?v=WpJZ7z6_D9o

2.5.3. ONDAS DE CEO

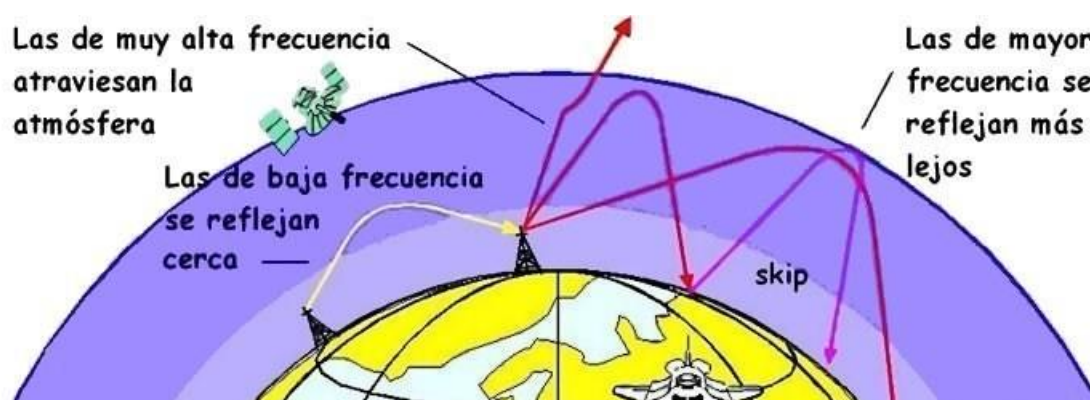
As ondas electromagnéticas que se dirixen por encima do nivel do horizonte chámanse ondas de ceo. As ondas de ceo envíanse cara ao ceo, onde son reflectidas ou refractadas novamente á Terra pola ionosfera ou por satélites.

Propagación por refracción ionosférica

A ionosfera é a rexión do 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 trátase dunha refracción progresiva a medida que a onda vai entrando na ionosfera de xeito que ao final sae “reflexada”. 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.



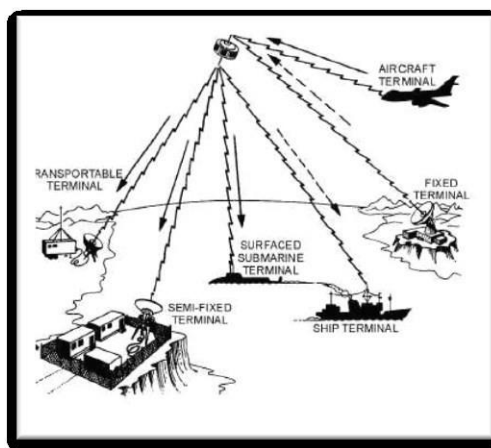
A propagación por reflexión ionosférica está determinada pola frecuencia utilizada, polo ángulo de apuntamento e polo nivel de ionización da ionosfera. Cunha frecuencia grande a refracción ionosférica será menor. Ademais se o ángulo de apuntamento é demasiado alto o raio non se refractará o suficiente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

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.

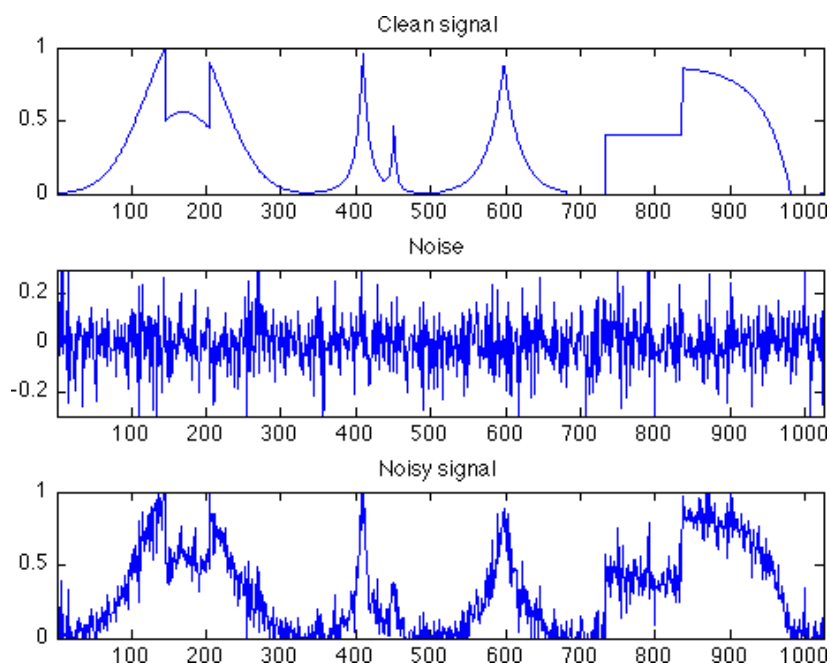
Este tipo de ligazóns non requiren dunha liña de vista entre a estación transmisora e a estación receptora. Para poderse comunicar unha estación con outra é necesario crear a ligazón por medio dun satélite, de modo que o receptor sexa capaz de recibir o sinal do emisor. Existen moitos fenómenos que alteran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



2.7. 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.

Matemáticamente, 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; “imprímense” 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:

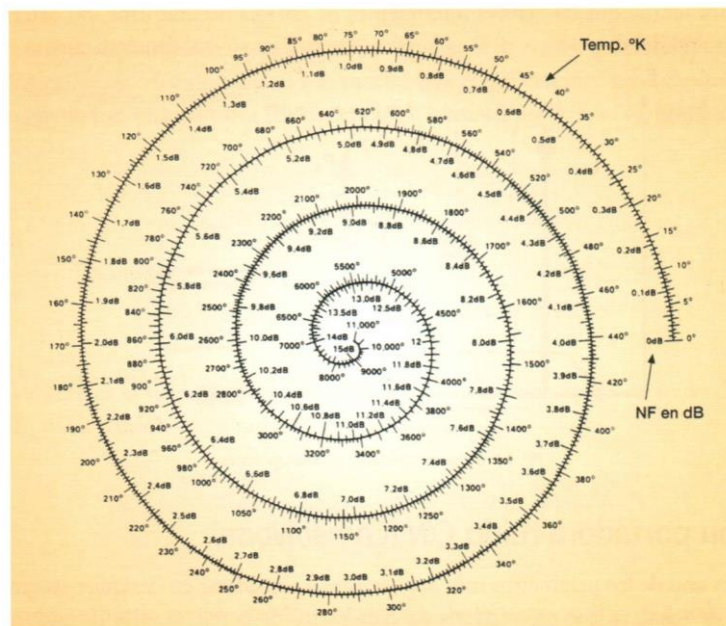
$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_N - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdots G_{N-1}}$$

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, considerando que estea libre de ruído, que xeraría a mesma potencia de ruído que o circuíto real. A temperatura de ruído está 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:

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