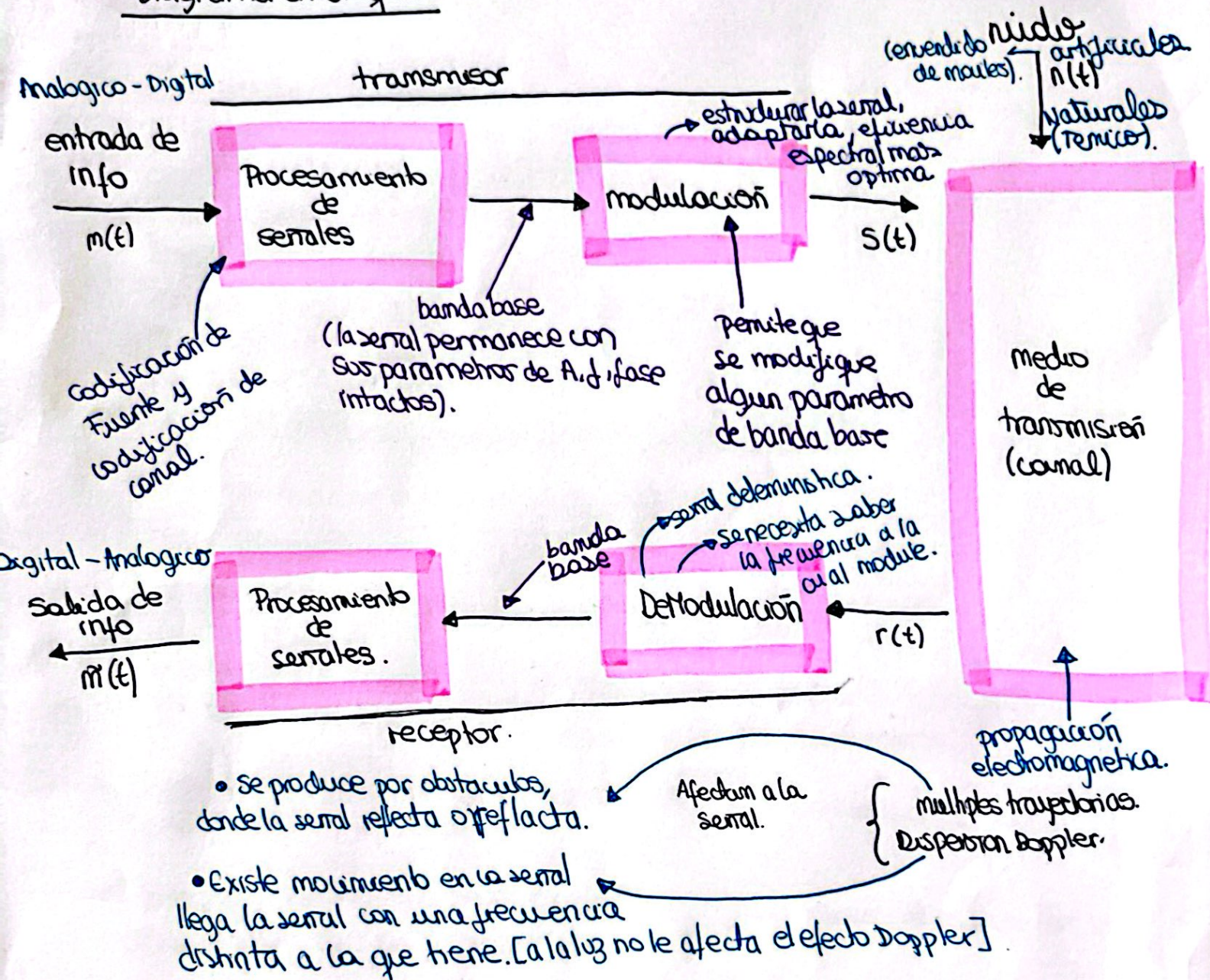


## Diagrama en bloques.



→ **comunicación multipunto:** tecnología de comunicación que permite conectar un punto central con múltiples puntos remotos.

→ **comunicación punto a punto:** conexiones inalámbricas directas entre dos o más dispositivos de red que permiten transportar datos, Internet, teléfono y video.

## PASO A PASO EXAMEN TELECO.

→ 2 ecuaciones:

### 1° Ecuación del margen del enlace

$$Md = P_{TX} - P_{CTX} + G_{TX} - FSL + G_{RX} - P_{CRX} - S_{RX}$$

donde.  $P_{TX}$  es la potencia del transmisor (dBm).

$P_{CTX}$ ,  $P_{CRX}$ : pérdida por cable y conectores (dB).

$G_{TX}$ ,  $G_{RX}$ : ganancia de las antenas (dBi).

$FSL$ : pérdida en espacio libre (dB).

$S_{RX}$ : sensibilidad del receptor (dBm).

Criterio clave:  $Md > 6\text{dB}$  asegura una comunicación confiable.

### 2° Ecuación pérdida en el espacio libre (FSL)

$$FSL = 20\log(d) + 20\log(f) + 92,44$$

donde  $d$ : distancia en km,  $f$ : frecuencia (Hz).

→ Teniendo estas ecuaciones, se necesitan obtener los parámetros de los equipos a utilizar y reemplazarlos en la fórmula.

→ Obtenidos esos parámetros, se transpman las unidades y se verifican lo necesario

→ Para elegir los equipos se necesita la tecnología a usar, el estándar en el que trabajen y su frecuencia.

• Cálculo de distancia, con  $r = 8497\text{ km}$  →  $d = \sqrt{2 \cdot r \cdot h}$

• Cálculo de la potencia recibida →  $P_r = P_t + G_t + G_r - FSL$

• Cálculo SNR → en dB =  $SNR = P_t [\text{dBm}] - \text{piso ruido} [\text{dBm}]$ .

→ en W =  $SNR = \frac{P_r [\text{potencia recibida}]}{P_n [\text{piso de ruido}]}$ .

• Para obtener el ancho de banda, con un roll-off 0.

$$2 \cdot B = \frac{R}{l}$$

Salen de igualar ambas D.

$$D = \frac{2 \cdot B}{1+r}; \quad D = \frac{R}{l}$$

## Ejercicios:

- Un radio transmisor celular suministra una potencia de 3W a 800MHz. Utiliza una antena de ganancia de 3dBi. El receptor está a 5km de distancia, con una ganancia de antena de 12dBi. Calcule  $P_r$ .

$$\begin{aligned} L_f(\text{dB}) &= 92,44 + 20 \log(5) + 20 \log(0,8) - 3 - 12 = \\ &= 92,44 + 13,97 + (-1,93) - 3 - 12 \\ &= 89,48 \text{ dB} \end{aligned}$$

potencias están en dBm.

$$P_t = 34,771 \text{ dBm} \longrightarrow 3\text{W. traspaso de } P_t \text{ en W a } P_t \text{ en dBm.}$$

$$P_r = P_t - \text{perdida} = 34,771 - 89,48 = -54,709 \text{ m.}$$

- en el receptor se necesita este valor o menor es de sensibilidad, sino el ruido tendrá mayor potencia de la que recibir; necesito un -60, -70 por ahí.

valores más pequeños de lo obtenido, mejor sensibilidad

→ **codificación de fuente**

optimizo los datos que transmito [con B limitado se usa fuente].

→ **codificación de canal**  
mitigo/cango errores.

## 2. Telecomunicaciones (Comunicaciones Digitales, TI, Señales)

→ para transmitir datos se necesitan fuentes

→ celulares, computador

→ no necesitan proceso de digitalización

conjuntos discretos  
(codigos Morse)  
conjuntos continuos  
(de valores)  
t°, humedad.

- Una fuente digital de información produce un conjunto finito de mensajes posibles.
- Una fuente analógica de información produce un conjunto infinitos mensajes distintos → transmiten datos que necesitan digitalizarse, medio continuo.
- Una Forma de onda digital es una función en el tiempo que sólo puede adoptar un conjunto discreto de valores de amplitud. No sólo 1 o 0.
- Una Forma de onda analógica es una función del tiempo que posee un rango continuo de valores.

→ rango dinámico mayor, mejor para la señal.

### Objetivos de un sistema de comunicación:

Enviar la información con el mínimo deterioro posible y satisfacer las condiciones de diseño de ancho de banda, potencia y costo

Medida de la degradación digital: BER (Bit Error Rate). → mdo bits/ s para señales digitales

→ curva mas pegada al eje Y ese tiene mejor BER.

canal estable → usotasa transmision alta 16PSK  
canal no estable → transmiso menos BPSK

### Asignación de frecuencias:

La Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT) / ITU da la distribución internacional de frecuencias y determina el tipo de servicio, la modulación, la banda de frecuencias y la potencia máxima admisible.

propagación por espacio libre

Propagación según la frecuencia:

→ la propagación depende de la frecuencia.

Propagación Terrestre únicamente: 3KHz a 300KHz, AM.

Propagación Terrestre e Ionosférica: 300KHz a 30MHz, FM, TVanalog.

Propagación Línea de Vista (LOS): 30MHz a 300GHz, TV digital.

Atenuaciones por precipitaciones y vapor de agua: 10GHz, 22.2GHz, 183GHz

### 2.1 Modo de propagación de onda

#### Propagación de onda en espacio libre

El modo de propagación depende de la frecuencia, a frecuencias más bajas, el alcance es mayor, la onda es más penetrante y rodea más obstáculos, mientras que a frecuencias más altas se transmite una mayor cantidad de datos.

f baja,  $\lambda$  es grande, alcance es mayor, penetra obstáculos.  
f alta,  $\lambda$  es baja, alcance es menor, se atenúa mas rapido la señal.  
mayor tasa transmision

Según el orden de frecuencias, de más baja a más alta, las ondas de radio pueden tomar 3 trayectorias básicas de propagación a través de espacio libre.

A medida de que las ondas están más cerca de la superficie de la tierra se verán más afectadas por las propiedades de esta.

| Modos de propagación de ondas                                                      |                                                                                      |                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hasta 2 MHz                                                                        | 300 kHz a 30 MHz                                                                     | 30 MHz a 30 GHz                                                                                                |
| Por onda de superficie o terrestre.<br>La onda sigue a la superficie de la Tierra. | Por onda ionosférica.<br>La onda se refracta en las capas ionizadas de la atmósfera. | Por onda espacial o línea de vista.<br>La onda se propaga en línea recta, directa, del transmisor al receptor. |

• espacio libre → como afecta a la señal que quiero transmitir.

### Propagación por onda ~~ionosférica~~ de superficie

#### - Ondas de frecuencia hasta 2 MHz

Onda polarizada de manera vertical que sigue la superficie de la tierra, por ende, sigue su curvatura para propagarse más allá del horizonte.

En cuanto a sus aplicaciones, da buenos resultados en comunicaciones a larga distancia, aunque afecta mucho el tipo de terreno, además se utiliza en la banda de radiodifusión AM.

- superficie tierra, curvatura y campo electromagnético afectan a estas señales
- aplicación típica: AM



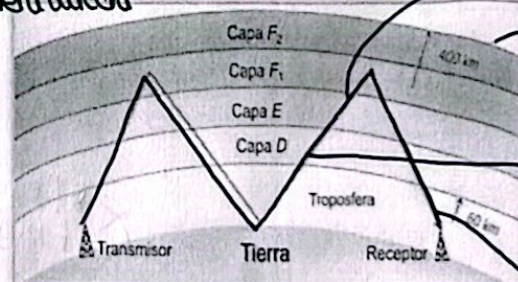
### Propagación por onda ionosférica:

#### Ondas de frecuencia de 300KHz a 30MHz

La onda se refracta en las capas ionizadas de la atmósfera, allí las moléculas de aire se ionizan por la radiación solar, dichas capas están entre 60-400 Km de altura. La propagación en el día (mayor ionización) es posible para las frecuencias entre 10MHz y 30MHz, mientras que la propagación de noche (menor ionización) es posible para las frecuencias menores que 10MHz.

En cuanto a su aplicación, se utiliza en comunicaciones de barcos, aviones y radioaficionados. Tienen gran alcance pero poca estabilidad, las ondas pueden reflejarse desde el suelo y realizar saltos. Es posible rodear la tierra (max distancia de un salto es de 3.200Km).

- pero con potencia alta.
- alcanza la ionosfera y no llega de manera directa
- Rx y Tx se comunican de manera indirecta por refracción en la ionosfera.
- día mayor ionización, noche menor ionización.
- son inestables.
- aplicaciones: radares barcos, aviones.



- refracción en la ionosfera y en la capa terrestre.
- moléculas ionizadas ( $e^+$ )
- más cercana a la superficie terrestre.
- max 20 saltos.

### Propagación por onda espacial terrestre

#### - Ondas de frecuencia entre 30MHz a 30GHz (más suba en el espectro).

Utiliza radiación directa entre dos antenas a través de la troposfera, se le conoce también como propagación por Línea de Vista (LOS), pueden haber reflexiones desde la superficie de la tierra, pero es más probable que cause problemas que incremente la señal intensidad de la señal.

En cuanto a su aplicación, se utilizan en radioenlace por microondas terrestre, telefonía móvil, difusión de televisión terrestre.

La onda espacial terrestre requiere que ambas antenas estén a la mayor altura posible.

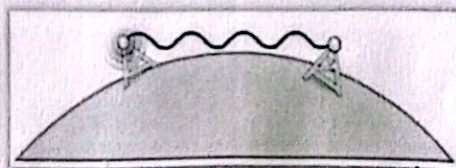
Los radioenlace de microondas terrestres se explotan entre 2 a 80GHz se llaman así ya que ambos terminales (Tx y Rx) se encuentran en la tierra.

- microondas: están en el rango de los micrometros ( $\lambda$ ).

- LOS lo más importante para la comunicación.

- si hay reflexiones, necesito repetidores.

- Ej: telefonía móvil, televisión digital.



- instalar a la mayor altura posible.

## Propagación por onda espacial satelital

### Ondas de frecuencia entre 30MHz a 30GHz

Utiliza radiación directa entre la antena de la estación terrestre y la satelital, el satélite corresponde a un repetidor emplazado en el espacio.

En cuanto a su aplicación, se utiliza en radioenlaces por microondas satelital, telefonía móvil satelital y difusión de televisión satelital.

Los radioenlaces de microondas terrestres se explotan entre 2 a 50GHz se llaman así ya que uno de los terminales se encuentra en un satélite.

→ se necesita LOS, pero la antena receptora está en el espacio.

→ Ej: aviones en el internet, utilizo satélite como repetidor para que llegue al avión.

→ ventaja: alcanzar distancias grandes

desventaja: latencia, retardo es mayor que una punto a punto.

- Para una radiación eficiente la antena debe ser más larga que  $h = \frac{\lambda}{10}$ , calculando  $\lambda = \frac{c}{f}$

con  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  y  $f$  igual a la frecuencia.

Las ondas se refractan de manera gradual en la ionósfera y responde a la expresión:

$$n = \sqrt{1 - \frac{81 \cdot N}{f^2}} \rightarrow \text{índice de refracción.}$$

Con  $n$  índice de refracción,  $N$  cantidad de electrones libres por metro cúbico (alrededor de  $10^{12}$ ) y  $f$  es la frecuencia en Hz.

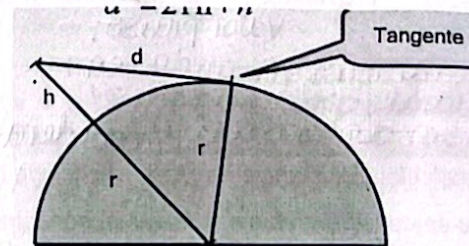
depende en que capa de la ionósfera me encuentre  $\Rightarrow f^2 \gg 81 \cdot N$  en LOS.

## 2.2 Propagación LOS (mayor a 30MHz)

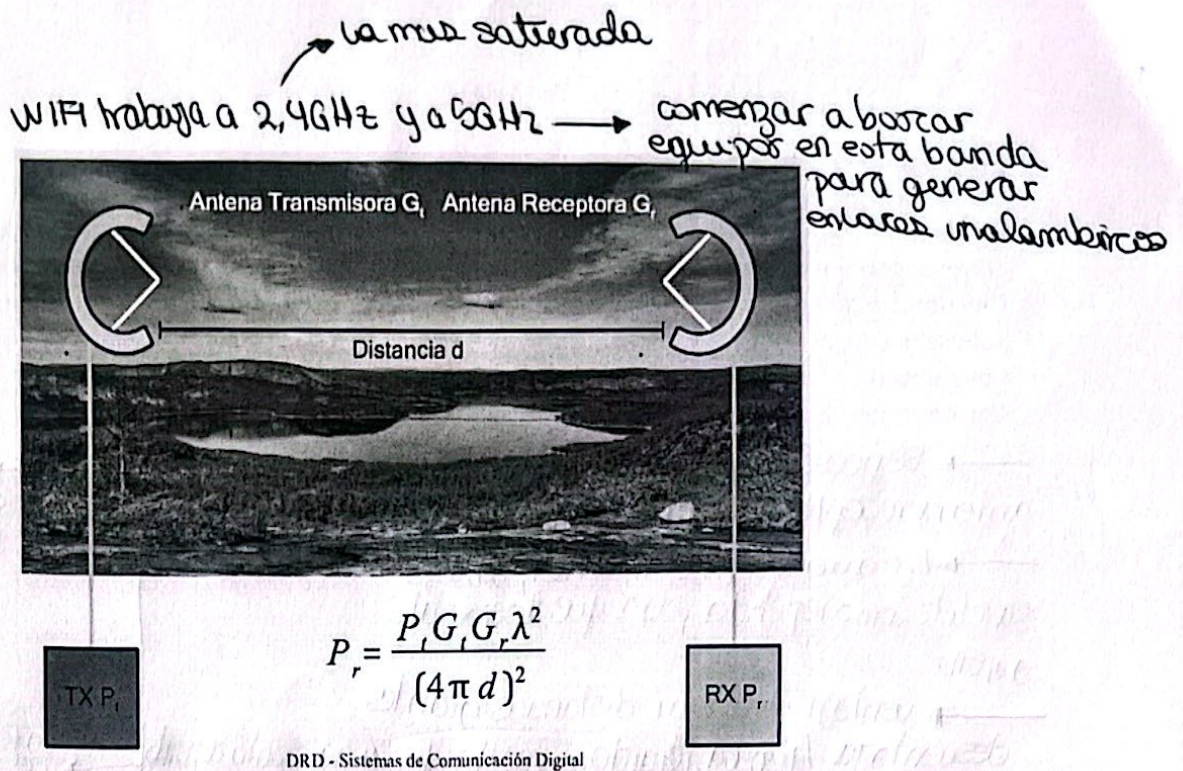
La propagación LOS requiere que las antenas se vean por encima del horizonte. El radio de la tierra es de 8497km (8.497.000 m).

Dando para nuestro cálculo,  $d = \sqrt{2 \cdot r \cdot h} \rightarrow r \gg h$

Si se quiere sumar distancias se tiene  $d = \sqrt{2 \cdot r \cdot h_1} + \sqrt{2 \cdot r \cdot h_2}$



- La distancia a la que puede llegar una señal depende también del transmisor y el receptor.
- El transmisor entrega una potencia al medio a través de la antena.
- El receptor tiene una sensibilidad mínima, una señal con potencia menor no puede ser decodificada.
- Además, la señal debe ser recibida con una cierta potencia por encima del ruido para ser decodificada.



- Línea de vista de onda espacial (Propagación de onda en espacio libre).

**Alcance de la trayectoria** → La onda viaja y sufre problemas de refracción. La onda espacial utiliza radiación directa entre dos antenas a través de la troposfera. Debe disponer de la potencia necesaria para cruzar una distancia dada y tener condiciones de visibilidad directa.

La distancia de comunicación está limitada por la curvatura de la tierra y se calcula en base a la geometría de la tierra y la altura en que está la antena transmisora (horizonte óptico).

$r_1(km) = \sqrt{12.74 * h_1(m)}$  → altura y considerando que la respuesta es en km. lo que

En la práctica la distancia va más allá del horizonte óptico debido a que la refracción en la atmósfera tiende a curvar la onda hacia la tierra, provocando que llegue una distancia 1/3

veces mayor al horizonte de radio  $r_1(km) = \sqrt{17 * h_1(m)}$  → produce que la curvatura de la tierra refracta la

(AMBAS ECUACIONES SE UTILIZAN EN UN TERRENO RAZONABLEMENTE PLANO)

valor preciso.

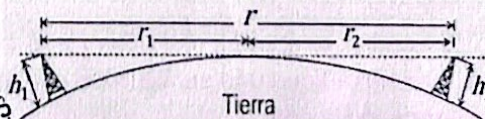
→ ecuaciones son válidas en caso ideal, opera en terreno plano sin obstrucciones. / considera 1 antena.

Para calcular la distancia máxima, se incluye la altura en la que está la zona receptora, por lo que se consideran las distancias al horizonte de radio de cada antena.  $r_1(km) = \sqrt{17 * h_1}$

(m) y  $r_2(km) = \sqrt{17 * h_2(m)}$ .

$r_1$  = distancia del transmisor al horizonte. En km.  
 $h_1$  = altura en que está la antena transmisora. En m.  
 $K \approx 4/3$ , factor de corrección.

→ Para comunicarnos entre 2 antenas



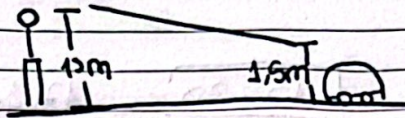
Entonces para obtener el valor aproximado de la distancia máxima se deben sumar ambas,

$r(km) = \sqrt{17 * h_1(m)} + \sqrt{17 * h_2(m)}$ , con r en Km y h en m.

↓ distancia max entre Tx y Rx / en un terreno plano sin obstáculos.

DATE

→ entremas altura e igualdad de altura de antenas  
mucho mejor

L M M J V S D  
O O O O O O O**Ej 1 ppt:**

$$h_{\text{torre}} = 15 \text{ m}$$

$$h_{\text{taxi}} = 1,5 \text{ m}$$

Distancia entre taxi y antena.

$$\Rightarrow r(\text{km}) = \sqrt{17 \cdot 15} + \sqrt{17 \cdot 1,5}$$

$$r(\text{km}) = 15,9 + 5,04$$

$$|r(\text{km}) = 21,01 \text{ km}|$$

 $\Rightarrow$  La distancia de la antena transmisora

$$|r(\text{km}) = \sqrt{17 \cdot 15} = 15,9 \text{ km}|$$

 $\Rightarrow$  radio taxi a radio taxi

$$|r(\text{km}) = \sqrt{17 \cdot 1,5} + \sqrt{17 \cdot 1,5} = 10 \text{ km}|$$

**Ej 2 ppt:**

$$h_{\text{transmisora}} = 50 \text{ m}$$

a) Calcule la antena a radio 1,5 m del suelo

$$\Rightarrow r(\text{km}) = \sqrt{17 \cdot 50} + \sqrt{17 \cdot (1,5)}$$

$$\Rightarrow |r(\text{km}) = 34,2 \text{ km}|$$

b) Calcule techo puesta una antena 12 m.

$$\Rightarrow r(\text{km}) = \sqrt{17 \cdot 50} + \sqrt{17 \cdot (12)}$$

$$\Rightarrow |r(\text{km}) = 43,4 \text{ km}|$$

**Ej 3 ppt:** Calcule la altura a la cual debe estar la antena de una estación  
~~de TV terrestre~~ de TV terrestre para que su cobertura sea de  
50 km a la redonda

R: Se debe asumir una altura de la antena

$$r(\text{km}) = \sqrt{17 \cdot h_1} + \sqrt{17 \cdot h_2}$$

$$50 = \sqrt{17 \cdot h_1} + \sqrt{17 \cdot 1,5}$$

$$50 = \sqrt{17 \cdot h_1} + 5,04 \Leftrightarrow 44,96 = \sqrt{17 \cdot h_1} / ( )^2$$

$$|h_1 = 118,9 \text{ m}|$$

$$|h_1 = 118,9 \text{ m}|$$

Ej zona Fresnel:

$$r_1(m) = 17,32 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 30}{40 \cdot 6}} = 17,32 \cdot \sqrt{\frac{300}{240}} = 19,36 \text{ m}$$

Ha ese valor se le multiplica  $\cdot 0,6$ , ya que se debe tener un 60% libre o sea sería de 11,62 m.

Un radio enlace por UHF que opera a una frecuencia de 6 GHz tiene una separación de 40 km entre antenas. Un obstáculo en la trayectoria se sitúa a 10 km de la antena transmisora. Calcule el clearance debe existir entre la trayectoria directa y el obstáculo.

Ej PPT

$$F_1 = 17,32 \cdot \sqrt{\frac{0,35 \cdot 0,35}{0,7 \cdot 2,4}} = 4,67 \text{ m}$$

$$0,6 \cdot F_1 = 4,67 \cdot 0,6 = 2,802 \text{ m}$$

Un camión que mide 4,2 m para no afectar la comunicación, si es mayor a eso se produce difracción que es lo que no queremos.

Ej PPT

$$F_1(m) = 17,32 \cdot \sqrt{\frac{(0,4) \cdot (0,0)}{1,4 \cdot 2,4}} = 5,97 \text{ m} \cdot 0,6 = 3,58 \text{ m}$$

Se resta la altura de la antena con la  $F_1$

$$10 \text{ m} - 3,58 = 6,41 \text{ m de altura}$$

\* Mientras más cerca este el obstáculo a la antena, más altura puede tener el obstáculo, ya que la altura es más pequeña.

\* Si aumento la frecuencia, mi  $F_1$  es más pequeño por ende la altura será mayor, o sea puede soportar obstáculos más altos.

Es más directa, entre más  $f$  más directa, y es más pequeño.

→ frente de onda: una onda con 3 frentes. Tx ))) : || Rx  
↓ dimensiones.



### Obstrucción parcial de la línea de vista

La antena es el foco primario de un frente de onda que se expande, pero ese frente incide en alguna montaña o algún obstáculo y se produce una difracción.

Las ondas directas y difractadas se suman al receptor, pero debido a la diferencia en la longitud de trayectoria de ambas, la interferencia puede ser constructiva (si ambas ondas están en fase) o destructiva (si están fuera de fase, es decir, se pueden cancelar mutuamente produciendo el desvanecimiento de onda).

ambas ondas tienen la misma fase.  
→ generan distintos frentes.

→ se trabaja en un espacio en 3D, ya que la onda sale ))) y llega a Rx ||

Si se quiere disminuir la potencia de la onda difractada y su interferencia sea menos pronunciada se debe incrementar el espacio entre la trayectoria directa y el objeto que difracta la onda.

→ fenómeno de difracción, la onda choca con algún obstáculo, llegando a Rx la onda real y las difractadas.

### 2.3 Zonas de fresnel

→ es una elipsoide, ya que salen esferas y llegan planas

Las zonas de fresnel son una familia de elipsoides en 3D con focos en las antenas, todas poseen la misma distancia  $r$  entre antenas pero cada una dispone de un radio  $F$  al centro cada vez mayor.

→ define el área donde las ondas electromagnéticas pueden evitar obstáculos importantes para evitar interferencias destructivas y evitar pérdidas de señal.

La idea consiste en determinar en qué zona del espacio entre el emisor y el receptor debe estar libre para evitar la interferencia destructiva de la onda difractada.

→ se usa en enlaces PTP, donde enlaces multiméricos entre ciudades para evitar obstáculos.

Existen muchas zonas de fresnel, pero la que nos interesa es la primera, ya que contiene el 50% de la potencia de la onda. Si dicha zona se encuentra libre, el nivel de recepción será equivalente al obtenido en espacio libre.

→ que se encuentre lo más libre posible.

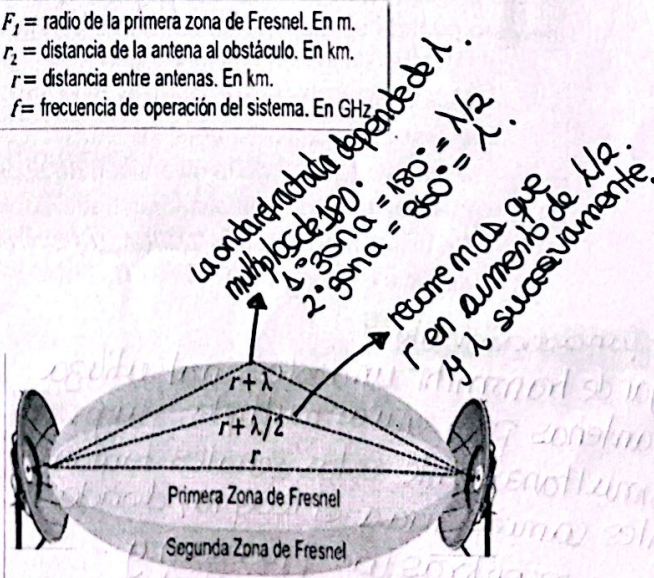
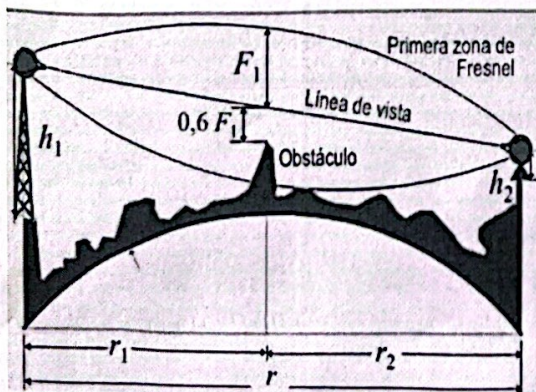
- Cálculo de la primera zona de Fresnel

El radio  $F_1$  en cualquier punto del elipsoide de la primera zona de Fresnel se calcula en función de la ubicación del obstáculo y la frecuencia de operación.

contiene la mayor cantidad de potencia de la onda.  
lo que está más cerca de la línea de vista directa

$$F_1(m) = 17,32 * \frac{\sqrt{r_1(km) * r_2(km)}}{\sqrt{r(km) * f(GHz)}}$$

$F_1$  = radio de la primera zona de Fresnel. En m.  
 $r_1, r_2$  = distancia de la antena al obstáculo. En km.  
 $r$  = distancia entre antenas. En km.  
 $f$  = frecuencia de operación del sistema. En GHz



→ se debe dejar al menos el 60% de la primera zona de fresnel a lo largo de todo el trayecto.  $0.6 F_1$  = zona Fresnel 1°

→ si un obstáculo obstruye la zona de fresnel, aumenta la altura de las torres o se instala un punto de rebote para instalar con antenas.

## efectos:

- Interferencia constructiva/destructiva: señales que llegan a Rx se restan (destructiva) o se suman (constructiva) debido a sus  $\neq$  fases.
- fading (desvanecimiento): señales canceladas, generan caídas temporales de intensidad en la señal.
- retraso de propagación: señales llegan con retardo respecto a la señal directa.

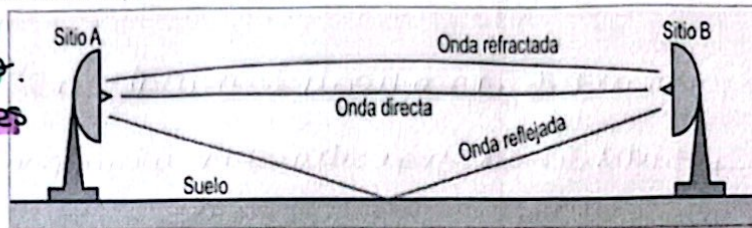
## Multitrayectoria

Se produce ya que en un radio enlace una LOS se planifica con un línea de vista libre de obstáculos, pero debido a la refracción y a la reflexión se reciben múltiples copias de la onda con diferentes retardos.

La refracción es causada por la atmósfera, dobla a tierra la trayectoria de la onda que se expande, mientras que la reflexión es causada por la superficie del suelo o el agua.

La onda resultante será mayor o menor que la directa, dependiendo de la diferencia en la longitud de los trayectos de la onda directa y de las refractadas y reflejadas, es decir, se produce una amplificación o anulación parcial de la onda.

- difracción: señal dobla al pasar cerca de un borde u obstáculo.
- dispersión: se espere en múltiples direcciones al chocar con objetos irregulares.



Para controlar el desvanecimiento de la onda, existen dos métodos básicos para tratarlo:

1. Sobre construir el sistema: Se incrementa la potencia del transmisor, la ganancia de las antenas o la sensibilidad del receptor para tener un margen de desvanecimiento de por lo menos 20 dB.
2. Técnicas de diversidad: La primera corresponde a la diversidad de frecuencias; la segunda la diversidad de espacio, es decir, utiliza dos antenas montadas una sobre otra en la misma torre (antenas deben estar separadas por  $2\lambda$  o más). Estas técnicas no se usan cuando la superficie reflectora es agua.

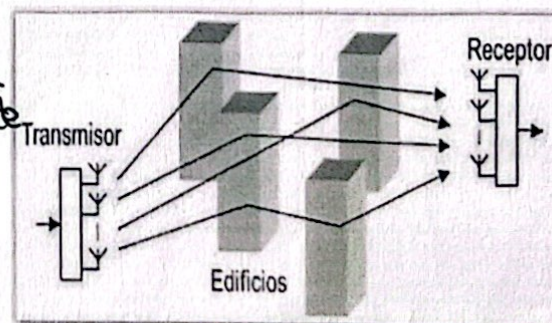
## Multitrayectoria en comunicaciones móviles

En comunicaciones móviles la multitrayectoria es fundamental, ya que las superficies reflectoras las proporcionan los rasgos estructurales y topográficos del ambiente, los efectos son controlados por sistemas de antenas inteligentes (estas controlan la amplitud y la fase de las ondas recibidas hasta obtener una óptima recepción y superar los límites de la línea de vista cuando se dispone de suficiente potencia).

- **MIMO (Multiple Input Multiple Output):** tecnología de antenas inteligentes que utiliza varias antenas en el transmisor y en el receptor. Capitaliza los beneficios de la multitrayectoria y de la diversidad de espacio para conseguir un mejor alcance del que se consigue con sistemas tradicionales. Se utiliza hoy en redes WiFi (4, 5 y 6) y en tecnologías 4G y 5G. Un enlace sin línea de vista es posible.

## funcionamiento:

En lugar de transmitir una sola señal, utiliza varias antenas para enviar múltiples flujos de datos simultáneamente. Estas señales toman diferentes caminos hacia el receptor, donde las antenas receptoras las procesan y combinan para reconstruir los datos originales.



→ 4x4 MIMO = 4 antenas Tx y Rx / Massive MIMO (5G n4100): involucra decenas o cientos de antenas en la base estación.

## 2.4 Clasificación de los sistemas de telecomunicaciones

- **Medio físico de transporte de señales**, los sistemas pueden clasificarse principalmente en cable, fibra óptica o radioeléctricos.
- **Tipo de usuarios**, sistema punto a punto o punto multipunto.
- **Tipo de comunicación**, unidireccionales o bidireccionales.
- **Banda de frecuencia en sistema de banda estrecha o banda ancha.**

En base a los sistemas de cable o fibra óptica, utilizan como medio físico de transporte de las señales algunos de las siguientes:

- **Línea abierta:** formada por uno o más hilos conductores. Si son dos hilos se designan como línea de pares, si está formada por cuatro hilos, se conoce como cuadrete. Se utiliza principalmente en telefonía, telegrafía y transmisión de datos a baja velocidad.
- **Cable telefónico de pares múltiples:** Consiste de un cable protegido contra la intemperie y usualmente apantallado o blindado eléctricamente, en cuyo interior se confinan muchos pares de hilos.
- **Cable coaxial:** formado por un conductor rodeado por una funda metálica y aislado de ella, que actúa como pantalla electromagnética contra señales externas. Se utiliza en sistemas de banda ancha, como telefonía multicanal, televisión y transmisión de datos a elevada velocidad.
- **Fibra óptica:** funcionamiento diferente al de los cables anteriores pero el tipo de servicio es semejante y puede considerarse como un medio de transmisión por cable. Se emplea en sistemas de banda ancha y sus prestaciones son, en general, muy superiores a la de los cables metálicos.
- **Sistemas radioeléctricos:** Por radio se entiende la transmisión de señales a través del espacio, mediante ondas electromagnéticas, sin que haya conexión física entre transmisor y receptor. El medio de propagación de las ondas electromagnéticas es, en este caso, el aire o el vacío. Los sistemas de telecomunicación utilizan el espectro radioeléctrico, que comprende las bandas de frecuencias útiles para los servicios de radiocomunicación y abarca, desde frecuencias inferiores a 1 KHz hasta alrededor de 300 GHz.

Según la ITU los tipos de servicios de radiocomunicación que se asignan en las diferentes bandas se definen como sigue:

- **Servicios fijos:** son servicios de radiocomunicación entre puntos fijos específicos.
- **Servicios móviles:** servicios de radiocomunicación entre estaciones que pueden utilizarse cuando están en movimiento, paradas en lugares no especificados, o bien entre estaciones móviles y estaciones fijas.
- **Servicio móvil aeronáutico:** servicios de radiocomunicación entre estaciones terrestres y aeronaves o entre aeronaves.
- **Servicio móvil marítimo:** servicios de radiocomunicación entre estaciones costeras y barcos o entre barcos navegando.
- **Servicio móvil terrestre:** servicios de radiocomunicación entre una estación base y una estación terrestre móvil, o entre estaciones móviles terrestres.

### *Tipos de servicio*

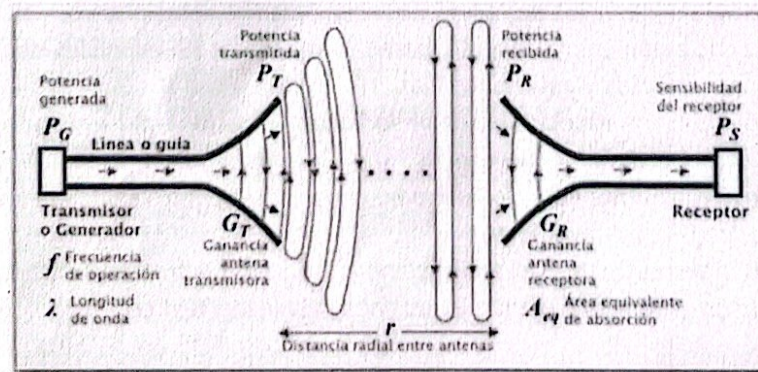
- **Radionavegación:** servicios para determinar la posición de naves mediante las propiedades de propagación de las ondas radioeléctricas.

- **Radionavegación aérea:** servicios de radionavegación para la navegación aérea, por ejemplo: radio-altímetros, radares de indicación de obstrucciones, etc.
- **Radionavegación marítima:** servicios de radionavegación para la navegación marítima, por ejemplo: radiofaros costeros.
- **Radiolocalización:** servicios para determinación de la posición de naves con propósitos diferentes a los de navegación, por ejemplo: radares terrestres.
- **Radiodifusión:** servicios de radiocomunicación cuyo propósito es la recepción directa por el público en general. Como ejemplos ondas medias (AM), frecuencia modulada (FM) y Televisión.
- **Radioficionados:** servicios de radiocomunicación llevados a cabo por personas interesadas en las técnicas radioeléctricas, únicamente por interés personal y sin interés comercial alguno.
- **Espaciales:** servicios de radiocomunicación entre estaciones o vehículos espaciales.
- **Tierra-espacio:** servicios de radiocomunicación entre estaciones terrestres y estaciones o vehículos espaciales, por ejemplo, la comunicación entre una estación terrestre y un satélite.
- **Radioastronomía:** astronomía basada en la recepción de ondas radioeléctricas de origen cósmico.
- **Estándares de frecuencia:** transmisiones de radio de frecuencias específicas y alta precisión, cuyo propósito es la recepción con fines científicos, técnicos o de otra índole.

## 2.5 Parámetros de antenas y Cálculo de radioenlace terrestre

### Elementos principales de un sistema de transmisión por radio:

- **Transmisor:** genera una potencia que se entrega a la antena a través de una línea.
- **Línea de Transmisión:** guía la potencia generada por la hacia la antena en forma de onda plana.
- **Antena Transmisora:** Radia la potencia que le llega al transmisor, eficiencia depende de sus características.
- **Onda en el espacio:** La onda esférica radiada se visualiza como plana cuando llega a la antena receptora que se encuentra en campo lejano.
- **Antena receptora:** Absorbe potencia del frente de onda que le llega.
- **Receptor:** Recibe a través de la línea, la potencia que absorbe la antena receptora.



## Tipos de antenas: (según radiación)

### → Antenas Directivas:

- Están diseñadas para concentrar la transmisión y recepción de señales en una dirección específica, logrando mayor alcance y ganancia en esa dirección.
- Ideales para enlaces punto a punto (PtP) o para cubrir áreas específicas con una señal fuerte.

### • características:

- patrón de radiación enfocado: transmiten y reciben señales en una sola dirección, permitiendo ~~minimizar~~ minimizar interferencias provenientes de otras direcciones.
- alta ganancia, ya que concentran la energía en una sola dirección, mejorando el alcance de la señal.
- uso típico: enlaces larga distancia (WIFI, LTE, 5G), comunicaciones PtP.

### • ejemplos:

- Antena Yagi: eficiente enlaces mediana/larga distancia / LTE, TV digital, enlaces rurales.
- Antena Parabólica: ganancia extremadamente alta / enlaces satelitales y microondas.
- Antena sectorial: cubre un sector específico / se usa en estaciones base celulares y redes WIFI.

### • ventajas:

mayor alcance  
mayor eficiencia en el uso de energía  
menor interferencia en otras direcciones

### • desventajas:

Cobertura limitada a una dirección específica.  
Necesidad de alineación precisa.

### → antenas omnidireccionales

- Diseñadas para transmitir y recibir señales de manera uniforme en todas las direcciones en el plano horizontal. Ideales para aplicaciones donde se necesita cubrir un área amplia alrededor de la antena.

### • características:

- patrón radiación circular: emiten señales con intensidad uniforme en todas las direcciones horizontales.
- ganancia moderada: ganancia más baja que las directivas, ya que distribuyen la energía en todas las direcciones.
- uso típico: WIFI locales, estaciones base en redes celulares, enlaces de corto alcance, como edificios o áreas urbanas.

### ejemplos:

- antena de largo; antena colineal; Antena Vertical

### • ventajas:

Cobertura uniforme en todas las direcciones

### • desventajas:

Alcance limitado.

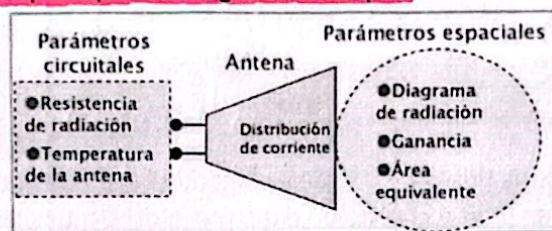
## Parámetros básicos de una antena:

### 1. Circuitales

- **Resistencia de radiación**, la antena se presenta a la línea como una resistencia del espacio virtual acoplada a sus terminales.
- **Temperatura de la antena**, relacionada con la radiación pasiva de objetos distantes que la antena está mirando.

### 2. Espaciales

- **Diagrama de radiación**, cantidades tridimensionales que involucran variación del campo E o de la potencia como función de coordenadas esféricas.
- **Ganancia o directividad**, indicación de la capacidad de la antena para conducir la potencia radiada en una determinada dirección.
- **Área equivalente**, área de la cual la antena extrae la potencia del frente de onda que pasa para entregarla al receptor.



## Modelo circular de la antena en transmisión:

### Elementos

- **Impedancia de la antena**:  $Z_A$  al conectar el transmisor a la antena, la relación de  $V$  e  $I$  en los terminales de la antena permite modelar como una impedancia compleja ( $Z_A$ ) que varía en frecuencia.
- **Resistencia de radiación**: Representa la capacidad de disipación de potencia mediana radiación al espacio y que puede ser equiparada a una resistencia óhmica disipadora de potencia, es decir, la antena se presenta a la línea como una resistencia del espacio acoplada a sus terminales.
- **Resistencia de pérdidas**: Representa la potencia disipada en la superficie de los conductores de la antena, se utilizan antenas de baja pérdida.
- **Reactancia de la antena**: Representan la inductancia de los conductores de la antena y su capacitancia respecto a tierra.

### Impedancia de la antena.

$$Z_A = \frac{V}{I} = R_r + R_\Omega + jX_A$$

$Z_A$  = impedancia de la antena, en  $\Omega$ .

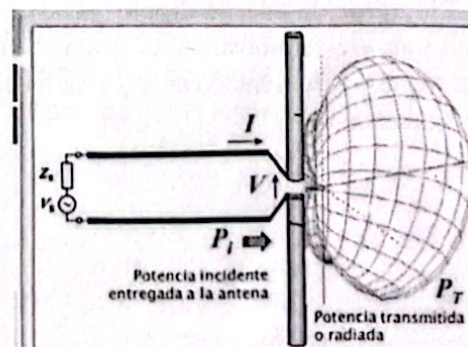
$V$  = voltaje, en V.

$I$  = corriente, en A.

$R_r$  = resistencia de radiación, en  $\Omega$

$R_\Omega$  = resistencia de pérdidas, en  $\Omega$

$X_A$  = reactancia de la antena, en  $\Omega$



### Antenas según su radiación:

Una antena se diseña de modo que radie más potencia en una dirección que en otras. La radiación se concentra en un patrón con forma geométrica reconocible que se conoce como **diagrama de radiación o de campo**.

Se habla de **antenas omnidireccionales** (ej. antena dipolo, su radiación tiene forma similar a un donut sin agujero, donde las puntas de los brazos son puntos sordos hacia donde no irradia) y **directivas** (antena Yagi, tiene un patrón de radiación similar al cono de luz de un proyector).

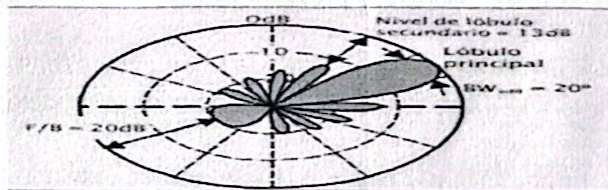
La radiación se grafica en 3D, en función de las coordenadas esféricas  $r, \theta$  y  $\phi$  a una distancia fija.

En campo lejano la densidad de potencia es proporcional al campo  $E$ , lo que hace que un diagrama de radiación de campo contenga la misma información que un diagrama de potencia.

### Antenas directivas

En el diagrama se definen parámetros que describen el comportamiento de la antena y permiten especificar su funcionamiento. Son cantidades escalares necesarias para diseñar antenas directivas.

El campo  $E$  representa de forma relativa y en escala logarítmica, un diagrama relativo logarítmico tiene el máximo en 0 dB y el resto de direcciones del espacio con dB negativos. Cuando la escala es logarítmica, los diagramas de campo y de potencia son idénticos.



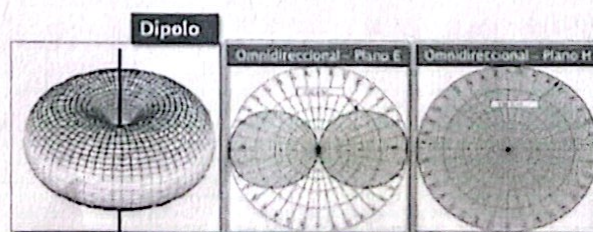
### Ejemplos Diagramas de radiación

#### Ejemplo I: Parámetros del diagrama directivo típico

- **Lóbulo principal:** zona en la que la radiación es máxima
- **Ancho de haz:** ancho del lóbulo principal entre puntos de potencia media,  $-3\text{dB}=20^\circ$
- **Nivel de lóbulo secundario:** es el mayor de los máximos secundarios medidos respecto al máximo principal:  $-13\text{dB}$ .
- **Relación frente/atras:** relación en dB de la radiación principal a la obtenida en la dirección opuesta.

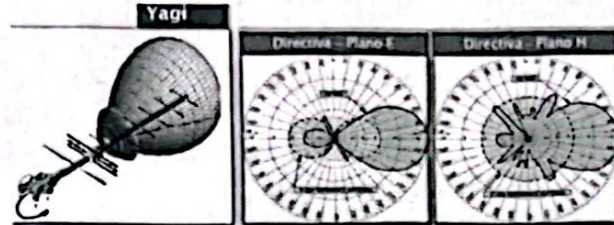
#### Ejemplo II: Diagrama de antena dipolo

- En el plano  $y-z$  se muestra el diagrama de campo  $E$  que es bidireccional.
- En el plano  $y-x$  perpendicular al  $y-z$  se muestra el diagrama de campo  $H$  que es omnidireccional.



### Ejemplo III: Diagrama de antena Yagi

- En el plano y-z se muestra el diagrama de campo H que es omnidireccional.
- En el plano y-x perpendicular al y-z, se muestra el diagrama de campo H que es directivo.



### Ganancia de una antena transmisora

#### Ejemplo para la antena dipolo

#### Ganancia de la antena dipolo

- Se calcula comparando la densidad de potencia radiada en la dirección de máxima radiación, a una distancia dada, con la que radiaría a esta misma distancia un radiador isotrópico que radiase la misma potencia.
- La radiación isotrópica se utiliza como referencia. Una antena con una ganancia superior a la isotrópica radiará más potencia en una dirección dada, en detrimento de otras, donde radiara menos.
- La antena dipolo radia 1,64 veces con mayor intensidad en la dirección de máxima radiación que un radiador isotrópico por tanto su ganancia es  $10 \log 1,64 = 2,15$  dBi.

$$G_T = \frac{S}{S_i} = 4\pi r^2 \frac{S}{P_T}$$

$G_T$  = ganancia de la antena transmisora.  
 $S$  = densidad de potencia transmisora, en  $W/m^2$ .  
 $S_i$  = densidad de potencia isotrópica, en  $W/m^2$ .  
 $P_T$  = potencias radiada o transmitida, en W.  
 $r$  = distancia radial desde la transmisora, en m.

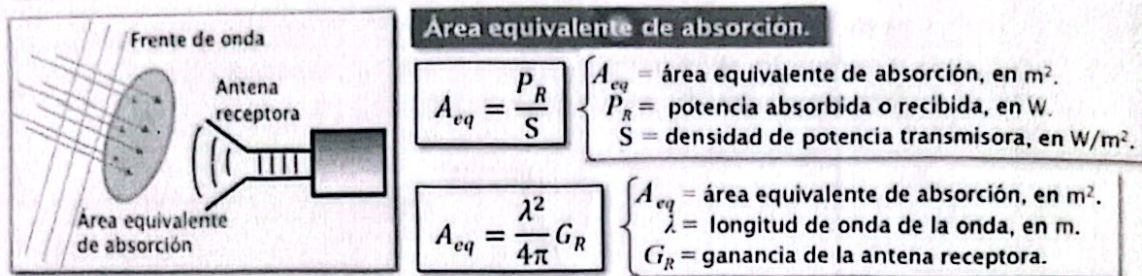
Se expresa en dBi

$$G_T(dBi) = 10 \log GT$$

Directividad es distinto que ganancia. La ganancia pone de manifiesto el hecho de que una antena real no radia toda la potencia que se le suministra, si no que parte de esta se disipa en forma de calor. La ganancia es la directiva multiplicada por la eficiencia de la antena.

### 2.6 Área equivalente de absorción

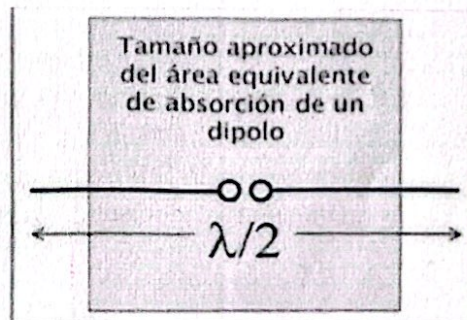
Es el área del cual la antena receptora absorbe potencia del frente de onda que pasa por ella, para entregarla al receptor. La antena es más eficiente para absorber potencia desde una dirección que desde otra, quiere decir que la antena receptora tiene ganancia y la potencia que absorbe depende de su tamaño física y su ganancia. Con base a la teoría electromagnética se demuestra que el área equivalente depende de la ganancia de la antena y de la longitud de onda.



La ganancia es la misma si la antena se utiliza para transmitir o recibir.

#### EJ: áreas de equivalencia

- El área equivalente de una antena dipolo es proporcional al área de un cuadrado cuyo lado es casi igual a la longitud de la antena. Para el caso de la antena dipolo, los lados del cuadrado son casi iguales a media longitud de onda.
- El área equivalente de las antenas parabólicas usadas en microondas es proporcional al diámetro del plano reflector, el cual enfoca la radiación hacia la apertura.



#### 2.7 Pérdida en espacio libre

La utilidad del concepto de área equivalente se demuestra al usarla para desarrollar la ecuación de transmisión de Friis, esta ecuación establece la pérdida en el espacio libre, es decir, la razón entre la potencia recibida y la potencia transmitida. Se obtiene al combinar las ecuaciones de la ganancia de la antena transmisora y del área equivalente de absorción de la antena receptora.

Al alejarse de la transmisora, la onda se esparce sobre una mayor región en el espacio libre, se atenúa.

→ modelos para cuando Tx y Rx tienen una vista clara del otro.

→ La ecuación de Friis muestra que la potencia recibida disminuye con el cuadrado de la distancia entre Tx-Rx; o sea  $P_R$  cae con una razón de 20dB cada una.

#### Ecuación de transmisión de Friis.

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^2}{16\pi^2 r^2}$$

$P_R$  = potencia recibida, en W.  
 $P_T$  = potencia transmitida, en W.  
 $G_T$  = ganancia de la antena transmisora.  
 $G_R$  = ganancia de la antena receptora.  
 $\lambda$  = longitud de onda de la onda, en m.  
 $r$  = distancia radial entre antenas, en m.

→  $\text{dB} = 10 \log_{10}$

Es común expresar la ecuación de transmisión de Friis en términos de pérdidas en el espacio libre en dB con el signo cambiado. Por supuesto, la potencia recibida es más débil que la transmitida, por lo que la pérdida en dB es negativa. Las antenas crean un efecto de amplificación que compensan parte de las pérdidas.

**Pérdida con el signo cambiado.**

$$L_{fs}(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_T(\text{W})}{P_R(\text{W})}$$

$L_{fs}$  = pérdida en el espacio libre, en dB.  
 $r$  = distancia radial entre antenas, en km.  
 $f$  = frecuencia de operación, en GHz.  
 $G_T$  = ganancia de la transmisora, en dBi.  
 $G_R$  = ganancia de la receptora, en dBi..

( $G_R$  = ganancia de la receptora)

$$L_{fs}(\text{dB}) = 92,44 + 20 \log r(\text{km}) + 20 \log f(\text{GHz}) - G_T(\text{dBi}) - G_R(\text{dBi})$$

→ se utiliza cuando tenemos los parámetros en dB.

## 2.8 Cálculos del presupuesto de potencia / CONSIDERAR EN UN DISEÑO.

Proceso mediante el cual se evalúa si el enlace es viable, y para ello se deben calcular las pérdidas en el trayecto y conocer las características del equipamiento y de las antenas.

- **Características del equipamiento:** Se tiene la potencia de transmisión específica del fabricante del transmisor, más de 30 mW. Y se tiene la sensibilidad del receptor, la cual es específica del receptor y es el nivel mínimo de potencia que debe recibir para una determinada calidad, rangos desde -75 a -95 dBm. *→ depende de la modulación que voy a tener.*
- **Características de las antenas:** Se tiene la ganancia de la antena, los cuales corresponden a dispositivos pasivos que crean el efecto de amplificación debido a su forma física, tienen las mismas características al transmitir y recibir. Las omnidireccionales tienen ganancia 2 a 12 dBi, las sectoriales 12-15 dBi y parabólicas 19-24 dBi. *→ misma antenas Tx y Rx.*
- **Pérdida en el trayecto:** Existe la pérdida en espacio libre, en donde la onda pierde potencia por que se esparce en el espacio, la pérdida aumenta con la distancia y la frecuencia pero disminuye con la ganancia de las antenas y se calcula con la fórmula de la transmisión de Friis. Y se tiene la pérdida por el medio ambiente, la onda pierde potencia por absorción, cuando pasa a través de árboles, paredes, ventanas, edificios pero también por desvanecimiento debido a interferencias por multitrayecto. Para contrarrestar esta pérdida se dispone de un margen de tolerancia de 20 dB.
- **Pérdida en la línea o guía:** Existe la pérdida en la línea, en donde parte de la potencia se pierde en la línea de transmisión o en la guía de ondas que conecta al transmisor con la antena, la pérdida para un coaxial corto con conectores es de 2 a 3 dB.

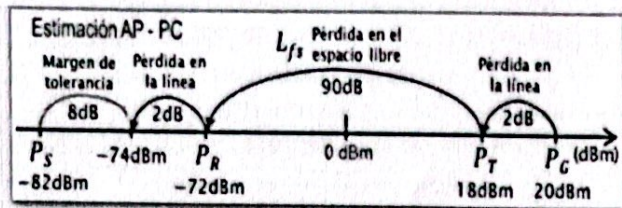
## EJEMPLOS DE CALCULO DEL PRESUPUESTO DE POTENCIA.

### Estimación viabilidad de enlace

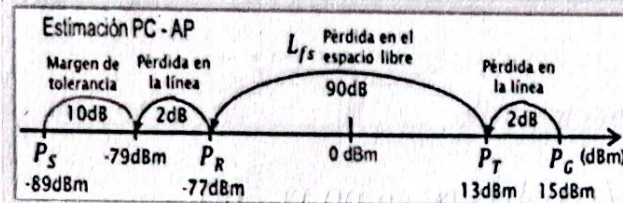
Estime la viabilidad de un enlace de 5 km entre un punto de acceso WiFi (AP) y un PC de cliente.

Los datos en cada sitio son los siguientes:

- Sitio AP, potencia generada 100mW/20dBm, sensibilidad del receptor -89dBm, ganancia de la antena omnidireccional 10dBi, pérdida de cable 2dB.
- Sitio PC, potencia generada 30mW/15dBm, sensibilidad del receptor -82dBm, ganancia de la antena omnidireccional 14dBi, pérdida de cable 2dB.



- Estimación AP - PC. Hay un margen de 8 dB que permite trabajar con buen tiempo, pero probablemente no sea suficiente para enfrentar condiciones climáticas extremas.



- Estimación PC - AP. Hay un margen de 10 dB. El enlace funciona, pero si se utiliza un plato de 24 dBi en el lado del PC, se tendría una ganancia adicional de 10 dBi en ambas direcciones. Otra opción más cara es utilizar equipos de radio de mayor potencia en ambos extremos del enlace.

### 3. Codificación y Modulación Digital

#### Técnicas de codificación:

##### - Datos digitales, señales digitales:

Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión, en donde cada pulso es un elemento de la señal. Los datos binarios codificados en elementos de señal.

##### Esquemas de codificación:

- **NRZ-L:** Se tiene dos tensiones diferentes para los bits 0 y 1. La tensión es constante durante el intervalo de bit (no hay transición, no retorna a 0). Tensión constante positiva para el 1, ya que hay ausencia de tensión para 0, la más habitual tensión positiva para un valor y tensión negativa para otro valor.

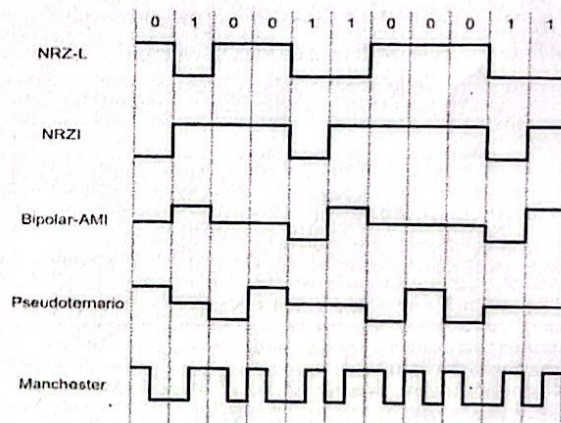
- **NRZI:** Sin retorno a cero invertido en 1. El dato se codifica por la presencia o ausencia de una transición al principio del tiempo del bit. Transición significa un 1, sin transición significa un 0.

- **Binario Multinivel:** Usa más de dos niveles, Bipolar-AMI: 0 representa la ausencia de la señal, 1 representado por pulsos de polaridad alternante. No hay pérdidas de sincronismo para una larga cadena de 1s.

- **Pseudoternario:** 1 representador por ausencia de señal, 0 representados por pulsos de polaridad alternante.

- **Manchester:** Transición en mitad del intervalo de duración de bit, la transición sirve como reloj y para transmitir el dato. Bajo a Alto representa un 1, Alto a Bajo representa un 0.

- **Manchester Diferencial:** Transición en mitad del intervalo usado solo para sincronizar, la transición al principio del intervalo del bit representa 0 y la ausencia de transición al principio del intervalo representa un 1.



##### - Datos digitales, señales analógicas (modem)

El Sistema de Telefonía pública usa modem (modulador-demodulador) y de 300Hz a 3400Hz. Desplazamiento por Amplitud (ASK), Desplazamiento de frecuencia (FSK), Desplazamiento de Fase (PSK).

**Desplazamiento por Amplitud ASK):** Valores se representan por diferentes amplitudes de portadora, se usa presencia y ausencia de portadora, es susceptible de repentinos cambios de ganancia, usa fibra óptica y es poco eficiente.

**Desplazamiento de Frecuencia (FSK):** Valores representados por diferentes frecuencias, menos sensible a errores que ASK, transmisión por radio en HF(3-30MHz), incluso en LAN en frecuencias superiores con cable coaxial.

**Desplazamiento de Fase(PSK):** La fase de la portadora se desplaza para representar los datos. PSK Diferencial el cambio de fase se refiere a la transmisión del bit anterior en lugar de una referencia absoluta.

**PSK en Cuadratura(QPSK):** Uso más eficaz del espectro si por cada elemento de señalización se presenta más de un bit, con saltos de fase de 90°, cada elemento representa dos bit, un módem estándar de 9600 bps usa 12 ángulos, cuatro de los cuales tienen dos amplitudes.

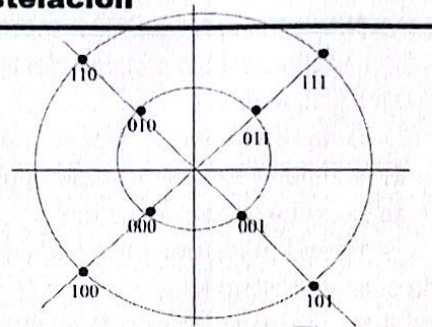
### Codificación Amplitud - Fase

⌘ La información digital está contenida tanto en la fase como en la amplitud

|      |      |     |      |     |      |     |      |     |
|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Amp  | 1    | 1   | 1    | 1   | 2    | 2   | 2    | 2   |
| Fase | -135 | -45 | +135 | +45 | -135 | -45 | +135 | +45 |
| MSB  | 0    | 0   | 0    | 0   | 1    | 1   | 1    | 1   |
|      | 0    | 0   | 1    | 1   | 0    | 0   | 1    | 1   |
| LSB  | 0    | 1   | 0    | 1   | 0    | 1   | 0    | 1   |

⌘ Puede haber 16 cuaternas con 4 bits

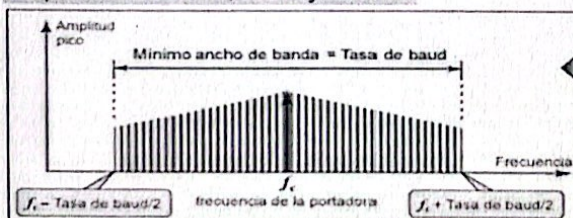
### Constelación



**Modulación en Amplitud en Cuadratura(QAM):** Se pueden enviar dos señales diferentes simultáneamente sobre una misma portadora, se utilizan dos réplicas de la portadora, una de ellas desfasada 90 respecto a la otra en cuadratura. Cada una de las portadoras se modula usando ASK y las dos señales independientes se transmiten por el mismo medio.

### Ancho de banda de modulaciones digitales

#### Espectro de ASK, PSK y QAM



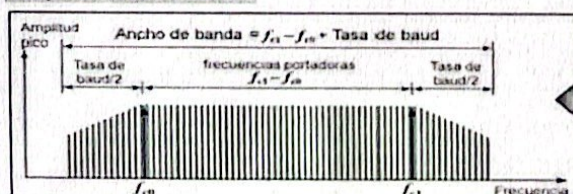
#### Dominio de la frecuencia

La modulación digital crea un ancho de banda proporcional a la tasa de señal en baud, centrado alrededor de la frecuencia portadora.

Significa que si hay disponible un canal paso banda, se puede elegir la portadora de manera que la señal modulada ocupe el ancho de banda.

El ancho de banda necesario para una transmisión QAM es el mismo que para ASK y PSK.

#### Espectro de FSK



Se puede pensar en FSK como en dos señales ASK, cada una con su frecuencia portadora.

Ancho de Banda para ASK y PSK, está relacionado con la velocidad de transmisión R y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$B_T = (1 + r) * R$$

Para FSK depende del salto de frecuencia de las frecuencias con la portadora como de la velocidad binaria R y se calcula mediante la siguiente fórmula:

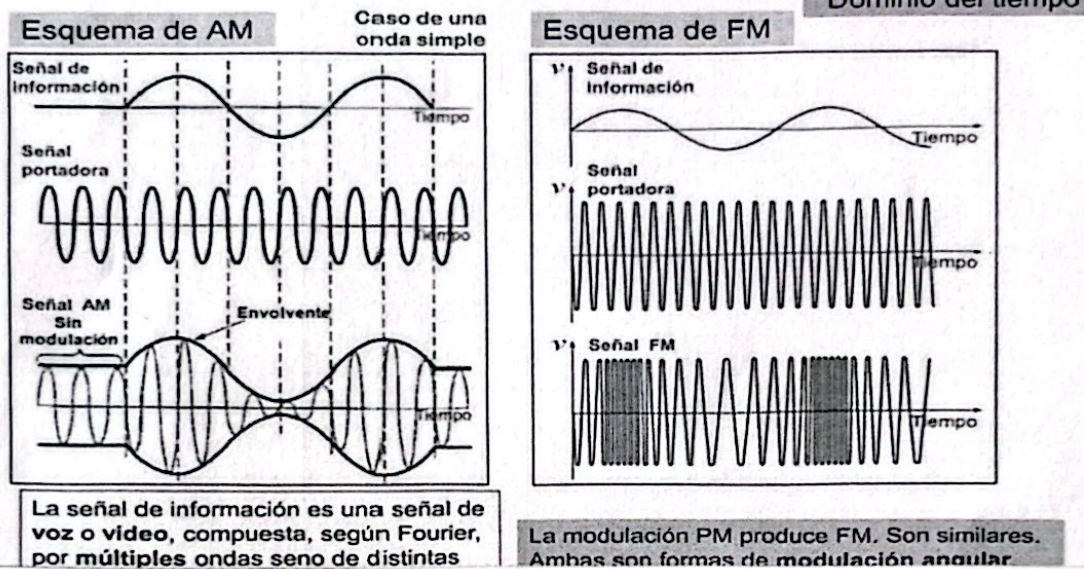
$$B_T = 2\Delta F + (1 + r) * R$$

- **Datos analogicos, señales digitales**

Digitalización: conversión de datos analógicos en datos digitales. Los datos digitales se pueden transmitir utilizando NRZ-L y se pueden convertir en señales analógicas (ASK, FSK, PSK). La conversión analógica a digital y viceversa se realiza usando un codec (PCM, DM (Modulación Delta)).

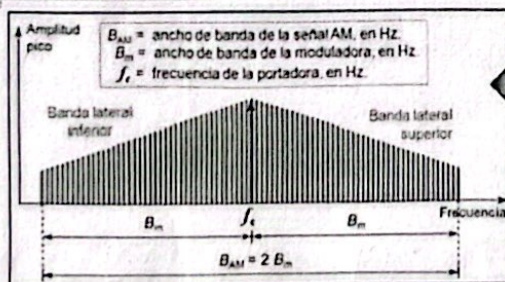
**Modulación por codificación de pulsos:** un sistema de 4 bits proporciona 16 niveles. La cuantificación tiene un error de cuantificación o ruido y las aproximaciones suponen que es imposible recuperar exactamente la señal original. Calidad comparable a la transmisión analógica. 8000 muestras por segundo de 8 bits cada una suponen 64 kbps. La relación señal/ruido PCM se mejora aprox 6 dB cada vez que se aumenta un bit.  
 $SNR(dB) = 6.02n + 1.76$ .

- **Datos analogicos, señales analogicas**



### Ancho de banda de AM

#### Espectro de AM



#### Dominio de la frecuencia

La modulación AM crea un ancho de banda igual al doble que el ancho de banda de la señal moduladora, centrado alrededor de la frecuencia portadora.

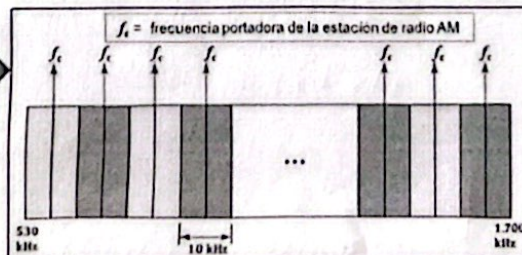
Ambas bandas laterales llevan a misma información. Por esta razón, en algunas aplicaciones se descarta una banda, reduciendo el ancho de banda a la mitad.

#### Radiodifusión comercial

Una banda entre 530 y 1.700 kHz se asigna a la radio AM.

Cada estación necesita 10 kHz de  $B_{AM}$ .

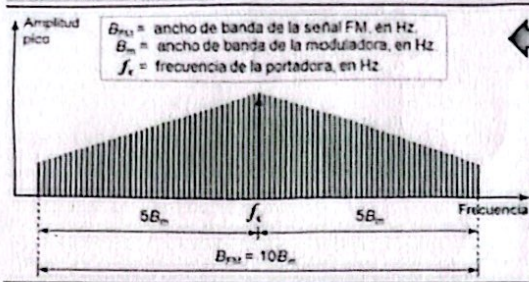
Cada radio AM utiliza una portadora diferente.



## Ancho de banda de FM

### Espectro de FM

### Dominio de la frecuencia



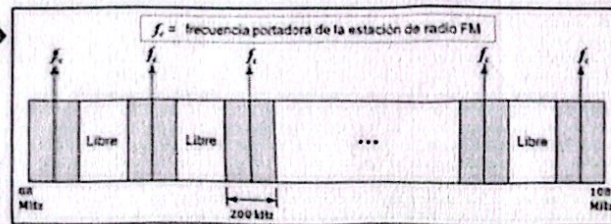
La modulación FM crea un ancho de banda difícil de determinar, pero se puede demostrar empíricamente que es varias veces la de la moduladora, dependiendo de los parámetros de modulación. 10 es un valor frecuente.

### Radiodifusión comercial

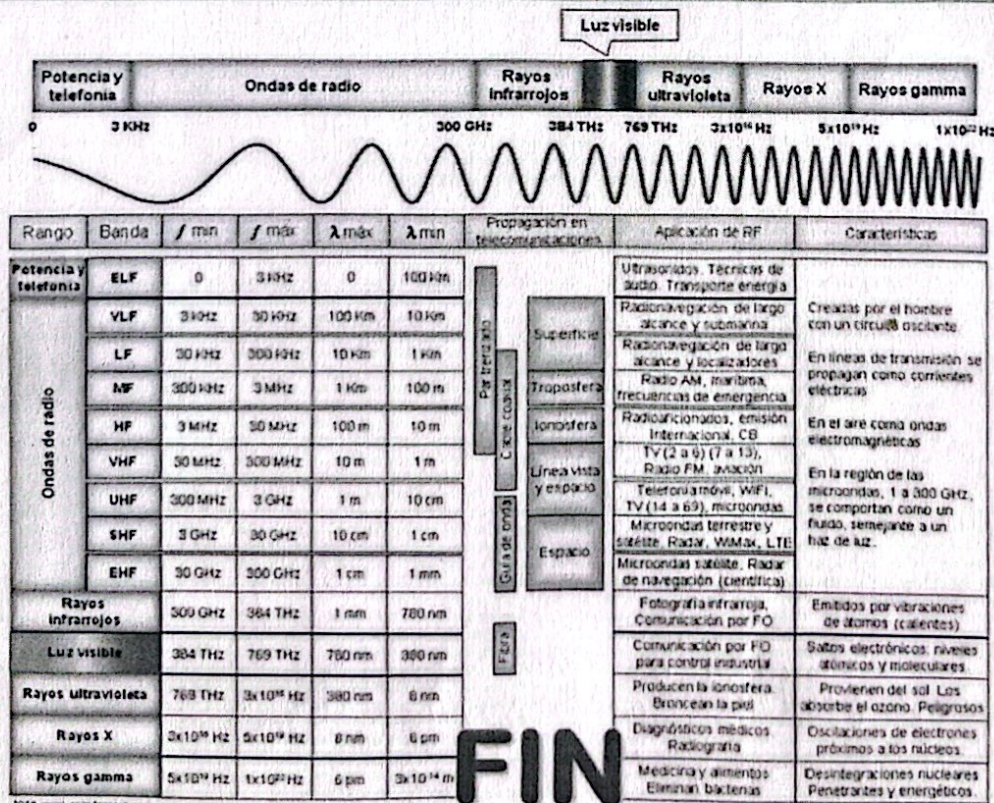
FM tiene una banda entre 88 y 108 MHz.

A cada estación se asignan 200 kHz de  $B_{FM}$ .

Cada radio FM utiliza una portadora diferente.



## Bandas de frecuencias



FIN