



Fundamentos de Comunicaciones Inalámbricas

Federico La Rocca

Tecnologías para la Internet
de las Cosas





Agenda

■ Propagación

- Fundamentos
- Antenas
- Algunos modelos de propagación

■ Modulación digital

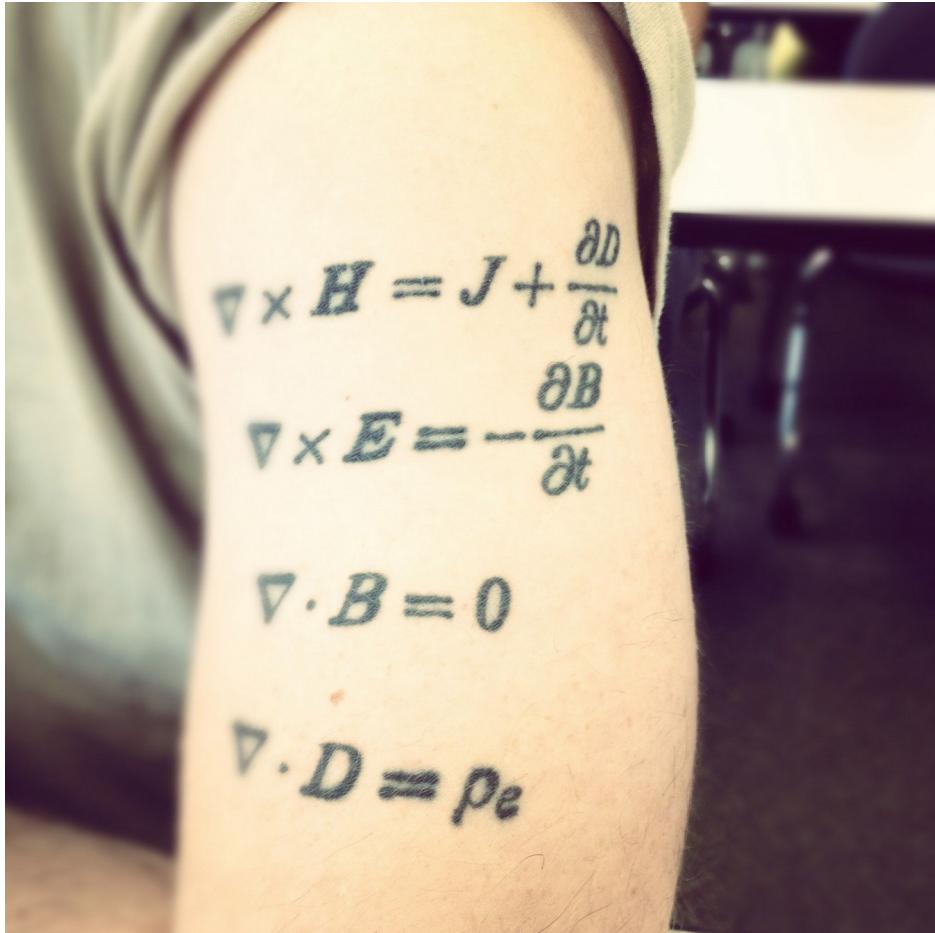
- Modulación lineal y exponencial
- Canal AWGN
- Sensibilidad

■ Link budget



Propagación - Fundamentos

■ Ecuaciones de Maxwell



H = Campo magnético = B/μ
Con μ la permeabilidad del medio

J = Densidad de corriente
Corriente eléctrica por unidad de área

D = Densidad de flujo eléctrico
 $= \epsilon E$
Con ϵ la permitividad del medio

ρ_e = Densidad de carga
eléctrica

Carga por unidad de volumen



Propagación - Fundamentos



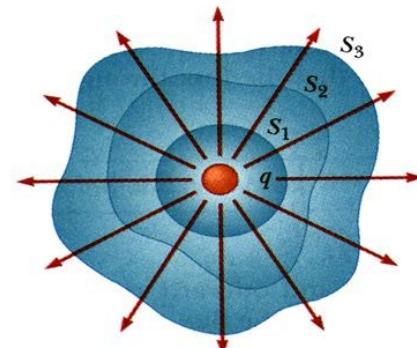
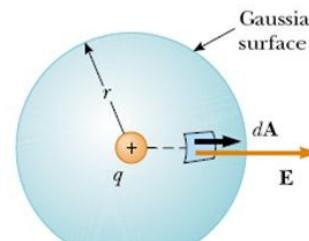
■ Ecuaciones de Maxwell (intuitivo)

A photograph of a handwritten page from a notebook. The page contains the following text:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot B = 0$$
$$\nabla \cdot D = \rho_e$$

A blue oval highlights the equation $\nabla \cdot D = \rho_e$.

Ley de Gauss: La carga en un volumen dado es proporcional al campo eléctrico que atraviesa su superficie





Propagación - Fundamentos



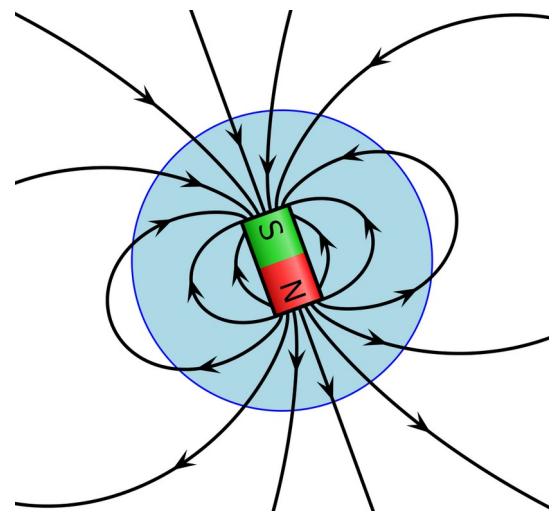
■ Ecuaciones de Maxwell (intuitivo)

A photograph of a handwritten page from a notebook. The page contains the following text:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot B = 0$$
$$\nabla \cdot D = \rho_e$$

The equation $\nabla \cdot B = 0$ is circled in blue.

Ley de Gauss de magnetismo: El campo magnético que atraviesa cualquier superficie cerrada es siempre cero (i.e. no existen los uni-polos magnéticos)





Propagación - Fundamentos



■ Ecuaciones de Maxwell (intuitivo)

A photograph of handwritten mathematical notes on a piece of paper. The notes include:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot B = 0$$
$$\nabla \cdot D = \rho_e$$

Two blue ovals highlight the first two equations. Two blue arrows point from these highlighted equations to the corresponding text definitions on the right.

Ley de Ampere: Un campo magnético se puede generar por (i) corrientes eléctricas o (ii) campos eléctricos que cambian con el tiempo

Ley de Faraday de Inducción: Un campo magnético que cambia en el tiempo genera un campo eléctrico que cambia en el espacio (y viceversa)



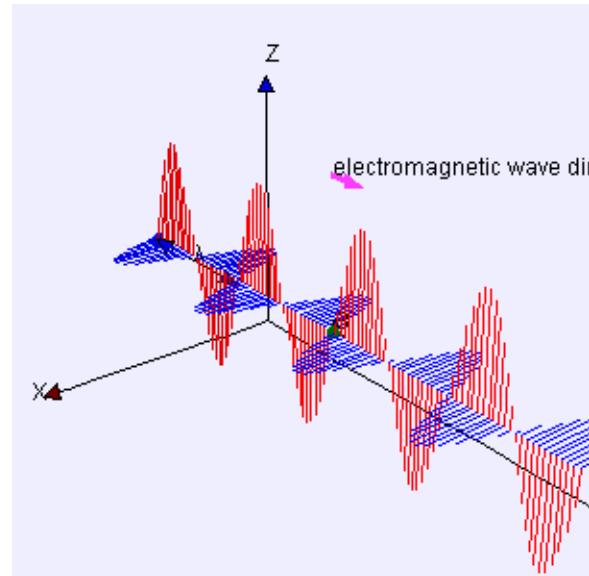
Propagación - Fundamentos



■ Ecuaciones de Maxwell en el vacío ($J = \rho_e = 0$):

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \nabla^2 E = 0 \quad \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} - \nabla^2 B = 0$$

- Se puede probar que los componentes de ambos campos tienen la forma $g(2\pi ft - kr)$ y que son ortogonales
- Ejemplo: $A \cos(2\pi ft - ky)$



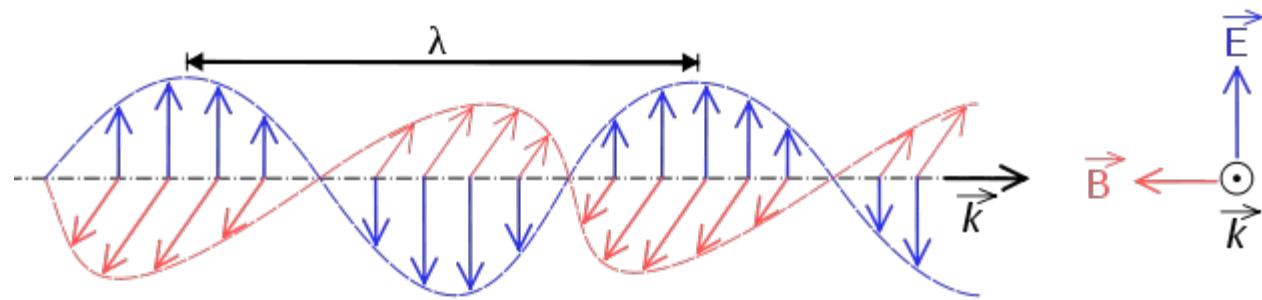


Propagación - Fundamentos



■ Resumen:

- Dos componentes: campo eléctrico (E) y campo magnético (B)
- Oscilan perpendicularmente entre sí y perpendicular a la dirección de propagación

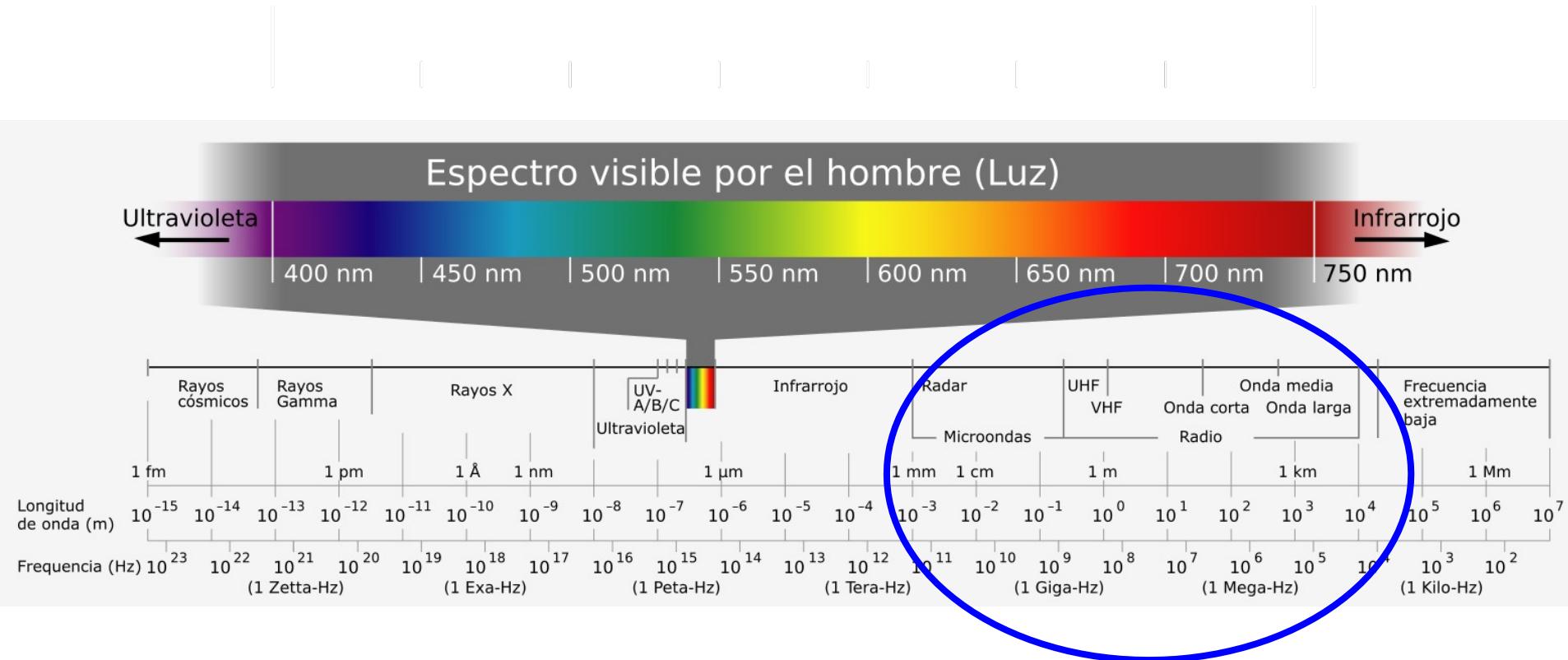


- Se podría pensar que el campo magnético genera el campo eléctrico que a su vez genera el campo magnético
- Se cumple que $c = \lambda f$



Espectro electromagnético

■ ¿Qué hay a distintas frecuencias?





Espectro radioeléctrico

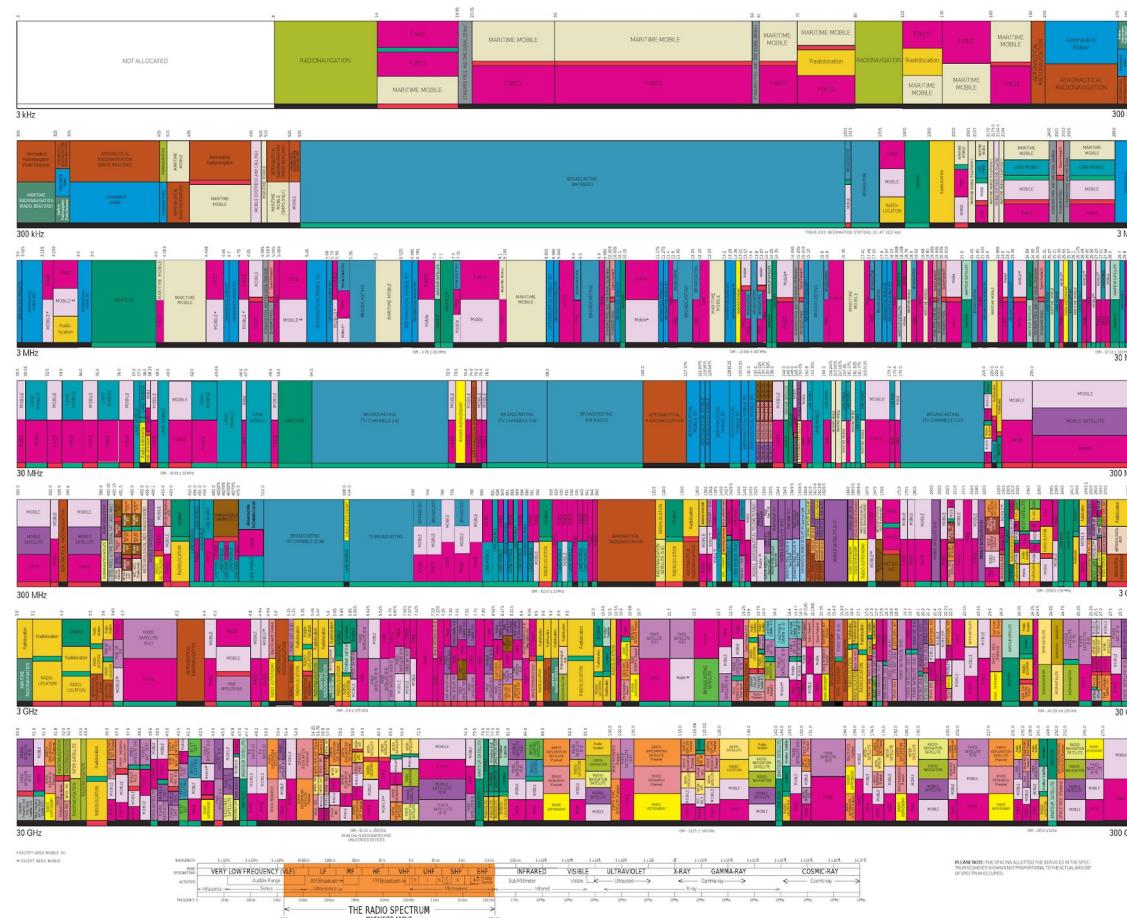
■ Asignación de frecuencias: caro y escaso

UNITED STATES FREQUENCY ALLOCATIONS THE RADIO SPECTRUM



This chart is a graphic representation of the portion of the Table of Frequency Allocations used by the United States Government. It is not a complete listing of all frequency allocations. It is intended to give the reader a general idea of the spectrum usage. For complete allocations, consult the Table of Frequency Allocations. Questions concerning the use of specific frequencies should be directed to the Office of Spectrum Management.

U.S. DEPARTAMENTO DE COMERCIO
National Telecommunications and Information Administration
Office of Spectrum Management
October 2003

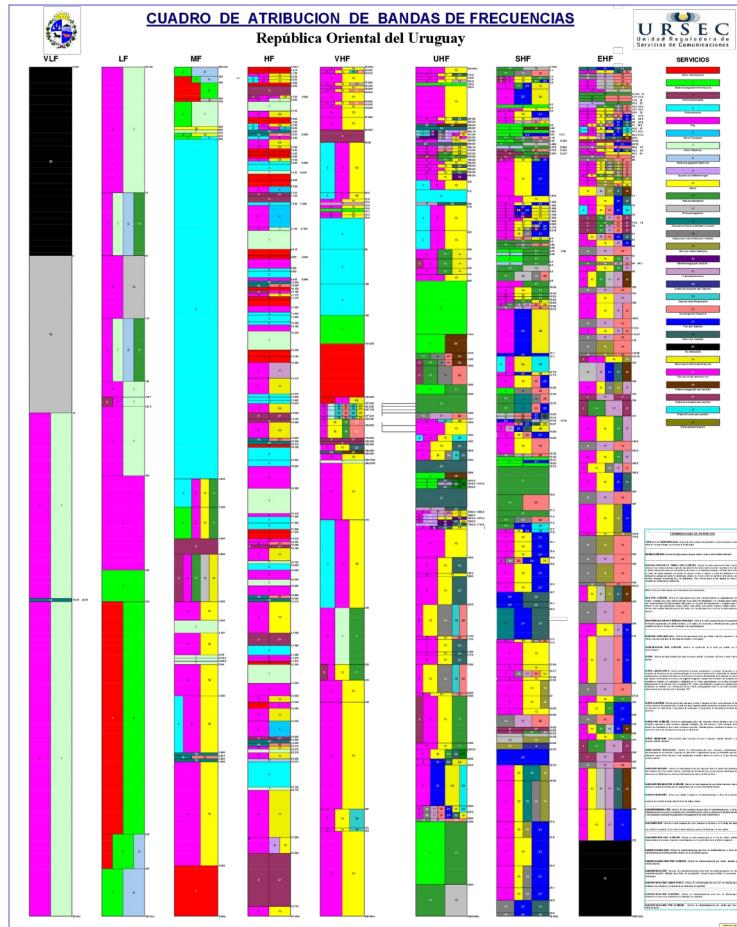




Espectro radioeléctrico

■ Asignación de frecuencias: caro y escaso

<https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/>





Agenda

■ Propagación

- Fundamentos
- **Antenas**
- Algunos modelos de propagación

■ Modulación digital

- Modulación lineal y exponencial
- Canal AWGN
- Sensibilidad

■ Link budget



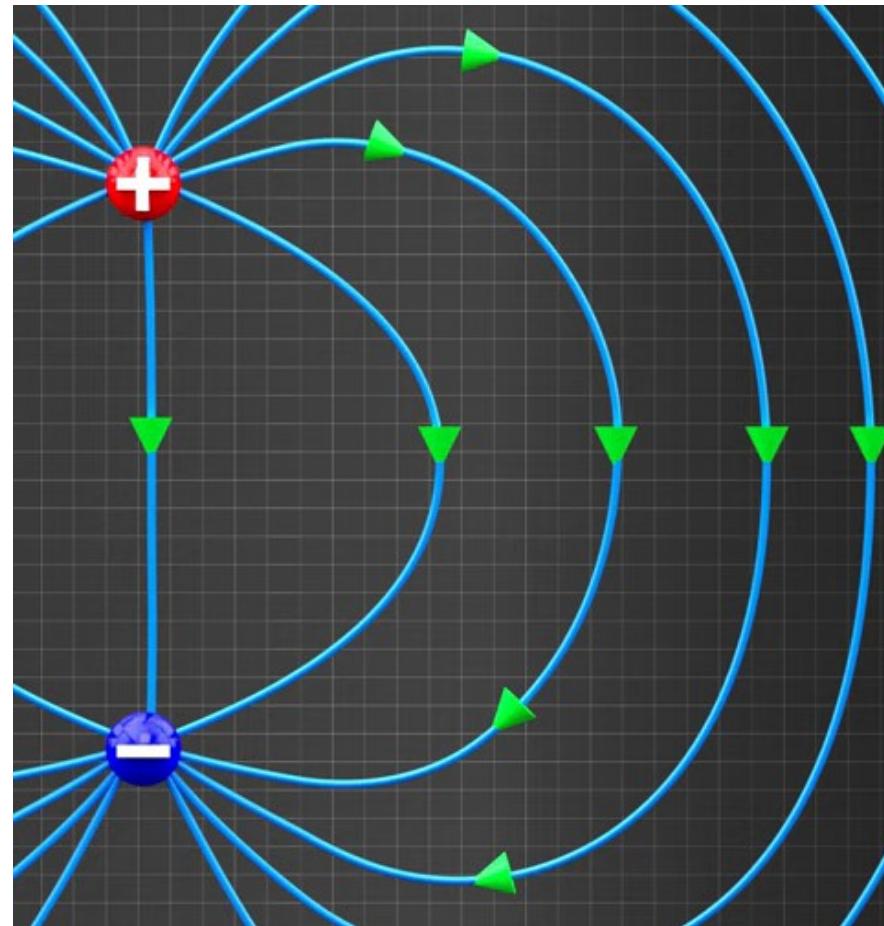
Antenas

- Es el transductor que convierte las ondas electromagnéticas en corriente eléctrica (y viceversa)
- En resumen: es la interfaz entre el equipo radio y el ambiente
- Es quizá la parte más crítica y menos comprendida del sistema
 - Una antena bien elegida e instalada puede ser la diferencia entre un sistema que funciona y uno que no



Antenas

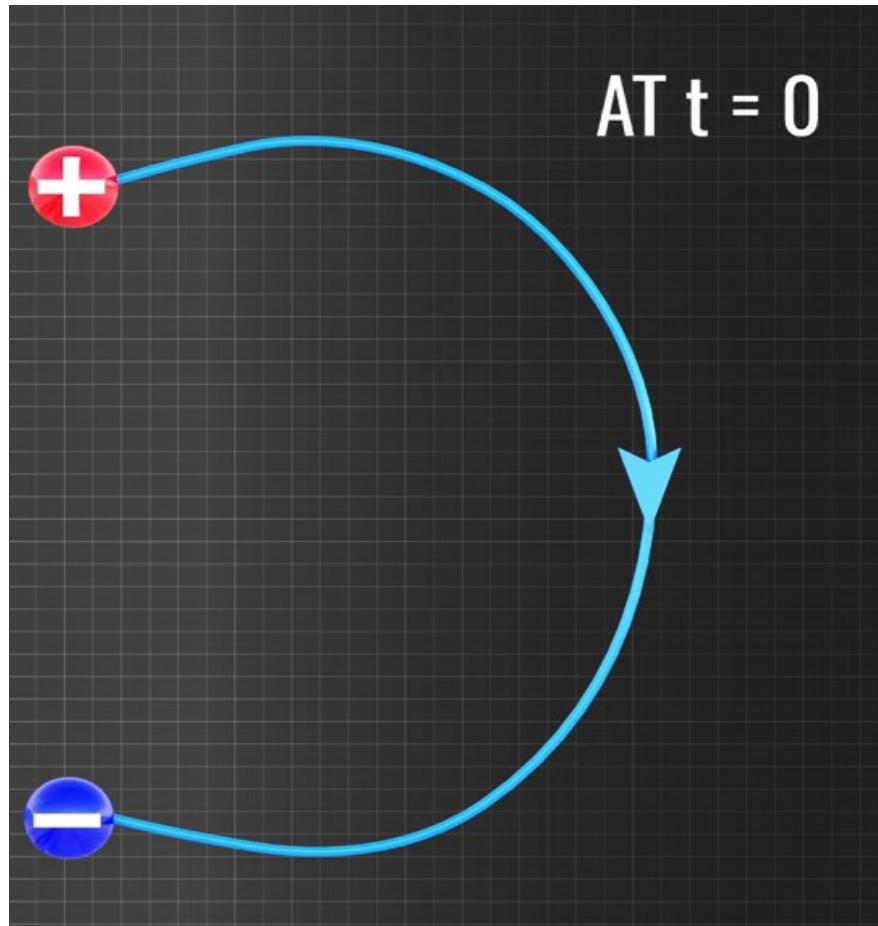
■ Funcionamiento básico: emisor





Antenas

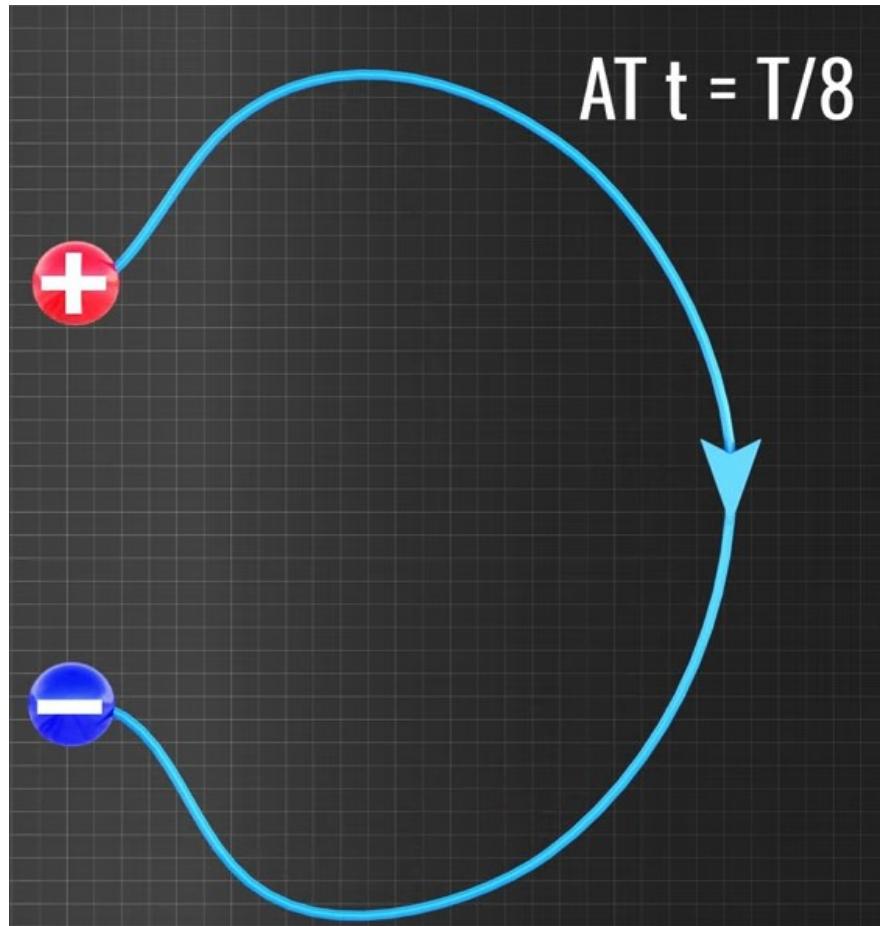
■ Funcionamiento básico: emisor





Antenas

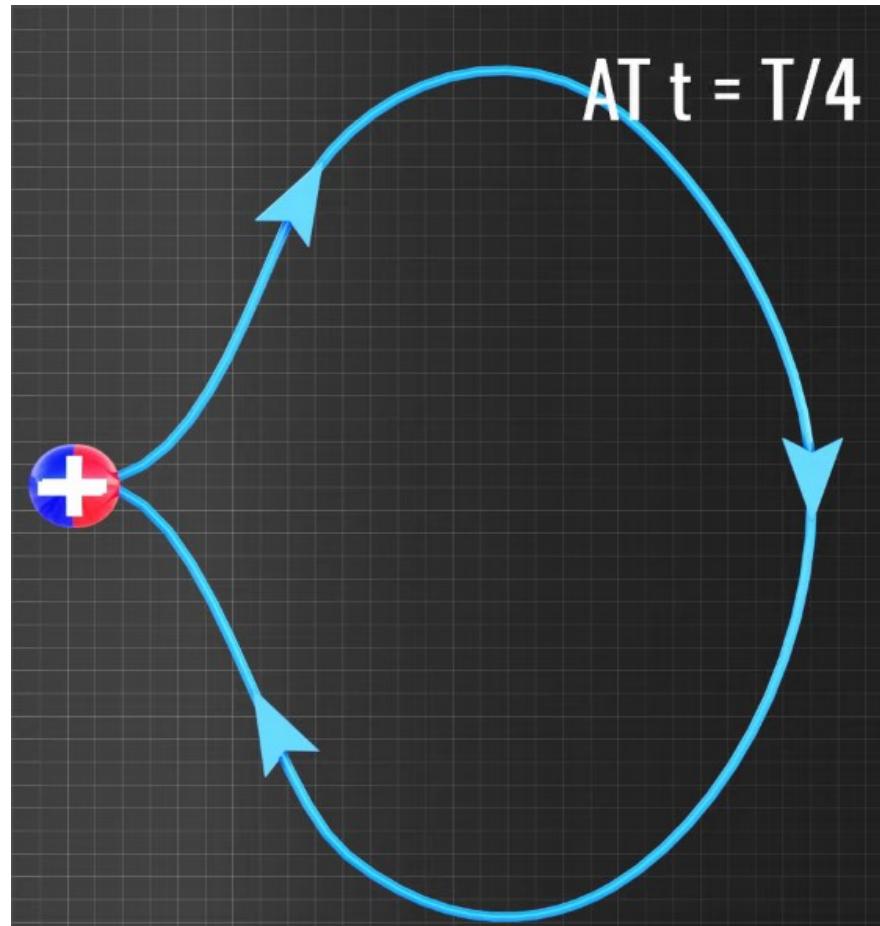
■ Funcionamiento básico: emisor





Antenas

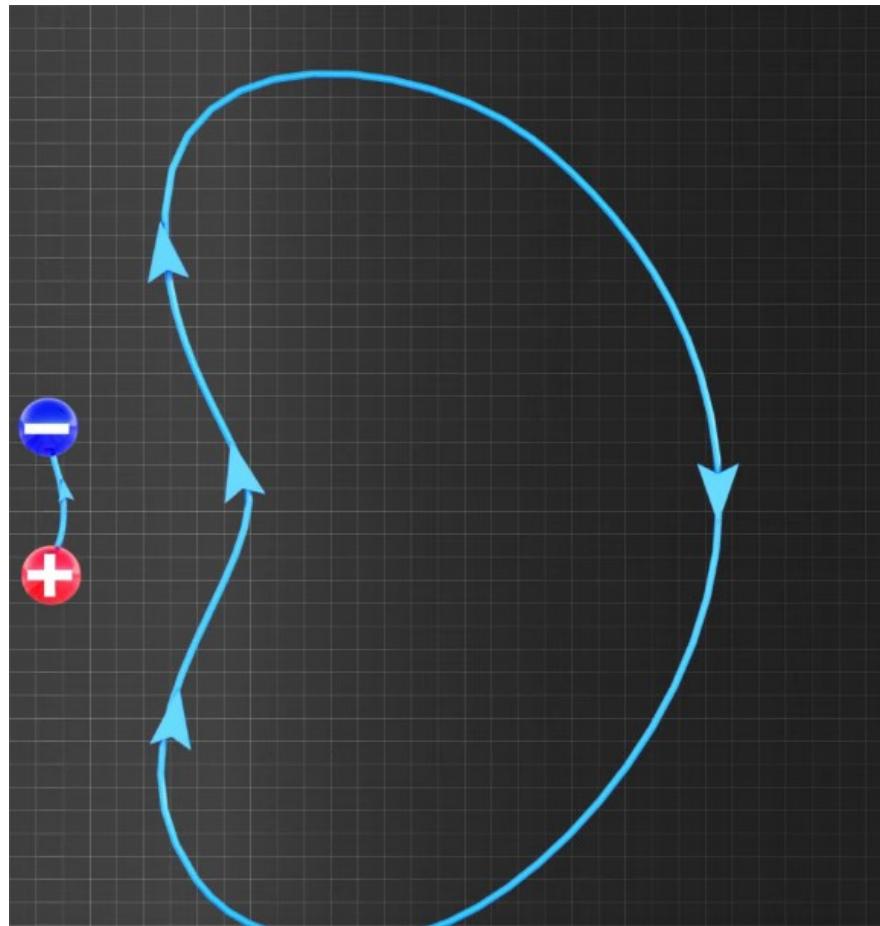
■ Funcionamiento básico: emisor





Antenas

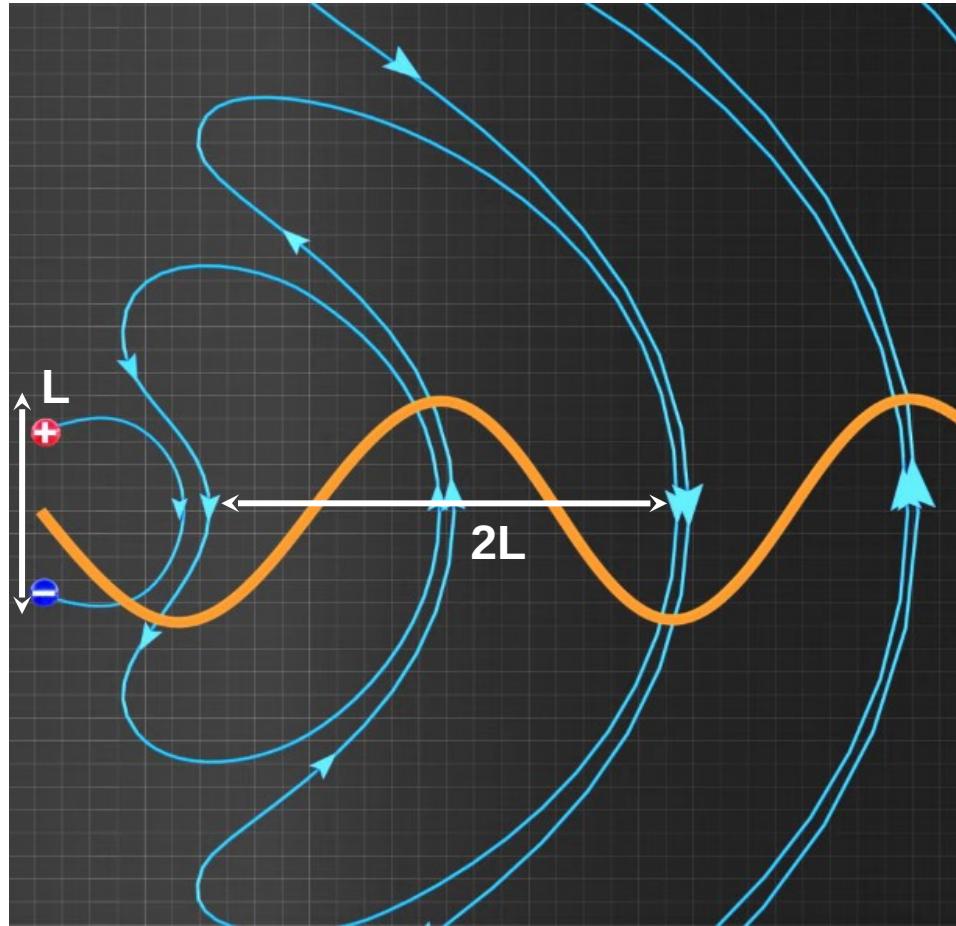
■ Funcionamiento básico: emisor





Antenas

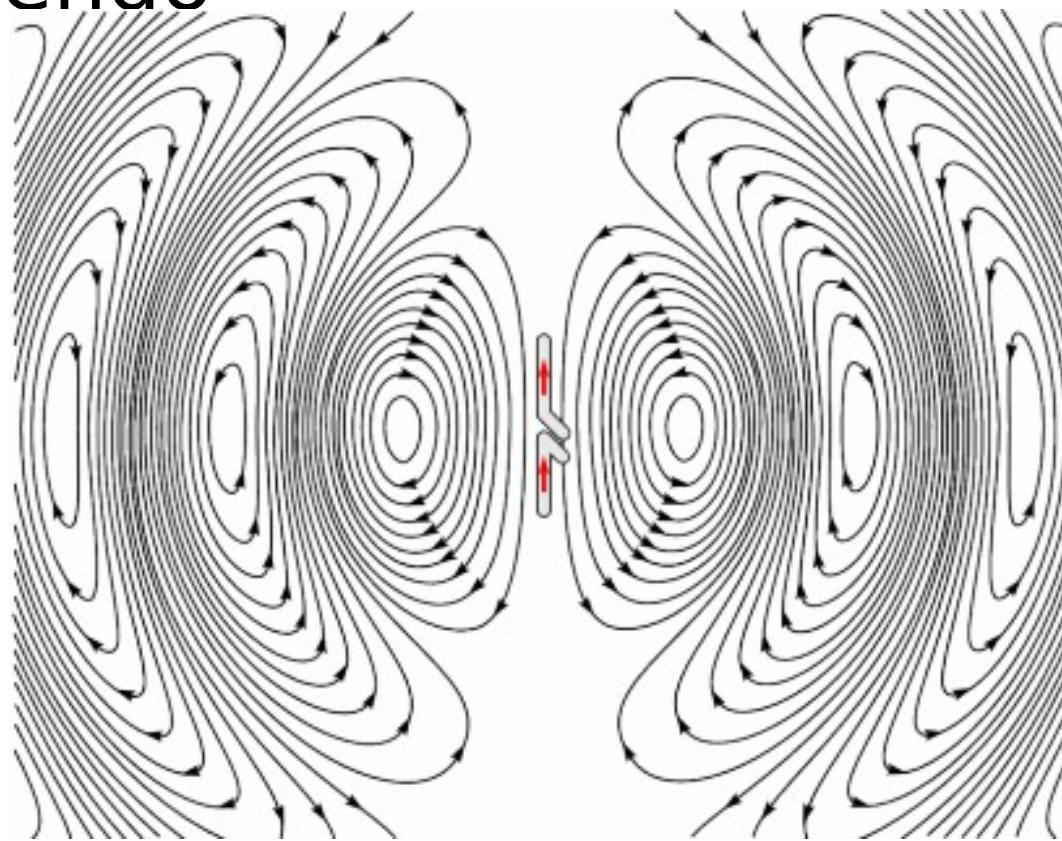
■ Funcionamiento básico: emisor





Antenas

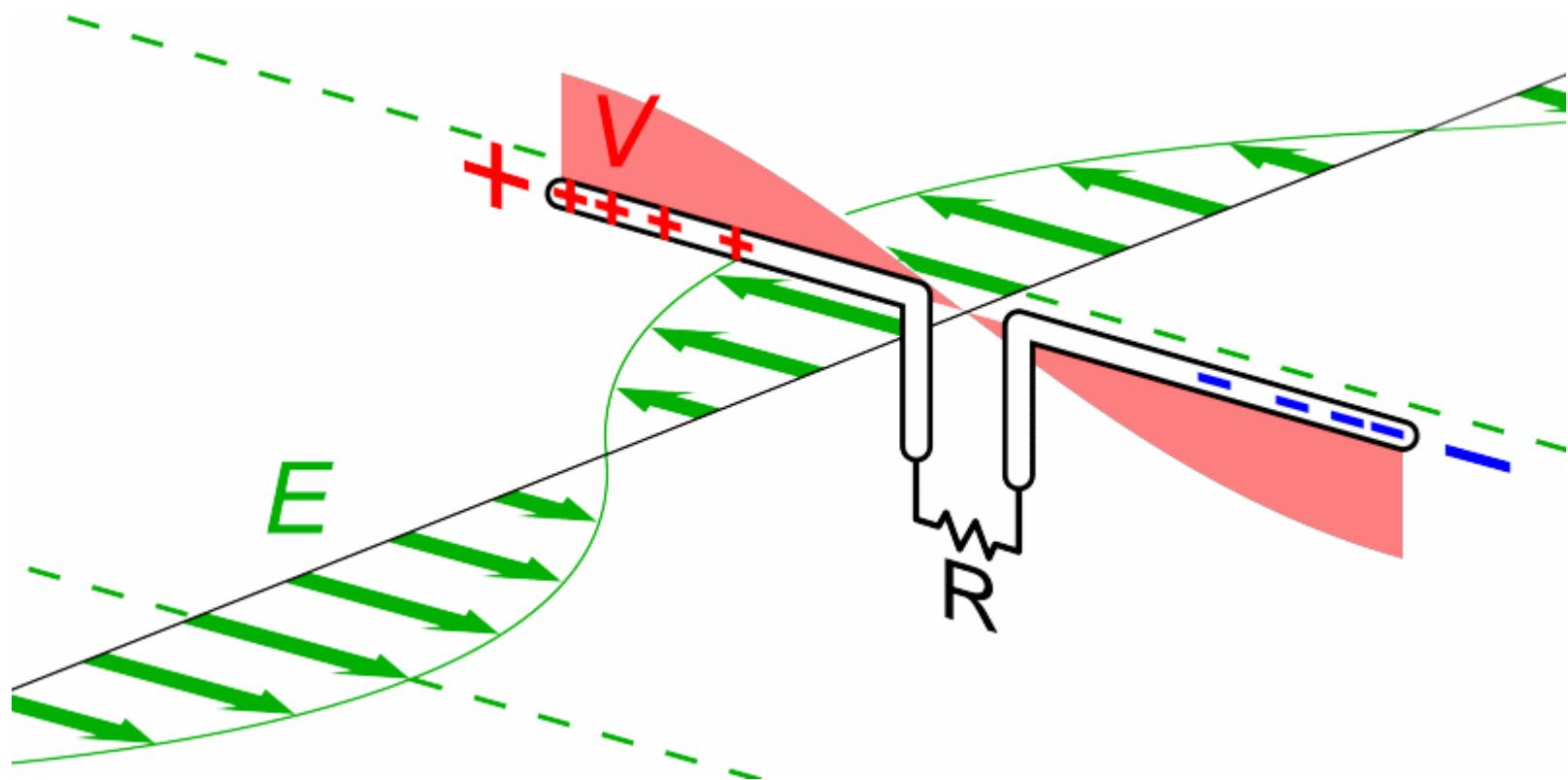
■ Funcionamiento básico: dipolo emitiendo





Antenas

- Funcionamiento básico: dipolo recibiendo





Antenas

■ Conclusiones:

- Las antenas no son isotrópicas (no radian en todas direcciones igual)
- Su operación depende de la frecuencia de la señal y su orientación respecto al frente de onda
- La operación en transmisión y recepción es idéntica

■ Veamos algunos parámetros importantes

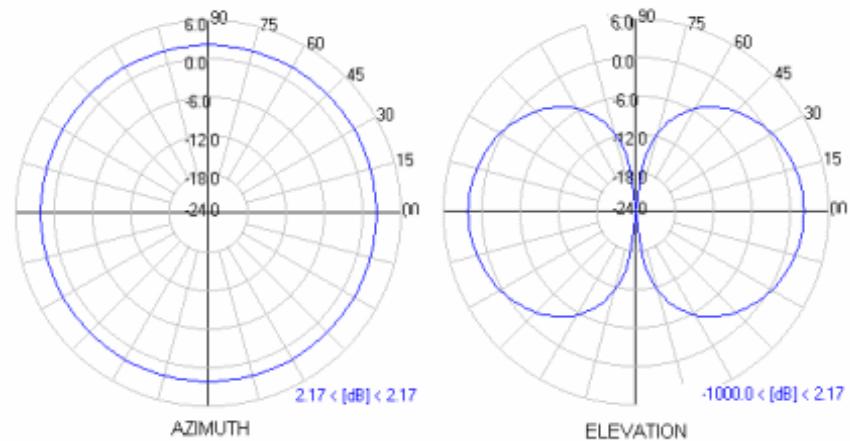
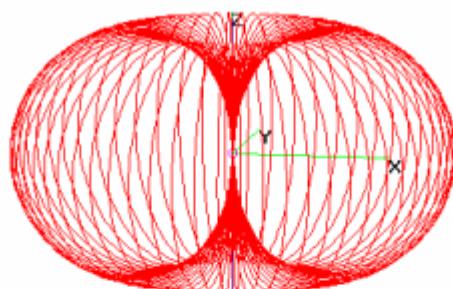


Antenas - Ganancia

- La ganancia $G(\theta, \phi)$ se define como la potencia radiada por ángulo sólido respecto a una isotrópica

$$G(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}/4\pi}$$

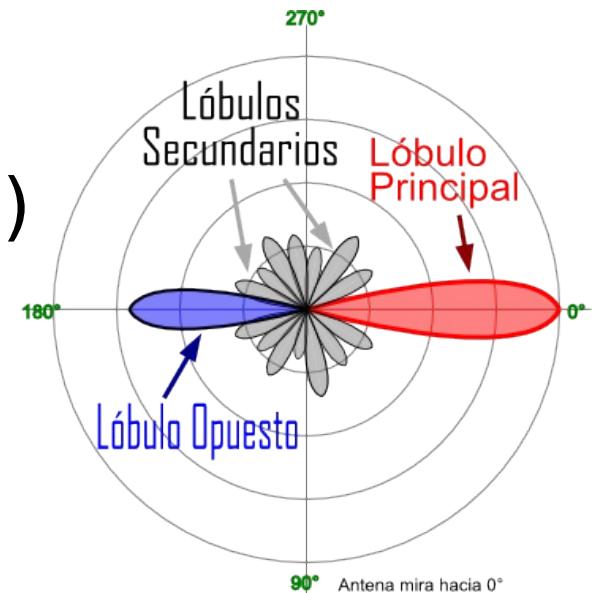
- Ejemplo: dipolo





Antenas - Ganancia

- Si no se explicita la dirección se refiere a la de máxima ganancia
- Muchas veces se brinda respecto a la isotrópica ($P_{in}/4\pi$) y en ese caso se mide en dBi
- Otros parámetros:
 - Beamwidth (ancho de haz)
 - Front-to-back ratio





Antenas - Otros parámetros



■ Ancho de banda:

- El rango de frecuencias para el cual la performance de la antena es la esperada

■ Polarización:

- Orientación del campo eléctrico generado por la antena con respecto a la superficie terrestre
- Típicamente vertical, horizontal o circular
- Importante que Rx y Tx coincidan aunque puede cambiar por propagación

■ Impedancia:

- Cociente entre voltaje aplicado y corriente resultante
- Importante que la impedancia del equipo, conectores, antena, etc. sea la misma



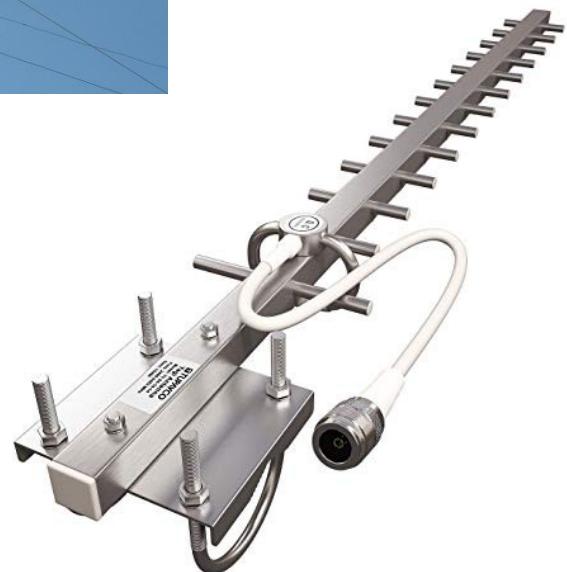
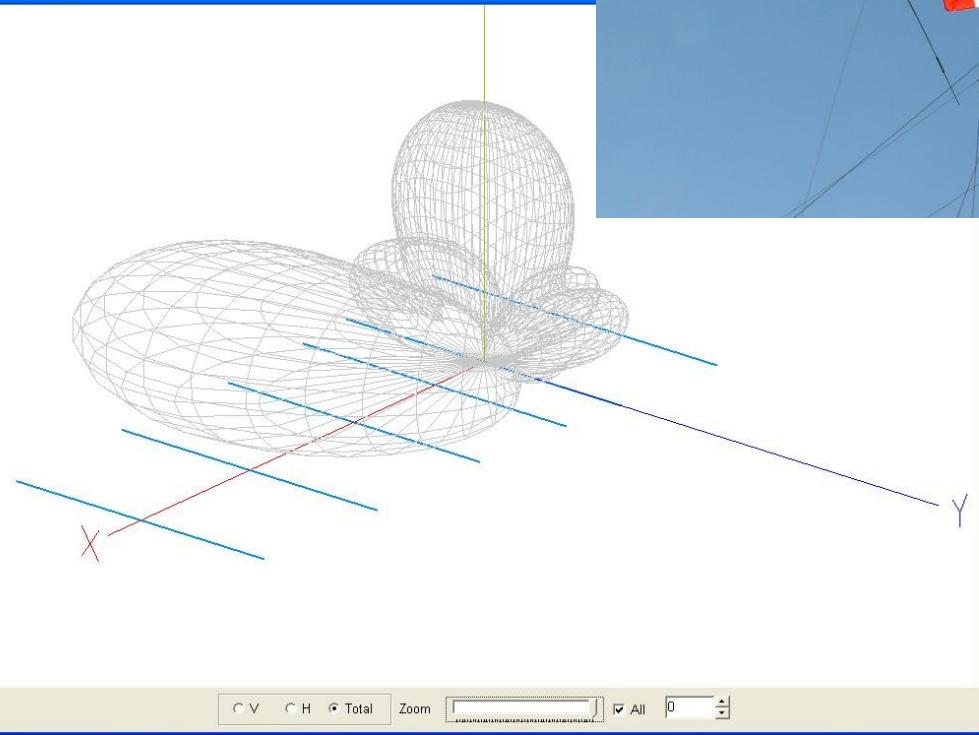
Ejemplo: dipolo





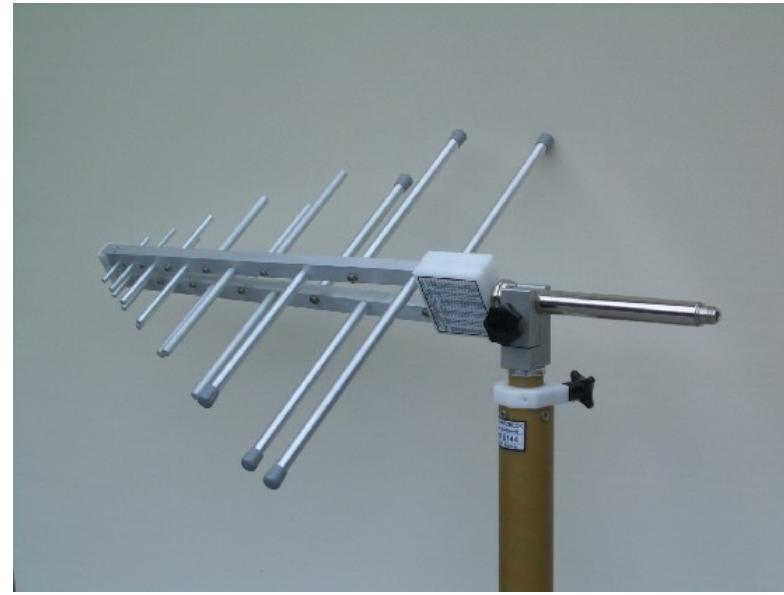
Ejemplo: Yagi-Uda

3D Far field





Ejemplo: Log-periódica





Agenda

■ Propagación

- Fundamentos
- Antenas
- Algunos modelos de propagación

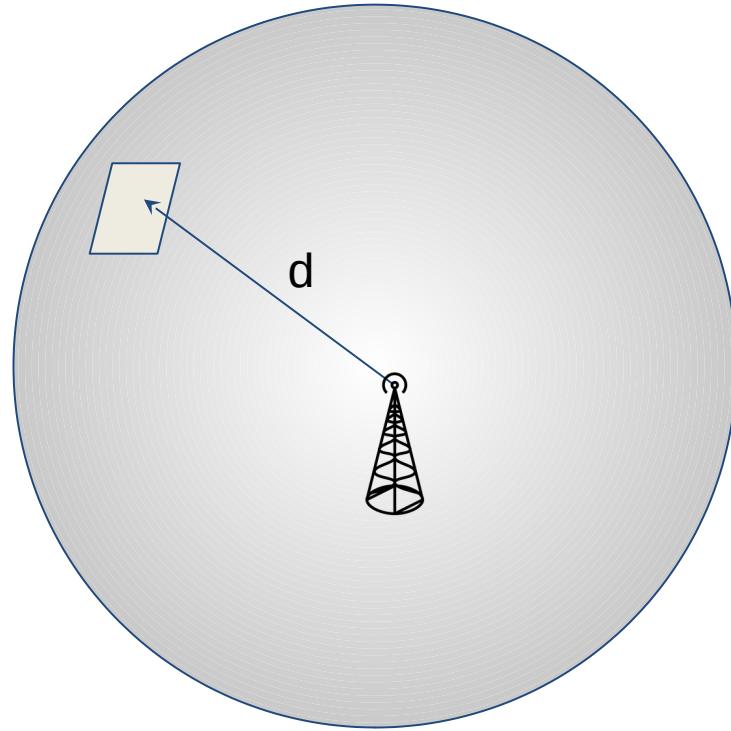
■ Modulación digital

- Modulación lineal y exponencial
- Canal AWGN
- Sensibilidad

■ Link budget



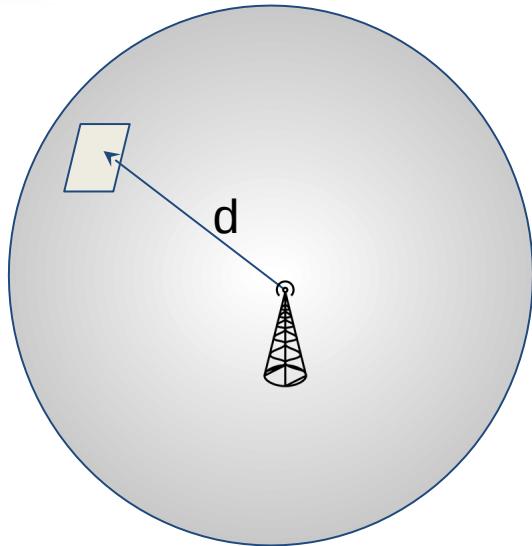
Propagación en vacío



- Potencia radiada por unidad de área: $W_t(\theta, \phi, d) = U_t(\theta, \phi)/d^2$
- Se puede probar que recepción la potencia recibida será $W_t(\theta, \phi, d) A_{r}^{eff}$
 - A_{r}^{eff} es el **área efectiva** de la antena receptora
 - $A_{r}^{eff} = \lambda^2 D_r(\theta_r, \phi_r)/4\pi$



Propagación en vacío



- Sustituyendo $U_t(\theta_t, \phi_t)$ por $G(\theta_t, \phi_t)P_{in}/4\pi$ se llega a la ecuación de Friis:

$$\begin{aligned} P_r &= W_t(\theta_t, \phi_t, d) A_{eff}^r = W_t(\theta_t, \phi_t, d) \lambda^2 D_r(\theta_r, \phi_r)/4\pi \\ &\Rightarrow P_r = U_t(\theta_t, \phi_t) \lambda^2 D_r(\theta_r, \phi_r)/4\pi d^2 \end{aligned}$$

$$P_r = P_t G_r(\theta_r, \phi_r) G_t(\theta_t, \phi_t) (\lambda/4\pi d)^2$$



Propagación en vacío

- Ecuación de Friis como función de la frecuencia

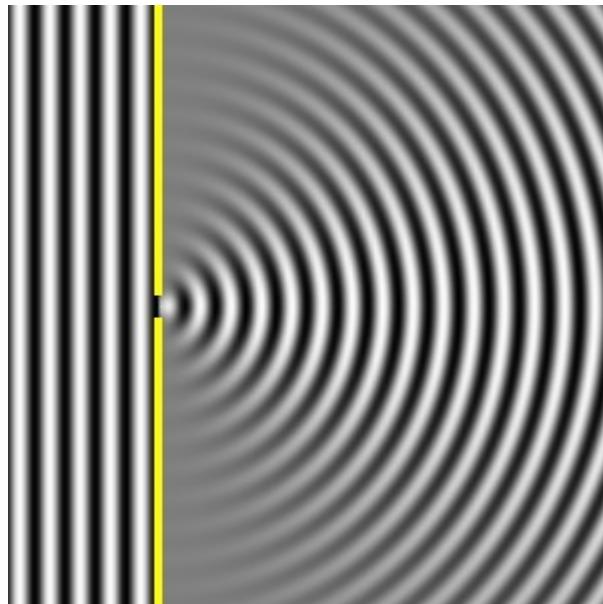
$$P_r = P_t G_r(\theta_r, \phi_r) G_t(\theta_t, \phi_t) (c/4\pi d f)^2$$

- Dos conclusiones:
 - Caída cuadrática en distancia: la misma energía se dispersa en un área mayor
 - Caída cuadrática en frecuencia: el área efectiva de la antena receptora es menor
- ¿Para qué sirve?
 - En condiciones de línea de vista (LOS) aplica
 - Es la base de casi todos los modelos

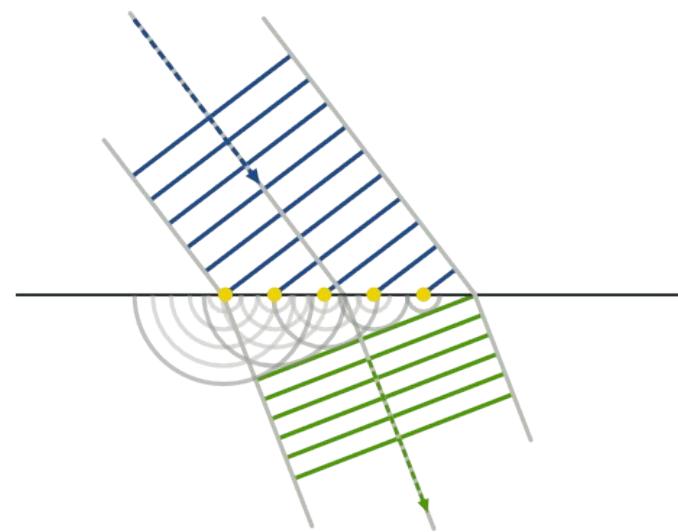


Condiciones de LOS

- **Frente de onda:** lugar geométrico de los puntos del espacio donde la fase del campo electromagnético es la misma
- **Principio de Huygens:** “Cualquier punto de un frente de onda puede ser visto como una fuente puntual”



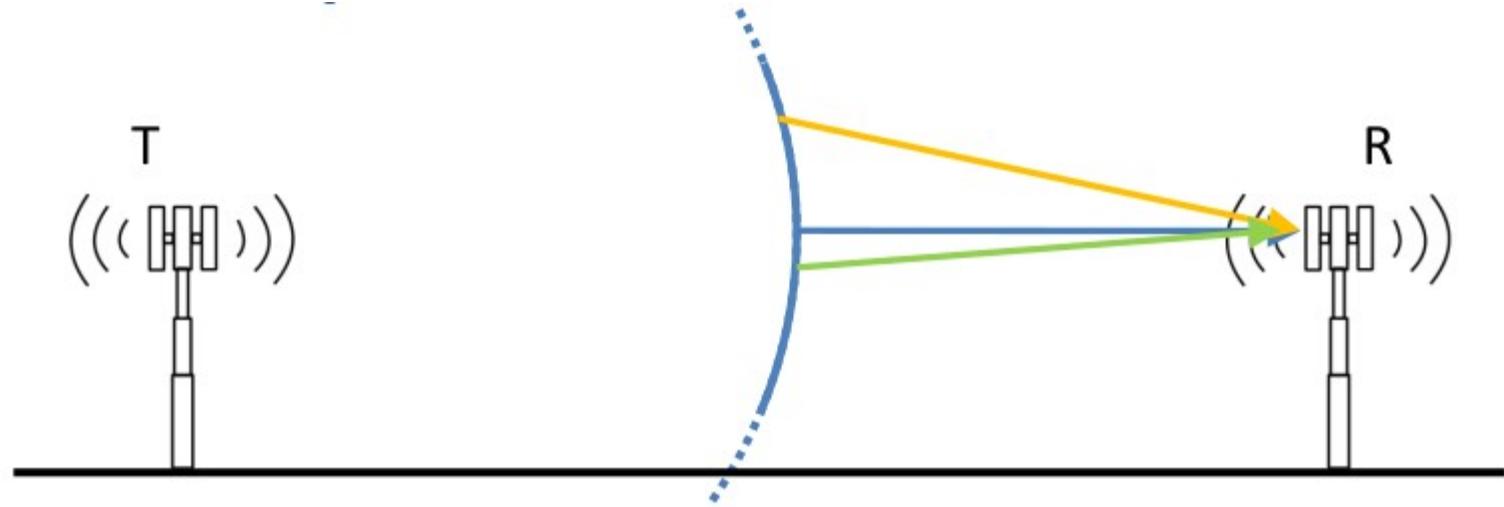
Difracción



Refracción



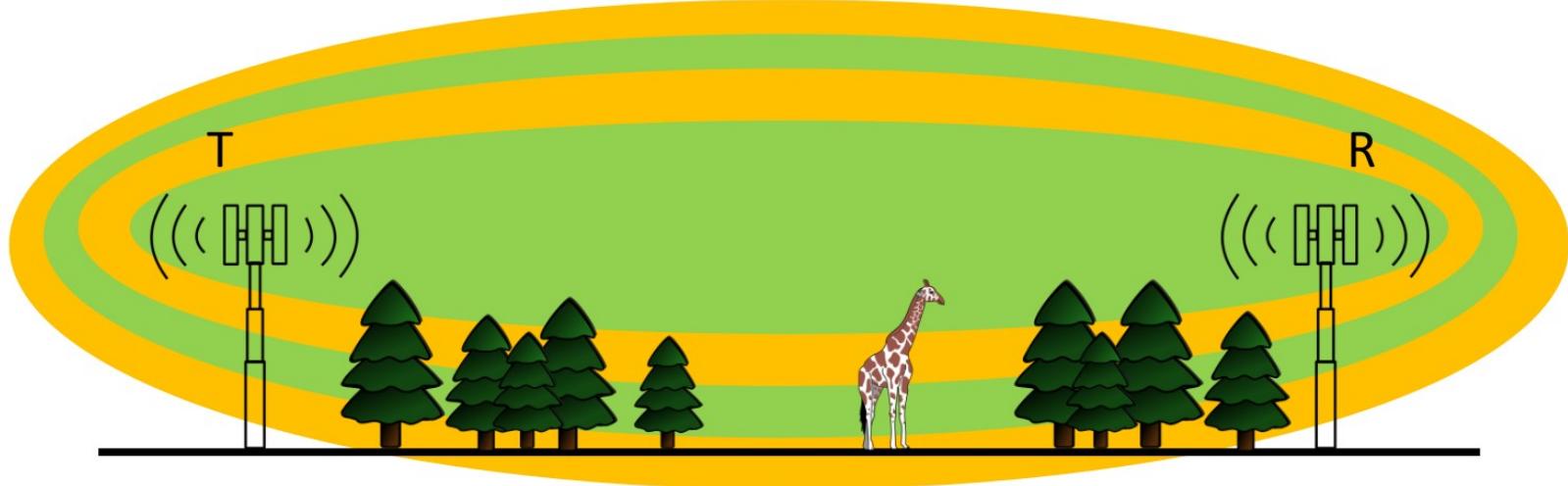
Elipsoides de Fresnel



- Apliquemos el principio de Huygens al frente de onda circular generado por T:
 - El camino directo será el componente principal
 - El resto de los caminos llega con fase distinta
 - Si la diferencia de recorrido está entre $2k\lambda/2$ y $(2k+1)\lambda/2$: los caminos interferirán constructivamente
 - Sino, interferirán destructivamente



Elipsoides de Fresnel



■ k-ésima elipsoide de Fresnel

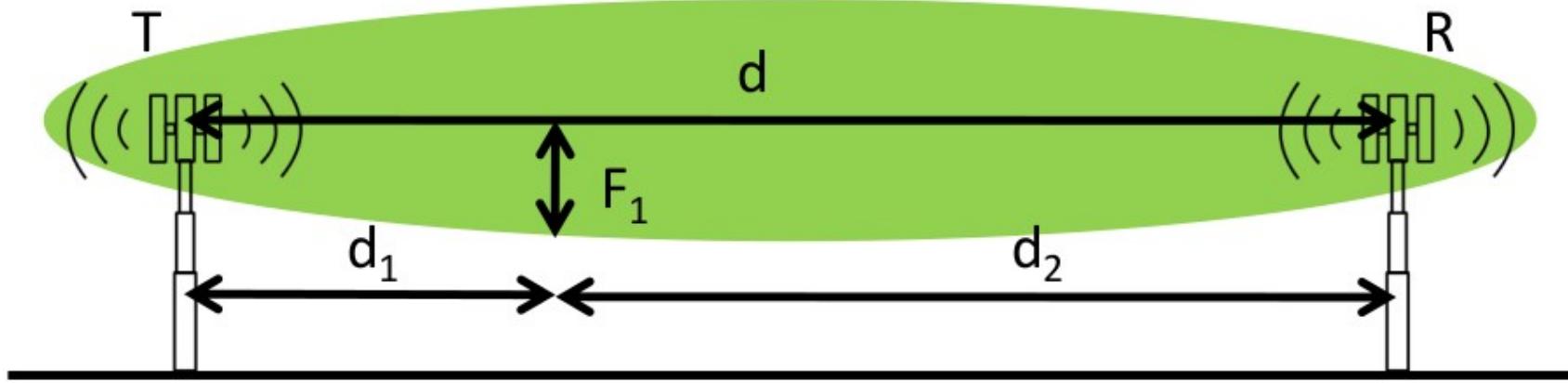
- Lugar geométrico de los puntos del espacio donde la diferencia entre el camino directa y el indirecto es exactamente $k\lambda/2$
- La energía dentro de los elipsoides pares aporta potencia y la de los impares quita potencia

■ La mayoría de la energía está en el primer elipsoide: condición de LOS

- La primer elipsoide libre de obstáculos
- Por lo general se toma como criterio 60%



Elipsoides de Fresnel



■ ¿Cómo calcular el radio de la elipsoide?

- En cualquier punto:

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

- En la mitad del trayecto (radio máximo)

$$F = 8660.3 \sqrt{\frac{d}{f}}$$

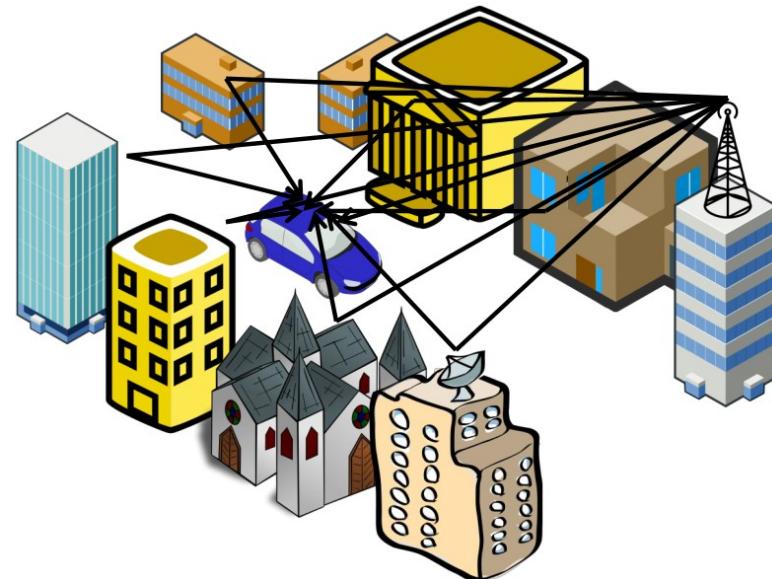
- Dos ejemplos:

- Radio AM ($f \sim 1\text{MHz}$) y una distancia de 1km: $F = 274\text{m}$
- Enlace Micro ($f \sim 1\text{GHz}$) y una distancia de 1km: $F = 9\text{m}$



Modelos NLOS

- ¿Y si no hay línea de vista?
- Tres tipos de modelos:
 - Empíricos: basados en medidas
 - Semi-empíricos: se basan en la teoría de propagación. Incorporan características del entorno y se complementan con medidas para ajustar los parámetros
 - Físicos: Se apoyan en la teoría de rayos. Requieren gran nivel de detalle del entorno.





Modelos NLOS

■ Ejemplo Empírico: Modelo de Okumura

- Campaña de medidas de atenuación en Tokio y publica una serie de curvas
- Depende de la altura del transmisor, receptor, distancia y entorno (urbano, suburbano, etc.)
- Modelo Okumura-Hata: Versión analítica de las curvas de Hata
- Modelo Okumura-Hata COST231: Extensión del modelo de Okumura-Hata para frecuencias entre 1500 y 2000 MHz

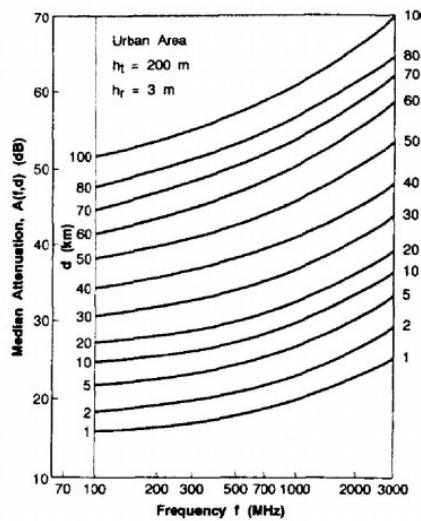


Figure 3.23

Median attenuation relative to free space ($A_{mu}(f,d)$), over a quasi-smooth terrain [From [Oku68] © IEEE].

Urban environments [edit]

The Hata model for urban environments is the basic formulation since it was based on Okumura's measurements made in the built-up areas of Tokyo. It is formulated as following:

$$L_U = 69.55 + 26.16 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_B - C_H + [44.9 - 6.55 \log_{10} h_B] \log_{10} d$$

For small or medium-sized city,

$$C_H = 0.8 + (1.1 \log_{10} f - 0.7) h_M - 1.56 \log_{10} f$$

and for large cities,

$$C_H = \begin{cases} 8.29 (\log_{10}(1.54h_M))^2 - 1.1 & \text{if } 150 \leq f \leq 200 \\ 3.2 (\log_{10}(11.75h_M))^2 - 4.97 & \text{if } 200 < f \leq 1500 \end{cases}$$

where

L_U = Path loss in urban areas. Unit: decibel (dB)

h_B = Height of base station antenna. Unit: meter (m)

h_M = Height of mobile station antenna. Unit: meter (m)

f = Frequency of transmission. Unit: Megahertz (MHz)

C_H = Antenna height correction factor

d = Distance between the base and mobile stations. Unit: kilometer (km).



Modelos NLOS

■ Ejemplo Semi-Empírico: Norma ITU-R P.1546

- Consta de curvas de atenuación empíricas para ciertos escenarios
- ... pero se brindan correcciones por distintos fenómenos de propagación
- Funciona para frecuencias entre 30 MHz y 3 GHz
- Última versión de 2019 (ITU-R P.1546-6)

3.1 Land paths shorter than 15 km

For land paths less than 15 km, one of the following two methods should be used:

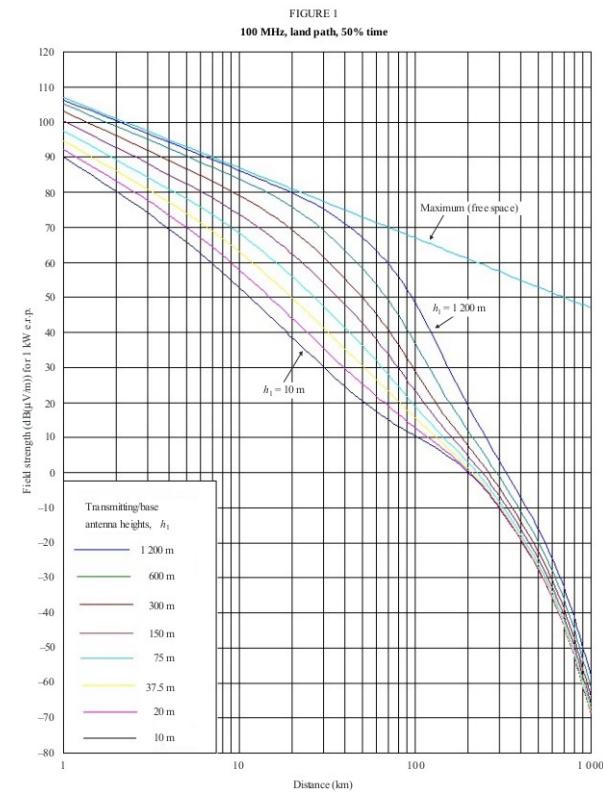
3.1.1 Terrain information not available

Where no terrain information is available when propagation predictions are being made, the value of h_1 is calculated according to path length, d , as follows:

$$h_1 = h_a \quad \text{m} \quad \text{for} \quad d \leq 3 \text{ km} \quad (4)$$

$$h_1 = h_a + (h_{eff} - h_a)(d - 3)/12 \quad \text{m} \quad \text{for } 3 \text{ km} < d < 15 \text{ km} \quad (5)$$

where h_a is the antenna height above ground (e.g. height of the mast).





Agenda

■ Propagación

- Fundamentos
- Antenas
- Algunos modelos de propagación

■ Modulación digital

- Modulación lineal y exponencial
- Canal AWGN
- Sensibilidad

■ Link budget



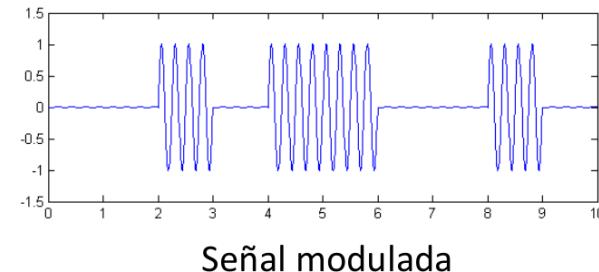
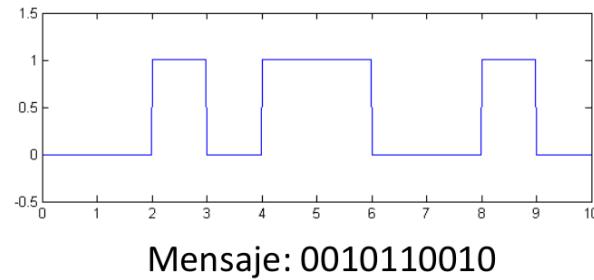
Modulación Digital

■ ¿Qué es?

- Es el proceso de transformar la secuencia de 0s y 1s (el mensaje) en una señal analógica que pueda ser transmitida físicamente
- Requerimiento: usar la banda asignada

■ Ejemplo: On-Off Keying (OOK)

- Cada 1 se representa por la presencia de la portadora durante T_b segundos
- Cada 0 se representa por su ausencia





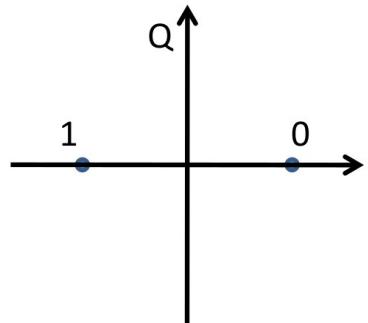
Modulación Digital Lineal



- En general, cada (grupo de) bit(s) se representa por una única señal multiplicada por cierto valor

- En OOK

- '1' <-> $A \times \pi(t/T_b)$
 - '0' <-> $0 \times \pi(t/T_b)$

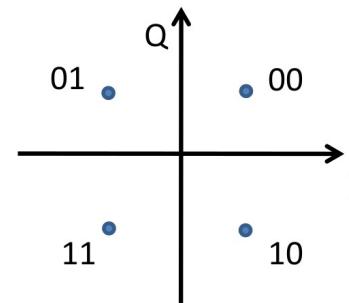


- En BPSK

- '1' <-> $-A \times p(t)$
 - '0' <-> $A \times p(t)$

- En QPSK

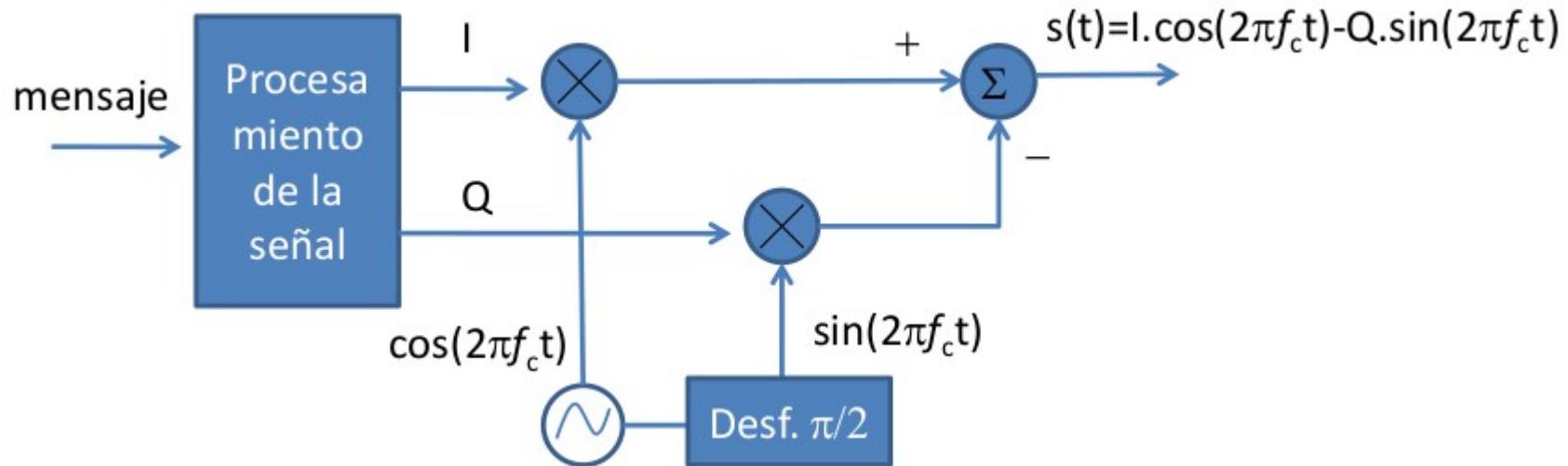
- '00' <-> $(A+jA) \times p(t)$
 - '01' <-> $(-A+jA) \times p(t)$
 - '10' <-> $(A-jA) \times p(t)$
 - '11' <-> $(-A-jA) \times p(t)$





Modulación

- Recordatorio: la parte real (**In Phase**) se envía multiplicando por coseno de la portadora y la parte imaginaria (**Quadrature**) por seno

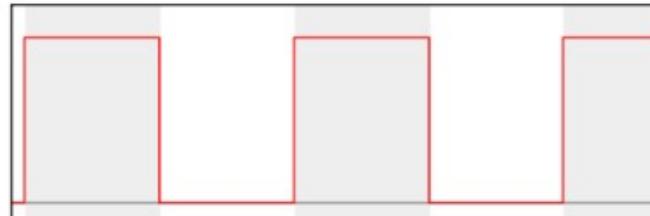




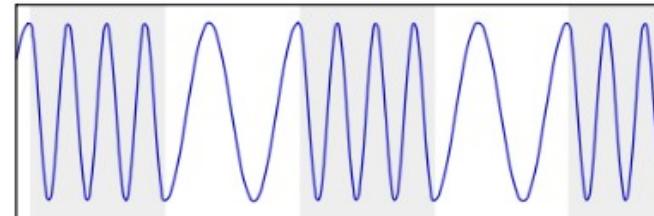
Modulación Digital Exponencial



- Frequency Shift-Keying (FSK): Usar distintas frecuencias para distintos símbolos



Mensaje: 010101



Señal modulada

- Básicamente se modula por FM una señal conformada como M-ASK
 - Ejemplo: GSMK (Gaussian Minimum Shift Keying), usado en GSM, conforma usando $p(t) = \pi((t-T/2)/T) * Ae^{-axx}$



Ruido AWGN

- Incluso si corrijo todas las no-idealidades, el ruido siempre queda
- Considerando solo el ruido blanco (piso de ruido igual a N_0), el mejor receptor BPSK tendrá un BER

$$P_e = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2P_r}{r_b N_0}} \right)$$

- Compromiso entre Potencia de recepción (P_r), Tasa de bits (r_b) y densidad del ruido
- El ruido puede provenir del ambiente, pero sobre todo del propio equipo receptor
- Dada una P_e (BER) máxima y el N_0 en el equipo, obtengo la sensibilidad (mínima potencia de recepción)



Agenda

■ Propagación

- Fundamentos
- Antenas
- Algunos modelos de propagación

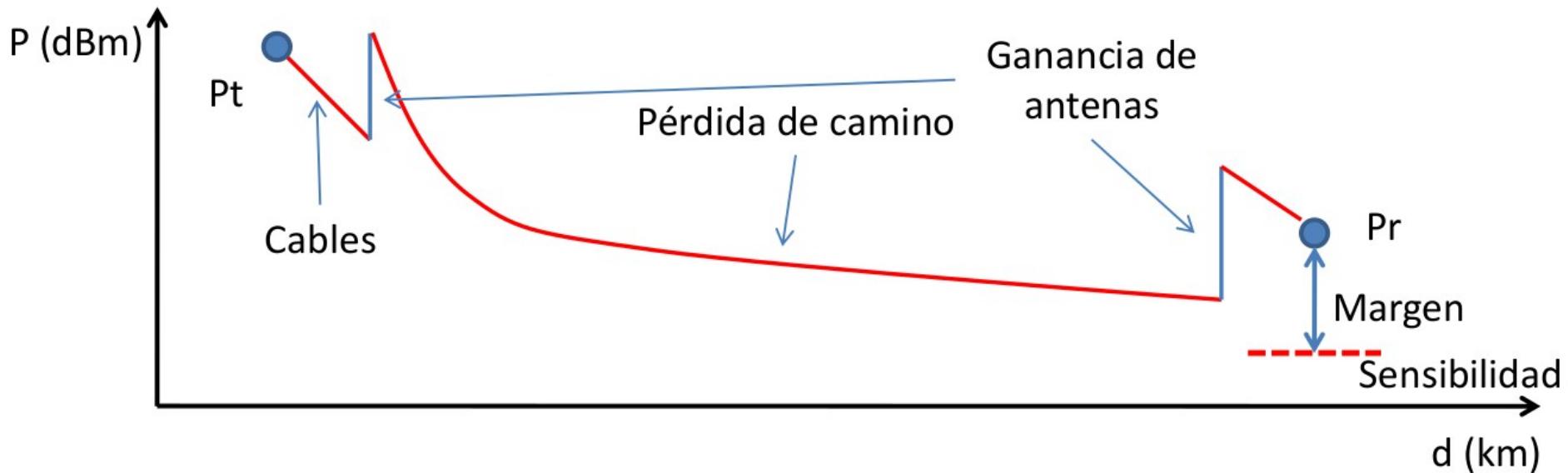
■ Modulación digital

- Modulación lineal y exponencial
- Canal AWGN
- Sensibilidad

■ Link budget

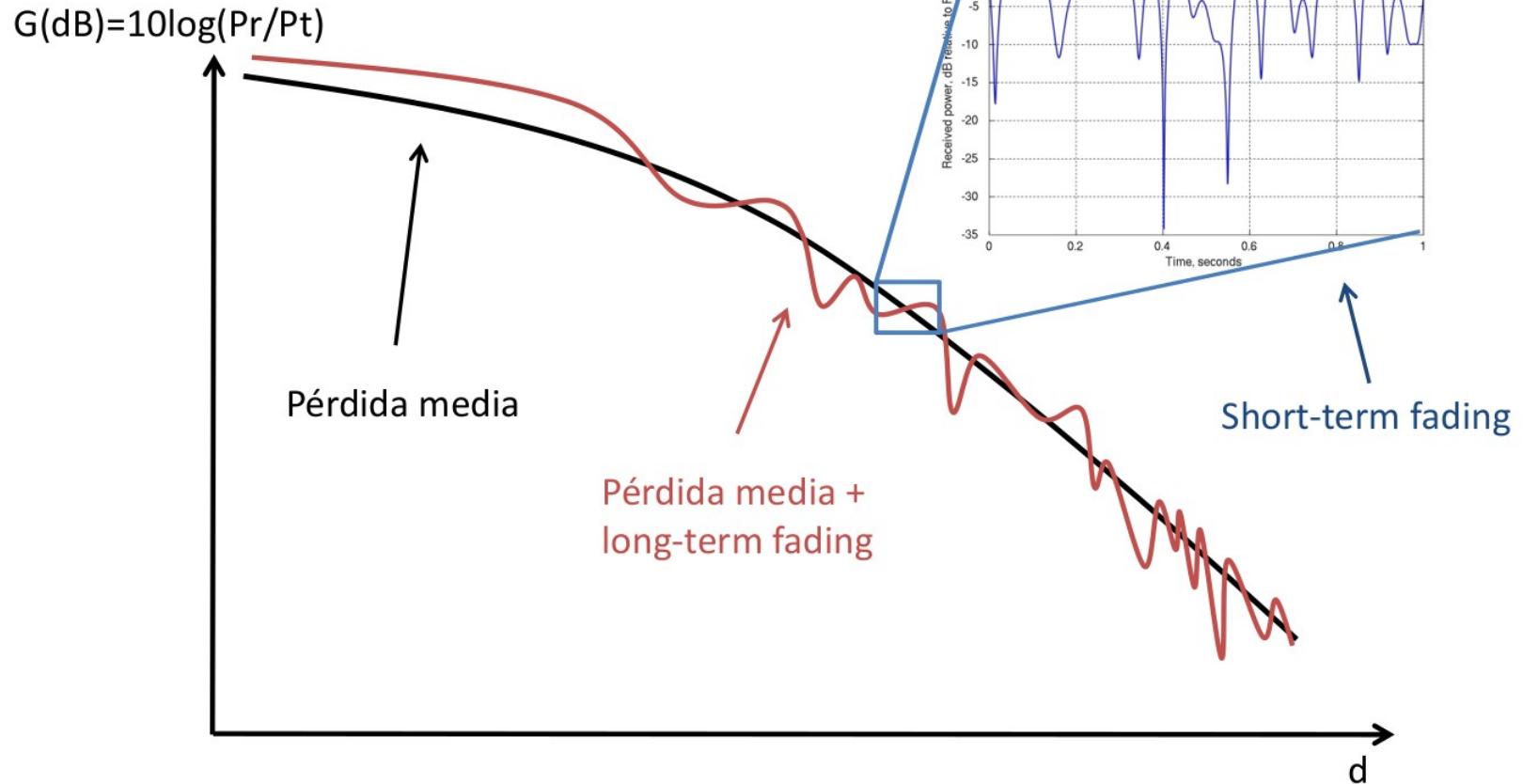


Link Budget





Link Budget - Margen





Pérdidas

■ Pérdidas por cable



Type RG.../U	6 Part no. 40001	8 40013	11 40002	58 40003	59 40004	62 40005
--------------	------------------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Attenuation at 20 °C
(dB/100m)

100 MHz	8,8	8	7,5	17	11,5	10,5
200 MHz	13,5	10,8	11	24	16,5	15
500 MHz	21	17	18,5	39	27	24,5
800 MHz	27,5	25	24	51	35	32,5
1000 MHz	-	26,5	30	56	41	35
1350 MHz	-	30,6	-	-	-	-
1750 MHz	-	35	-	-	-	-



Pérdidas

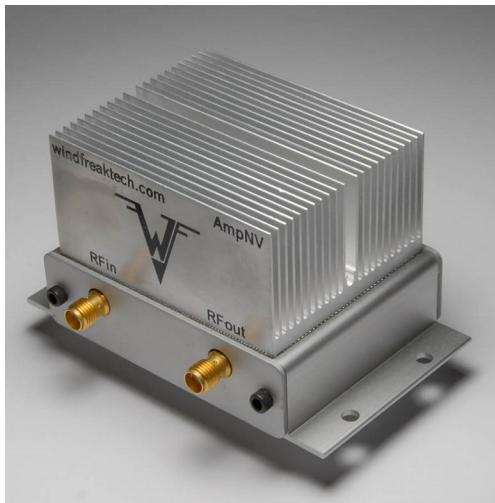
■ Pérdidas por conectores (y adaptadores)



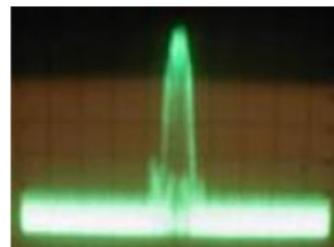


Ganancias

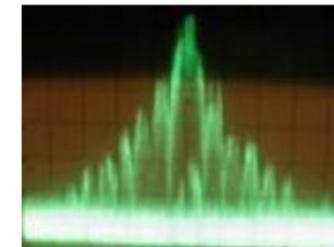
■ Amplificador en transmisión (PA)



- Cuidado: No linealidad



antes



después



Ganancias

■ Amplificador en recepción (LNA)



- Noise Figure (NF): cuánto empeora la SNR de la señal de salida respecto a la de entrada ($\text{SNR}_{\text{in}}[\text{dB}] - \text{SNR}_{\text{out}}[\text{dB}]$)



Link Budget

- El presupuesto de enlace es básicamente verificar que la potencia de recepción sea mayor que la sensibilidad del receptor, tomando en cuenta toda la cadena

- + Potencia de Transmisión
- Pérdida en los cables y conectores Tx
- + Ganancia de la antena Tx
- Pérdida de camino
- + Ganancia de la antena y amplificador Rx
- Pérdida en los cables y conectores Rx

Margen + Sensibilidad del Rx



Gracias!