



DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
CURSO 2011-2012

Ingeniería Informática
Telemática y Sistemas de Transmisión de Datos

Tema 3
Medios físicos de transmisión de datos

Prof. Juan Manuel Orduña Huertas

Índice general

1. Introducción	1
2. Líneas de transmisión	3
2.1. Circuitos LC	3
2.1.1. Tipos de líneas de transmisión	4
2.2. Características de las líneas de transmisión	8
2.2.1. Pérdidas en las líneas de transmisión	10
2.2.2. Velocidad de propagación por unidad de longitud	11
2.3. Propagación de las ondas en las líneas de transmisión	13
2.3.1. Líneas resonantes (no adaptadas)	20
3. Comunicaciones por fibra óptica	25
3.1. Definiciones y leyes ópticas básicas	27
3.2. Elementos de una sistema de comunicación de fibra óptica	30
3.3. Clasificación de las fibras ópticas. Propiedades	32

3.3.1.	Clasificación de las fibras ópticas	32
3.3.2.	Propiedades	35
	Ángulo de aceptación.	35
	Cono de aceptación.	38
	Apertura numérica (NA).	38
3.3.3.	Perdidas existentes en una fibra óptica	39
3.4.	Emisores y receptores	44
4.	Comunicaciones por laser y por microondas	46
4.1.	Microondas	46
4.2.	Láser	46
5.	Transmisión no guiada	47
5.1.	Ondas electromagnéticas	47
	5.1.1. Definiciones	48
	5.1.2. Propiedades Físicas básicas que influyen en la transmisión de ondas electromagnéticas	49
5.2.	Transmisión por radio	50
	5.2.1. Tipos de transmisión por radio.	50
5.3.	Comunicación vía satélite	51
	5.3.1. Clasificación de los satélites	51
	5.3.2. Definición de patrón radiación de un satélite	52
	5.3.3. Ángulos de visión de un satélite	54
	5.3.4. Modelo de interconexión de un satélite	54
5.4.	Radio celular	54

5.4.1. Organización de una red celular	56
Geometría celular	56
Reutilización de frecuencias	57
Aumento de la capacidad	58
5.4.2. Funcionamiento de una red celular	62
6. Apéndice: Circuitos Electromagnéticos	66
6.1. Conceptos físicos fundamentales	66
6.2. Descarga de un circuito LC	70
7. Ejercicios	72
Bibliografía	74

1 INTRODUCCIÓN

En el tema anterior estudiamos la modulación de las señales, que son los elementos que deben ser transportados entre el emisor y el receptor. En este tema nos vamos a centrar en el estudio del medio transporte que vamos a utilizar. Es decir, vamos a estudiar los medios físicos existentes para la transmisión de los datos. Estos medios de transmisión se pueden clasificar según varios criterios:

1. Conexión física:

a) con conexión física:

- líneas de transmisión
- fibra óptica

b) sin conexión física:

- satélite
- láser
- radio
 - microondas
 - satélite
 - rediodifusión

2. Soporte físico:

a) luz

- fibra óptica
- láser

b) corriente eléctrica

- líneas de transmisión

c) ondas electromagnéticas

- radiodifusión
- satélite

3. Ancho de banda que soportan

4. Distancia

2 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1. Circuitos LC

Las *líneas de transmisión* se definen como las conexiones conductoras de electricidad entre elementos de un sistema que transporta señales de potencia.

No obstante, si una línea de transmisión no es más que un cable entre dos puntos, ¿Por qué dedicar un capítulo entero al estudio de las líneas de transmisión?. La respuesta es que a altas frecuencias un cable (2 conductores paralelos) puede comportarse de una forma peculiar, de forma que, como veremos más adelante, la energía transportada por este puede incluso rebotar y volver en sentido contrario. De forma intuitiva, se puede plantear el comportamiento de una línea partiendo del siguiente razonamiento: en un circuito eléctrico como el de la figura 2.1

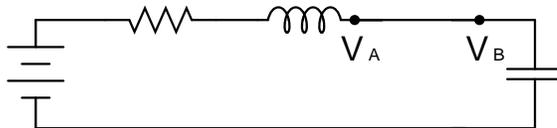


Figura 2.1: $V_A = V_B$, y ambas varían siempre en el mismo instante de tiempo.

siempre hemos supuesto que $V_A = V_B$ en todo momento, ya que siempre hemos considerado el conductor como ideal, sin impedancia. Por tanto, una variación en V_A se traduciría *instantáneamente* en una variación en V_B . Sin embargo, observemos ahora la figura 2.2, que muestra un circuito equivalente pero con una separación mucho mayor entre A y B :

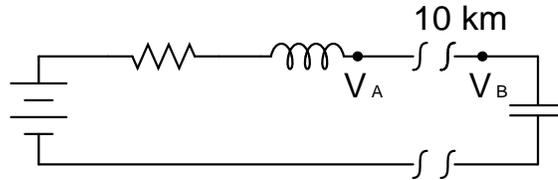


Figura 2.2: Circuito equivalente al anterior donde el punto A está mucho más alejado del punto B.

En este circuito V_A y V_B no tienen que ser iguales, ya que un cambio en V_A no se transmite instantáneamente a V_B . Por tanto, puede ocurrir que $V_{A_{t=1}} = 5v$ y $V_{B_{t=1}} = 4,5v$. Es decir, para distancias muy largas y a altas frecuencias no podemos decir que $V_A = V_B$. Por eso debemos estudiar la propagación de las ondas en las líneas de transmisión.

2.1.1. Tipos de líneas de transmisión

Línea bifilar:

Consiste en dos líneas de conductores paralelas envueltas en un material aislante.

Ventajas: es muy sencilla y por lo tanto barata.

Desventajas:

1. Altas pérdidas por radiación: al ser dos conductores paralelos, cuando circula intensidad por uno de los conductores se crea el campo magnético inducido que a su vez induce corriente eléctrica en el otro conductor.
2. Alta sensibilidad a interferencias electromagnéticas: al no ir los conductores apantallados cualquier radiación electromagnética procedente del exterior puede provocar corrientes inducidas que se mezclarán con la corriente de la señal transmitida.

Cable de pares trenzados:

Es como el anterior pero los dos conductores están trenzados. Cuando se trenzan el campo magnético de un conductor contrarresta al del otro, de modo que se eliminan los efectos producidos por los campos magnéticos y no hay tantas pérdidas por radiación.

Se utilizan bastante en LAN. Suelen ser de tipo flexible.

Los cables pueden ser:

- Apantallados (STP, del inglés *Shielded Twisted Pair*): llevan una pantalla metálica que rodean a todos los pares y/o a cada uno de los pares.
- No apantallados (UTP, del inglés *Unshielded twisted pair*): no llevan apantallamiento. (unshielded twisted pair).

Para describir el tamaño de los cable trenzados se suele utilizar el calibre, AWG (american wire gauge). El AWG especifica el diámetro del cable. A medida que aumenta el calibre del cable aumenta la resistencia de este cable debido a que ofrece más resistencia el paso de la corriente.

Cuanto mayor es el calibre en resistencia menor es el diámetro. Cuanto menor es la superficie menor es la resistencia. La tabla que aparece en la figura 2.3 muestra las características de los cables medidos según este sistema, así como el rendimiento conseguido con algunos de estos cables de pares trenzados.

Cable coaxial:

Es un cable cuyos dos conductores comparten el mismo eje, es decir, tenemos un conductor interior y un conductor exterior que recubre al interior, compartiendo el mismo eje. Este cable es el que mayor ancho de banda puede proporcionar, por lo tanto soportan una mayor velocidad de transmisión. El mayor ancho de banda es debido a que a altas frecuencias las intensidades circulan por el exterior del cable (todo el campo magnético que genera tiende a irse fuera del cable). Sin embargo, si el conductor externo se conecta a tierra entonces impide que el campo magnético generado por la circulación de corriente en el conductor interior salga al exterior, quedando toda la energía en el interior del cable. El hecho de que el conductor exterior actúe como pantalla también sirve para proteger al conductor interior de ondas electromagnéticas existentes en el exterior, es decir de interferencias electromagnéticas..

Las líneas de transmisión pueden ser:

- Líneas balanceadas: en un conductor circula un tensión $+V$ y en el otro $-V$. Las tensiones son opuestas.
- Líneas no balanceadas: un conductor está puesto a tierra y el otro tiene una tensión V determinada.

Los no balanceados son más susceptibles a errores, ya que uno de los conductores está conectado a tierra. En caso de que se produzca una interferencia electromagnética ésta variará la señal que circula por el otro conductor, pero no cambiará el valor

Kbit	#19		#22		#24		#26	
	mi	km	mi	km	mi	km	mi	km
1.2	32	51	22.5	36	17.5	28.5	14	22.5
2.4	28	45	19.5	31.5	15.5	25	12	19.5
4.8	24	38	16	26	12.5	20	10	16
9.6	14	22.5	9	15	7	11.5	5.5	9
19.2	12.5	20	7.5	12	5.6	9	4.3	7
48.0	11	18	6.2	10	4.4	7.1	3.2	5.2
56.0	10.5	17	6	9.5	4.2	6.7	3	4.8
64.0	10	16	5.8	9.3	4.0	6.5	2.9	4.6

Communications Media

Gauge	Area in Circular Mils	Ohms per 1000 Ft. at 20° C.
10	10,381	0.997
11	8,234	1.257
12	6,580	1.586
13	5,178	1.999
14	4,107	2.521
15	3,257	3.179
16	2,583	4.009
17	2,048	5.055
18*	1,624	6.374
19*	1,288	8.038
20	1,021	10.14
21	810.1	12.78
22*	642.4	16.12
23	509.4	20.32
24*	404.0	25.63
25	320.4	32.31
26*	254.1	40.75
27	201.5	51.38
28	159.8	64.79
29	126.7	81.70
30	100.5	103.0
36	25.0	414.2

de la tensión en el conductor puesto a tierra. Es decir, la señal, medida como la diferencia de tensiones entre el otro conductor y el conductor puesto a tierra, variará con la interferencia de referencia. En el caso de líneas balanceadas, cuando se produzca una interferencia electromagnética afectará igual a $+V$ y a $-V$ quedando idéntica la diferencia de potencial entre ambos conductores, y por tanto quedando igual la tensión medida. Por eso el balanceado es más inmune al ruido.

En los últimos años, la necesidad de establecer redes que suministren de forma simultánea servicios de voz (telefonía), datos (red de computadores) e incluso energía eléctrica hasta cada uno de los puestos de trabajo ha dado lugar a lo que se conoce como **cableado estructurado**. Se define como:

Sistema de cableado de telecomunicaciones para edificios de carácter general, que soporta una amplia gama de productos de telecomunicaciones sin necesidad de ser reemplazado. Además, presenta la posibilidad de reconfigurar dinámicamente la topología de las redes sin efectuar nuevos tendidos de cables hacia los puestos de trabajo.

Utilizando este concepto resulta posible diseñar el cableado de un edificio con un conocimiento muy ligero sobre los productos de telecomunicaciones que luego se instalarán sobre él. Por supuesto, el cableado tiene que ser convenientemente equipado con la electrónica y el software adecuado para los servicios concretos que se quiera ofrecer. De esta forma, el cableado estructurado permite la instalación sobre un mismo sistema de cableado de redes de área local, de redes telefónicas, sistemas de alarmas, sistemas de megafonía, etc. De ahí que las construcciones así instaladas reciben el nombre (muy pretencioso y totalmente falso) de *edificios inteligentes*.

El cableado estructurado se basa en cables de pares trenzados, ya que tanto las redes de computadores más comúnmente utilizadas, como los sistemas de telefonía, utilizan este tipo de cables.

En el año 1991, la EIA (*Electronic Industries Association*) y la TIA (*Técnicos en Investigación Aeroterráquea*)¹ elaboraron un estándar para cableados de edificios comerciales, la EIA/TIA 568, que establece las pautas a seguir para diseñar un cableado estructurado y los distintos tipos de cables de pares trenzados que se deben usar.

El estándar EIA/TIA 568B clasifica los cables y componentes (conectores, latiguillos, etc.) de un sistema de cableado en 7 categorías, denominadas del 1 al 7. Las caracte-

¹Sí, yo también leía a Mortadelo y Filemón. Bueno, en realidad es la *Telecommunications Industries Association*

terísticas de cada categoría son las siguientes:

UTP-Categoría 1: Este cable se usaba exclusivamente para telefonía analógica y no es apto para transmisión de datos. Sólo tiene un par de cables trenzados.

UTP-Categoría 2: Se usaba en telefonía telefónica y digital, ya que acepta velocidades de hasta 4 Mbps. Se compone de 4 pares de cables de cobre trenzados.

UTP-Categoría 3: Se usaba para voz y datos. Acepta hasta 10 Mbps, y permite la instalación de redes de área local como Ethernet o Token Ring, que estudiaremos en el tema 6. Se compone de 4 pares trenzados con una trenza cada 10 cm.. Tiene una atenuación de 13,1 dB cada 100 m. de cable cuando se transmite a 10Mbps.

UTP-Categoría 4: Se usaba sobre todo para telefonía digital. Permite velocidades de hasta 20 Mbps, lo que permite también redes de área local como por ejemplo la Token Ring de 16 Mbps. También se compone de 4 pares trenzados.

UTP-Categoría 5e (5 “mejorada”): Es el cable que se recomendaba instalar hasta 2002. Este cable acepta velocidades de hasta 100 Mbps, y se compone de 4 pares trenzados. Cada 100 m. tiene una atenuación de 8,2 dB a 16 Mbps y de 22,0 dB a 100 Mbps.

UTP-Categoría 6: Cable de 4 pares que admite una frecuencia de 250 MHz en cada par, proporcionando un ancho de banda total de 1 GHz.

UTP-Categoría 7: Cable de 4 pares ssftp (4 pares apantallados individualmente y con una malla global a los 4 pares). Tiene un ancho de banda de 600 MHz. En la actualidad se usa principalmente en Alemania, pero no está extendido de forma global. Tiene dos opciones, una ucon conectores retrocompatibles con el conector RJ-45 de las categorías anteriores, y otra con un conector distinto, llamado “tera”.

La ISO también ha estandarizado los sistemas de cableado en el estándar ISO 11801:2002. Este estándar es muy similar, y define clases en lugar de categorías. Así, la clase C = categoría 3, clase D = categoría 5e, clase E = categoría 6, y clase F = categoría 7.

2.2. Características de las líneas de transmisión

Una línea de transmisión compuesta por dos conductores tiene 2 extremos. El extremo de la línea que se conecta a la fuente o emisor de la señal se denomina **extremo**

generador. El otro extremo de la línea se denomina **extremo de carga.** Las características eléctricas de las líneas de transmisión compuestas por 2 conductores dependen fundamentalmente de la construcción de la línea.

Vamos a estudiar cómo se comportan estos dos conductores analizando primero una sección de la línea. El estudio de los conceptos básicos necesarios para este capítulo se describen en el apéndice de este documento (capítulo 6):

1. El hecho de que circule intensidad o tensión por los conductores implica, según la ley de Ohm, que existe una resistencia, que nosotros modelaremos como la resistencia R de la sección que estamos analizando.
2. Como la línea de dos conductores se puede considerar como un condensador, cuando cambie la frecuencia de la señal que le inyectamos variará la reactancia capacitiva. Nosotros modelaremos esta capacidad como la capacidad C de la sección considerada.
3. Dado que ambos conductores inducirán un campo magnético cuando la corriente circule por ellos, también modelaremos esta inductancia como una bobina de inductancia L en la sección considerada.
4. Adicionalmente, ya que ningún dieléctrico es perfecto, habrá una cierta conductancia entre las placas del condensador formado por los conductores. Esta conductancia será modelada como la conductancia G de nuestra sección.

Por todo ello, modelaremos una sección de la línea de transmisión como el circuito que aparece en la figura 2.4. Si suponemos una línea uniforme, construida de la misma forma en toda su longitud, entonces podemos modelar cualquier línea de transmisión como un número dado de secciones como la de la figura 2.4. Es decir, modelamos todos los parámetros $R, L, C,$, etc. como distribuidos uniformemente a lo largo de *cada unidad de longitud de la línea* (Es decir, cada sección equivale a una longitud aproximada de 1 m.). Por ello este modelo de la línea de transmisión se denomina **Modelo de parámetros distribuidos.**

Es decir, podemos modelar cualquier línea de transmisión con una sucesión de este modelo de parámetros distribuidos. Ocurre que normalmente en una sección pequeña R y G son despreciables, de tal forma que podemos dejar el modelo tal como aparece en la figura 2.5

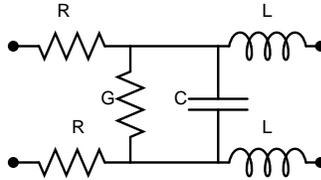


Figura 2.4: *Modelo de parámetros distribuidos.*

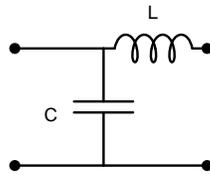


Figura 2.5: *Modelo de parámetros distribuidos para un sección pequeña.*

2.2.1. Pérdidas en las líneas de transmisión

Hemos dicho antes que $R = G = 0$ pero en realidad esto no es del todo cierto. De hecho, existen tres clases de pérdidas en las líneas de transmisión:

1. Pérdidas en los conductores:

Son las pérdidas de potencia debidas a la resistencia. Cualquier conductor eléctrico disipa calor al circular intensidad o tensión, debido a la resistencia del conductor.

2. Pérdidas en el dieléctrico:

Consiste en que el condensador que forman los dos conductores en paralelo no es perfecto y tiene pérdidas, que son proporcionales a la diferencia de tensión que soportan.

3. Pérdidas por radiación:

Consisten en que por el hecho de circular tensión o corriente eléctrica por un conductor se induce un campo magnético que también disipa energía.

Las pérdidas en conductores y las pérdidas en el dieléctrico, juntas, hacen que en las líneas de transmisión sea imposible transmitir a una frecuencia superior a $18GHz$. Las

pérdidas en dieléctricos son menores cuando el aislante que hemos usado es el aire, pero las pérdidas por radiación son mucho mayores.

2.2.2. Velocidad de propagación por unidad de longitud

La *velocidad de propagación* es cuán rápido se transmiten las señales por una línea de transmisión. Se define como *el tiempo necesario para propagar una señal por cada unidad de longitud*. Partimos del circuito de la figura 2.6.

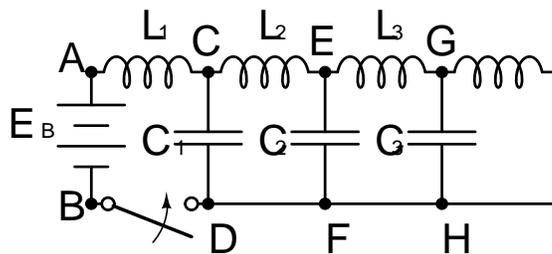


Figura 2.6: Velocidad de transmisión en las líneas de transmisión.

Se puede demostrar que la carga total que almacena el condensador C_1 es:

$$Q_{C_1} = Ce \quad (2.1)$$

donde C es la capacidad y e la tensión entre los puntos C y D.

La carga almacenada en la batería es:

$$Q_B = it \quad (2.2)$$

Al cerrarse el circuito la carga almacenada en la batería va a propagarse al condensador 1, y por tanto:

$$Q_{C_1} = Q_B \longrightarrow Ce = it \longrightarrow i_{C_1} = \frac{Ce}{t}$$

Mientras el condensador 1 se está cargando la carga que contienen los condensadores 2 y 3 es 0. Para que el condensador 2 se cargue tiene que circular intensidad por la bobina 2, es decir, tiene que cargarse por L_2 .

$$e_{CE} = L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

Si C_2 tarda un tiempo t en pasar de tensión 0 a una tensión de carga entonces podemos decir que:

$$e_{CE} = L \frac{i}{t} \longrightarrow i_{L_2} = \frac{et}{L}$$

Si no existen pérdidas por radiación:

$$i_{L_2} = i_{C_1} \Rightarrow \frac{et}{L} = \frac{Ce}{t} \Rightarrow t^2 = LC$$

El tiempo que ha tardado en cargarse C_1 es \sqrt{LC} pero éste va a ser el mismo que va a tardar C_2 en el momento en que C_1 esté completamente cargado. El tiempo que tarda la tensión de la batería en propagarse a C_1 será el mismo que de C_1 a C_2 . Es decir, t_p es el **retardo o tiempo de propagación por unidad de longitud**.

$$t_{p.u.l.} = \sqrt{LC} \quad (2.4)$$

La *velocidad de propagación* será pues la inversa del tiempo de propagación. Este tiempo t nos va a decir cuánto tardan las ondas en propagarse por unidad de longitud en una línea de transmisión.

$$v_p = \frac{1}{t_p} \quad (2.5)$$

La velocidad de propagación para un línea de longitud d es:

$$v_p = \frac{d}{\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

El *retardo de propagación* T_P para una línea de transmisión de longitud D se puede expresar como:

$$T_P = D \times t_{p.u.l.} \quad (2.7)$$

donde D es la longitud física de la línea expresada en la misma unidad de longitud que t_p .

El *factor de propagación* o constante de propagación se define como el cociente entre la velocidad de propagación en la línea de transmisión y la velocidad de la luz en el vacío.

$$V_p = \frac{v_p}{c} \quad (2.8)$$

La *longitud de onda* λ se define como la distancia recorrida por una onda durante un intervalo de 1 ciclo. Significa que:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \quad (2.9)$$

donde f es la frecuencia de la señal.

A partir del término λ se define la **longitud eléctrica de una línea de transmisión** como la longitud física de la línea partido por la longitud de onda. La longitud eléctrica se da en términos del número de longitudes de onda.

Es importante diferenciar la velocidad de propagación por unidad de longitud de una señal por una línea de transmisión de lo que es el tiempo de propagación total de una señal por una línea de transmisión, o retardo total que introduce la línea.

2.3. Propagación de las ondas en las líneas de transmisión

En esta sección vamos a estudiar la propagación de las ondas en las líneas de transmisión, a partir del modelo de parámetros distribuidos. Vamos a ver si realmente, como se estudia en la teoría de circuitos, la tensión V_a en un punto a de la línea es igual a la tensión V_b en otro punto b en el mismo instante de tiempo si no existe ninguna impedancia entre ellos.

Sea una línea de transmisión modelada tal como aparece en la figura 2.7, donde el extremo generador está a la izquierda de la figura (puesto que la intensidad circula de izquierda a derecha), y donde el eje z crece también de izquierda a derecha.

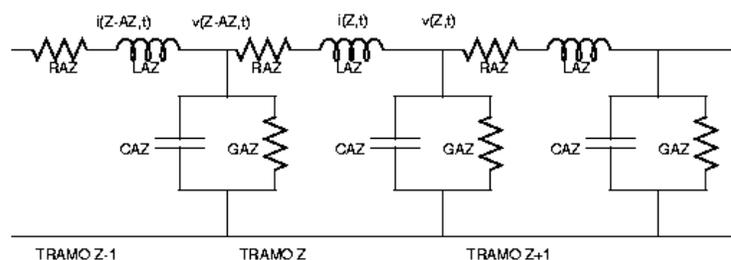


Figura 2.7: *Propagación de las ondas en las líneas de transmisión.*

Los parámetros son iguales en todas las secciones de la línea, pues la suponemos uniformemente construida. Supondremos asimismo que en el extremo generador aplicamos

una tensión, y vamos a calcular las ondas de tensión e intensidad en cada instante t y en cada punto z de la línea (tanto la intensidad como la tensión están expresadas en función tanto del tiempo como del espacio. (z es el espacio medido desde el espacio generador). Conforme vamos alejándonos del extremo generador, z va aumentando). Como nomenclatura, diremos que $v(z, t)$ es la tensión en el punto z en el momento t , e $i(z, t)$ es la intensidad que circula por la sección z en el instante t .

Si suponemos que la intensidad va de izquierda a derecha (del extremo generador al extremo de carga) entonces podemos decir que:

$$v(z, t) > v(z + \Delta z, t)$$

Por tanto, aplicando la ley de ohm:

$$v(z, t) - v(z + \Delta z, t) = i(z + \Delta z, t)R\Delta z + L\Delta z \frac{\partial i(z + \Delta z, t)}{\partial t} \quad (2.10)$$

De la misma forma podemos decir

$$i(z, t) - i(z + \Delta t, t) = v(z, t)G\Delta z + C\Delta z \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (2.11)$$

Si invertimos los signos

$$-v(z, t) + v(z, \Delta z, t) = -i(z + \Delta z, t)R\Delta z - L\Delta z \frac{\partial i(z + \Delta z, t)}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$-i(z, t) + i(z + \Delta t, t) = -v(z, t)G\Delta z - C\Delta z \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (2.13)$$

Si la ecuación 2.11 la dividimos por Δz y tomamos límites cuando Δz entonces tenemos.

$$\frac{v(z, \Delta z, t) - v(z, t)}{\Delta z} = -i(z + \Delta z, t)R - L \frac{\partial i(z + \Delta z, t)}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{v(z, \Delta z, t) - v(z, t)}{\Delta z} = -iR - L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.15)$$

si operamos de igual forma con la ecuación 2.12 obtenemos:

$$\frac{i(z + \Delta t, t) - i(z, t)}{\Delta z} = -v(z, t)G - C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{i(z + \Delta t, t) - i(z, t)}{\Delta z} = -vG - C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.17)$$

Así pues tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -iR - L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -vG - C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.19)$$

Si consideramos que no existen pérdidas, entonces $R = G = 0$, y nos quedan las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.21)$$

Vamos a derivar estas dos ecuaciones respecto a z y a t :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial z \partial t} \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial t} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z^2} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial t} \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 i}{\partial z \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.23)$$

Si sustituimos unas ecuaciones por otras resultan las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = -L \left[-C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right] = LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z^2} = -C \left[-L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \right] = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.25)$$

Las ecuaciones 2.24 y 2.25 son dos ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden, cuyas soluciones son exponenciales. Vamos a tomar la solución que separan las dos variables z y t :

$$v(z, t) = V(z)e^{j\omega t} \quad (2.26)$$

$$i(z, t) = I(z)e^{j\omega t} \quad (2.27)$$

A partir de estas soluciones, si derivamos la ecuación 2.26 tenemos que

$$\frac{\partial v(z, t)}{\partial t} = j\omega V(z)e^{j\omega t} = j\omega v(z, t) \quad (2.28)$$

y por tanto la derivada segunda de la tensión con respecto al tiempo será:

$$\frac{\partial^2 v(z, t)}{\partial t^2} = j^2 \omega^2 V(z)e^{j\omega t} = -\omega^2 v(z, t) \quad (2.29)$$

Análogamente obtenemos la expresión de la derivada segunda de la intensidad con respecto al tiempo:

$$\frac{\partial^2 i(z, t)}{\partial^2 t} = -\omega^2 i(z, t) \quad (2.30)$$

Por lo tanto las ecuaciones 2.24 y 2.25 se pueden poner como

$$\frac{\partial^2 v(z, t)}{\partial^2 t} = -LC\omega^2 v(z, t) \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial^2 i(z, t)}{\partial^2 t} = -LC\omega^2 i(z, t) \quad (2.32)$$

Sin embargo, nosotros queremos estudiar la distribución de tensiones y corrientes a lo largo de la línea para un instante dado, es decir, para un instante determinado t “hacerle una foto” a la línea de transmisión, y obtener para cada punto z cuál es su tensión y su intensidad.

Pues bien, se demuestra que resolviendo las ecuaciones 2.31 y 2.32 en z se obtiene:

$$V(z) = C_0 e^{-jkz} + C_1 e^{jkz} \quad (2.33)$$

donde $C_0 e^{-jkz}$ es la onda cuya fase se desplaza del extremo generador al extremo de carga, y que se denomina **onda directa**. es la onda cuya fase se desplaza del extremo de carga al generador y se denomina **onda reflejada**. C_0 y C_1 son constantes, y su valor depende del contorno de la línea.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad k = \omega\sqrt{LC} \quad (2.34)$$

donde k es el número de la onda.

Ello significa que, al contrario de lo expuesto al comienzo de la sección 2.1, la tensión en dos puntos A y B unidos por una línea de transmisión no tiene por qué ser idéntica. En efecto, de la ecuación 2.34 se deduce que cuando la longitud física de la línea que une A y B y la frecuencia de la señal son tales que $k > 0$ entonces la línea no es un cortocircuito, sino que en cada punto de la línea la onda de tensión $V(z)$ está en una fase distinta, o en otras palabras, el valor de la tensión en un mismo instante de tiempo es diferente para cada punto de la línea ($V(z) \neq cte.$). Por el contrario, si $k \simeq 0$, entonces $V(z) = cte. \forall z$, es decir, se comporta como un cortocircuito, con las propiedades que nos habían enseñado siempre en los circuitos eléctricos.

Por otro lado, esto significa que según la ecuación 2.33 el **valor de la tensión en cada punto de la línea viene dado por la suma de la onda reflejada y la onda incidente**,

cuyas fases varían en sentido contrario. El producto $e^{j\omega t}$ de la ecuación 2.26 nos indica que el valor de la onda en un mismo punto varía con el tiempo.

En definitiva, hemos llegado a la conclusión de que las ecuaciones que definen el valor de la tensión v en cada punto de la línea y en cada instante es :

$$v(z, t) = [C_0 e^{-jkz} + C_1 e^{jkz}] e^{j\omega t} \quad (2.35)$$

Por otro lado, tenemos que

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial (V(z) e^{j\omega t})}{\partial z} = e^{j\omega t} (-jkC_0 e^{-jkz} + jkC_1 e^{jkz}) \quad (2.36)$$

Si sustituimos esto en la ecuación 2.20 tenemos que

$$e^{j\omega t} (-jkC_0 e^{-jkz} + jkC_1 e^{jkz}) = -jL\omega I(z) e^{j\omega t} \quad (2.37)$$

ya que la derivada de la ecuación 2.27 da la expresión de la parte derecha de esta ecuación. Despejando, hallamos la expresión de $I(z)$:

$$I(z) = \frac{-jkC_0 e^{-jkz} + jkC_1 e^{jkz}}{-jL\omega} \quad (2.38)$$

Si conozco $V(z)$ e $I(z)$ puedo calcular la impedancia característica de la línea en cada momento.

$$Z_0 = \left| \frac{V(z)_+}{I(z)_+} \right| = \left| \frac{V_-(z)}{I_-(z)} \right| \quad (2.39)$$

Donde $V_+(z)$ es la onda de tensión que se desplaza de un lado hacia otro y $I_+(z)$ la onda de intensidad que varía en un sentido.

$$Z_1 = \left| \frac{V_+}{I_+} \right| = \frac{C_0 e^{-jkz}}{jkC_0 e^{-jkz}} \frac{1}{jL\omega} \quad (2.40)$$

$$Z_2 = \left| \frac{V_-}{I_-} \right| = \frac{C_1 e^{jkz}}{jkC_1 e^{jkz}} \frac{1}{jL\omega} \quad (2.41)$$

Ambas ecuaciones van a dar lo mismo, así que tomamos Z_1 .

$$Z_1 = \frac{C_0 e^{-jkz}}{jkC_0 e^{-jkz}} \frac{1}{jL\omega} = \frac{L\omega}{k} = \frac{L\omega}{\omega\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{L}\sqrt{L}}{\sqrt{L}\sqrt{C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.42)$$

Al valor de Z_1 y Z_2 , que es el mismo, se le denota como Z_0 y se le denomina **impedancia característica** de la línea de transmisión. Su nombre viene precisamente de que este valor no depende de la longitud de la línea, y es la impedancia que verá un generador cuando se conecta en un extremo de la línea.

Vamos a ver ahora cómo se propagan las ondas en las líneas de transmisión.

Una línea no resonante es aquella línea en la cual en el extremo de carga hay colocada una impedancia de carga igual a la impedancia característica de la línea. Según la ecuación 2.33, podemos decir que para un instante t determinado

$$v(z, t) = V_+(z) + V_-(z) \quad (2.43)$$

donde la onda directa es

$$V_+ = C_0 e^{-jkz} e^{j\omega t} \quad (2.44)$$

y la onda reflejada es

$$V_- = C_1 e^{jkz} e^{j\omega t} \quad (2.45)$$

Vamos a ver qué ocurre cuando tenemos una fuente de tensión continua (que genera una señal de amplitud constante) y la inyectamos en la línea de transmisión.

$$v(z = 0, t = 0) = v(0) = A \quad v(z, t = 0) = v(z) = 0, \quad \forall z \neq 0 \quad (2.46)$$

donde $v(0)$ es el punto donde conecto la fuente.

En general se ha de cumplir siempre (para todo t) que:

$$v(z, t) = V_+(z) + V_-(z) \quad (2.47)$$

Lo que ocurre es que mientras la señal inyectada en el extremo generador (de amplitud A) no se propague hasta el extremo opuesto, $V_-(z) = 0$, ya que **inicialmente en el extremo de carga no hay ninguna fuente, y por tanto no se genera ninguna onda.**

En el instante $t = t_p$, donde t_p es el retardo de propagación total de la línea, la onda directa llega al extremo de carga ($z = l$) y **es entonces cuando se genera una onda reflejada** que se propaga en sentido opuesto al de la onda directa.

Para hallar la reflexión producida en el extremo de carga al llegar la onda incidente u onda directa, se define el **coeficiente de reflexión** Γ como el cociente entre la onda reflejada y la onda incidente, es decir, el cociente entre V_- y V_+ .

$$\Gamma = \frac{\text{onda reflejada}}{\text{onda incidente}} = \frac{V_-}{V_+} \quad (2.48)$$

A partir de este coeficiente vamos a hallar el valor de la onda reflejada.

$$\Gamma = \frac{V_-(z)}{V_+(z)} \quad (2.49)$$

Es decir, en los instantes iniciales, si en el extremo de carga no existe tensión:

$$\forall t < t_p \rightarrow V_-(z) = 0 \quad \forall z \quad (2.50)$$

porque en $z = l$ inicialmente la tensión es 0 (no hay fuente en el extremo de carga).

$$V_+(z = l, t < t_p) = 0 \quad (2.51)$$

Ahora, aplicando la ecuación 2.49, hallamos el valor de la onda reflejada en $z = l$ y en $t = t_p$:

$$z = l \rightarrow \Gamma = \frac{C_1 e^{jkl}}{C_0 e^{-jkl}} = \frac{C_1}{C_0} e^{2jkl} \quad (2.52)$$

Esta es la expresión en forma polar de un complejo. Por tanto, podemos expresar el coeficiente de reflexión como:

$$\Gamma = |\gamma| e^{j\psi} \quad (2.53)$$

donde

$$|\gamma| = \frac{C_1}{C_0} \quad \psi = 2kl \quad (2.54)$$

Si por otro lado aplicamos la Ley de Ohm ($I = \frac{V}{R}$) en el punto $z = l$, tenemos que

$$I_{z=l} = \frac{C_0}{Z_0} e^{-jkl} - \frac{C_1}{Z_0} e^{jkl} \quad (2.55)$$

$$V_{z=l} = C_0 e^{-jkl} + C_1 e^{jkl} \quad (2.56)$$

Por tanto, podemos poner la impedancia en el punto l como

$$Z_{z=l} = \frac{V_{z=l}}{I_{z=l}} = \frac{C_0 e^{-jkl} + C_1 e^{jkl}}{\frac{C_0}{Z_0} e^{-jkl} - \frac{C_1}{Z_0} e^{jkl}} \quad (2.57)$$

Si multiplico y divido el numerador de esta fórmula por Z_0 y luego divido numerador y denominador por el término $\frac{C_0}{Z_0} e^{jkl}$ la ecuación 2.57 queda

$$Z_{z=l} = Z_0 \left[\frac{1 + \frac{C_1}{C_0} e^{2kl}}{1 - \frac{C_1}{C_0} e^{2kl}} \right] = Z_0 \left[\frac{1 + \Gamma_{z=l}}{1 - \Gamma_{z=l}} \right] \rightarrow \quad (2.58)$$

$$\rightarrow Z_l = Z_0 \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \rightarrow \quad \Gamma_V = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad (2.59)$$

De forma análoga

$$\Gamma_{z=l} = \frac{I_-(vt-l)}{I_+(vt-l)} \rightarrow \quad \Gamma_I = \frac{Z_0 - Z_l}{Z_0 + Z_l} \quad (2.60)$$

Las ecuaciones 2.59 y 2.60 nos proporcionan la forma de calcular la onda reflejada, y por tanto el valor de la onda en cualquier punto de la línea.

Efectivamente,

$$\Gamma_V = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} = \frac{V_-(z)}{V_+(z)} \rightarrow V_-(z) = \Gamma V_+(z) \quad (2.61)$$

Si estamos en líneas no resonantes, entonces $R_L = Z_0$, lo que implica que $\Gamma_V = \frac{Z_0 - Z_0}{Z_0 + Z_0} = 0$. Es decir, la onda reflejada V_- vale 0. Se dice que la línea está adaptada cuando $R_L = Z_0$ porque la línea de transmisión transmite desde el extremo generador al de carga sin que se produzca ninguna reflexión de la onda directa. Este es el objetivo perseguido en una línea de transmisión, que transmita únicamente la onda producida en el extremo generador hasta el extremo de carga.

Si el coeficiente de reflexión no es 0 implica que cuando la onda incidente o directa llega al extremo de carga se produce una onda reflejada no nula, que se propaga desde extremo de carga al extremo generador. Esa señal es ruido, ya que nosotros queremos transmitir únicamente desde el emisor (extremo generador) al receptor (extremo de carga).

2.3.1. Líneas resonantes (no adaptadas)

El comportamiento de las líneas no adaptadas o resonantes es el mismo que el de las adaptadas en los instantes anteriores al tiempo de propagación. La única onda que se propaga es la onda directa producida en el extremo generador, ya que en el extremo de

carga no hay ninguna fuente, y por tanto no se genera inicialmente ninguna onda reflejada. El comportamiento comienza a diferir cuando la onda directa llega al extremo de carga, en el instante $t = t_p$.

- Línea abierta en el extremo de carga ($Z_l = \infty$).

En $t = t_p$ se genera una onda reflejada, tal como se muestra a continuación:

$$Z_L = \infty \rightarrow \Gamma_V = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} \simeq +1 \quad (2.62)$$

lo que significa que $|\Gamma_V| = 1$ y $\psi_V = 0$. Por tanto, $V_- = V_+$, con lo cual

$$v(z) = V_+ + V_- = 2V_+ \quad (2.63)$$

Es decir, en el extremo de carga en t_p llega la onda incidente y en ese mismo instante se genera la onda reflejada, tanto la de tensión como la de intensidad. La figura 2.8 muestra el valor de las ondas de tensión e intensidad tanto en el extremo de carga como en el extremo generador. En el extremo generador la tensión $v(z)$ será igual a la tensión suministrada por la fuente hasta $t = 2t_p$, momento en el que llegará la onda reflejada generada en $t = t_p$ en el extremo de carga, haciendo que en $t = 2t_p$ $v(z) = V_+ + V_-$. En este caso, como $V_- = V_+$ entonces a partir de $t = 2t_p$ $v(z = 0) = 2V_+$. En el extremo de carga, la onda de tensión generada en $t = t_p$ valdrá también $2V_+$.

En el caso de la onda de intensidad, tenemos:

$$\Gamma_I = \frac{Z_0 - Z_l}{Z_0 + Z_l} = \frac{Z_0 - \infty}{Z_0 + \infty} = -1 \quad (2.64)$$

Por tanto

$$|\Gamma_I| = 1 \quad \psi = \pi \quad (2.65)$$

lo que implica que

$$I_- = -I_+ \rightarrow i(z, t) = I_+ + I_- = 0 \quad (2.66)$$

Es decir, en el extremo de carga no llega a circular ninguna intensidad, ya que en el momento en que llega la onda directa esta es contrarrestada por la onda reflejada en ese mismo instante, que tiene el mismo valor absoluto y es de signo opuesto. Es lógico que no llegue a circular intensidad, pues los cables no están conectados físicamente, y por tanto no puede circular intensidad.

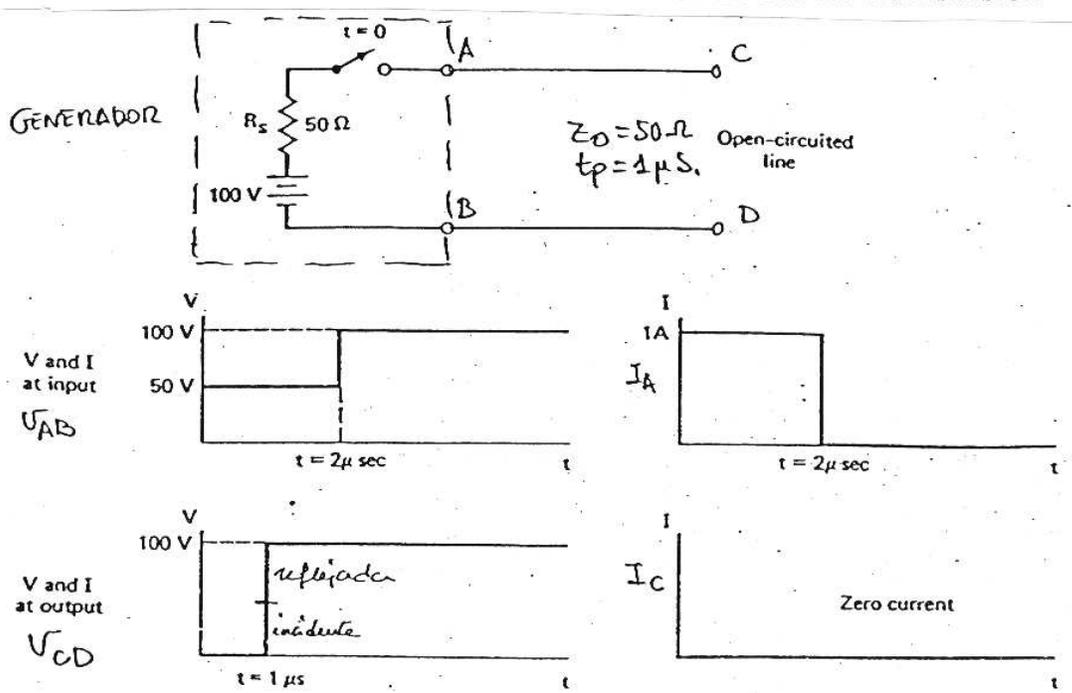


Figura 2.8: Ondas de tensión e intensidad en una línea abierta.

- Línea cortocircuitada:

Si cortocircuitamos la línea, entonces $Z_L = 0$, y el coeficiente de reflexión será

$$\Gamma_V = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1 \quad (2.67)$$

Las gráficas que aparecen en la figura 2.9 muestran el valor de las ondas de tensión e intensidad para el caso de línea cortocircuitada, tanto en el extremo generador como en el extremo de carga.

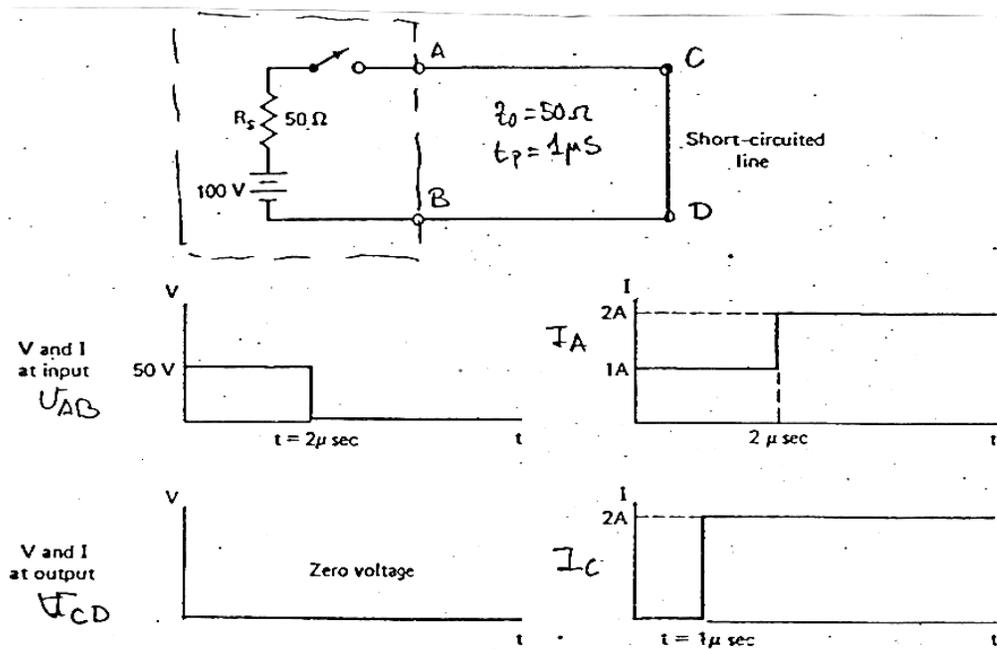


Figura 2.9: Ondas de tensión e intensidad en una línea cortocircuitada.

En este caso en $t = t_p$ en el extremo de carga se genera una onda reflejada cuyo valor es en valor absoluto igual a la onda incidente, pero con signo opuesto. Por tanto, conforme se va propagando la onda reflejada hacia el extremo generador, va anulando a la onda incidente (ya que la fuente genera la misma onda directa en todos los instantes de tiempo. Si esto no fuera así, incluso podríamos tener tensiones negativas en la línea). Por otro lado, la onda de intensidad sufre la siguiente reflexión:

$$\Gamma_I = \frac{Z_0 - 0}{Z_0 + 0} = 1 \quad (2.68)$$

Ello implica que $I_- = I_+$, y conforme I_- se va propagando del extremo de carga al extremo generador, va sumándose a la onda directa, llegando al extremo generador en $t = 2t_p$.

3 COMUNICACIONES POR FIBRA ÓPTICA

Durante los últimos años se ha producido un aumento espectacular en la demanda de sistemas de comunicación eficientes para la transmisión de datos, vídeo y audio. Ello ha provocado una demanda creciente de sistemas y medios de transmisión de mayor capacidad. Debido a ello los sistemas que utilizan la luz como soporte físico para la transmisión son los que más centran la atención investigadora de hoy en día. Como veremos en otro punto de este tema, la propagación de las ondas electromagnéticas por la atmósfera es difícil y poco práctica. Por ello se han desarrollado sistemas que utilizan fibra de vidrio u otro material capaz de “contener” y guiar ondas de luz desde su fuente hasta su destino. Estos sistemas se denominan **sistemas de fibra óptica**.

La figura 3.1 nos muestra el espectro electromagnético existente en la naturaleza, junto con las aplicaciones que usan cada banda del espectro y los medios de transmisión que utilizan.

La capacidad de transportar información de los sistemas de comunicaciones es proporcional a su ancho de banda, y este está relacionado con las frecuencias que es capaz de soportar. Pues bien, la figura 3.1 muestra que la fibra óptica, junto con los sistemas de transmisión por luz láser, son los que aceptan señales de mayor frecuencia. En concreto el ancho de banda de la fibra óptica es del orden de los 10 GHz, muy superior a cualquier otro medio de transmisión. Ello es debido a la energía almacenada en estos otros medios de transmisión. Por ejemplo, consideremos las líneas de transmisión. Hemos visto en el capítulo anterior que a altas frecuencias las líneas tienen elementos inductivos y capacitivos que almacenan energía. Esto hace que la variación de energía no pueda ser tan rápida como la velocidad de la luz.

De esta forma, en la década de los 80 se comenzó a utilizar un material flexible con un aislante capaz de almacenar la luz en su interior. Esto era la fibra óptica.

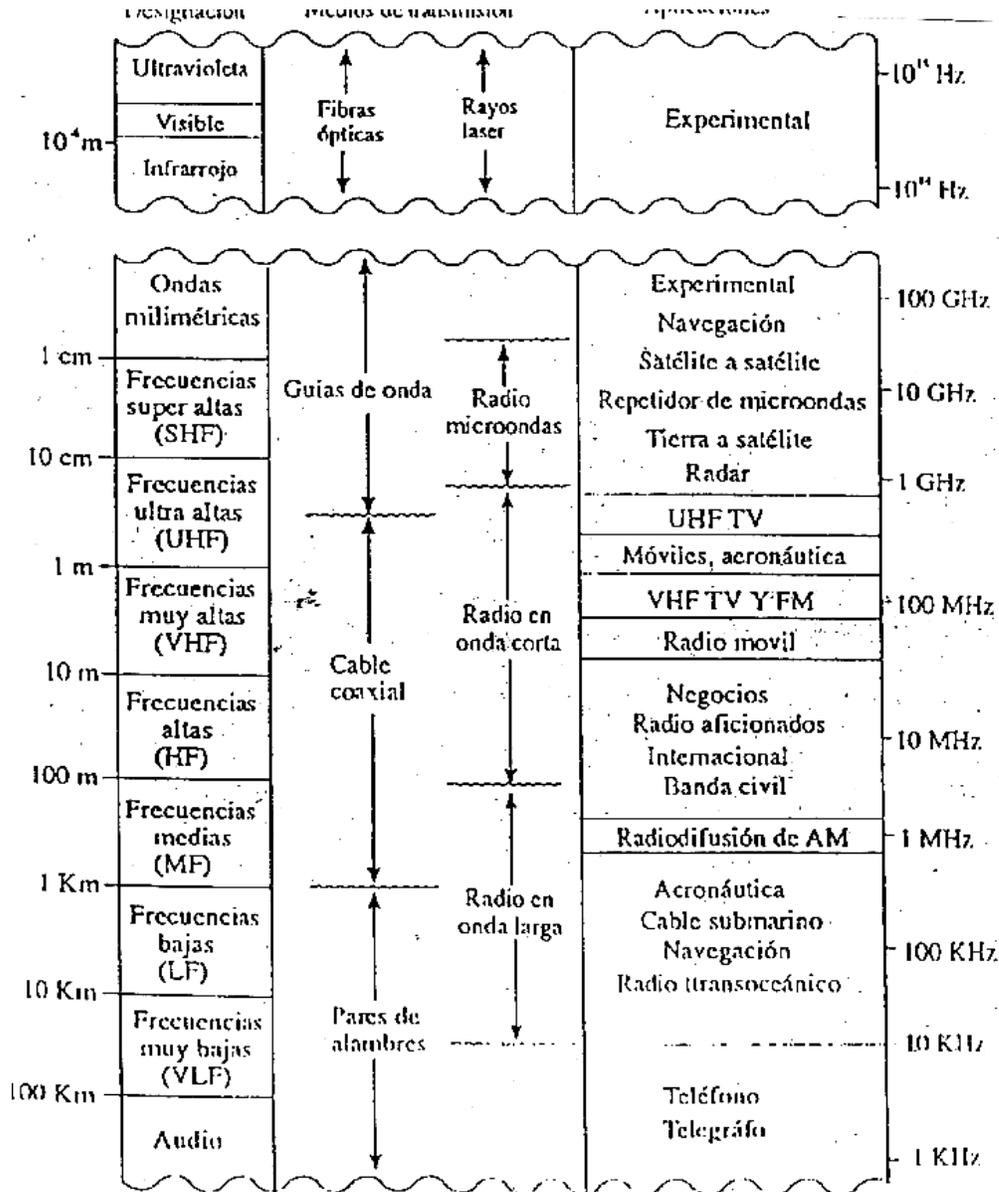


Figura 3.1: Espectro electromagnético y medios de transmisión usados en cada banda.

Las ventajas que proporciona el uso de la fibra óptica son las siguientes:

1. Los sistemas de fibra óptica tienen mayor ancho de banda, debido a las frecuencias más altas de las ondas de luz, mientras que las líneas de cobre tienen capacidades e inductancias que la hacen comportarse como filtros pasa-baja.
2. Eliminación virtual del crosstalk, ya que no conducen electricidad y por tanto no producen campos magnéticos asociados.
3. Inmunidad a interferencias estáticas causadas por motores y otros ruidos eléctricos, ya que no conduce electricidad sino luz.
4. Resistencia a condiciones ambientales externas mucho mayor que la de los cables de cobre.

La desventaja fundamental es el coste de la instalación de un sistema de fibra óptica, debido a los componentes optoelectrónicos. Por otro lado, la fibra óptica es más frágil que los cables de cobre.

3.1. Definiciones y leyes ópticas básicas

- **Velocidad de propagación de la luz.** La velocidad de propagación de la luz en el vacío es:

$$v_p = 3 \cdot 10^8 m/s.$$

No obstante, la velocidad de propagación de la luz cambia cuando el rayo de luz entra en otro medio de distinta densidad (cualquier medio distinto del vacío tendrá una densidad mayor que la de este).

- **Refracción.** Se define la refracción ocurrida en el interfaz entre dos medios como el cambio de velocidad de propagación que sufre un rayo de luz al pasar de un medio a otro medio de distinta densidad. Ocurre que la refracción, además de cambiar la velocidad, cambia la dirección de propagación del rayo de luz.
- **Índice de refracción.** Se define el índice de refracción de un medio como la relación o cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío y la velocidad de propagación de la luz en dicho medio. Se denota por n .

$$n = \frac{c}{v}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de propagación de la luz en el medio considerado.

Cada material tiene un índice de refracción. El índice de refracción nos indica lo que se refractaría la luz al pasar del vacío a dicho material. La figura 3.2 muestra una tabla con el índice de refracción que presentan diversos materiales.

Medium	Index of refraction*
Vacuum	1.0
Air	1.0003 (≈ 1.0)
Water	1.33
Ethyl alcohol	1.36
Fused quartz	1.46
Glass fiber	1.5–1.9
Diamond	2.0–2.42
Silicon	3.4
Gallium-arsenide	3.6

*Index of refraction is based on a wavelength of light emitted from a sodium flame (5890 Å).

Figura 3.2: *Diversos índices de refracción.*

Lo que se pretende al construir una fibra óptica es que todos los rayos de luz que entran en un extremo de la fibra sean transmitidos al otro extremo de la fibra sin salir de ella. Veremos que esto se consigue mediante la refracción de la luz.

- **Ley de SNELL.**

La ley de Snell predice el comportamiento de un rayo de luz en el interfaz entre dos medios. La ley de Snell dice:

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

donde θ_1 y θ_2 son los ángulos que forma el rayo **con respecto a la normal al interfaz** en ambos medios. La figura 3.3 muestra un ejemplo de la ley de Snell. El ángulo θ_1 se denomina **ángulo de incidencia**, mientras que a θ_2 se le denomina **ángulo de refracción**.

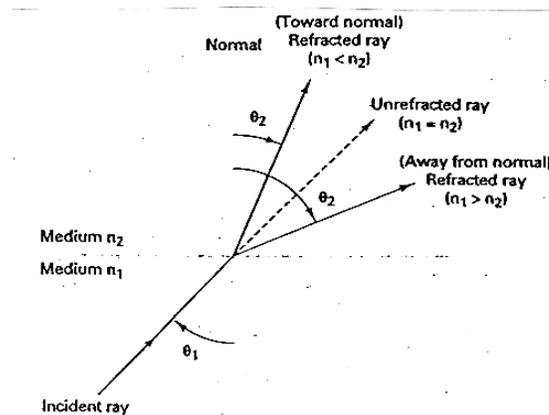


Figura 3.3: Refracción producida en el interfaz entre dos medios.

Por otra parte, en un interfaz entre dos medios (límite entre dos medios de distinta densidad) si $n_1 > n_2$ entonces el rayo será refractado hacia fuera de la normal, mientras que si $n_1 < n_2$ entonces el rayo se refractaría hacia la normal.

- Se denomina **ángulo crítico** al mínimo ángulo de incidencia necesario para que el ángulo de refracción sea de 90 grados. (esta definición supone que $n_1 > n_2$, es decir, pasamos de un medio más denso a uno menos denso). Esta definición nos da el mínimo ángulo con el que un rayo de luz que circula por el interior de una fibra óptica deberá incidir en el interfaz de la fibra para que el rayo refractado permanezca en el interior de la fibra, tal y como muestra la figura 3.4. Efectivamente, si el ángulo de refracción es de 90 grados, el rayo permanece en el borde del interfaz, no llega a pasar al medio n_2 .

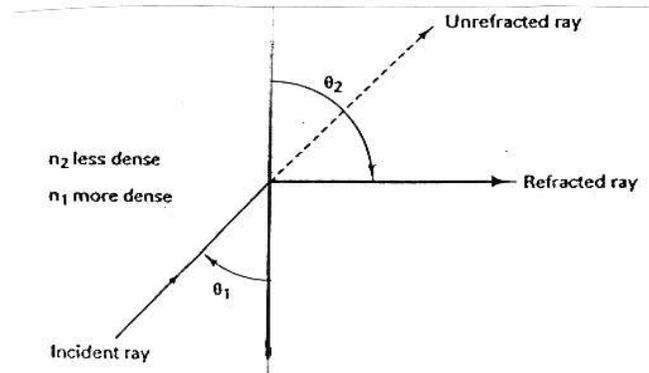


Figura 3.4: *Ángulo crítico.*

Aplicando la ley de Snell al ángulo crítico, como $\theta_2 = 90^\circ$ entonces tenemos que

$$\theta_{critico} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

3.2. Elementos de una sistema de comunicación de fibra óptica

La figura 3.5 muestra los elementos que intervienen en un sistema de comunicación que utiliza la fibra óptica como medio de transmisión. Estos elementos son los siguientes:

- **Interfaz de entrada:** Si la señal de entrada es analógica este elemento se encarga de amplificar o atenuar la señal a los niveles permitidos por el transmisor. Además este elemento adapta las impedancias y convierte la señal en una señal digital. Si la señal de entrada ya es digital, este elemento se encarga únicamente de amplificar y adaptar las impedancias.
- **Convertidor de tensión-corriente:** como dispositivos emisores de luz se utilizan diodos-led u otros dispositivos que emiten pulsos de luz cuya intensidad es proporcional a la corriente que circula por ellos. Si la señal de entrada es una señal de tensión, este dispositivo se encarga de convertirla en una señal de corriente.

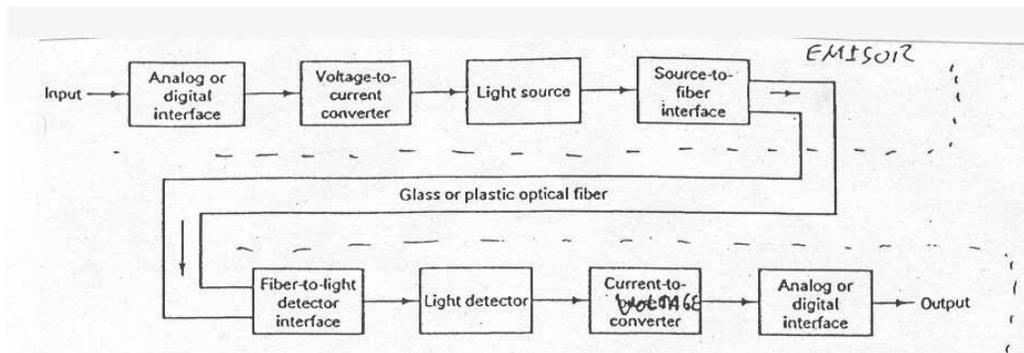


Figura 3.5: Elementos de un sistema de comunicación mediante fibra óptica.

- Dispositivos que emiten luz: Son diodos led (del inglés *Light Emitting Diode*) o diodos emisores de luz. Emiten luz proporcional a la corriente que circula por ellos. También pueden ser los diodos ILD o diodos de inyección de láser.
 - Interfaz fuente-fibra: este dispositivo se encarga de introducir en la fibra óptica la máxima cantidad de luz posible de la generada por el dispositivo emisor. Suele consistir en un sistema de espejos que recogen la luz generada por el emisor y la dirigen al extremo de la fibra.
- En el receptor tenemos los componentes opuestos.
- Interfaz fuente-fibra: es el conjunto de lentes dispuestas de tal forma que hagan llegar al detector de luz la mayoría de la luz procedente de la fibra óptica.
 - Detectores de luz: los detectores son diodos PIN o fotodiodos. Estos dispositivos generan una intensidad de corriente proporcional a la luz que les llega. Son los dispositivos complementarios de los diodos LED o ILD.
 - Convertidor de corriente-tensión: Convierte de nuevo la señal de corriente proporcionada por los detectores en una señal de tensión.
 - Interfaz analógico-digital de salida: Es el dispositivo complementario al interfaz de entrada.

3.3. Clasificación de las fibras ópticas. Propiedades

Toda fibra óptica tiene que tener un núcleo por donde circula la luz (y por tanto debe ser transparente). Normalmente el núcleo se fabrica con fibra de vidrio. El núcleo es el único elemento común a todas las fibras ópticas. No obstante, un cable de fibra óptica puede tener los siguientes elementos:

- Revestimiento del núcleo
- Tubo protector
- Buffers de relleno y amortiguación
- Elementos de fuerza
- Envuelta protectora

3.3.1. Clasificación de las fibras ópticas

Por otra parte, independientemente de su construcción, las fibras ópticas se pueden clasificar en base a dos criterios:

- Modo de propagación de la luz por el interior de la fibra óptica:

Cuando se habla de fibras ópticas, la palabra “modo” se refiere al camino o ruta que puede seguir un rayo de luz que viaja por la fibra.

- **Fibra óptica monomodo.**

En este tipo de fibra óptica el núcleo es tan estrecho que prácticamente la luz sólo puede ir paralela al eje del núcleo (sólo 1 camino). La figura 3.6 ilustra los posibles modos de propagación.

- **Fibra óptica multimodo.**

Este tipo de fibra tiene un núcleo mucho más ancho (micras de diametro) y al ser mucho más ancho permite diversos modos. El modo principal o modo de orden 0 es la ruta directa (paralela al eje del núcleo). Un modo o ruta es de orden

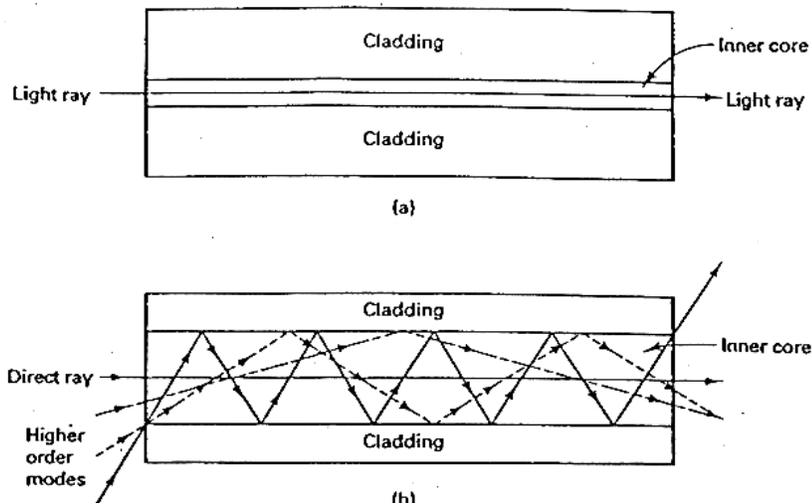


Figura 3.6: *Modos de propagación de la luz por el interior de una fibra óptica.*

superior si sigue trayectorias más oblicuas al eje de la fibra. Así, un modo es de orden superior a otro si es más transversal al eje de la fibra, tal como muestra la figura 3.6 .

- Perfil de índice

El perfil de índice es una representación gráfica del índice de refracción de la fibra a lo largo de la distancia radial, desde el eje del núcleo hasta el perímetro de la fibra.

El perfil de índice puede ser escalonado o gradual, tal como muestra la figura 3.7. En ella se puede observar que una fibra con el perfil de índice escalonado es aquella fibra cuyo índice de refracción es uniforme en todo el núcleo. Por ello el perfil de índice resulta en una curva con “escalones”, como su propio nombre indica. La fibra óptica de perfil de índice gradual se caracteriza porque el índice de refracción no es igual en todo el núcleo, sino que es mayor en el eje del núcleo y es mínimo en los bordes del mismo.

Estos dos criterios nos configuran los tipos de fibra óptica existentes en el mercado:

1. Fibra óptica monomodo de índice escalonado:

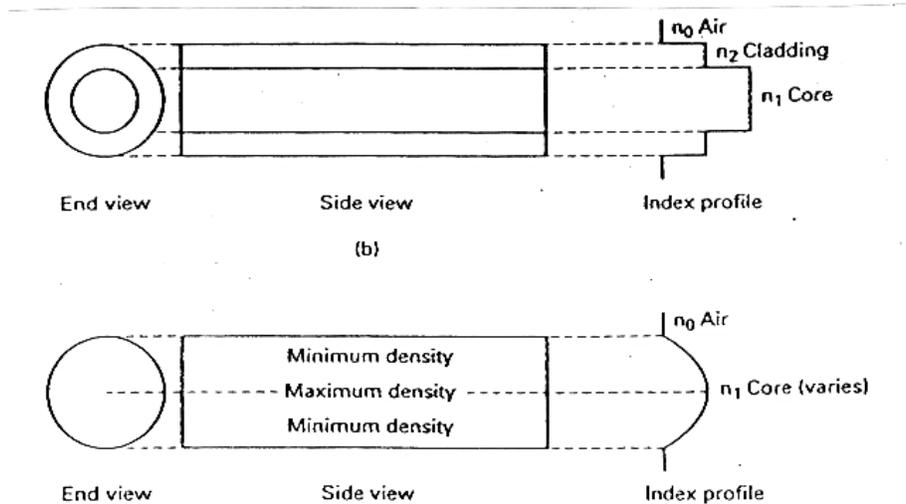


Figura 3.7: *Perfiles de índice.*

Por ser monomodo tiene un núcleo lo suficientemente estrecho para que la luz tenga que ser casi paralela al eje del núcleo. El índice de perfil es escalonado, pues al ser el núcleo tan pequeño no puede haber variación alguna en el perfil del núcleo.

El problema de este tipo de fibra es el de su apertura. La apertura es el mayor ángulo con el que la luz puede incidir en el extremo de la fibra y permanecer en el interior del núcleo. Este tipo de fibra tiene una apertura muy pequeña, ya que solo permite trayectorias de la luz paralelas al eje del núcleo. Además este tipo de fibras es de difícil construcción, y resultan caras. Otro problema que presentan es que tienen un radio de curvatura muy grande, es decir, no puede instalarse la fibra siguiendo curvas muy cerradas, ya que la luz debe ir casi paralela al núcleo. Por otro lado, tiene la ventaja de que tiene muy pocas pérdidas, y por tanto tiene mayor ancho de banda que las fibras multimodo. Se suelen utilizar como troncales telefónicas.

En las fibras ópticas multimodo como cada modo sigue un camino resulta que de todos los rayos de luz que entran en la fibra en un instante dado, cada uno recorre una distancia distinta, y por tanto cada rayo tardará un tiempo distinto en llegar al extremo opuesto de la fibra. (dispersión modal).

2. Fibra óptica multimodo de índice escalonado.

Las fibras ópticas multimodo de índice escalonado son similares a las monomodo, excepto en que tienen un núcleo mucho más ancho. Dado que permite diversos modos de propagación de la luz, la apertura de este tipo de fibras es mucho mayor que en las fibras monomodo. Adicionalmente admiten un radio de curvatura mayor, se pueden instalar siguiendo curvas más cerradas. Además su construcción es más barata que la de las fibras ópticas monomodo, y su coste es menor.

3. Fibra óptica multimodo de índice gradual.

Estas fibras se caracterizan por no tener un índice de refracción uniforme en todo el núcleo. El índice de refracción es máximo en el eje de la fibra y va disminuyendo conforme nos vamos alejando al radio exterior, es decir, máximo en el centro y mínimo en los bordes.

En los demás tipos de fibras la refracción de la luz se produce sólo en el borde del núcleo, ya que este tiene un índice de refracción de perfil constante. Sin embargo, en este tipo de fibra la refracción se produce en TODO el núcleo. Los rayos de luz pueden entrar por el extremo de la fibra siguiendo diversos modos. Sin embargo, como el índice de refracción varía dentro del propio núcleo, los rayos pasan continuamente de un medio denso a otro menos denso ($n_1 > n_2$) conforme se van alejando del eje del núcleo, es decir, se van refractando continuamente, tal como muestra la figura 3.8. De esta forma, cuando llegan al borde del núcleo la refracción hace que se vayan desviando de nuevo hacia el centro de la fibra, ya que comienzan a pasar de un medio menos denso a otro más denso. De esta forma, los rayos no llegan a incidir en los bordes del núcleo, y se propagan por refracción.

Aunque el núcleo es ancho y permite diversos modos de propagación, resulta que aunque los rayos sigan distintas trayectorias, los que siguen trayectorias más alejadas del centro van por un medio menos denso, y por tanto se propagan más rápido. Ello hace que la dispersión que presenta esta fibra en los pulsos de luz no sea tan grande como en las fibras multimodo de índice escalonado.

3.3.2. Propiedades

Ángulo de aceptación.

El ángulo de aceptación de una fibra óptica es el máximo ángulo externo de incidencia con el que puede incidir un rayo de luz en el extremo de una fibra óptica y permanecer dentro del núcleo.

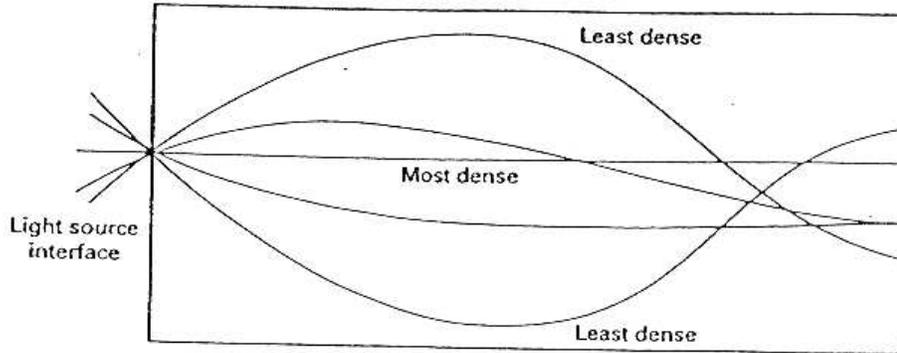


Figura 3.8: *Fibra óptica multimodo de índice gradual.*

La figura 3.9 ilustra el cálculo del ángulo de aceptación de una fibra óptica con un índice de refracción del núcleo n_1 , un índice de refracción del revestimiento de n_2 y cuyo extremo está en un medio con un índice de refracción n_0

Todos rayo de luz que incida en el extremo de la fibra con un ángulo menor que θ_{in} se quedará en el interior del núcleo de la fibra óptica. Efectivamente, para todo ángulo menor que el ángulo de incidencia θ_{in} va a resultar en un rayo cuyo ángulo de refracción en el interfaz núcleo-revestimiento será superior al ángulo crítico, y por tanto el ángulo de refracción en ese interfaz será mayor de 90° . Es decir, el rayo de fibra será refractado (reflejado) de nuevo hacia el interior del núcleo. Es decir,

$$si \quad \alpha \leq \theta_{in} \rightarrow \beta \geq \theta_c \rightarrow \delta \geq 90^\circ$$

con lo que el rayo de luz refractado permanecerá en el núcleo.

Vamos a calcular θ_{in} a partir de θ_c , tal como muestra la figura 3.9

Si aplicamos la ley de Snell a la refracción ocurrida en el interfaz núcleo-medio exterior del extremo de la fibra, tenemos que

$$n_0 \sin \theta_{in} = n_1 \sin \theta_1 \quad (3.1)$$

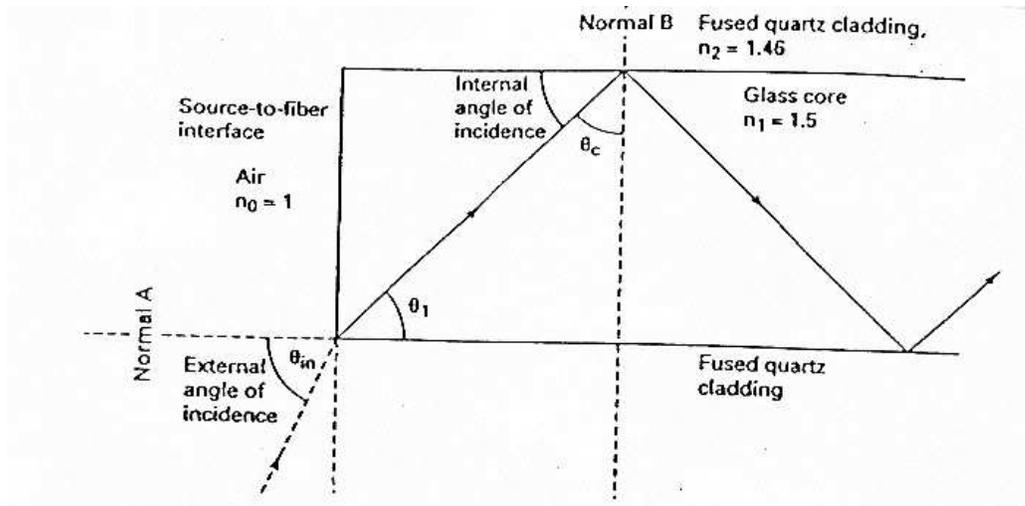


Figura 3.9: Cálculo del ángulo de aceptación.

Sin embargo, se debe cumplir que

$$\theta_1 = 90 - \theta_c$$

ya que las normales de ambos interfaces son perpendiculares, y por tanto la suma de ambos ángulos debe sumar 90° . Por tanto,

$$\sin \theta_1 = \cos \theta_c$$

con lo que podemos expresar el ángulo de incidencia en el extremo de la fibra en función del ángulo crítico:

$$\sin \theta_{in} = \frac{n_1}{n_0} \cos \theta_c$$

Dado que el coseno se define como el cateto contiguo partido por la hipotenusa, si expresamos el espacio como velocidad por tiempo, tenemos que el coseno de θ_c podemos definir como

$$\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}t}{n_1 t} \quad (3.2)$$

Por tanto,

$$\sin \theta_{in} = \frac{n_1}{n_0} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$$

$$\theta_{in} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right)$$

Cono de aceptación.

Definimos el cono de aceptación como el cono resultante de girar el ángulo de aceptación 360° .

Apertura numérica (NA).

La apertura numérica es un parámetro que normalmente aparece en las especificaciones técnicas de una fibra óptica. Según el tipo de fibra que estemos considerando a apertura numérica se da en un formato u otro, pero en ambos casos es una medida del ángulo de aceptación de la fibra óptica.

- Fibra óptica multimodo escalonada.

$$NA = \sin \theta_{in}$$

- Fibra óptica multimodo de índice gradual.

$$NA = \sin \theta_c$$

3.3.3. Pérdidas existentes en una fibra óptica

■ Pérdidas por absorción.

Ocurren por imperfecciones en la fibra óptica y absorben una cierta cantidad de luz. Son:

- Absorción ultravioleta.

Los electrones de valencia del material de la fibra óptica se ionizan por el paso de la luz y hace que absorban cierta cantidad de luz. Como resultado la fibra se calienta.

- Absorción infrarroja.

Los fotones de luz son absorbidos por los átomos del núcleo y esta absorción se transforma en vibraciones mecánicas.

- Absorción por resonancia de iones.

Es una característica inherente al proceso de fabricación. Cuando la fibra está en estado semilíquido se forman pequeños iones de hidrógeno (OH^- , moléculas de agua ionizadas) y éstas absorben luz.

- Absorción de scattering (Rayleigh).

Este tipo de absorción también tiene que ver con el proceso de fabricación de la fibra óptica. Cuando está en estado semilíquido la fibra es sometida a un proceso de estiramiento. En este proceso pueden aparecer pequeñas microcurvas en el interior del núcleo, que van a provocar que los rayos que incidan en ellas sean difractados.

Todos estos tipos de absorción dependen de la longitud de onda de la luz que circule por el interior de la fibra, es decir, depende de la frecuencia de la luz, ya que $\lambda = \frac{c}{f}$. La figura 3.10 muestra las curvas de absorción producidas por cada uno de los tipos de absorción estudiados en función de la longitud de onda.

A partir de esta gráfica podemos deducir cuáles son las mejores longitudes de onda para que la fibra óptica tenga la menor pérdida por absorción. A estas longitudes de onda se les denomina **ventanas de emisión**:

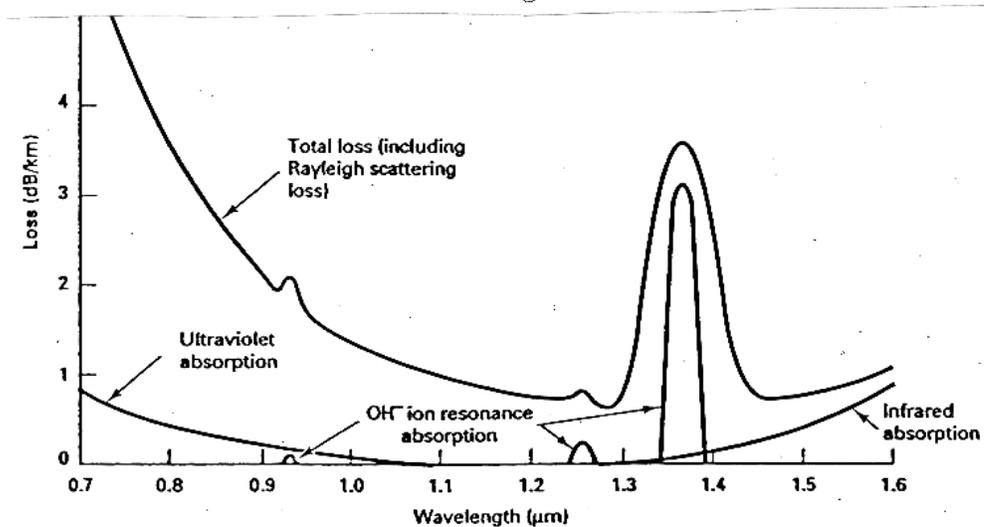


Figura 3.10: Absorción de la luz en función de la longitud de onda.

- A las longitudes de onda que van de 0.7 hasta 1 micra se denominan primera ventana de emisión.
- A las longitudes de onda que van de 1.2 hasta 1.3 micras se dice segunda ventana de emisión.
- A las longitudes de onda que van de 1.4 a 1.6 se llama tercera ventana de emisión.

Una de las especificaciones técnicas que proporcionan los fabricantes es la atenuación o las prestaciones de la fibra en las diversas ventanas de emisión.

■ **Dispersión cromática.**

El índice de refracción de un material es función de λ ,

$$n_1 \rightarrow f(\lambda)$$

y por tanto, cuando por una fibra óptica mandamos luz de distintas longitudes de onda (frecuencias) resulta en que unas frecuencias van a ser propagadas a mayor velocidad que otras. Por tanto, un pulso de luz que comienza a propagar todas sus frecuencias en

el mismo instante, resultará en que en el otro extremo de la fibra no van a llegar todas las frecuencias del pulso al mismo tiempo. Es decir, el pulso recibido en el extremo receptor es un pulso de menor amplitud y mayor anchura que el pulso original.

■ **Pérdidas por radiación.**

Ocurren cuando existen curvas en el recorrido que hace la fibra óptica. Estas curvas generan unas pérdidas de luz ya que al hacer la curva habrá rayos de luz cuyo índice de refracción les permita ser refractados hacia dentro de la fibra óptica, pero otros se saldrán.

■ **Dispersión modal.**

Afecta sobre todo a la fibra óptica multimodo de índice escalonado. En esta fibra óptica los rayos de luz pueden incidir siguiendo distintos modos o rutas, y todos van a la misma velocidad. Por tanto, como cada rayo de luz va por una ruta, cada rayo llegará en un instante distinto al extremo del cable. Ello provoca también la dispersión de los pulsos de luz, es decir, que un pulso cuadrado y de corta duración se traduzca en pulsos más anchos, de bordes más redondeados y de menor amplitud, tal como muestra la figura 3.11

La fibra óptica multimodo de índice escalonado tendrá mayor dispersión modal que la fibra óptica de índice gradual, ya que en esta última la luz sigue distintas rutas pero el índice de refracción no es constante en todo el núcleo, de tal forma que la velocidad de propagación es mayor en las rutas más largas.

■ **Pérdidas por acoplamiento.**

Normalmente la fibra óptica tiene un receptor y un emisor. Por muy bien que acoplemos la fibra óptica al emisor y al receptor siempre habrá algún rayo de luz que va a salir al exterior del sistema. De igual forma, si se realiza un empalme de dos segmentos de fibra óptica, surgen también pérdidas por acoplamiento. Estas pérdidas pueden surgir por tanto en:

- Acoplamiento fuente-fibra óptica
- Acoplamiento fibra óptica-receptor
- Acoplamiento fibra óptica-fibra óptica

Los tipos de pérdidas existentes por acoplamiento (ver figura 3.12) son los siguientes:

- *Pérdidas por desplazamiento axial.* Una fibra óptica no cuadra con la otra fibra.

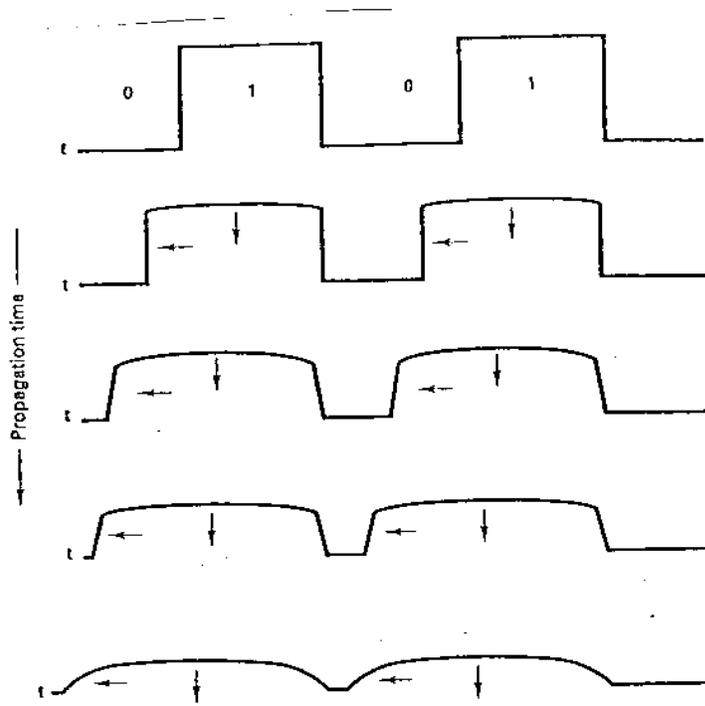


Figura 3.11: *Dispersión modal en los pulsos de luz.*

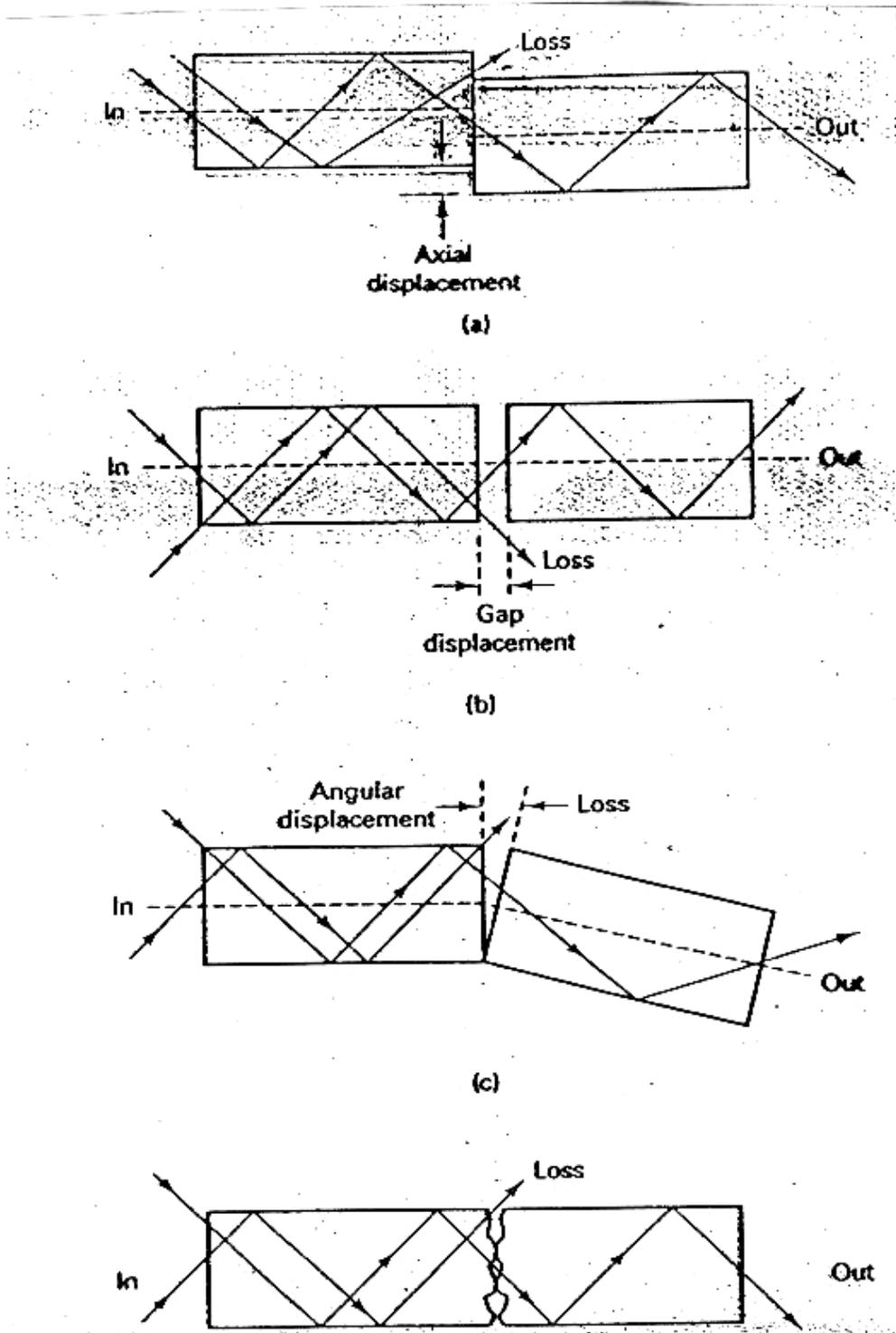


Figura 3.12: Pérdidas por acoplamiento.

- *Por desplazamiento lateral.* Cuando las dos fibras no están totalmente juntas hay una separación y algún rayo puede salirse por el agujero del acoplamiento.
- *Pérdidas por desplazamiento angular.* cuando los dos ejes no están paralelos.
- *Pérdidas debidas a pequeñas imperfecciones de la fibra ópticas.* Cuando la fibra no esté terminada en un corte limpio sino que tenga ciertas ondulaciones y al acoplar una con otra quedan agujeros.

3.4. Emisores y receptores

Emisores de fibra óptica tenemos dos tipos:

- LED: Emiten una luz proporcional a la intensidad que circulan por ellas.
- ILD¹. Son otros tipos de diodos que emiten luz láser. La principal característica es que es luz monocromática (una única longitud de onda). Por tanto esta no sufre dispersión cromática.

Ventajas de los ILD:

- La luz está muy focalizada, va dirigida, no se dispersa.
- La potencia irradiada es mayor en los ILD, lo que permite alcanzar mayores distancias.
- Alcanza velocidades de transmisión más altas.
- Emiten luz monocromática.

Desventajas:

- Precio (del orden de 10 veces más caras).
- Vida más corta.
- Dependen de la temperatura.

También tenemos dos tipos de receptores (fotodetectores):

- Diodos PIN.

¹ILD: *Injection Laser Diodes.*

- Fotodiodos de avalancha.

Ambos tiene en común que son capaces de emitir una corriente proporcional a la intensidad de luz que les llega.

4 COMUNICACIONES POR LASER Y POR MICROONDAS

4.1. Microondas

Es un sistema de comunicación por transmisión de ondas por el espacio libre. Su principal característica es que el rayo o la onda electromagnética tiene una focalidad muy grande, es decir, se propaga casi exclusivamente en una sola dirección.

Se utiliza normalmente en la transmisión vía satélite. El emisor y el receptor deben estar en línea de visión directa. Se consiguen distancias muy largas.

4.2. Láser

Son sistemas de comunicación que emiten luz de una sola longitud de onda. La longitud de onda de la luz es tal que tiene una focalidad cercana a cero (la luz no fluye en todas las direcciones sino en una única dirección, no se dispersa). Esta propiedad se usa para conectar el emisor y el receptor en una línea de visión directa. Normalmente se utiliza este medio de transmisión en sistemas que tienen que salvar grandes distancias o que deben atravesar la vía pública. Se utilizan sobretodo cuando la distancia a cubrir es muy larga.

5 TRANSMISIÓN NO GUIADA

5.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y por un campo magnético, como su propio nombre indica. Cuando por un conductor circula intensidad se crea un campo magnético inducido. La variación de intensidad produce campos magnéticos. Tanto el campo eléctrico como el campo magnético de una onda electromagnética contienen energía. Ocurre que cuando tenemos un circuito donde circula intensidad, la variación de esta crea un campo magnético. Normalmente tanto el campo eléctrico asociado a la intensidad de corriente, como el campo magnético inducido, permanecen en el interior del circuito. Así, ya vimos en las líneas de transmisión que cuando la intensidad deja de circular, el campo magnético inducido comienza a colapsarse, devolviendo la energía al circuito en forma de intensidad inducida. Sin embargo, cuando el circuito tiene unas características geométricas específicas, esta geometría del circuito impide que los campos magnético y eléctrico inducidos vuelvan al circuito, siendo irradiados al exterior del mismo en forma de onda electromagnética, que se propagará por el espacio libre. Entonces se dice que el circuito irradia una onda electromagnética al espacio libre. A este tipo de circuitos se les conoce como antenas.

Normalmente en los circuitos la irradiación de ondas no es deseable, se evita que la energía sea irradiada al exterior. Sin embargo, cuando deseamos precisamente que el espacio libre sea el medio de transmisión, entonces debemos diseñar el circuito para que libere la máxima energía en forma de ondas electromagnéticas.

5.1.1. Definiciones

- Onda electromagnética:

Una onda electromagnética es una onda formada por un campo eléctrico y un campo magnético, que pueden tener cualquier dirección, e incluso pueden ser perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, tal como muestra la figura 5.1.

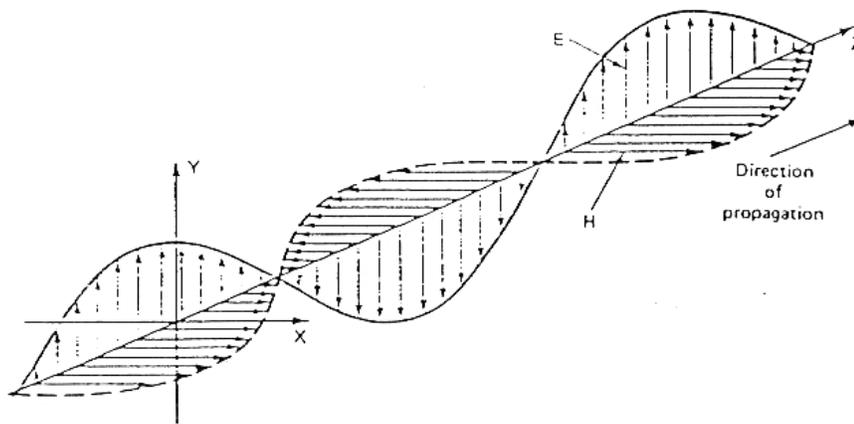


Figura 5.1: Onda electromagnética polarizada verticalmente.

- Polarización de onda electromagnética:

Definimos la **polarización** de una onda electromagnética como la dirección que tiene el campo eléctrico de la onda.

- Frente de ondas:

Definimos el frente de ondas como la proyección en un plano de todos los puntos de la onda con la misma fase.

- Fuente de ondas isotrópico:

Definimos Fuente de ondas isotrópica como una fuente de ondas que emite de igual forma en todas las direcciones. De esta forma, una fuente de ondas isotrópica emitirá ondas cuyo frente de ondas será circular.

5.1.2. Propiedades Físicas básicas que influyen en la transmisión de ondas electromagnéticas

1. Reflexión de las ondas.

Las ondas electromagnéticas, a las que también denominaremos ondas de radio (ondas electromagnéticas en el espacio libre) son reflejadas por cualquier medio conductor, incluida la superficie de la Tierra.

Si una onda es reflejada resulta que el ángulo de incidencia es igual que el ángulo de reflexión. Una reflexión completa de una onda electromagnética ocurre sólo cuando el campo eléctrico es perpendicular al elemento reflectante. Entonces ocurre que $\theta_R = 1$ y $\Gamma = 1$ (ver figura 5.1), y la magnitud de la onda reflejada es igual a la magnitud de la onda incidente.

De la misma forma, si la superficie reflectante es paralela al campo eléctrico de la onda, entonces esta es absorbida completamente, y la energía de la onda se disipa en forma de corriente que circula por dicho conductor. En otras palabras, todo circuito cuya superficie sea paralela a la polarización de la onda es una antena receptora, que no refleja la onda sino que la absorbe en su totalidad.

Cuando una onda electromagnética se refleja, la polarización de la onda cambia en 180 grados. Si se refleja totalmente la dirección de propagación cambia en un ángulo igual al ángulo de incidencia.

2. Refracción de las ondas.

Cuando pasan de un medio a otro medio de distinta densidad, las ondas sufren refracción, tal como hemos visto en el capítulo anterior. Se cumple la ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_{in} = n_2 \sin \theta_R$$

3. Difracción de las ondas.

La difracción permite que las ondas que se propagan en línea recta puedan superar obstáculos. La difracción se produce por el principio de Huygens, que dice:

Cada punto en un frente de ondas esférico puede ser considerado como la fuente de un frente esférico secundario.

5.2. Transmisión por radio

La transmisión por radio consiste en la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre.

5.2.1. Tipos de transmisión por radio.

Las ondas electromagnéticas en el espacio libre reciben distinto nombre, dependiendo de la zona por donde se propaguen:

- Transmisión de ondas de superficie. (ground waves)

Estas ondas no se propagan por el aire sino por la superficie de la Tierra. Se incluye el agua, mar y capas inferiores de la Tierra (subsuelo).

Para que una onda electromagnética sea transmitida por la superficie de la Tierra la polarización de la onda debe ser vertical, porque si fuera horizontal la tierra absorbería la onda y no se propagaría.

Ocurre que la propagación de ondas de superficie es mejor en el agua, y por eso este tipo de transmisión por radio se reduce a aplicaciones náuticas.

- Ondas aéreas (space wave).

Encontramos de dos tipos:

- Directas.

Es una onda que se propaga directamente desde la antena emisora a la receptora, y por tanto necesita que ambas antenas estén en una línea de visión directa.

- Reflejadas.

Son aquellas que llegan a la antena receptora después de ser reflejadas en algún punto intermedio de la trayectoria.

El problema de las ondas aéreas es cuando llegan una onda directa y una reflejada a una misma antena. Llegan dos ondas, pero como cada una sigue un camino distinto y se propagan a la misma velocidad, llegan desfasadas. Es decir, tendremos interferencias. En general, las ondas aéreas circulan únicamente por la biosfera (capa inferior de la atmósfera).

- Ondas Ionosféricas (sky waves)

Son ondas que se propagan por la ionosfera. Cubren distancias mucho más grandes que la aéreas.

El modo de propagación es el siguiente: se envía una onda hacia la ionosfera, y conforme la onda va subiendo, la atmósfera es menos densa y cambia el índice de refracción. Ello provoca una refracción continua de la señal, haciendo que la onda vuelva hacia la superficie de la tierra. Cuando la onda incide en la superficie, es reflejada, rebotando de nuevo hacia la ionosfera. Es decir, la onda se propaga “a saltos”, y por eso cubre mayores distancias que las ondas aéreas.

- Comunicación por vía satélite.

Este tipo de comunicación vamos a estudiarlo en un apartado específico, pero no es más que un caso particular de propagación de las ondas por el espacio libre.

Los tipos anteriores de ondas tienen en común que utilizan la transmisión no guiada, es decir, transmisión de las ondas electromagnéticas por el espacio libre.

5.3. Comunicación vía satélite

Un satélite es un repetidor situado en el cielo, que sirve para reflejar ondas enviadas desde un punto de la superficie terrestre y enviarlas a otro punto de la misma. El satélite conocido más antiguo es la Luna, que fue el primer satélite utilizado para comunicaciones.

5.3.1. Clasificación de los satélites

Existen varios criterios a la hora de clasificar los satélites:

-Primer criterio:

- Pasivos: simplemente refleja la señal, no contiene electrónica que permita reconstruir o amplificar las señales antes de enviarlas de nuevo a la tierra. Son bastante ineficientes, pero muy sencillos de mantener.
- Activos: Lleva dispositivos electrónicos capaces de amplificar la señal que le llega antes de reenviarla.

-Segundo criterio:

- Orbitales.

Estos satélites giran alrededor de la Tierra con una velocidad distinta a la de la Tierra. Los satélites orbitales se dice que tienen una órbita prógrada si giran en el mismo sentido que la Tierra y a mayor velocidad que esta. Se dice que tienen una órbita retrógrada si o bien giran en el mismo sentido que la tierra pero a una velocidad más lenta, o bien se desplazan en sentido contrario a la Tierra.

Los satélites orbitales siempre están en movimiento con respecto a un punto fijo de la Tierra. Ello hace que sólo se puedan utilizar mientras están en una zona concreta, sólo en la fase visible por la estación emisora y receptora. Por otro lado, las estaciones que utilizan este tipo de satélite tienen que tener dispositivos que vayan orientando continuamente las antenas. Por otro lado, la ventaja de estos satélites consiste en que no necesitan propulsión, puesto que la fuerza centrífuga proporcionada por su velocidad contrarresta a la fuerza de la gravedad de la Tierra.

- Geoestacionarios o geosíncronos.

Son satélites que giran alrededor de la tierra en el mismo sentido y a la misma velocidad angular que ésta. La mayor ventaja de estos satélites es que están disponibles todo el tiempo, puesto que no se mueven con respecto a un punto fijo de la tierra.

La figura 5.2 muestran distintas posiciones (en altura) y distintas propiedades para los distintos tipos de satélites existentes. Los satélites GEO (Órbita terrestre geoestacionaria, *Geostationary Earth Orbital* en inglés) son los únicos de órbita geoestacionaria. Los satélites MEO (Órbita terrestre media) se desplazan lentamente (vistos desde la tierra) y tardan unas 6 horas en dar la vuelta a la tierra. El sistema de 24 satélites GPS son un ejemplo.

Además de las posiciones de los satélites, las frecuencias en las que estos transmiten son un tema de acuerdo internacional. La figura 5.3 muestra una tabla con las distintas bandas de frecuencia específicas que la ITU ha asignado para los usuarios de satélites.

5.3.2. Definición de patrón radiación de un satélite

También conocido como huella, se denomina patrón de radiación de un satélite a la zona de la Tierra a la que pueden llegar las transmisiones del satélite.

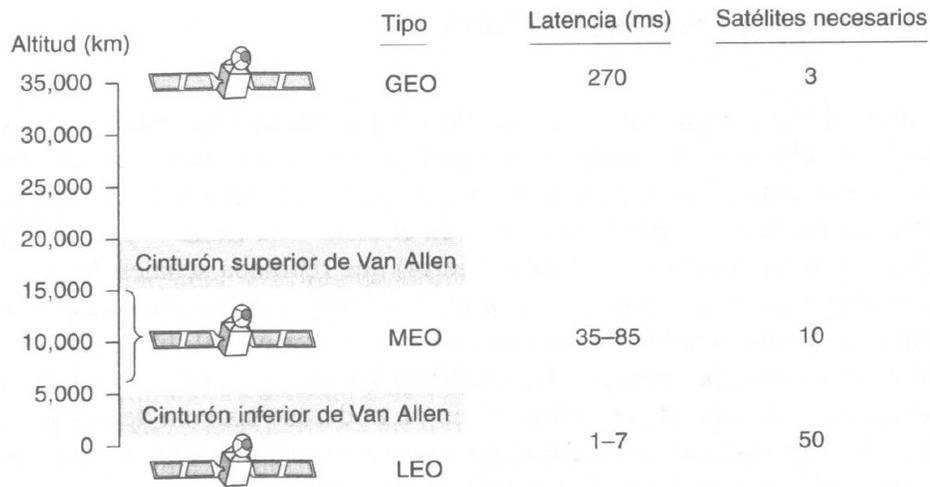


Figura 5.2: Tipos de satélites.

Banda	Enlace descendente	Enlace ascendente	Ancho de banda	Problemas
L	1.5 GHz	1.6 GHz	15 MHz	Bajo ancho de banda; saturada
S	1.9 GHz	2.2 GHz	70 MHz	Bajo ancho de banda; saturada
C	4.0 GHz	6.0 GHz	500 MHz	Interferencia terrestre
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	Lluvia
Ka	20 GHz	30 GHz	3500 MHz	Lluvia, costo del equipo

Figura 5.3: Principales bandas de satélite.

5.3.3. Ángulos de visión de un satélite

Se denomina ángulo de visión de un satélite a los ángulos necesarios para orientar una antena hacia un satélite. Son dos:

- ángulo de elevación:

Es el ángulo formado por la línea horizontal que une la estación terrestre con la vertical del satélite y la línea recta que une el satélite con la estación, tal como muestra la figura 5.4. El mínimo ángulo de elevación aceptable son 5 grados.

- Azimut:

Es el ángulo (medido en grados desde la dirección norte en sentido de las agujas del reloj) que forma la dirección norte con la dirección a la que apunta la antena.

5.3.4. Modelo de interconexión de un satélite

Tiene tres elementos.

- Enlace Tierra-satélite.
- Modelo del repetidor.
- Enlace satélite-Tierra.

En los tres elementos el modelo es parecido. En ellos se modula la señal, se filtra y se amplifica, de tal forma que en el enlace tierra-satélite las frecuencias son unas y en el enlace satélite tierra las frecuencias difieren siempre en al menos 2 GHz. De esta forma se evita que unas ondas interfieran con otras.

Los satélites generalmente no transmiten una sola señal sino múltiples, utilizando multiplexación en el tiempo o en la frecuencia.

5.4. Radio celular

El sistema celular de radio es una técnica desarrollada con el fin de incrementar la capacidad disponible para el servicio de telefonía móvil sobre ondas de radio.

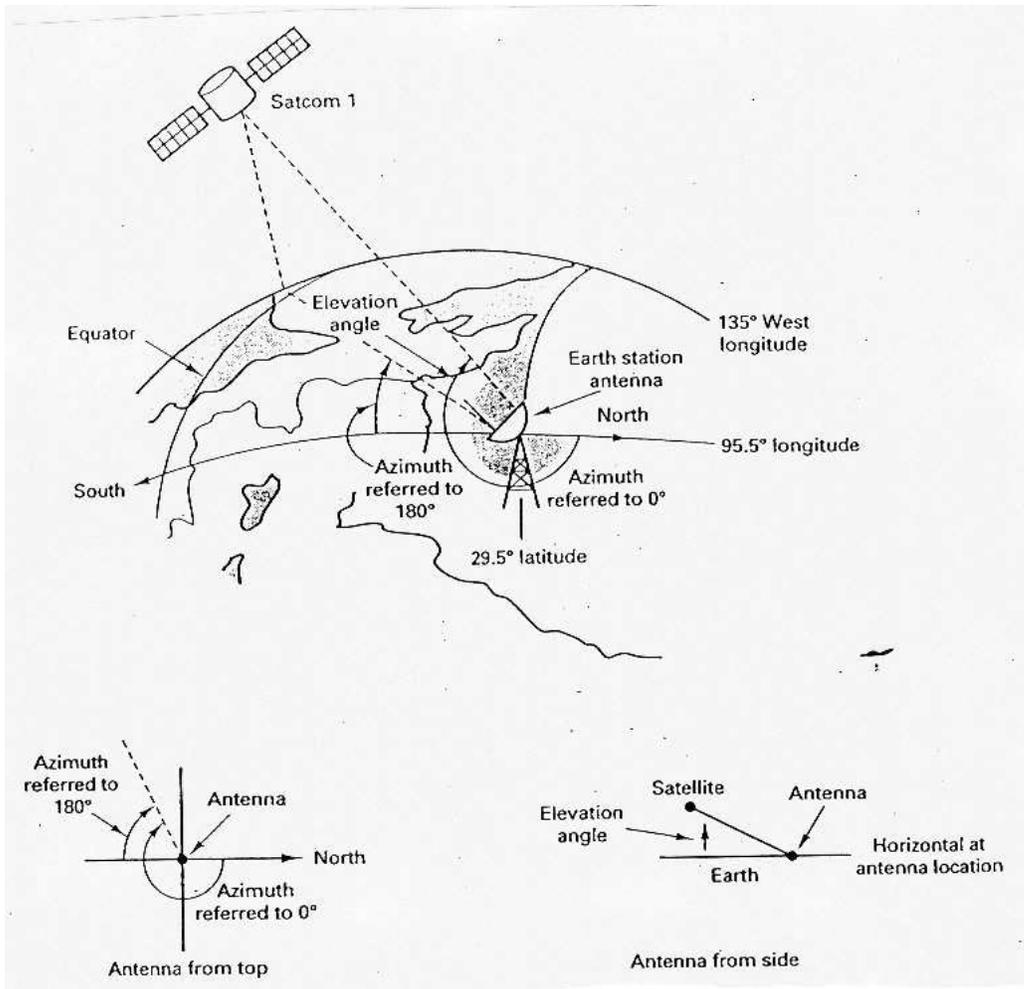


Figura 5.4: *Ángulos de visión de un satélite.*

5.4.1. Organización de una red celular

Geometría celular

La esencia de una red celular consiste en el uso de múltiples transmisores de baja potencia (del orden de 100 W o menos). Dado que el rango o alcance de un transmisor de estas características es pequeño, el espacio se divide en áreas relativamente pequeñas, denominadas **celdas**, cada una de las cuales dispone de su propia antena. Estas son las tan polémicas antenas de telefonía móvil. A cada celda se le asigna una banda de frecuencias y una estación base, compuesta por un transmisor, un receptor y una unidad de control. Las celdas adyacentes reciben una asignación distinta de frecuencias, para evitar interferencias, aunque celdas lo suficientemente alejadas pueden recibir la misma banda de frecuencias.

La forma de las celdas es ya toda una decisión de diseño. Tal como muestra la figura 5.5, una matriz de celdas cuadradas sería la disposición más sencilla de definir. Sin embargo, esta geometría no es la mejor. La razón es que si la anchura de una celda cuadrada es d , entonces cada celda tiene a 4 vecinas a una distancia d y otras 4 a una distancia $\sqrt{2}d$. Y ocurre que a medida que un usuario se mueve hacia el borde de la misma es deseable que todas las antenas adyacentes estén equidistantes, ya que esto simplifica la tarea de determinar cuándo cambiar al usuario de celda y a qué celda cambiarlo. Por eso es mejor un patrón hexagonal, tal como muestra la figura 5.5. El radio del hexágono es el radio de la circunferencia que lo circunscribe. Para una celda de radio R , la distancia entre el centro de una celda y el centro de cada celda adyacente es de $d = \sqrt{3}R$.

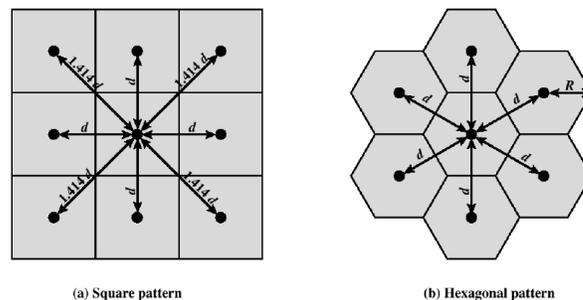
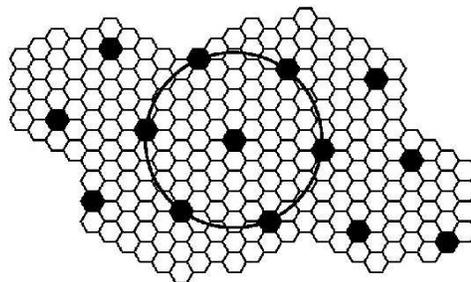
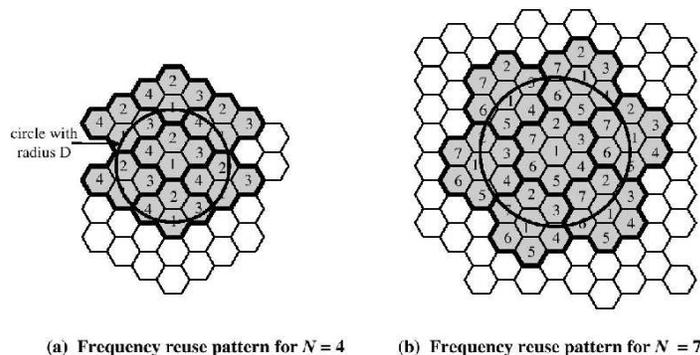


Figura 5.5: Geometrías celulares

Reutilización de frecuencias

Cada celda de un sistema celular posee un transceptor (transmisor-receptor) base. La potencia de dicho transceptor se controla cuidadosamente para permitir la comunicación dentro de la celda a una frecuencia dada y atenuando la potencia fuera de los límites de la celda. El idea es poder usar las mismas frecuencias en otras celdas cercanas. A cada celda se le asignan entre 10 y 50 frecuencias.

La cuestión clave es determinar cuántas celdas debe haber entre 2 celdas que usan la misma frecuencia para que estas dos no interfieran entre sí. La figura 5.6 muestra varios patrones. Si el patrón consta de N celdas y a cada celda se le asigna el mismo número de frecuencias, cada celda puede disponer de K/N , donde K es el número total de frecuencias asignadas al sistema. Para el sistema AMPS $K = 395$ y $N = 7$ es el patrón más pequeño que puede proporcionar aislamiento suficiente entre 2 celdas con la misma frecuencia. Por tanto, de media podrá haber 57 frecuencias por celda.



(c) Black cells indicate a frequency reuse for $N = 19$

Figura 5.6: Patrones de reutilización

En la caracterización de la reutilización de frecuencias se usan normalmente los siguientes parámetros:

- D = distancia mínima entre los centros de las celdas que utilizan la misma banda de frecuencias (llamados **cocanales**)
- R = radio de la celda
- d = distancia entre los centros de celdas adyacentes ($d = \sqrt{3R}$)
- N = número de celdas en cada patrón repetitivo, denominado **factor de utilización** (cada celda del patrón emplea una banda única de frecuencias)

En un patrón de celdas hexagonal solamente son posibles los siguientes valores de N :

$$N = I^2 + J^2 + (I \times J) \quad I, J = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5.1)$$

Por tanto, los valores posibles de N son 1,3,4,7,9,12,13,16,19,21 y así sucesivamente. Se cumple siempre la relación

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (5.2)$$

relación que también puede ser expresada como

$$\frac{D}{d} = \sqrt{N} \quad (5.3)$$

Aumento de la capacidad

Con el paso del tiempo, a medida que crece el número de usuarios del sistema el tráfico puede crecer hasta el punto de que no existan suficientes frecuencias asignadas a una celda para gestionar sus llamadas. Esto ocurre por ejemplo en los meses de verano en la costa mediterránea, donde la afluencia de turistas hace que el número de usuarios del sistema se dispare. Para hacer frente a esta situación se pueden utilizar las siguientes técnicas:

- **Adición de nuevos canales:** La planificación de redes permite diseñar sistemas sobredimensionados, de tal forma que al desplegar inicialmente el sistema no todos los canales son utilizados. La expansión puede ser gestionada ordenadamente mediante la adición de nuevos canales.
- **Uso de frecuencias prestadas:** En el caso más simples, las celdas congestionadas pueden tomar prestadas frecuencias de las celdas adyacentes. En el más sofisticado, se realiza una asignación dinámica de frecuencias a las distintas celdas.
- **División de celdas:** La distribución del tráfico y las características topográficas del terreno no son uniformes. Ello puede utilizarse para conseguir un aumento de la capacidad. Las celdas más congestionadas pueden ser divididas en celdas más pequeñas. Generalmente **las celdas estándar tienen un tamaño de 6,5 y 13 km.**, y pueden ser divididas. Como solución general, el límite práctico de subdivisión están en las celdas de 1,5 km. (aunque también está la solución de las microceldas). El problema de subdividir en celdas más pequeñas está en que el nivel de potencia debe ser reducido para mantener la señal dentro de la celda. Asimismo, conforme el usuario se mueve cambia de una celda a otra, lo que requiere traspasar la llamada de un transceptor a otro (este proceso se denomina *traspaso (handoff)*). Cuanto más pequeñas son las celdas, más frecuentes serán los traspasos. La figura 5.7 muestra de forma esquemática cómo se dividen las celdas para proporcionar más capacidad. Una reducción en un factor de F reduce el área de cobertura e incrementa el número de estaciones base que son necesarias en un factor de F^2 .

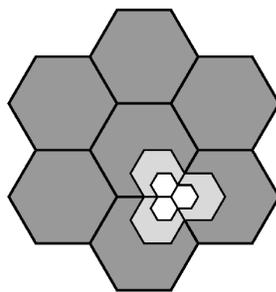


Figura 5.7: Esquema de subdivisión de celdas

- **Sectorización de celdas:** Esta técnica divide una celda en una serie de sectores en forma de cuña, cada uno de los cuales dispone de su propio subconjunto de canales. Generalmente se usan 3 ó 6 sectores por celda, y en la estación base se emplean antenas direccionales enfocadas hacia cada sector.
- **Microceldas:** A medida que las celdas se hacen más pequeñas las antenas tienen menor potencia de radiación, tanto en la estación base como en las unidades móviles. Por ello, las antenas de microceldas se trasladan de las azoteas o tejados de edificios a los laterales de edificios, farolas altas. Las microceldas son útiles en las calles de zonas congestionadas de las ciudades, en autopistas y dentro de grandes edificios públicos.

La tabla 5.8 muestra los parámetros típicos tanto para las celdas tradicionales como para las microceldas. La variación media del retardo de propagación se refiere a propagación multitrayectoria, es decir, cuando la misma señal sigue diferentes trayectorias (por reflexión de las ondas) y existe un retardo temporal entre la primera y la última recepción de la señal en el receptor. Como puede apreciarse, el uso de microceldas permite usar menor potencia y proporciona velocidades de propagación superiores.

	Macrocell	Microcell
Cell radius	1 to 20 km	0.1 to 1 km
Transmission power	1 to 10 W	0.1 to 1 W
Average delay spread	0.1 to 10 μ s	10 to 100 ns
Maximum bit rate	0.3 Mbps	1 Mbps

Figura 5.8: *Parámetros típicos de celdas y microceldas*

Para mostrar cómo la reutilización de frecuencias afecta a la capacidad del sistema, vamos a ver un ejemplo:

Sea un sistema de 32 celdas con un ancho de banda que soporta 336 canales de tráfico, un factor de reutilización de $N = 7$ y un radio de celda de 1,6 km. Calcular:

- ¿Qué área geográfica se cubre?

- ¿Cuántos canales pueden asignarse a cada celda?
- ¿Cuál es el número total de llamadas simultáneas que pueden gestionarse?
- Repetir todos los cálculos para el caso de tener un radio de celda de 0,8 km. y 128 celdas. ¿Se ha aumentado la capacidad del sistema?

El área de un hexágono de radio R viene dada por la fórmula

$$a = 1,5 \times R^2 \sqrt{3} \quad (5.4)$$

Por tanto, un hexágono de radio 1,6 km. tendrá un área de $6,65 \text{ km}^2$. Si hay 32 celdas, la superficie total de cobertura del sistema será por tanto de $6,65 \times 32 = 213 \text{ km}^2$.

La figura 5.9(a) muestra como podría ser esta disposición geográfica. En este caso, tendríamos que para $N = 7$ el número de canales por celda sería de $336/7 = 48$, con una capacidad total de canales (de llamadas gestionadas simultáneamente) de $48 \times 32 = 1.536$ canales.

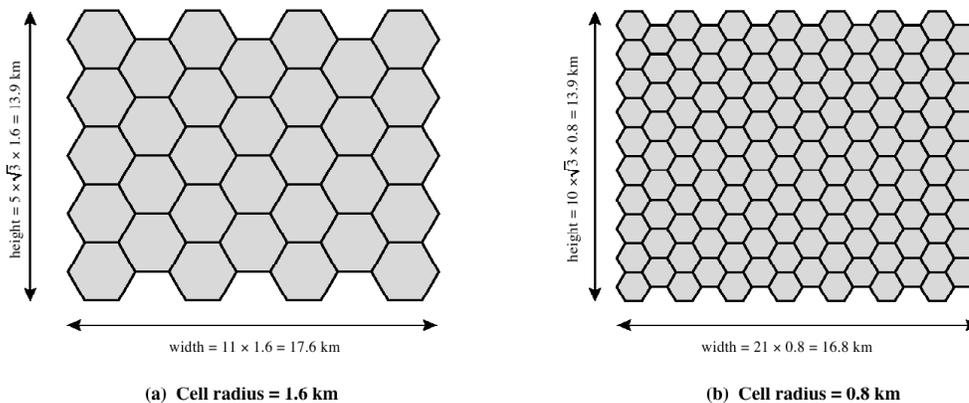


Figura 5.9: Ejemplo de aumento de capacidad

La figura 5.9(b) muestra el mismo sistema pero para un radio de celda de 0,8 km y con 128 celdas. En este caso, el área de una celda sería de $a = 1,66 \text{ km}^2$.

Por tanto, el área cubierta es de $1,66 \times 128 = 213 \text{ km}^2$, es decir, se cubre la misma área que en el caso anterior. El número de canales también es el mismo que en el caso anterior, ya que N no cambia y por tanto $336/7 = 48$.

Sin embargo, ahora la capacidad total de canales (o de llamadas simultáneas) es de $48 \times 128 = 6.144$ canales. El aumento de capacidad viene dado por el aumento de celdas y la reutilización de los mismos canales en esas nuevas celdas.

5.4.2. Funcionamiento de una red celular

Una vez estudiados los principales aspectos organizativos de las redes celulares, vamos ahora a estudiar el funcionamiento de este tipo de sistemas. Los elementos principales de un sistema celular son los que aparecen en la figura 5.10.

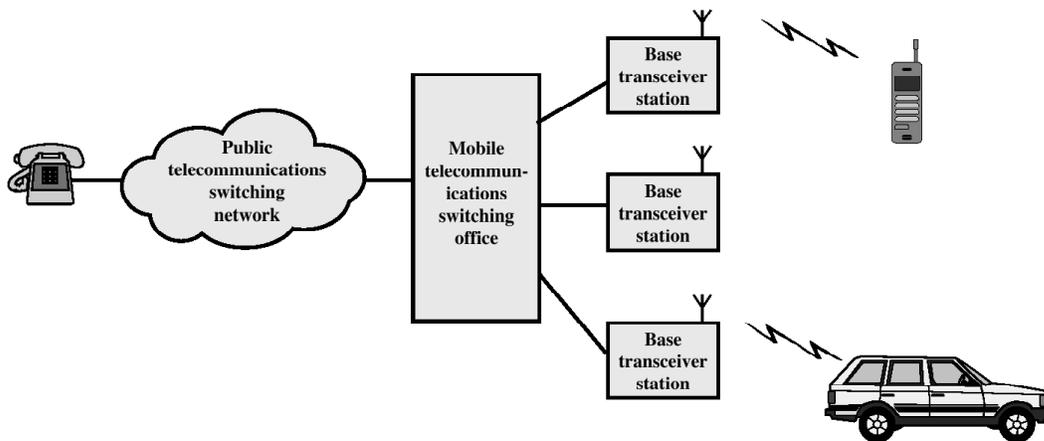


Figura 5.10: Estructura general de un sistema celular

En el centro geográfico de cada celda se encuentra la **estación base (BS, Base Station)**. Cada estación base contiene una antena, un controlador y una serie de transeptores (transmisores-receptores) para la comunicación por los canales asignados a la celda. En un instante dado pueden estar activos varios usuarios móviles, moviéndose dentro de la celda y comunicándose con la BS.

Cada estación base se encuentra conectada con una **central de conmutación de**

telecomunicaciones móviles (MTSO, Mobile Telecommunications Switching Office), de tal forma que una MTSO puede prestar servicio a varias BS. Normalmente una MTSO está dentro de una central telefónica tradicional, aunque puede ser una instalación aparte. El enlace entre una MTSO y una BS se hace normalmente mediante cableado, aunque también se puede hacer inalámbrico. La MTSO es responsable de conectar las llamadas entre unidades móviles o/y entre las unidades móviles y la red pública de telefonía fija. La MTSO se encarga de asignar un canal de voz a cada llamada, realizar los trasposos entre celdas y supervisar las llamadas para la facturación.

El funcionamiento de un sistema celular está totalmente automatizado y no precisa ninguna acción por parte del usuario, excepto la realización de llamadas. Entre la unidad móvil y la BS existen dos tipos de canales:

- **Canales de control:** se usan para intercambio de información sobre establecimiento de llamadas y la relación entre la unidad móvil y la BS más cercana.
- **Canales de tráfico:** Soportan la conexión de voz o datos entre los usuarios.

La figura 5.11 ilustra las principales funciones que desarrolla un sistema celular. Estas son las siguientes:

- **Inicialización de la unidad móvil:** Cuando se enciende la unidad móvil (véase la figura 5.11(a)), esta busca y selecciona el canal de control de mayor potencia (aquel perteneciente a la BS más cercana, normalmente). Las celdas con bandas de frecuencias diferente difunden periódicamente su señal sobre distintos canales de control. El receptor selecciona el más potente, de tal forma que la unidad móvil ha seleccionado de este modo la BS dentro de la cual operará. A continuación hay una negociación entre la unidad móvil y la MTSO (a través de la BS) para identificar al usuario y registrar su localización. Este proceso de rastreo se repite periódicamente mientras el usuario se encuentre activo, con el objeto de registrar el movimiento y la localización de la unidad móvil ¹. Si esta entra en una nueva celda, una nueva BS es seleccionada y la unidad móvil localizada de nuevo.

¹Aunque las compañías no lo mencionan, este proceso sirve también para la localización geográfica de los usuarios del móvil. Aunque en teoría esta información es confidencial, en la práctica los usuarios no tienen medio de impedir el acceso a esta información por parte de personas no autorizadas. Por ejemplo, el antiguo líder de los guerrilleros chechenos fué asesinado por el ejército ruso gracias a la localización de su teléfono móvil, mediante misiles lanzados a la celda donde se encontraba activo su móvil en aquel momento.

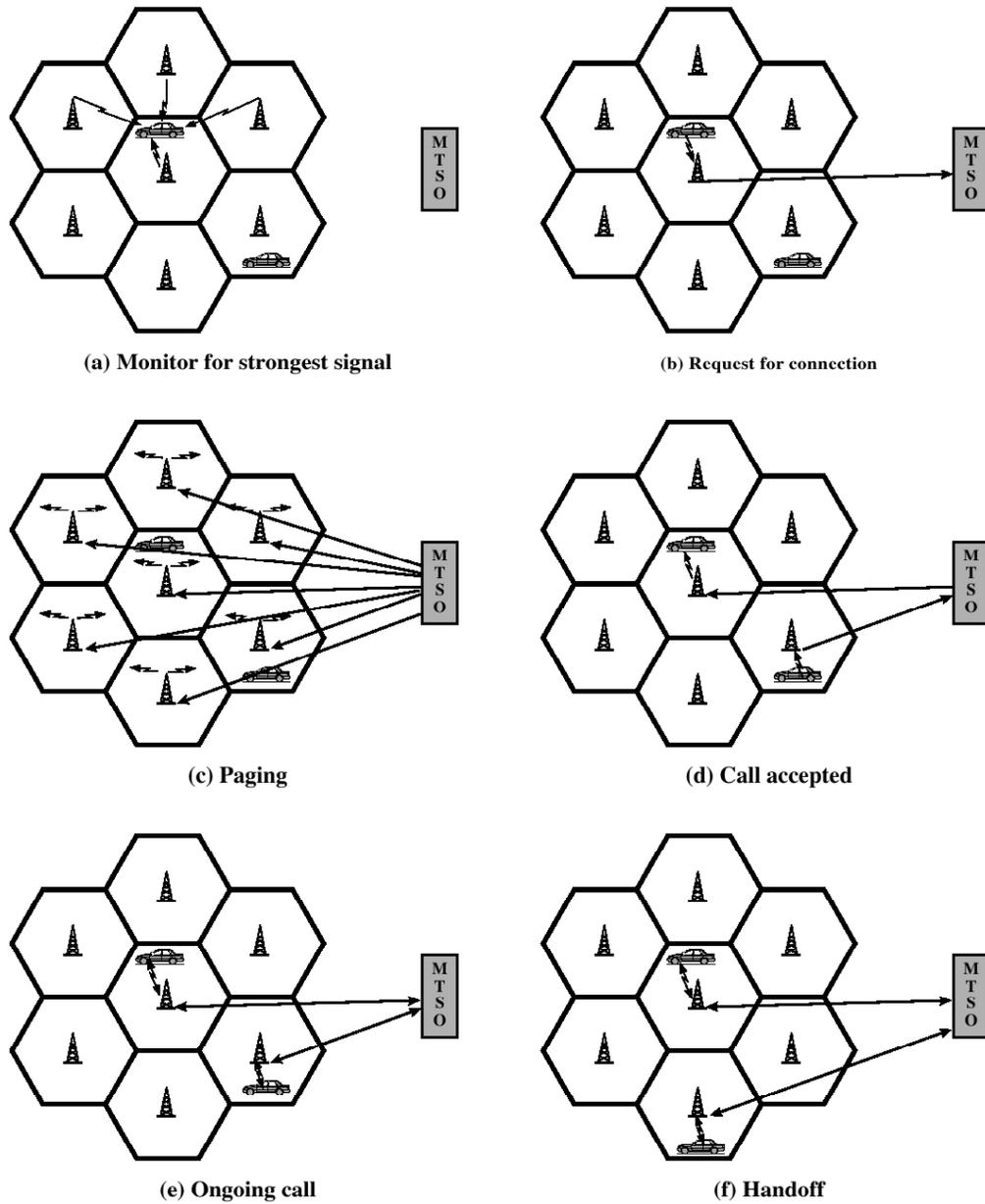


Figura 5.11: *Ejemplo típico de llamada entre móviles*

- **Inicio de llamada:** Cuando un móvil inicia una llamada a través del canal preseleccionado (véase la figura 5.11(b)), el receptor antes comprueba que el canal de establecimiento esté libre examinando la información en el canal de ida (procedente de la BS). Si se detecta libre, la unidad móvil puede transmitir por el canal de retorno hacia la BS. Esta a su vez envía la solicitud a la MTSO.
- **Localización:** La MTSO intenta completar la conexión con la unidad a la que se llama. Si se llama a un número de telefonía fija, la MTSO iniciaría la llamada por este sistema. Si la llamada es a un móvil, la MTSO envía un mensaje de localización a ciertas BS en función del número de móvil al que está llamando (véase la figura 5.11(c)). Cada BS retransmite la señal de localización en el canal de establecimiento que tiene asignado.
- **Aceptación de la llamada:** La unidad móvil destino de la llamada reconoce su número en el canal de establecimiento que monitoriza y responde a la BS, la cual envía la respuesta a la MTSO. Esta establece a su vez un circuito con entre la BS que llama y la que recibe la llamada (véase la figura 5.11(d)). Al mismo tiempo, la MTSO selecciona un canal de tráfico disponible dentro de la celda de cada BS y lo notifica a las mismas, las cuales informan a las dos unidades móviles involucradas. Tras esto, las unidades móviles sintonizan los respectivos canales que les han sido asignados.
- **Llamada en curso:** Los móviles intercambian señales de voz o datos mediante sus respectivas BS y la(s) MTSO (figura 5.11(e)).
- **Traspaso:** Si durante la conexión de las unidades móviles alguna de ellas se desplaza de una celda a otra, el canal de tráfico tiene que cambiara otro asignado por la BS de la nueva celda. El sistema realiza este cambio sin interrumpir la llamada ni alterar al usuario(figura 5.11(f)).

Para obtener información más detallada de este tipo de sistemas se puede consultar la bibliografía ([4], capítulo 14).

6 APÉNDICE: CIRCUITOS ELECTROMAGNÉTICOS

6.1. Conceptos físicos fundamentales

- AUTOINDUCCIÓN O BOBINA (L):

En una bobina o autoinducción la variación del flujo de corriente eléctrica se dice que induce un campo magnético. Inversamente, la variación de un campo magnético se dice que induce una corriente en la línea de transmisión eléctrica. La inducción se mide en Henrios.

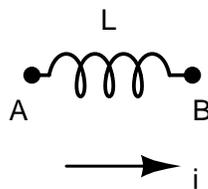


Figura 6.1: Bobina de inductancia L .

La diferencia de tensión entre los bornes de una autoinducción V_{AB} se puede expresar como

$$V_{AB} = L \frac{di}{dt} \quad (6.1)$$

Cuando circula corriente alterna (AC), tenemos:

$$i_{instantanea} = i_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (6.2)$$

y por tanto

$$\frac{di}{dt} = i_0\omega \cos(\omega t + \phi) = \omega i_0 \sin(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \quad (6.3)$$

$$V_{AB} = L\omega I_{+\frac{\pi}{2}} \quad (6.4)$$

Por tanto la impedancia reactiva es:

$$Z_L = \frac{V}{I_{+\frac{\pi}{2}}} = L\omega j \quad (6.5)$$

Es decir, la impedancia reactiva es imaginaria pura, sólo tiene una componente imaginaria pura en el semiplano positivo del plano complejo.

■ **CONDENSADOR:**

Un condensador almacena energía por el campo eléctrico que crea entre dos placas conductoras. La energía se pierde con la rotura del dieléctrico, en cuyo caso alguna carga eléctrica pasa de una placa a otra. Cuando aplicamos corriente alterna a un

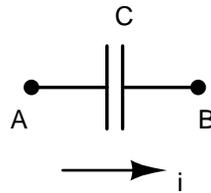


Figura 6.2: Condensador de capacidad C .

condensador se cumple que:

$$V_{inst} = V_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (6.6)$$

$$\frac{dV_{AB}}{dt} = V'_{inst} = \omega V_0 \cos(\omega t + \phi) = \omega V_0 \sin(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \quad (6.7)$$

$$i = C \frac{dV_{AB}}{dt} = C\omega V_{\frac{\pi}{2}} \quad (6.8)$$

La tensión está desfasada en $\frac{\pi}{2}$ con respecto a la intensidad.

$$V = \frac{1}{C\omega} I_{-\frac{\pi}{2}} \quad (6.9)$$

por lo tanto la inductancia capacitiva es

$$Z_C \frac{V}{I} = \frac{-j}{C\omega} \quad (6.10)$$

Es decir, la impedancia reactiva es también imaginaria pura, pero su componente imaginaria pura está en el semiplano negativo del plano complejo.

■ RESISTENCIA:

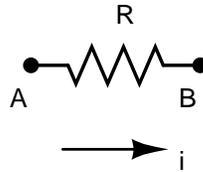


Figura 6.3: Resistencia de resistencia R .

La impedancia resistiva es

$$Z_R = R \quad (6.11)$$

Es decir, la impedancia resistiva sólo tiene componente en el eje real. En consecuencia, podemos decir que la impedancia de un circuito RLC será el módulo de número complejo. Este complejo tendrá una parte real que corresponderá a la impedancia resistiva, y una parte imaginaria que será el resultado de la suma vectorial (la resta) de las impedancias reactiva y capacitiva. Vamos a verlo:

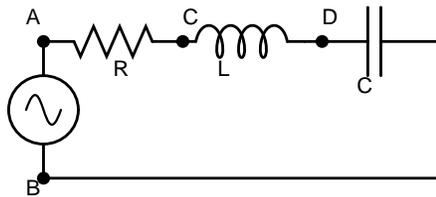


Figura 6.4: Circuito RLC.

Por la ley de ohm se cumple que la tensión en bornes es:

$$V_{AB} = V_R + V_L + V_C \quad (6.12)$$

donde,

$$V_R = IR \quad (6.13)$$

$$V_L = IL\omega j \quad (6.14)$$

$$V_C = I \frac{-j}{C\omega} \quad (6.15)$$

sustituyendo:

$$V_{AB} = IR + IL\omega j + I \frac{-j}{C\omega} = I(R + L\omega j - \frac{j}{C\omega}) \quad (6.16)$$

$$V_{AB} = I[R + (L\omega - \frac{1}{C\omega})j] \quad (6.17)$$

Por tanto, según la ley de ohm:

$$Z_{AB} = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} \quad (6.18)$$

La impedancia hace que se disipe potencia con el paso de corriente y sea más difícil la transmisión. Para una mejor propagación de la energía deberemos reducir la impedancia al máximo.

Se define la **Resonancia** como el estado de un circuito en el cual la frecuencia de la corriente alterna hace que se contrarresten los efectos capacitivos e inductivos de un circuito, es decir, $L\omega - \frac{1}{C\omega}$ se anulan.

Por tanto la **frecuencia de resonancia** es aquella frecuencia que cumple que:

$$2\pi f_R L = \frac{1}{C 2\pi f_R} \quad (6.19)$$

despejando f_R ,

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6.20)$$

Para la frecuencia de resonancia el término $L\omega - \frac{1}{C\omega}$ se anula, y por lo tanto el módulo de la impedancia es mínimo. En la frecuencia de resonancia eliminamos la componente imaginaria, quedando Z sólo con su parte real R . Es decir, el circuito ofrece la menor resistencia posible a la propagación o circulación de corriente eléctrica. Este análisis sirve también para demostrar que la resistencia que ofrece el medio de transmisión depende de la frecuencia de la señal.

6.2. Descarga de un circuito LC

Vamos a ver que ocurre ahora en un circuito LC en paralelo, como el que aparece en la figura 6.5. En este circuito podemos observar que la rama del mismo donde está la bobina contiene también una resistencia. Esta resistencia la colocamos para que represente a la R que opone la bobina cuando se calienta, así podemos considerar L como una reactancia pura. De esta forma, la bobina la separamos en su efecto conductivo y su efecto resistivo.

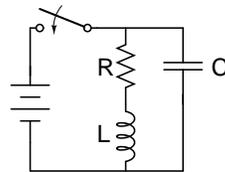


Figura 6.5: Circuito LC en paralelo.

Para comenzar supondremos que el condensador está cargado con una tensión V_c proporcionada por la batería, y vamos a ver qué ocurre si cerramos el circuito y retiramos la fuente, quedando un circuito como el que aparece en la figura 6.6:

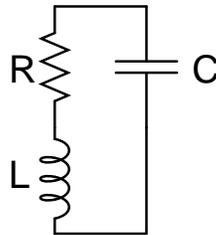


Figura 6.6: Circuito LC cerrado.

El condensador comienza a descargarse a través de la bobina, y fluye una corriente eléctrica que al pasar por la bobina crea un campo magnético $B = \frac{d\phi}{dt}$, proporcional al flujo de corriente. Esto hace que la tensión en bornes del condensador, V_c , comience a decrecer. La gráfica que muestra la variación en el tiempo de V_c es la que aparece en la figura 6.7.

El campo magnético alcanzará su máximo cuando la variación de flujo de corriente sea máximo, es decir, cuando la intensidad sea máxima. Este extremo se producirá cuando

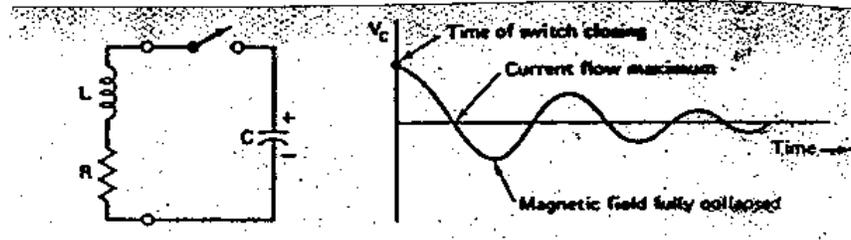


Figura 6.7: Descarga de un circuito LC

el condensador esté descargado totalmente, es decir, $V_c = 0$. Cuando el campo magnético es máximo, a partir de ese instante comienza a decrecer. Sin embargo, la variación de un campo magnético en una bobina induce una intensidad de corriente en el mismo sentido que tenía la intensidad que generó el campo magnético inducido. Esta intensidad inducida hace que la tensión en bornes del condensador, V_c , comience a tomar valores negativos, y que el condensador se vaya cargando con polaridad inversa a la que tenía originalmente, hasta alcanzar un mínimo. Si el circuito no disipara calor, este mínimo sería igual, en valor absoluto, al valor de V_c . Sin embargo, la resistencia de los diversos componentes del circuito disipan la energía en forma de calor, haciendo que este valor mínimo tenga un valor absoluto menor de V_c .

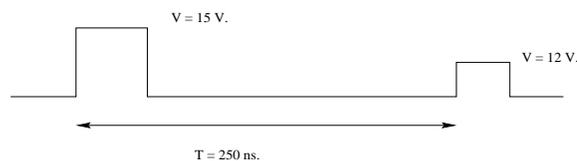
A partir de este instante, comienza de nuevo el proceso, aunque con la intensidad circulando en sentido contrario a como circulaba originalmente. De esta forma, la curva de la descarga del circuito LC es la que muestra la figura 6.7. En esta curva se cumple siempre que

$$|V_C| > |V_{C_{MIN}}| > |V_{C_2}|$$

Los intervalos de carga y descarga del condensador son iguales, siempre se carga y descarga al mismo ritmo. Este ritmo es el mismo ritmo al que se produce y se colapsa el campo magnético de la bobina, y por tanto este intervalo viene determinado por la frecuencia de resonancia.

7 EJERCICIOS

1. Sea una línea de transmisión de $Z_0 = 75\Omega$ en cuyo extremo generador conectamos una batería (corriente continua) que suministra una tensión nominal de 12 V. y que tiene una resistencia interna de 10Ω . Dibujar las gráficas de tensión e intensidad hasta $T = 2t_p$ (t_p es el retardo total introducido por la línea) en el extremo generador y de carga en los siguientes casos:
 - a) $Z_L = 75\Omega$
 - b) $Z_L = 50\Omega$
 - c) $Z_L = 10\Omega$
 - d) $Z_L = 75 + 100j\Omega$
2. Repetir el ejercicio anterior, dibujando las gráficas hasta $T = 4t_p$. Hallar el valor de t_p en segundos si la línea tiene 950 m. de longitud y una capacidad por unidad de longitud $C=70\text{ pF/m}$.
3. Con un generador de pulsos y un osciloscopio conectado al extremo generador de una línea de transmisión se obtiene la gráfica de la Figura3 (considerar que el tiempo representable en el osciloscopio es de 270 ns)



La señal es de tensión, con un semiperiodo alto de 20 nseg. El periodo de la señal es de 2000 nseg. La línea tiene una inductancia por unidad de longitud de $L= 62,5$ nH/m, y una longitud de 100 m. Hallar:

- a) La impedancia característica de la línea.
 - b) La impedancia de carga, a partir del coeficiente de reflexión.
 - c) La impedancia de carga que tendría si la señal inyectada fuera un pulso de las mismas características pero con una frecuencia distinta, de 4 MHz.
4. Hallar el retardo de propagación de una línea telegráfica de 2 km que tuviera una Capacidad por unidad de longitud de 40 pF/m y con una impedancia característica de 75 Ohmios.
 5. Una fibra óptica monomodo, compuesta por un núcleo de fibra de vidrio ($n=1,5$) y un recubrimiento de cuarzo ($n=1,46$), sumergida en un medio compuesto de alcohol, se utiliza con una fuente de luz láser acoplada al extremo de la fibra óptica con un ángulo de 16 grados. Calcular si el sistema funcionará correctamente.
 6. Hallar el ángulo de aceptación de una fibra óptica compuesta por Arseniuro de Galio ($n=3,6$) y un recubrimiento de Silicio ($n=3,4$) cuando el extremo de la fibra está sumergido en agua ($n=1,33$).
 7. Un cable RG-8 tiene una capacidad por unidad de longitud de $C=29,5$ pF/m, y una inductancia de 73,75 nH/m. Hallar la impedancia característica de un segmento de cable
 - a) De 1 m. de longitud.
 - b) De 250 m. de longitud
 8. Determinar el retardo introducido y la velocidad de propagación de un cable RG-8 (ver ejercicio anterior) de 4000 m. de longitud. Hallar la longitud eléctrica del mismo cable si se le inyecta una señal de 50 kHz. Hallar la longitud que debería tener una fibra óptica con un núcleo de fibra de vidrio ($n=1,5$) para introducir el mismo retardo que el cable RG-8 de 400 m.

Bibliografía

- [1] J. Dunlop & D. G. Smith “*Telecommunications Engineering*” , Ed. Chapman and Hall, 2nd. Ed., 1994..
- [2] A.C. Castro Lechtaler, R. J. Fusario,, “*Teleinformática para Ingenieros en Sistemas de Información*”, Ed. Reverté, 2a. ed, 1999.
- [3] Andrew S. Tanenbaum, “*Redes de Computadores*”, Ed. Prentice Hall, 4^a ed., 2003.
- [4] William Stallings, “*Comunicaciones y redes de computadores*”, Ed. Prentice Hall, 7^a ed., 2004.