

Índice

1.	Introdución a Física das Radiocomunicacións	2
1.1	¿Qué é unha onda?	2
1.2	Forzas e ondas electromagnéticas	4
1.2.1	Unidades e potencias de dez	6
1.3	Polarización	7
1.3.1	Polarización lineal	8
1.3.2	Polarización elíptica	9
1.3.3	Tipos de polarización	10
1.4	O espectro electromagnético	11
1.5	Ancho de Banda e Bandas de frecuencia	13
1.5.1	Ancho de banda e capacidade de información	13
1.5.2	Bandas do espectro de frecuencias radioeléctricas	15
1.6	Frecuencias e canles	17
1.7	Comportamento das ondas de radio	17
1.7.1	Absorción	19
1.7.2	Reflexión	20
1.7.3	Refracción	21
1.7.4	Difracción	22
1.7.5	Interferencia	25
1.7.6	Liña visual	25
1.7.7	Potencia	28
1.8	Propagación	29
1.8.1	Ondas Terrestres	31
1.8.1.1	Propagación por onda de superficie	33
1.8.1.2	Propagación por onda directa	33
1.8.2	Ondas de espazo	34
1.8.2.1	Propagación por ondas troposféricas	34
1.8.2.2	Propagación por reflexión e refracción ionosférica	34
1.9	Modos de transmisión	38

1. Introducción a Física das Radio-comunicacións

As comunicacións inalámbricas fan uso das ondas electromagnéticas para enviar sinais a través de longas distancias. Dende a perspectiva do usuario, as conexións inalámbricas non son particularmente diferentes de calquera outra conexión. Pero as ondas de radio teñen algunhas propiedades inesperadas. ¿Cómo saber por onde están circulando as ondas emanadas? ¿Qué sucede cando esas ondas rebotan nos obxectos do lugar ou, no caso dun enlace externo, nos edificios? Para construír enlaces inalámbricos de alta velocidade é importante comprender cómo se comportan as ondas de radio no mundo real.

1.1 ¿Qué é unha onda?

En xeneral estamos familiarizados coas vibracións ou oscilacións de varias formas, un péndulo, unha árbore mexéndose co vento, as cordas dunha guitarra, son todos 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 ten certa **velocidade, frecuencia e lonxitude de onda**. As mesmas están conectadas por unha simple relación:

$$\text{Velocidade} = \text{Frecuencia} * \text{Lonxitude de Onda}$$

A lonxitude de onda (algunhas veces chamada como **lambda, λ**) é a distancia medida desde un punto nunha onda ata a parte equivalente da seguinte, por exemplo desde a cima dun pico ata o seguinte. A frecuencia é o número de ondas enteiras que pasan por un punto fixo nun segundo. A velocidade mídese en metros/segundo, a frecuencia en ciclos por segundo (ou Hertz, abreviado **Hz**), e a lonxitude de onda en metros.

Por exemplo, se unha onda na auga viaxa a un metro por segundo e oscila cinco veces por segundo, entón cada onda terá vinte centímetros de largo:

$$1 \text{ metro/segundo} = 5 \text{ ciclos/segundo} * \lambda$$

$$\lambda = 1 / 5 \text{ metros}$$

$$\lambda = 0,2 \text{ metros} = 20 \text{ cm}$$

As ondas tamén teñen unha propiedade denominada **amplitude**. Esta é a distancia desde o centro da onda ata o extremo dun dos seus picos, e pode ser asimilada a “altura” dunha onda de auga. A relación entre frecuencia, lonxitude de onda e amplitude mostrase na **Figura 1**.

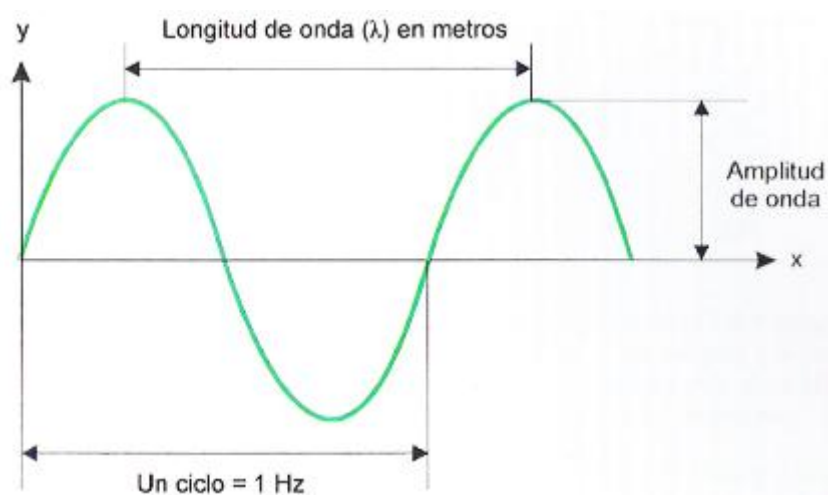


Figura 1.: Lonxitude de onda, amplitude e frecuencia .Neste caso a frecuencia é 1 ciclos por segundo, ou 1Hz.

As ondas mecánicas poden ser lonxitudinais ou transversais:

Nas **ondas lonxitudinais** o medio desprázase na dirección de propagación. Isto ocorre nas ondas de son, xa que o aire comprímese e expándese na mesma dirección do son.

Nas **ondas transversais** o medio desprázase en ángulo recto a dirección de propagación. Isto ocorre nas ondas de auga (as ondas dun estanque avanza horizontalmente, pero a auga desprázase verticalmente):

As ondas na auga son fáciles de visualizar. Simplemente tire unha pedra nun lago e verá as ondas e o seu movemento a través da auga por un tempo. No caso das ondas electromagnéticas a parte que pode ser máis difícil de comprender é: ¿qué é o que está oscilando? Para entendelo, necesitamos comprender as forzas electromagnéticas.

1.2 Forzas e ondas electromagnéticas

As forzas electromagnéticas son forzas entre cargas e correntes eléctricas. Decatámonos delas cando tocamos o peito dunha porta despois de camiñar nunha alfombra sintética, ou cando rozamos unha cerca eléctrica. Un exemplo mais forte das forzas electromagnéticas son os lóstregos que vemos durante as tormentas eléctricas. A **Forza Eléctrica** é a forza entre cargas eléctricas. A **Forza Magnética** é a forza entre correntes eléctricas.



Figura 2.: Exemplos de forzas electromagnéticas.

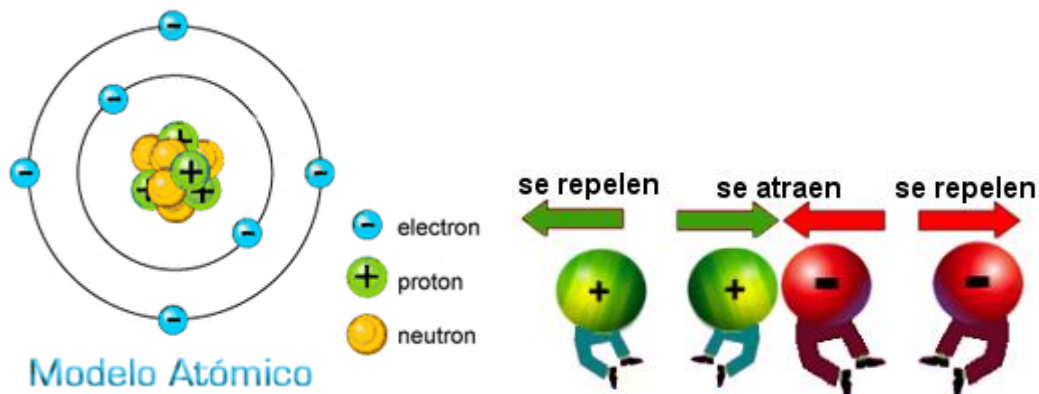


Figura 3.:Modelo atómico. Forza eléctrica entre cargas.

Os electróns son partículas que teñen carga eléctrica negativa. Vexamos qué sucede nun anaco de arame recto no cal empuxamos os electróns dun extremo a outro periodicamente. En certo momento, o extremo superior do arame está cargado negativamente - tódolos electróns están acumulados alí- e isto xera un campo eléctrico que vai de positivo a negativo o longo do arame. Ao momento seguinte, os electróns acumúlanse ao outro lado e o campo eléctrico apunta noutro sentido. Se isto sucede unha e outra vez, os vectores de campo eléctrico, por así dicilo, (frechas de positivo a negativo) abandonan o arame e son radiados no espazo que os rodea. O que describimos coñécese como dipolo (debido aos dous polos, positivo e negativo), ou mais comunmente **antena dipolo**. Esta é a forma mais sinxela da antena omnidireccional. O movemento do campo electromagnético é denominado comunmente **onda electromagnética**.

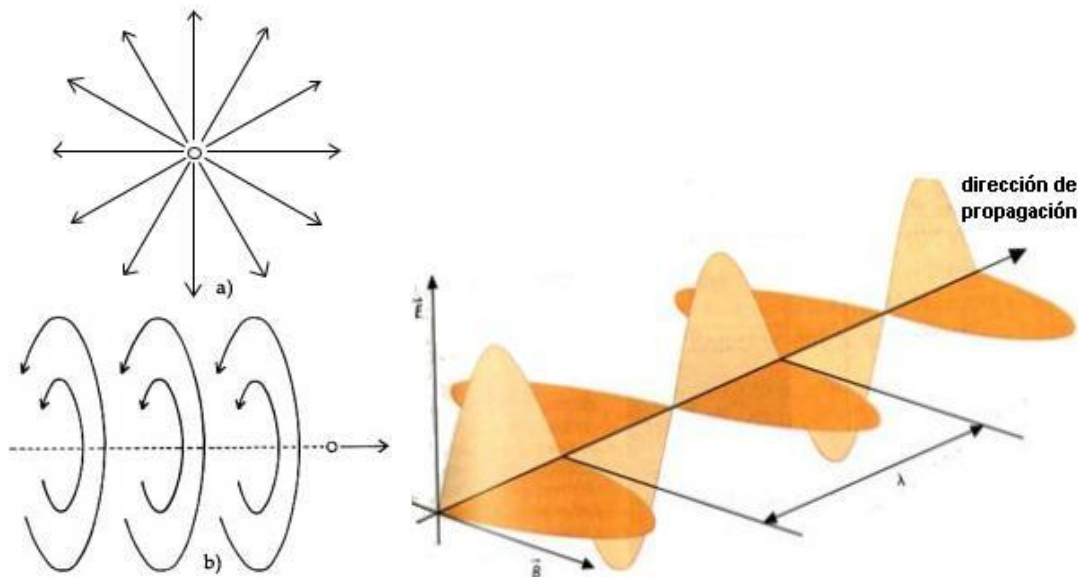


Figura 4. Esquerda: Liñas de campo eléctrico e magnético nun condutor. Dereita: Propagación conxunta dos campos eléctrico e magnético.

Volvamos a relación:

$$\text{Velocidade} = \text{Frecuencia} * \text{Lonxitude de Onda}$$

No caso das ondas electromagnéticas, a velocidade c é a velocidade da luz.

$$c = 300,000 \text{ km/s} = 300,000,000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad c = f * \lambda$$

As ondas electromagnéticas difiren das mecánicas en que non necesitan dun medio para propagarse. As mesmas propáganse incluso no baleiro do espazo. Isto é debido a que a propia onda electromagnética é enerxía pura, mais concretamente é o que coñecemos como fotón, e tamén se pode entender como un conxunto de fotóns que se desprazan. Todo movemento dunha carga eléctrica irradia fotóns ou o que é o mesmo, campo electromagnético (agás os electróns que están orbitando o núcleo atómico nunha órbita estable). E todo fotón (ou campo electromagnético viaxeiro) que incida sobre unha carga eléctrica pode producir que a carga se desprace.

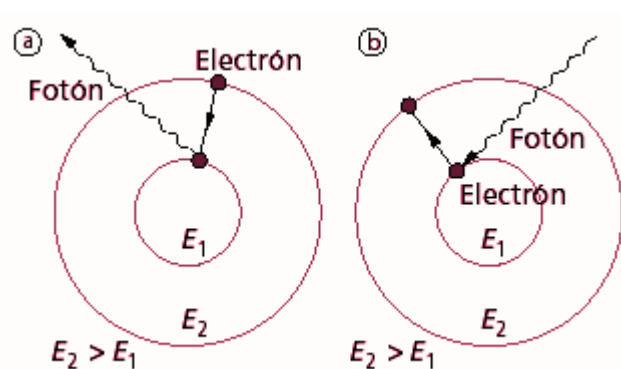


Figura 5.:Un electrón que cambia dunha órbita mais enerxética a unha de menos enerxía emite un fotón. Se un electrón recibe o impacto dun fotón de suficiente enerxía desprazarase a unha órbita mais enerxética.

1.2.1 Unidades e potencias de dez

En física, matemáticas e enxeñaría, de cotío expresamos os números como potencias de dez. Atopamos eses termos, por exemplo, en giga-hertz(GHz), centi-metros (cm), micro-segundos (μ s), e outros.

Potencia	Símbolo	Nome
10^{18}	E	exa
10^{15}	P	peta
10^{12}	T	tera
10^9	G	giga
10^6	M	mega
10^3	k	kilo
10^2	h	hecto
10^1	da	deca
10^{-1}	d	deci
10^{-2}	c	centi
10^{-3}	m	mili
10^{-6}	μ	micro
10^{-9}	n	nano
10^{-12}	p	pico
10^{-15}	f	femto
10^{-18}	a	atto

Coñecendo a velocidade da luz, podemos calcular a lonxitude de onda para unha frecuencia dada. Tomemos o exemplo da frecuencia para redes inalámbricas do protocolo 802.11b, a cal é:

$$f = 2,4 \text{ GHz} = 2.400.000.000 \text{ ciclos / segundo}$$

$$\text{Lonxitude de onda } \lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 / 2,4 \cdot 10^9 = 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ m} = 12,5 \text{ cm}$$

A frecuencia e a lonxitude de onda determinan a maior parte do comportamento dunha onda electromagnética, dende as antenas que construímos ata os obxectos que están no camiño das redes que intentamos facer funcionar.

1.3 Polarización

Outra calidade importante das ondas electromagnéticas é a **Polarización**. A polarización describe a dirección do vector do campo eléctrico. Nunha antena bipolar aliñada verticalmente (ou anaco de arame recto), os electróns só se moven de arriba cara 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 (e neste caso, vertical). Se deitamos a antena no chan (horizontal) teremos unha polarización lineal horizontal.

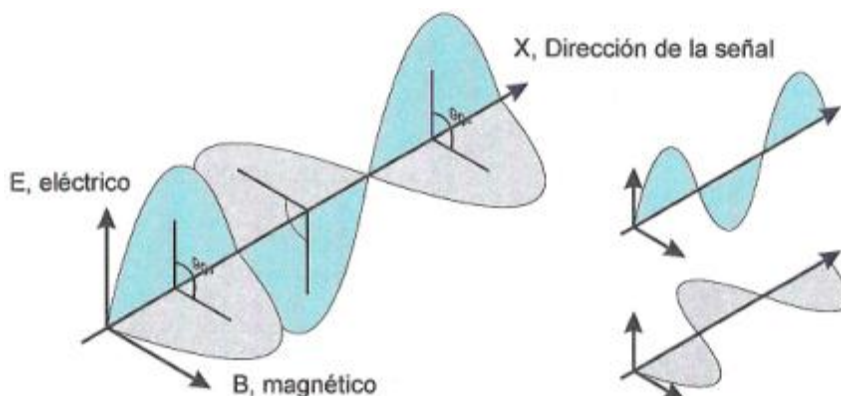


Figura 6: O campo eléctrico e o campo magnético complementario dunha onda electromagnética. A polarización describe a orientación do campo eléctrico.

Podemos encontrar polarizacións nas que os campos manteñen a súa posición durante todo o traxecto, as que chamaremos “**polarizacións lineais**”. Poderá ser vertical ou ben horizontal:

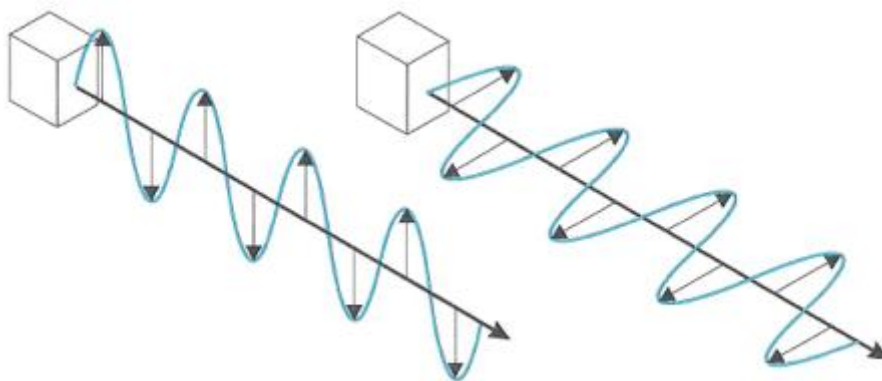


Figura 7: Polarizacións lineais vertical e horizontal.

Polo contrario, existen “*polarizacións elípticas e circulares*”, nas que os campos van xirando a medida que avanzan 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.

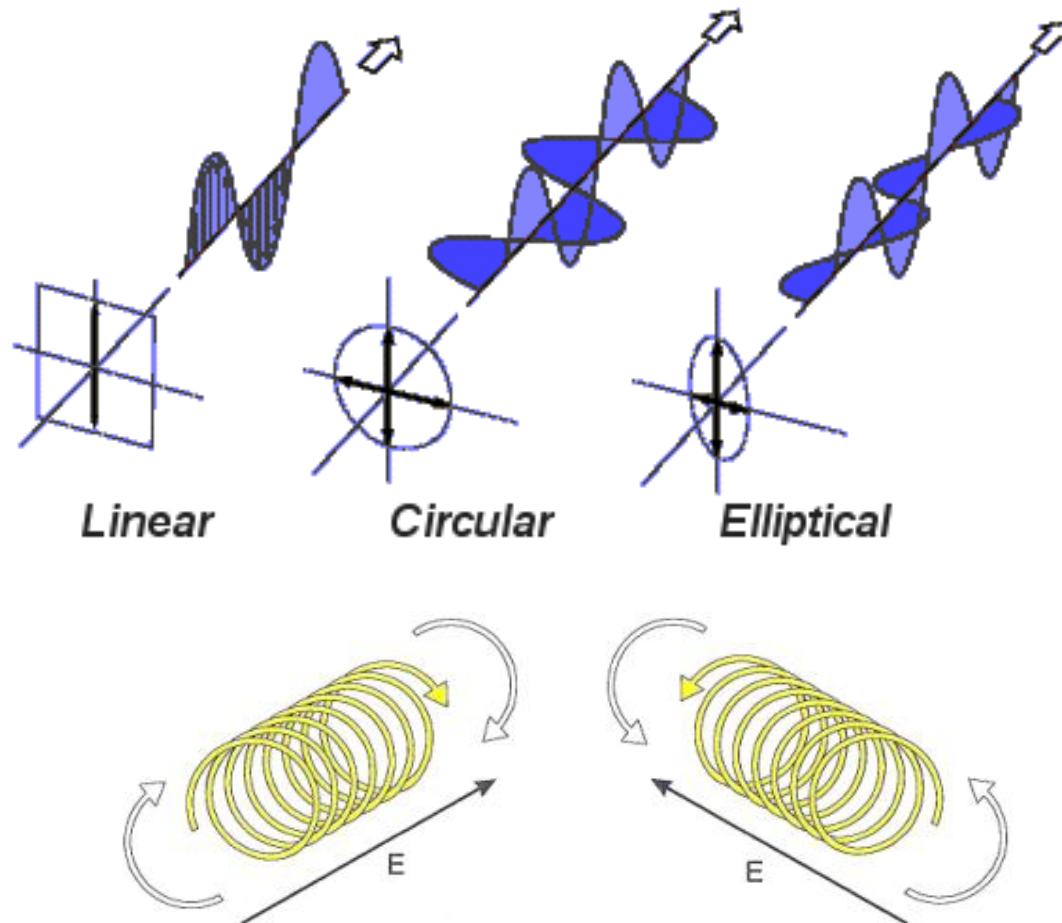


Figura 8: Arriba: Comparación das polarizacións lineal, circular e elíptica.
Abaixo: movemento do campo nas polarizacións circulares.

1.3.1 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.

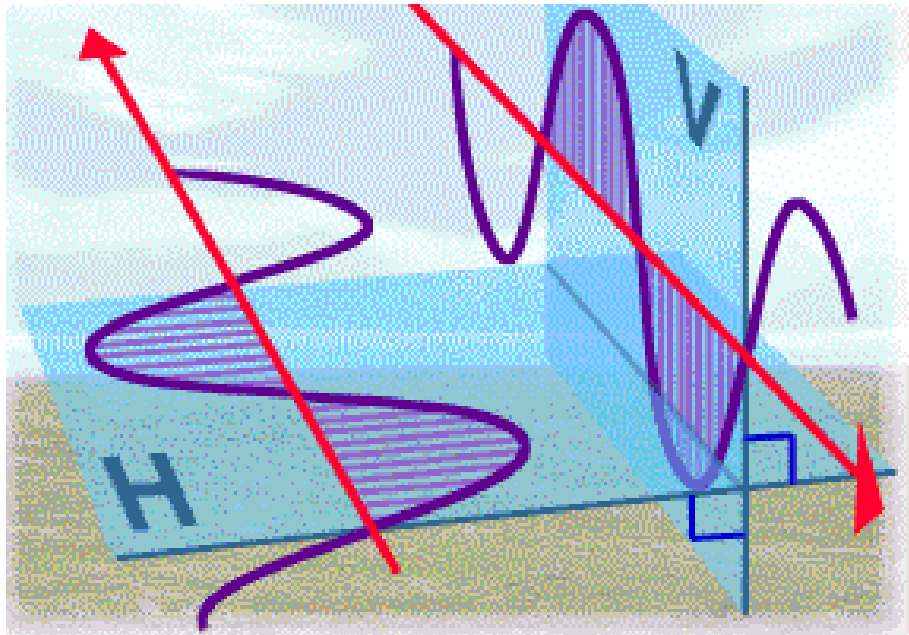


Figura 9: Representación das polarizacións vertical e horizontal respecto ó chan

1.3.2 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)

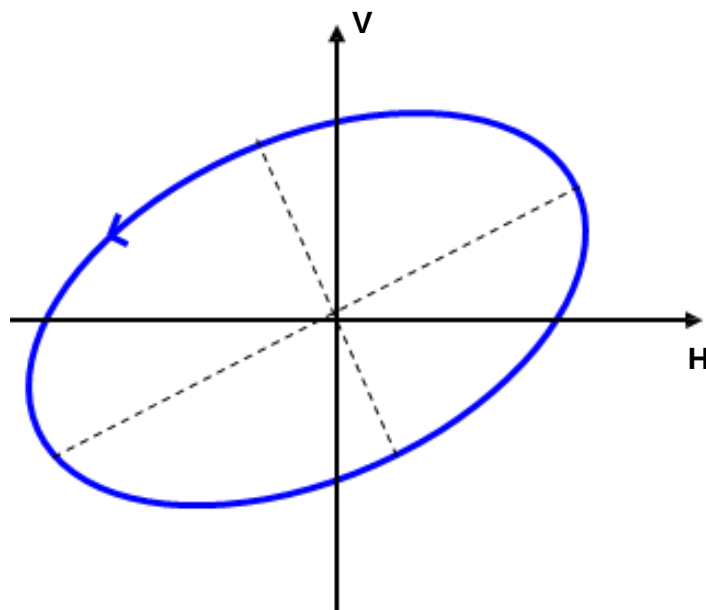


Figura 10: Representación da polarización elíptica.

1.3.3 Tipos de polarización

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 na que desexamos transmitir chámase polarización copolar. A ortogonal a esa, contrapolar ou cruzada.

Exemplo.-

Se a copolar é a V, a contrapolar é a H.

Se a copolar é lineal 45° , a contrapolar é lineal -45° .

Se a copolar é circular RHC, a contrapolar é circular LHC.

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 mais 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**.

1.4 O espectro electromagnético

As ondas electromagnéticas abarcan un amplo rango de frecuencias (e, correspondentemente, de lonxitudes de onda). Este rango de frecuencias e lonxitudes de onda é denominado **Espectro Electromagnético**. A parte do espectro mais familiar aos seres humanos é probablemente a luz, a porción visible do espectro electromagnético. Por espectro enténdese tanto unha parte como a totalidade do rango de frecuencias, así pódese entender o espectro electromagnético como tódalas ondas electromagnéticas de tódalas frecuencias posibles. Pero tamén pódese entender como unha parte desa totalidade se do que se fala é do espectro da luz visible, do espectro das microondas, do espectro do ultravioleta, do espectro dos Raios-X, etc.

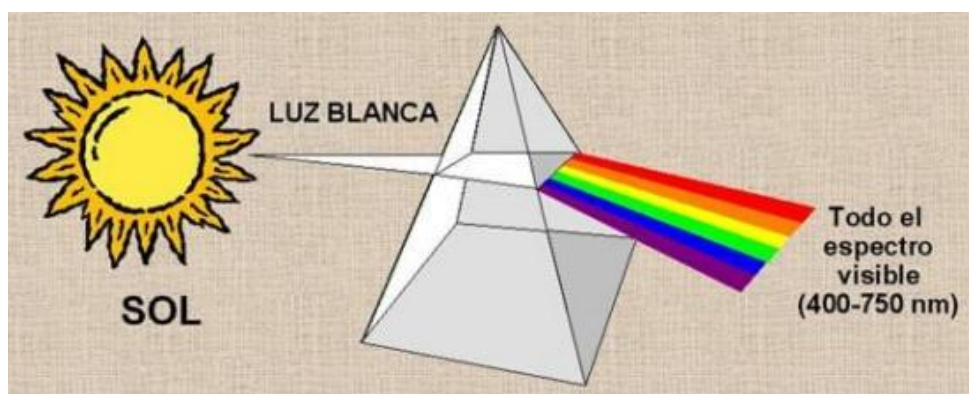


Figura 11: Obtención do espectro da luz visible mediante un prisma.

A luz sitúase aproximadamente entre as frecuencias de $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz a $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz, correspondentes a lonxitudes de onda dende cerca de 750 nm (vermello) a 400 nm (violeta/azul). Normalmente tamén estamos expostos a outras rexións do espectro electromagnético, incluíndo os campos da rede de distribución eléctrica **CA (Corrente Alternativa)**, a 50/60 Hz, Raios-X / Radiación Roentgen, Ultravioleta (nas frecuencias mais altas da luz visible), Infravermello (nas frecuencias mais baixas da luz visible) e moitas outras. **Radio** é o termo utilizado para a porción do espectro electromagnético no cal as ondas poden transmitirse aplicando corrente alterna a unha antena. Isto abarca o rango de 3KHz a 300 GHz, pero normalmente o termo reservase para as frecuencias inferiores a 1 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 mais 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 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 asóciase 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.

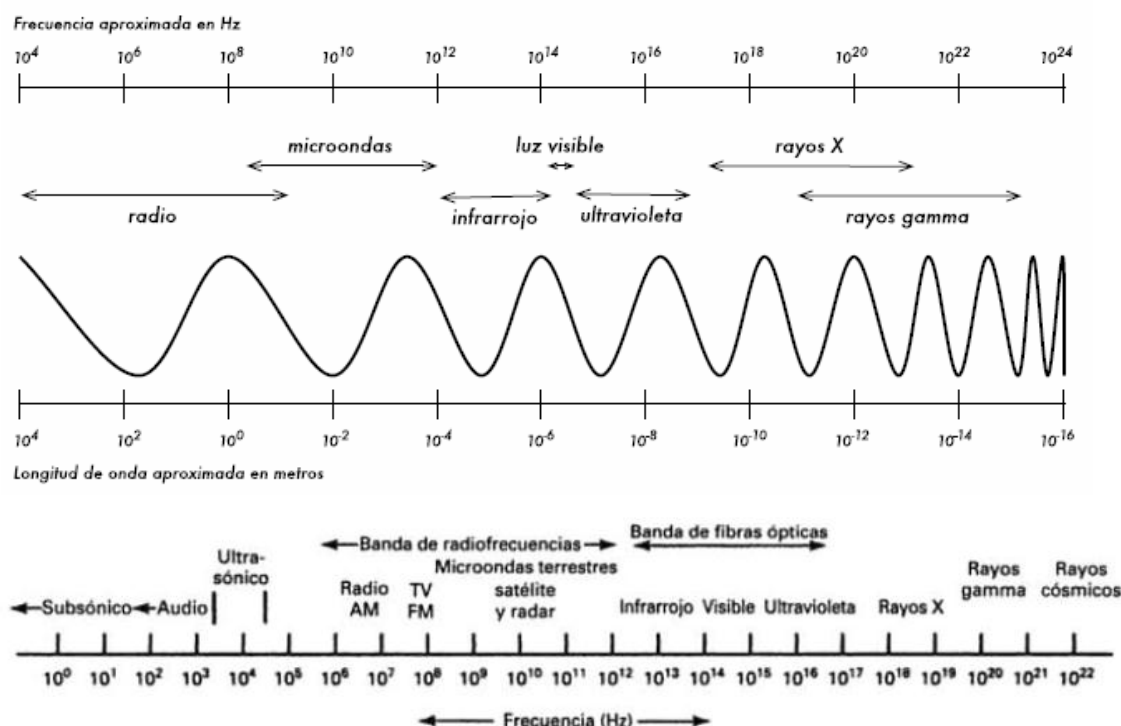


Figura 12: O espectro electromagnético.

1.5 Ancho de Banda e Bandas de frecuencia

Uns termos que vamos a atopar a miúdo na física de radio son o **ancho de banda** e as **bandas de frecuencia**.

1.5.1 Ancho de banda e capacidade de información

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 0,08 GHz (ou mais comunmente 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 ó ancho de banda (**B**) como o 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.

A capacidade de información tamén está relacionada co ancho de banda a través da relación sinal/ruído (S/N), tal e como pode verse no *límite de Shannon de capacidade de información*:

$$I = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Que en logaritmos decimais é:

$$I = 3,32 \cdot B \cdot \log_{10}\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

A **relación sinal/ruído** é o cociente entre a potencia do sinal dividida entre o a potencia do ruído que presente o medio por onde se transmite o sinal (non ten unidades):

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Potencia do sinal}}{\text{Potencia do ruído}}$$

Exemplo: para unha canle de comunicacións en banda de voz entre as frecuencias de 300 Hz a 3000 Hz, e cunha potencia do sinal de 1 W, e do ruído de 1 mW, a capacidade máxima de información será:

$$B = 3000 \text{ Hz} - 300 \text{ Hz} = 2700 \text{ Hz} = 2,7 \text{ KHz}; \quad \frac{S}{N} = \frac{1 \text{ W}}{1 \text{ mW}} = 1000$$

$$I = 3,32 \cdot 2700 \cdot \log_{10}(1 + 1000) = 26,9 \text{ Kbps}$$

Isto indica que se poderían transferir como máximo 26,9 Kbps a través dunha canle de 2,7 KHz. Pero non se pode facer nun sistema binario. Para acadar unha rapidez de transmisión de 26,9 Kbps a través dunha canle de 2,7 KHz, cada símbolo que se transfira debe conter mais dun bit de información. Por conseguinte, para chegar ó límite de Shannon de capacidade de transmisión, deben usarse sistemas dixitais de transmisión que teñan mais de dous símbolos de saída.

1.5.2 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 miramétricas – 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 resérvanse para as emisións que transmiten en **AM**, mentres que as de **FM** transmiten sobre os 100 MHz, e 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 fre-

cuencia 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 desto están bastante saturadas e so é conveniente utilízalas para montaxes de pouco alcance (no 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:

Espectro de TV en España			
Banda	Frec. Mínima	Frec. Máxima	Canles
<i>I</i>	<i>47MHz</i>	<i>68MHz</i>	<i>2, 3, 4 VHF</i>
<i>II</i>	<i>88MHz</i>	<i>108MHz</i>	<i>FM</i>
<i>III</i>	<i>174MHz</i>	<i>230MHz</i>	<i>5 ao 12 VHF</i>
<i>IV</i>	<i>470MHz</i>	<i>606MHz</i>	<i>21 ao 37 UHF</i>
<i>V</i>	<i>606MHz</i>	<i>862MHz</i>	<i>38 ao 69 UHF</i>

En microondas aínda son empregadas denominacións derivadas do radar, de tal modo que o espectro de microondas colle a parte superior do UHF e todo o SHF e o EHF dende 1 GHz a 300 GHz, tal e como se pode ver na seguinte táboa:

Espectro de microondas	
Banda	Frecuencias (GHz)
L	1 – 2
S	2 – 4
C	4 – 8
X	8 – 12
Ku	12 – 18
K	18 – 27
Ka	27 – 40
mm	40 – 300

1.6 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 cos 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.

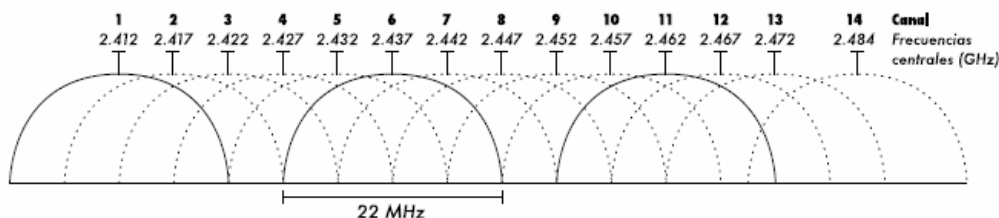


Figura.13: Canles e frecuencias centrais para 802.11b. Note cos canles 1, 6, y 11 non se superpoñen.

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 non todas as canles están en uso, cada emisora ocupa unha canle, pero hai canles desocupadas, que son mantidas así para evitar interferencias entre as emisoras.

1.7 Comportamento das ondas de radio

Aquí hai algunhas regras simples que poden ser de moita axuda cando realizamos os primeiros plans para unha comunicación:

- Canto mais longa a lonxitude de onda, mais lonxe chega.
- Canto mais longa a lonxitude de onda, mellor viaxa a través e ó redor de obstáculos.
- Canto mais curta a lonxitude de onda, pode transportar mais datos

Todas estas regras, simplificadas ao máximo, son mais fáciles de comprender cun exemplo.

As ondas mais longas viaxan mais lonxe

Supoñendo niveis iguais de potencia, as ondas con lonxitudes de onda mais longa tenden a viaxar mais lonxe que as que teñen lonxitudes de onda mais curtas. 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 a mesma potencia.

As ondas mais longas rodean os obstáculos

Unha onda na auga que ten 5 metros de longo non vai ser detida por un anaco de madeira de 5 mm que está sobresaíndo da superficie. Sen embargo, se a peza de madeira fora de 50 metros (por ex. un barco), interporíase no camiño da onda. A distancia que unha onda pode viaxar depende da relación entre a lonxitude de onda da mesma e o tamaño dos obstáculos no seu camiño de propagación. É difícil visualizar as ondas “atravesando” obxectos sólidos, pero ese é o caso coas ondas electromagnéticas. Canto mais longa a lonxitude de onda (e polo tanto unha frecuencia mais baixa) as ondas tenden a penetrar obxectos mellor que as que teñen lonxitudes de onda mais curtas (e por conseguinte unha frecuencia mais alta). Por exemplo, a radio FM (88-108 MHz) pode atravesar edificios e outros obstáculos facilmente, mentres as ondas mais curtas (como os teléfonos GSM operando a 900 MHz ou 1800 MHz) teñen mais dificultades en penetrar edificios. Este efecto é debido, en parte, aos diferentes niveis de potencia utilizados pola radio FM e o GSM, pero tamén debido as lonxitudes de onda mais curtas dos sinais GSM.

As ondas mais curtas poden transmitir mais datos

Canto mais rápida sexa a oscilación ou ciclo da onda, maior cantidade de información pode transportar, cada oscilación ou ciclo pode utilizarse por exemplo para transmitir un bit dixital, un ‘0’ ou un ‘1’, un ‘si’ ou un ‘non’. Existe outro principio que pode aplicarse a tódolos tipos de ondas, e que é extremadamente útil para comprender a propagación das ondas de radio. 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.

Imaxine que toma unha vara e a introduce verticalmente nun lago en calma, facendo que a auga ondee e baile. As ondas afastaríanse da vara — dende o lugar onde se introduce na auga— formando círculos. Agora, onde as partículas de auga estean oscilando e bailando, as partículas veciñas farán o mesmo: desde cada punto de perturbación orixinase unha nova onda circular. Isto é, dunha forma simple, o principio de Huygens.

“O principio de Huygens é un método de análise aplicado aos problemas da propagación de ondas no límite de campo lonxano. 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; e que esa onda avanzando como un todo, pode entenderse como a suma de tódalas ondas secundarias surxindo de puntos no medio xa atravesado. Esta visión da propagación de ondas axuda a comprender mellor a variedade de fenómenos das ondas, tales como a difracción”.

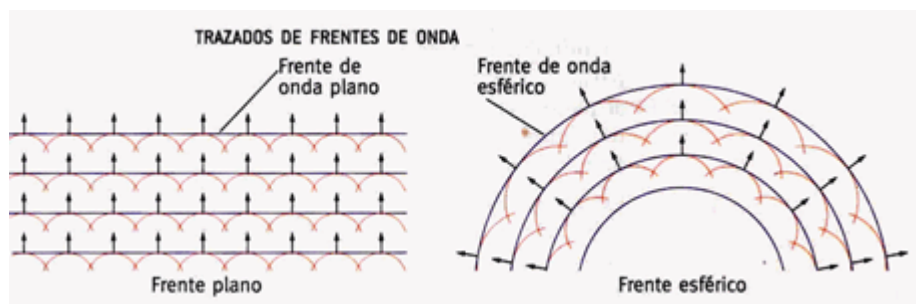


Figura.14: Ilustración do principio de Huygens aplicado a unha fronte plana e a unha fronte esférica.

Este principio aplicase tanto para as ondas de radio como para as ondas na auga, para o son e para a luz -so que a lonxitude de onda da luz é moi curta como para que os seres humanos poidamos ver os seus efectos directamente-. Este principio vai a axudarnos a comprender tanto a difracción, como as zonas de Fresnel, a necesidade de liña visual así como o feito de que algunhas veces as ondas cruzan as esquinas mais aló da liña visual.

Vexamos entón qué sucede coas ondas electromagnéticas cando viaxan.

1.7.1 Absorción

Cando as ondas electromagnéticas atravesan algún material, xeralmente debíltanse 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, mentres co 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. Para as microondas, os dous materiais mais absorbentes son:

- **Metal.** Os electróns poden moverse libremente nos metais, e son capaces de oscilar e polo tanto absorber a enerxía duna onda que os atravesa.
- **Auga.** As microondas provocan que as moléculas de auga se axiten, capturando algo da enerxía das ondas¹.

Na práctica, imos a considerar o metal e a auga como absorbentes perfectos: non vamos a poder atravesalos (aínda que capas finas de auga poderían permitir que unha parte da potencia pase). Son as microondas o que unha parede de ladrillo é a luz. Cando falamos da auga temos que recordar que se atopa en diferentes formas: chuvia, néboa, vapor e nubes baixas e todas van estar no camiño dos radioenlaces. Teñen unha gran influencia e en moitas circunstancias, un cambio no clima pode facer caer un radioenlace.

¹ Un mito común é que a auga “resoa” a 2,4GHz, que é a frecuencia utilizada polos fornos de microondas. En realidade, a auga aparentemente non ten ningunha frecuencia “resoante”. A auga xira e axítase en presenza de radiacións e quéntase na presenza de ondas de radio de alta potencia a calquera frecuencia. A frecuencia ISM de 2,4GHz non require licenza e polo tanto é unha boa elección para utilizala en fornos de microondas.

Existen outros materiais que teñen un efecto mais complexo na absorción de radiación.

Para as **árbores** e a **madeira**, a cantidade de absorción depende de tanta cantidade de auga conteñen. A madeira vella e seca é mais ou menos transparente, a madeira fresca e húmida vai absorber moitísimo.

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. Finalmente, falemos de nos mesmos: 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.

1.7.2 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 o metal e as superficies de auga. 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. Á luz das ondas de radio, unha rexa densa de metal actúa de igual forma que unha superficie sólida, sempre ca distancia entre as barras sexa pequena en comparación coa lonxitude de onda.

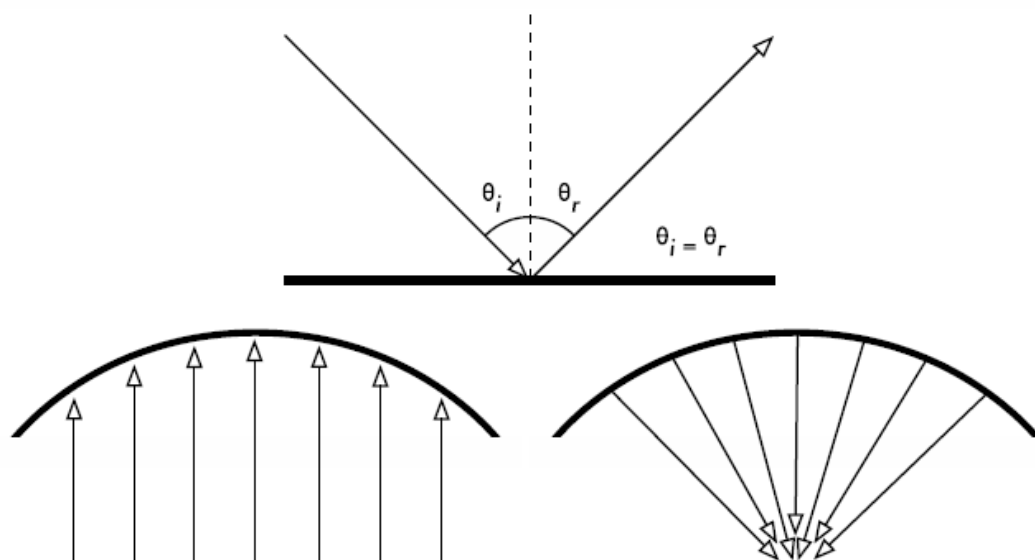


Figura 15: Reflexión das ondas de radio. O ángulo de incidencia é sempre igual ao ángulo de reflexión. Unha antena parabólica utiliza este efecto para concentrar as ondas de radio que caen sobre a súa superficie nunha dirección común.

A pesar de que as regras de reflexión son bastante simples, as cousas poden complicarse moito cando imaxinamos o interior dunha oficina con varios obxectos pequenos de metal de formas variadas e complicadas.

Isto explica por qué o **efecto multitraxectoria (multipath fading)** (é dicir que os sinais cheguen ao receptor a través de diferentes camiños, e por conseguinte en tempos diferentes), xoga un rol tan importante nas redes inalámbricas. 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.

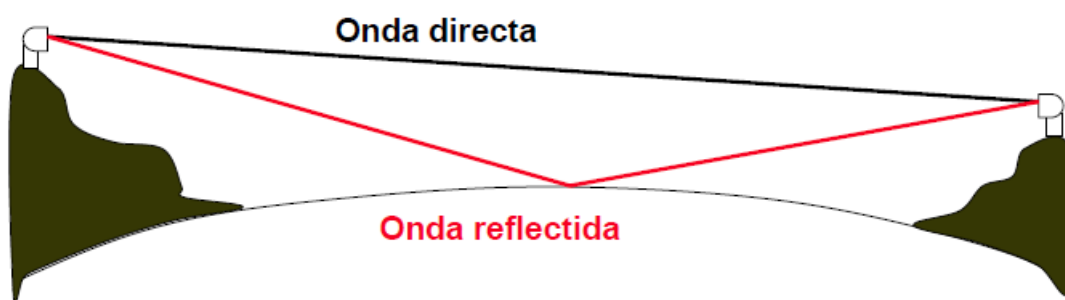


Figura 16: Reflexión que produce un efecto multitraxectoria..

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.

1.7.3 Refracción

A refracción é o cambio de dirección que experimentan as ondas electromagnéticas cando inciden formando un ángulo dende un medio transparente cara a outro. Isto é debido a que a velocidade da luz depende do medio polo que viaxen as ondas electromagnéticas, sendo mais baixa canto mais denso é o medio (o dato que estamos utilizando $c = 300.000 \text{ km/s}$ só é válido para o baleiro). A relación entre a velocidade de propagación de la onda no baleiro e a velocidade no medio do que se trate denomínase **índice de refracción (n)**.

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

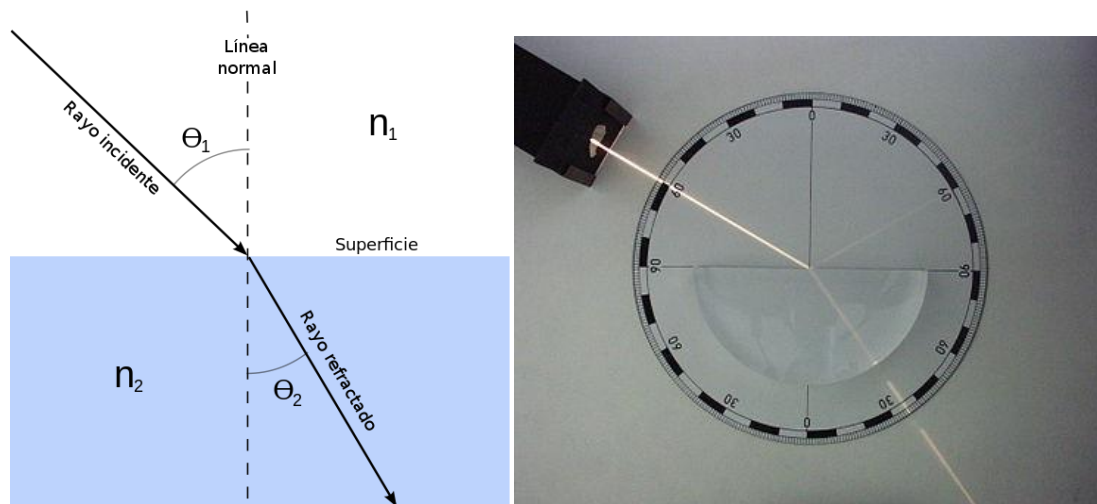


Figura.17: Refracción. Exemplo dun láser reflectido e refractado ó incidir sobre outro medio.

O ángulo 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. O arco da vella é o mesmo fenómeno, pero producido pola refracción en gotas de auga esféricas (as gotas da choiva) en lugar dun prisma:

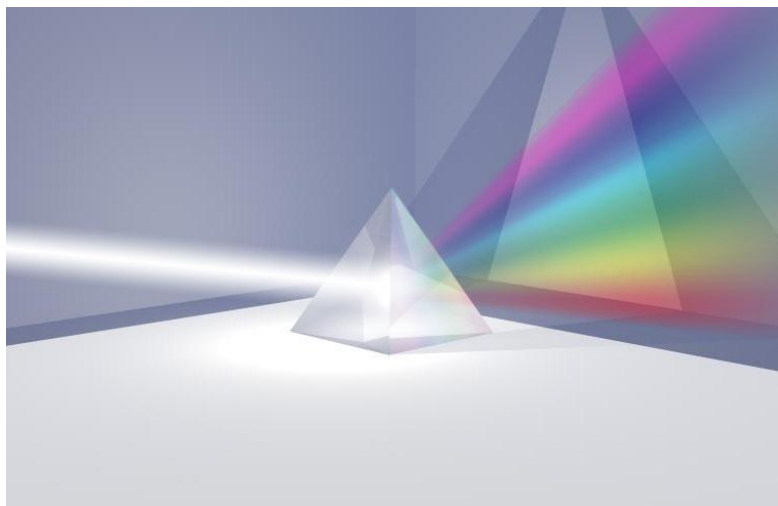


Figura.18: Descomposición da luz mediante a dobre refracción producida ó atravesar o prisma.

1.7.4 Difracción

Difracción é o comportamento das ondas cando, ao incidir nun obxecto, dan a impresión de dobrarse. É o efecto de “ondas dobrando as esquinas”. Imaxine unha onda na auga viaxando nun fronte de onda plano, tal como unha ola achegándose cara unha praia oceánica. Agora, interpoñemos no seu camiño unha barreira sólida, como unha cerca de madeira, para bloqueala. Logo practicamos unha estreita fenda nesa barreira,

como unha pequena porta. Desde esta abertura vai a comezar unha onda circular, e por suposto vai alcanzar puntos que están nunha liña directa detrás desa abertura, pero tamén a ambos lados dela. Se miramos este fronte de onda –que puidera ser tamén unha onda electromagnética- como un feixe de luz, sería difícil explicar cómo logra alcanzar puntos que están ocultos por unha barreira. Cando o modelamos como un fronte de onda, o fenómeno ten sentido.

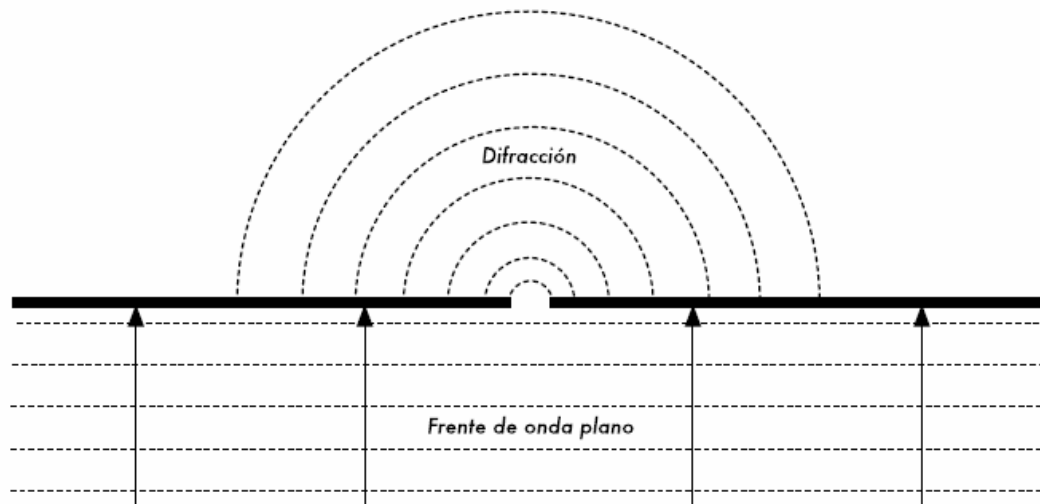


Figura 19: Difracción a través dunha fenda pequena.

O Principio de Huygens prové un modelo para comprender este comportamento. Imaxine que nun momento determinado, cada punto do fronte de onda pode considerarse como o punto de inicio doutra onda esférica (wavelet). Esta idea foi desenvolvida mais adiante por Fresnel, e se describe ou non adecuadamente o fenómeno aínda é tema de debate. Pero para os nosos propósitos, o modelo de Huygens describe o efecto bastante ben.

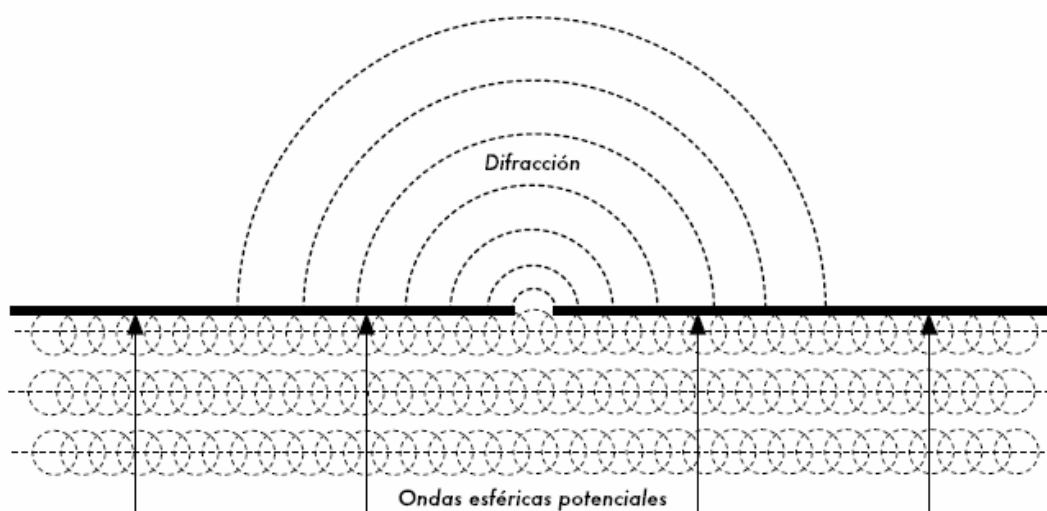


Figura 20: O Principio de Huygens.

É por medio do efecto de difracción, que as ondas van a “dobrar” nas esquinas, ou van a atravesar unha abertura nunha barreira. A lonxitude de onda da luz visible é moi pequena como para que os humanos poidan observar este efecto directamente. As microondas, cunha lonxitude de onda de varios centímetros, mostran os efectos da difracción cando chocan contra paredes, picos de montañas e outros obstáculos. A obstrución provoca que a onda cambie a súa dirección e dobre nas esquinas.

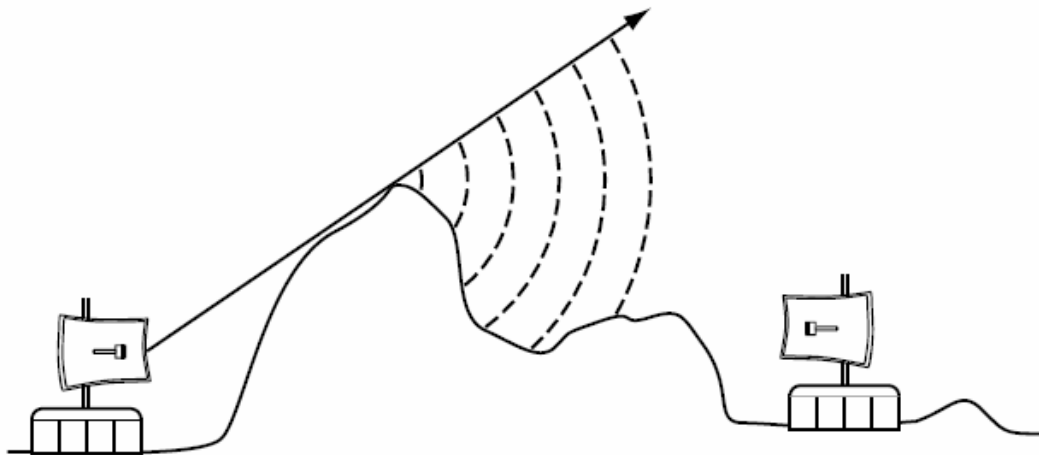


Figura 21: Arriba: Difracción na cima dunha montaña.
Abaixo: Difracción da luz na esquina dunha porta.

Hai que considerar que na difracción xerase 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.

1.7.5 Interferencia

Cando traballamos con ondas, un mais un non é necesariamente igual a dous, incluso pode resultar cero.

Isto é sinxelo de entender cando debuxamos dúas ondas senoidales 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**.

Para que os trens de ondas se sumen ou cancelen perfectamente, teñen que ter exactamente a mesma lonxitude de onda e unha relación de fase fixa; isto significa posicións fixas desde o pico dunha onda ata as outras.

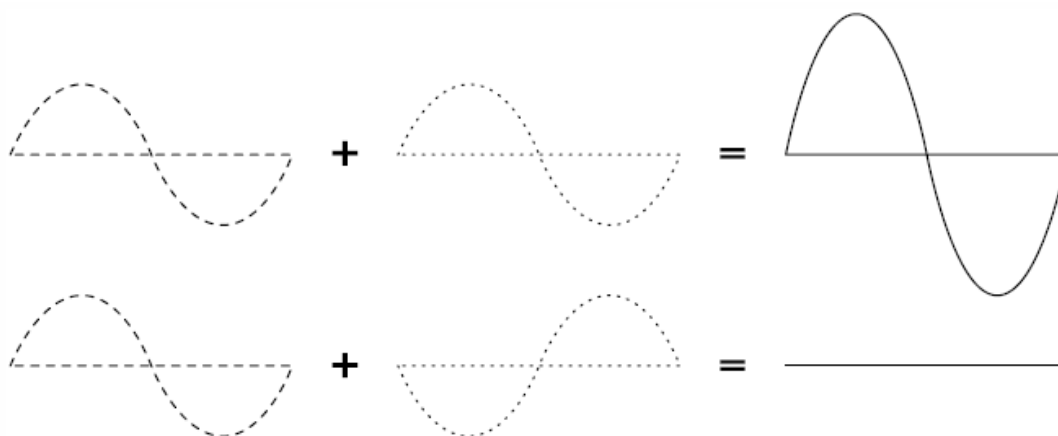


Figura 22: Interferencia construtiva e destrutiva.

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.

1.7.6 Liña visual

O termo **liña visual**, de cotío abreviada como **LOS** (polas súas siglas en inglés, *Line of Sight*), é fácil de comprender cando falamos acerca da luz visible: se podemos ver un punto B desde un punto A onde estamos, temos liña visual. Debuxa simplemente unha liña desde A ata B, e se non hai nada no camiño, temos liña visual.

As cousas póñense un pouco mais complicadas cando tratamos con microondas. A maioría das características de propagación das ondas electromagnéticas son proporcionais a súa lonxitude de onda. Este é o caso do ensanche das ondas a medida que avanzan. A luz ten unha lonxitude de onda de aproximadamente 0,5 micrómetros, as microondas teñen unha lonxitude de onda duns poucos centímetros. Por conseguinte, os feixes de microondas son mais anchos, necesitan mais espazo.

Os feixes de luz visible tamén se ensanchan, e se os deixamos viaxar o suficiente, podemos ver os resultados a pesar da súa pequena lonxitude de onda. Cando apuntamos un láser ben enfocado cara a lúa, o feixe estenderase abarcando mais de 100 metros de radio cando alcance a súa superficie (pódese comprobar este efecto utilizando un apuntador láser económico e un par de binoculares nunha noite clara. En lugar de apuntar cara a lúa, facelo cara unha montaña distante ou unha estrutura desocupada. O radio do seu feixe vaise incrementar coa distancia)

A liña visual que necesitamos para ter unha conexión inalámbrica óptima desde A ata B é mais que simplemente unha liña delgada -a súa forma é mais ben a dunha elipse-. O seu ancho pode describirse por medio do concepto de zonas de Fresnel.



Figura 23: Liña visual óptica e liña visual de radio (LOS).

Para entender a zona de Fresnel

A teoría exacta das zonas de Fresnel é algo complicada. Sen embargo, o concepto é facilmente entendible: sabemos, polo principio de Huygens, que por cada punto dunha fronte de onda comezan novas ondas circulares.

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 interesa 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.

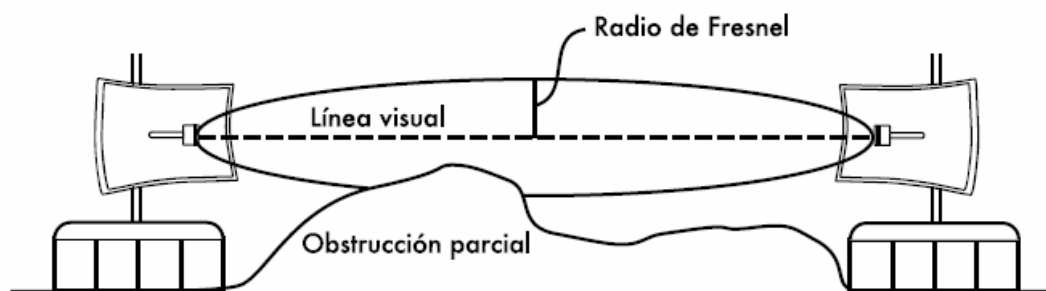
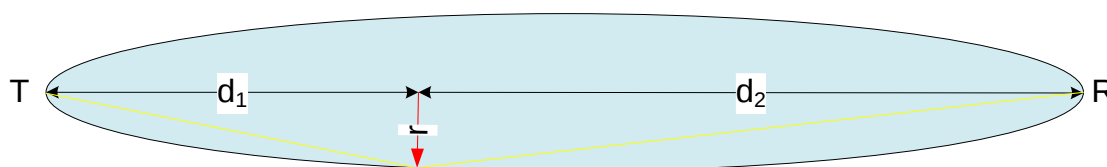


Figura 24: A zona de Fresnel é bloqueada parcialmente neste enlace ,aínda que a liña visual non está obstruída.

Aquí hai unha fórmula para calcular a primeira zona de Fresnel:

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



onde r é o radio da primeira zona en metros, d_1 e d_2 son as distancias dende o obstáculo aos extremos do enlace en metros, d é a distancia total do enlace en metros ($d = d_1 + d_2$), 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.

1. 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 nosas antenas, ou cambiar a dirección do enlace para evitar o obstáculo.

A segunda zona de Fresnel recolle as posicións nas que de haber obstáculos contribuirían con interferencias destrutivas. A diferenza da primeira debería ser bloqueada para evitar as perdas por multitraxecto.

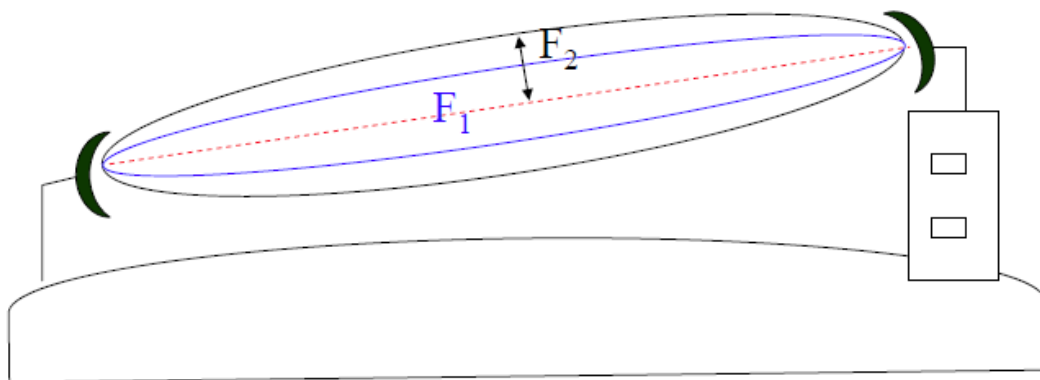


Figura 25: Primeira e segunda zonas de Fresnel.

1.7.7 Potencia

Calquera onda electromagnética contén enerxía ou potencia, o podemos sentir cando gozamos (ou sufrimos) a calor do sol. A potencia **P** é dunha importancia clave para lograr que os enlaces inalámbricos funcionen: necesítase certo mínimo de potencia para que o receptor lle de sentido o sinal.

O campo eléctrico mídese en **V/m** (diferenza de potencial por metro), a potencia contida nel é proporcional ao campo eléctrico ao cadrado

$$P \sim E^2$$

Na práctica, medimos a potencia por medio dalgún tipo de receptor, por ex. unha antena e un voltímetro, un medidor de potencia, un osciloscopio, ou inclusive unha tarxeta inalámbrica e un ordenador portátil. A potencia é proporcional ao cadrado do voltaxe do sinal.

1.8 Propagación

Cando se emiten, as ondas electromagnéticas interactúan coas moléculas do aire, transferindo os campos creados a través do espazo que os separa do receptor. A medida que a onda se propaga a súa enerxía vai decrecendo como consecuencia da absorción do sinal, propia do medio polo que transcorre.

As ondas que radian as emisoras de TV e radio son ondas electromagnéticas que se propagan polo espazo a unha velocidade de 300.000 km/s.

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. A relación entre a potencia transmitida por unha antena emisora (P_T) e a que recibe a antena receptora (P_R) está relacionada da forma:

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R$$

onde λ é a lonxitude de onda do sinal transmitido, d a distancia entre a antena emisora e a antena receptora, G_T a ganancia da antena transmisora, e G_R é a ganancia da antena receptora.

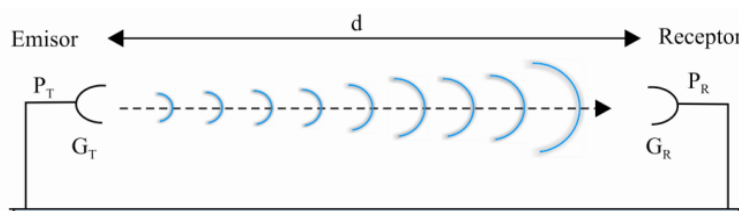


Figura 26: Propagación das ondas electromagnéticas.

Como se observa, ademais dos parámetros das antenas receptoras e emisoras, a potencia recibida depende da distancia entre as antenas e da lonxitude de onda do sinal que se propaga.

A relación entre a frecuencia e a lonxitude de onda dun sinal ven determinada pola expresión seguinte:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

onde c representa a velocidade de propagación do medio de transmisión, que no caso do aire correspóndese coa velocidade da luz (300.000.000 m/s).

2. Exemplo: O sinal de radiodifusión sonora en FM propágase no marxe de frecuencias de 87,5 a 108 MHz. A unha canle que transmite a frecuencia de 96.9 MHz correspóndelle unha lonxitude de onda de:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{96.9 \cdot 10^6 Hz} = 3.1 m$$

3. Exemplo: A potencia transmitida pola emisora (a frecuencia de 96.9 MHz) é de 10 W e utiliza unha antena de ganancia 10 (G_T). Un usuario situado a 10 Km da emisora recibe o sinal cunha antena omnidireccional ($G_R = 1$). O nivel do sinal que recibe o usuario é:

$$P_R = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R = 10 \left(\frac{3.1}{4\pi \cdot 10^4} \right)^2 10 \cdot 1 = 6.1 \cdot 10^{-8} W$$

O modo no que se produce a propagación non é uniforme, e depende fundamentalmente da frecuencia. A atenuación L en espazo libre dunha onda de frecuencia f (en MHz) ó percorrer unha distancia d (en Km) calcúlase como:

$$L(dB) = 32,44 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f)$$

Se o aplicamos ó exemplo anterior, para $d = 10$ Km e $f = 96,9$ MHz:

$$L(dB) = 32,44 + 20 \cdot \log(10) + 20 \cdot \log(96,9) = 92,17 dB$$

Mentres as capas baixas do aire que rodea a superficie da terra soen ser transparentes ante as ondas, a partires de 50Km e ata uns 400Km de altura, atopamos unha capa con importantes efectos sobre a propagación, esta é a **Ionosfera**. Nela a densidade crece coa altura, tendo a particularidade de ionizarse ante as radiacións solares, polo que, dependendo da frecuencia e do momento do día, pode comportarse como un espello, reflectindo as ondas, ou permitir o seu paso con un maior ou menor grao de refracción.

Como consecuencia do anterior podemos atopar diferentes modos de propagación dos sinais, tendo as seguintes formas de propagación:

- Ondas terrestres.
- Ondas de espazo.

1.8.1 Ondas Terrestres

A propagación por ondas terrestres está sometida ós efectos dos fenómenos xa mencionados de reflexión, difracción e interferencia.

Reflexión:

A onda cando choca cun obstáculo desvíase segundo o ángulo de incidencia, e segue un camiño diferente co da onda principal.

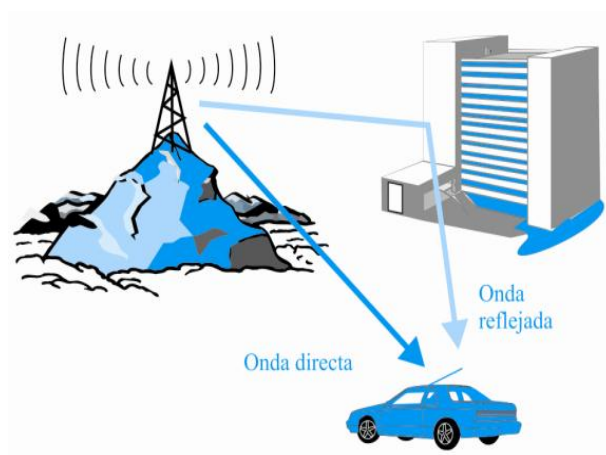


Figura 27: Ilustración do efecto da reflexión na propagación das ondas.

Difracción:

O fenómeno da difracción consiste en radiación de parte do sinal que recibe un obstáculo. Mediante a difracción é posible a comunicación aínda no caso de que non exista visibilidade entre as dúas antenas, aínda que sempre cunha perda importante do sinal.

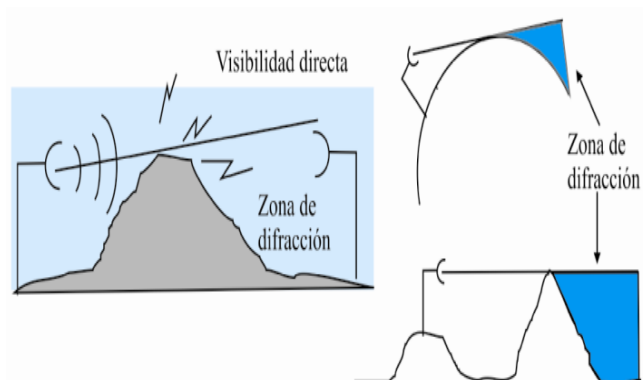


Figura 28: Ilustración do efecto da difracción na propagación das ondas.

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.

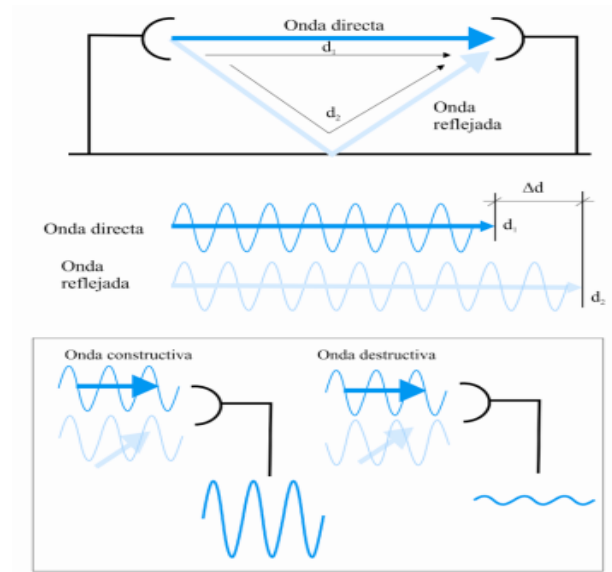


Figura 29: Ilustración do efecto da interferencia na propagación das ondas.

Como xa foi comentado anteriormente, isto da lugar o esvaecemento multitraxecto. Vexamos un exemplo:

4. 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) ou construtiva (desfase de 360° ou múltiplo):

- Cando $f = 1,5 \text{ MHz}$, 3 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 $f = 0,75 \text{ MHz}$, $2,25 \text{ MHz}$, $3,5 \text{ MHz}$ a interferencia é destrutiva e os sinais réstanse ou tamén se di que súmanse 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 apareceran unha serie de nulos e picos equiespaciados polo multitraxecto.

As ondas terrestres teñen dúas formas de propagarse, que dependen da frecuencia a cal son emitidas. Cando o sinal emitido é de baixa frecuencia propágase como ondas de superficie seguindo a curvatura da terra. Cando o sinal é de alta frecuencia a onda debe propagarse na liña visual (LOS) entre emisor e receptor.

1.8.1.1 Propagación por onda de superficie

Cando a frecuencia do sinal se atopa nas bandas mais baixas, pero por encima de 2 MHz, pódese utilizar a característica da superficie terrestre de difractor as ondas a medida que se propagan, polo que o sinal será capaz de seguir a curvatura da terra.

Neste caso hai que considerar a condutividade do solo polo que transcorren os sinais. Na superficie do mar, con unha condutividade moi alta, alcánzanse miles de Km, no caso de ambientes urbanos, onde hai numerosos obstáculos verticais de distintas alturas, as ondas sufrirán unha rápida atenuación.

Avantaxes:

- Poden percorrer todo o planeta
- Apenas lles afectan as condicións atmosféricas

Inconvintes

- Requiren alta potencia de transmisión
- Como a frecuencia é moi baixa, necesitan de antenas moi grandes.
- O ancho de banda é moi pequeno, o que da lugar a una baixa velocidade de transmisión

As principais aplicacións son a radiodifusión en AM, a radionavegación e as comunicacións marítimas.

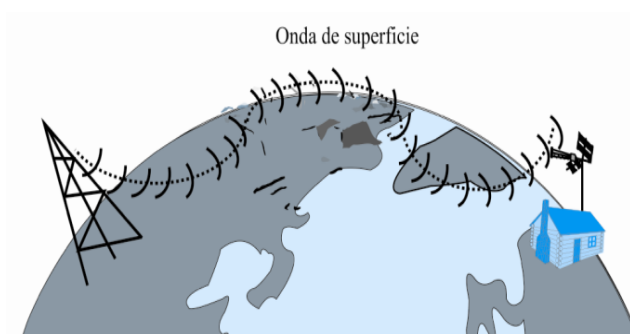


Figura 30: Propagación por onda de superficie.

1.8.1.2 Propagación por onda directa

Por riba dos 30MHz, a lonxitude de onda dos sinais é tan pequena que pode atravesar incluso as capas superiores da ionosfera. Isto supón que para propagar sinais de VHF e superiores, debemos utilizar un enlace directo sen obstáculos, garantindo así o contacto visual entre o emisor e o receptor. Como os sinais de televisión atópanse sempre neste grupo, a onda directa será o único método efectivo na propagación destas.

Se queremos transmitir algún sinal de forma que atravesese a ionosfera, como no caso das comunicacións vía satélite, teremos que elixir frecuencias elevadas, dado que estas presentarán unha menor atenuación na ionosfera, así como unha menor refracción (desviación sobre a dirección inicial) ao atravesala. Para esta aplicación utilízanse fre-

cuencias de SHF e EHF, denominadas habitualmente *frecuencias de microondas*.

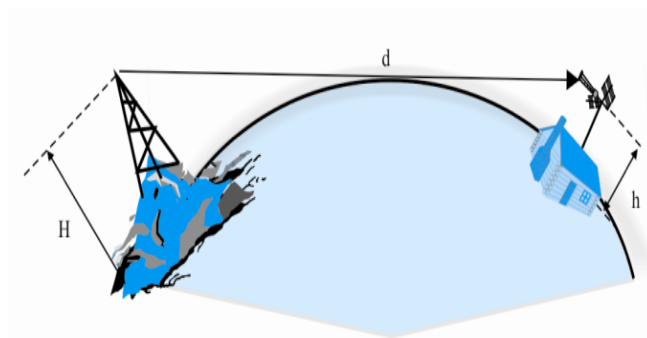


Figura 31: Propagación por onda directa.

1.8.2 Ondas de espacio

Este tipo de propagación ve afectada por las reflexiones, refracciones y difracciones que sufren las ondas al atravesar las diferentes capas que constituyen la atmósfera. Hágase distinción entre la capa más baja, la troposfera, y las que están encima de ella como la ionosfera.

1.8.2.1 Propagación por ondas troposféricas

Produce en la zona del espacio comprendida entre los 300 y 12000 metros de altura sobre el nivel del mar. En esta capa de la atmósfera producen heterogeneidades, generalmente en forma de nubes, que facilitan la difracción de las ondas que inciden sobre ellas. Este fenómeno es importante en la banda de UHF y VHF, donde la longitud de onda es del mismo orden que esos obstáculos.

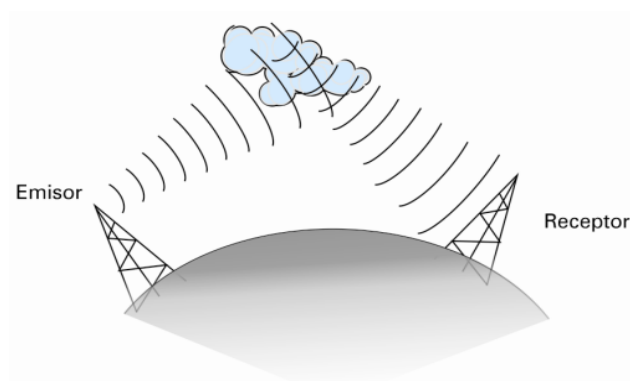


Figura 32: Propagación por ondas troposféricas. Las nubes causan la difracción de las ondas.

1.8.2.2 Propagación por reflexión y refracción ionosférica

Produce en la ionosfera, que es una capa atmosférica situada entre unos 35 y 400 Km sobre el nivel del mar. La concentración de gases en la atmósfera provoca la diferencia del índice de refracción (n) en las diferentes capas que la forman, lo que permite la refracción o

curvatura da traxectoria da onda. Baixo certas condicións a onda pode regresar a Terra.

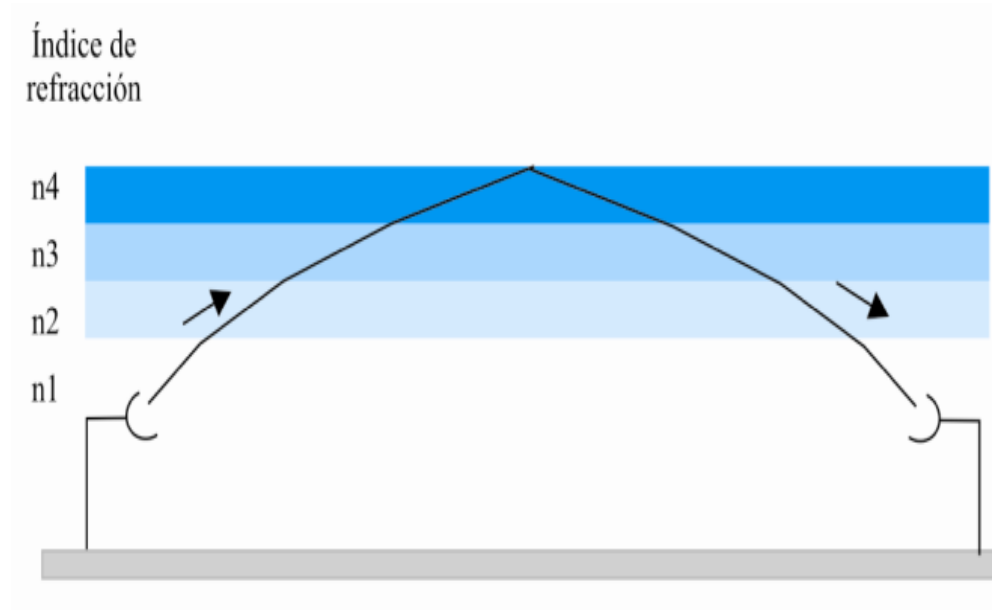


Figura 33: Propagación por ondas ionosféricas. As sucesivas refraccións e reflexións curvan a traxectoria.

A ionosfera pode dividirse en tres capas diferentes (D,E e F) que favorecen este efecto a distintas lonxitudes de onda.

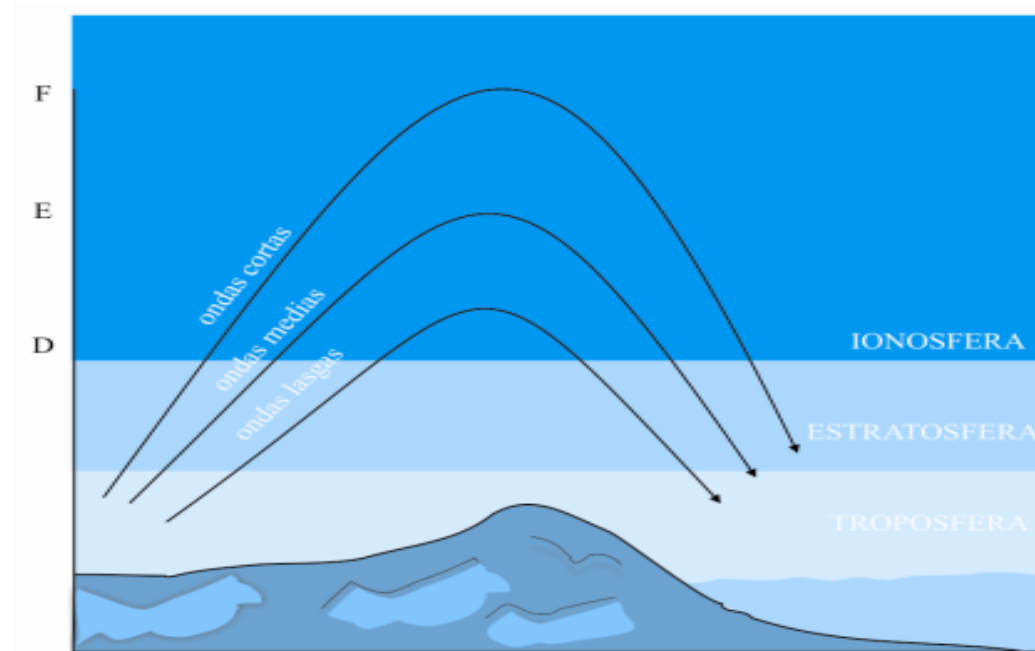


Figura 34: Efecto sobre a propagación de distintas lonxitudes de onda nas capas da ionosfera.

A medida que a frecuencia aumenta, a cobertura da superficie vai diminuindo, polo que se desexamos cubrir grandes distancias deberemos elixir un sistema diferente.

Para as bandas MF e HF, a ionosfera compórtase coma un espello, reflectíndose nas capas máis altas canto maior é a frecuencia.

Se utilizamos este sistema, deberemos considerar que durante a noite a ionosfera

diminúe notablemente o seu espesor. Cando se transmite un sinal de 5MHz polo día, o sinal electromagnético reflíctese a uns 50Km de altura, mentres que pola noite a mesma onda pode alcanzar uns 200Km antes dirixirse cara a terra, polo que a zona a cubrir será moito mais afastada. Tamén se poden percorrer grandes distancias a través de sucesivos rebotes na ionosfera con niveis de potencia razoables: entre 100 W e 5000 W.

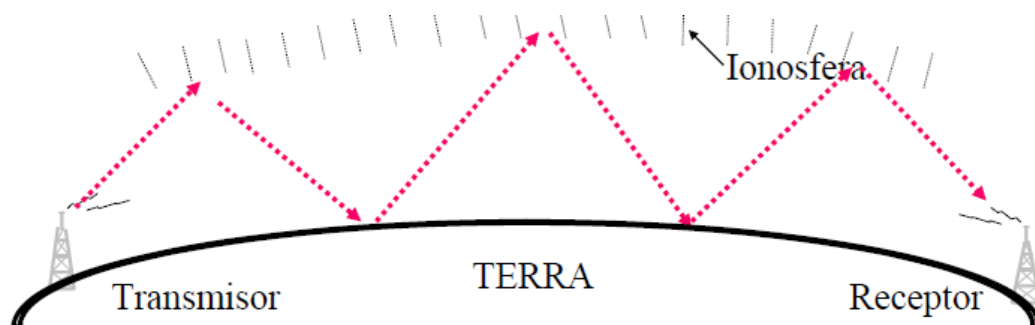


Figura 35: Se o nivel de potencia é suficiente, pódense abarcar grandes distancias por rebotes sucesivos.

Para cubrir tanto a zona próxima ao emisor como a mais afastada, pódense utilizar conxuntamente a transmisión por onda de superficie e por reflexión ionosférica.

Na táboa e figura seguintes ofrécese unha perspectiva conxunta das diferentes modalidades de propagación, así coma do seu alcance e campos de aplicación:

MODALIDADES DE PROPAGACIÓN				
BANDA	Modo de propagación	Alcance típico	Tempo de disponibilidad	CAMPOS DE APLICACIÓN
VLF	Guía-ondas tierra ionosfera		Todas horas	Radionavegación. Servicio móvil marítimo
LF	Onda de superficie	> 1.000 Km (sobre auga)	Todas horas	Frecuencias patrón.
MF	Onda de superficie	Distancias cortas (< 100 km)	Todas horas	Radiodifusión AM , radio marítima, radioaficionados, radio da policía.
	Onda ionosférica	Distancias longas (> 500 km suxeita a esvaecemento)	noite	Radiodifusión AM , radio marítima, radioaficionados.

HF	Onda ionosférica (3 – 8 MHz) (3 – 12 MHz) (6 – 25 MHz)	< 300 km > 500 km > 500 km	Día Noite Día	Servizo fixo Servizos móbiles Radiodifusión para grandes alcances, radio costeira, radio para aviación, radioaficionados, medicina.
	Onda de superficie (3 – 30 MHz)	Distancias cortas (< 100 km)	Todas horas	
VHF	Onda espacial (troposférica)	Visión directa (50 km)	Todas horas	Servizos móbiles. Radiodifusión FM e DAB, TV , radiogonometría, navegación aérea, radios da policía e aficionados, radio costeira, medicina.
	Dispersión ionosférica (f < 50 MHz)	2.000 km		Servizo fixo
UHF	Onda espacial (troposférica)	Visión directa (40 km)		Servizo fixo (radioenlaces) TV , radiogonometría, navegación aérea, radioaficionados, WIFI, TV satélites, comunicacións de telefonía móbil.
	Dispersión ionosférica (f < 500 MHz)	600 km		Servizo fixo
SHF	Onda espacial (troposférica)	Visión directa (40 km)		Servizo fixo (radioenlaces por microondas), Radar, radiogonometría, radionavegación, telecomunicacións y TV por satélites.

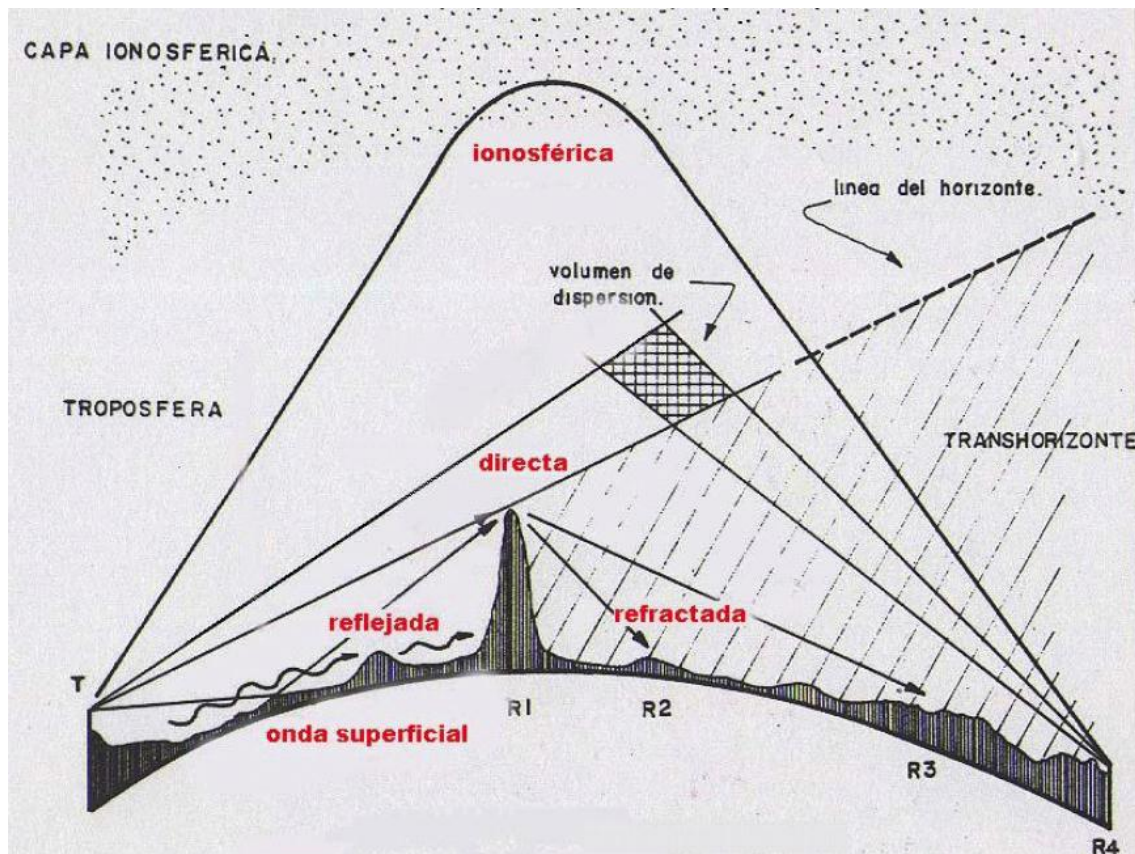


Figura 36: As diferentes formas de propagación.

1.9 Modos de transmisión

Os sistemas electrónicos de comunicacións pódense deseñar para manexar a transmisión só nunha dirección ou en ámbalas dúas direccións, só nunha a vez ou ámbalas ó mesmo tempo. A isto chamáselle *modos de transmisión*, e hai 4 modos de transmisión posibles: *simplex*, *semidúplex*, *dúplex* e *dúplex/dúplex*:

- **Simplex (SX):** as transmisións realízanse só nunha dirección. As veces, ós sistemas simplex chámaseles *só nun sentido*, *só recibir* ou *só transmitir*. Unha estación pode ser un transmisor ou un receptor, pero non ámbolos dous á vez. Exemplos de transmisión simplex son as emisións comerciais de radio e televisión, onde as estacións emisoras só transmiten o sinal e os receptores só a reciben.
- **Semidúplex (HDX, de half duplex):** No funcionamento semidúplex as transmisións pódense facer nánbalas dúas direccións, pero non ó mesmo tempo. As veces, ós sistemas semidúplex chámaseles *alternar námbolos dous sentidos* ou *de cambio e fora*. Unha estación pode ser transmisora e receptora, pero non ó mesmo tempo. Os sistemas de radio en dous sentidos que usan botóns para falar (PTT de push-to-talk) como son os de radio de banda civil ou os da policía, son exemplos de transmisión en semidúplex.

- **Dúplex total (FDX, de full duplex):** Co funcionamento dúplex total, ou simplemente dúplex, pode haber transmisións námbalas dúas direccións ó mesmo tempo. As veces, ós sistemas dúplex chámaseles *simultáneos de dúas direccións, dúplex completos ou liñas bilaterais*. Unha estación pode transmitir e recibir de forma simultánea; nembargante, a estación a cal se transmite tamén debe ser da cal se recibe. Un sistema telefónico normal é un exemplo de funcionamento dúplex.
- **Dúplex total/xeral (F/FDX, de full/full duplex):** Co funcionamento en dúplex total/xeral é posible transmitir e recibir de maneira simultánea, pero non necesariamente entre as mesmas dúas estacións. É dicir, unha estación pode transmitir a unha segunda estación e recibir ó mesmo tempo dunha terceira estación. As transmisións dúplex total/xeral úsanse case exclusivamente en circuitos de comunicacións de datos.