



# Fundamentos de Comunicaciones Inalámbricas

Federico La Rocca

Tecnologías para la Internet  
de las Cosas





# Agenda



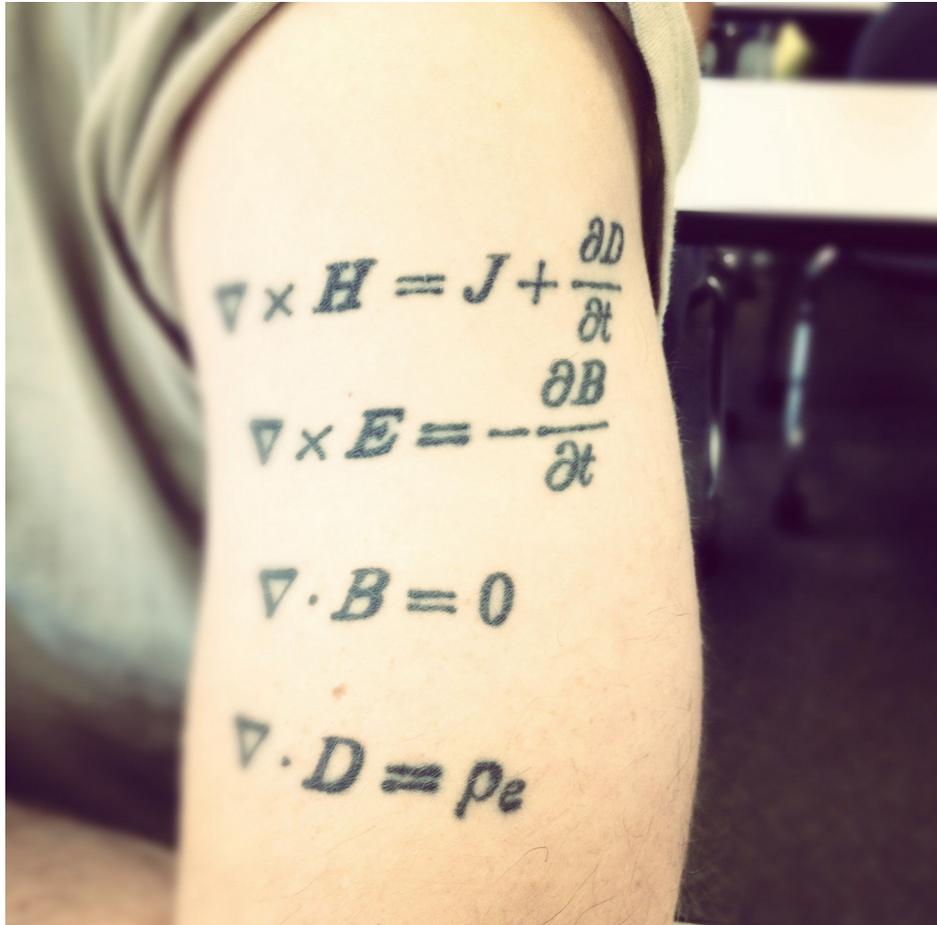
- Propagación
  - Fundamentos
  - Antenas
  - Algunos modelos de propagación
- Modulación digital
  - Modulación lineal y exponencial
  - Canal AWGN
  - Sensibilidad
- Link budget



# Propagación - Fundamentos



## ■ Ecuaciones de Maxwell



$H$  = Campo magnético =  $B/\mu$   
Con  $\mu$  la permeabilidad del medio

$J$  = Densidad de corriente  
Corriente eléctrica por unidad de  
área

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

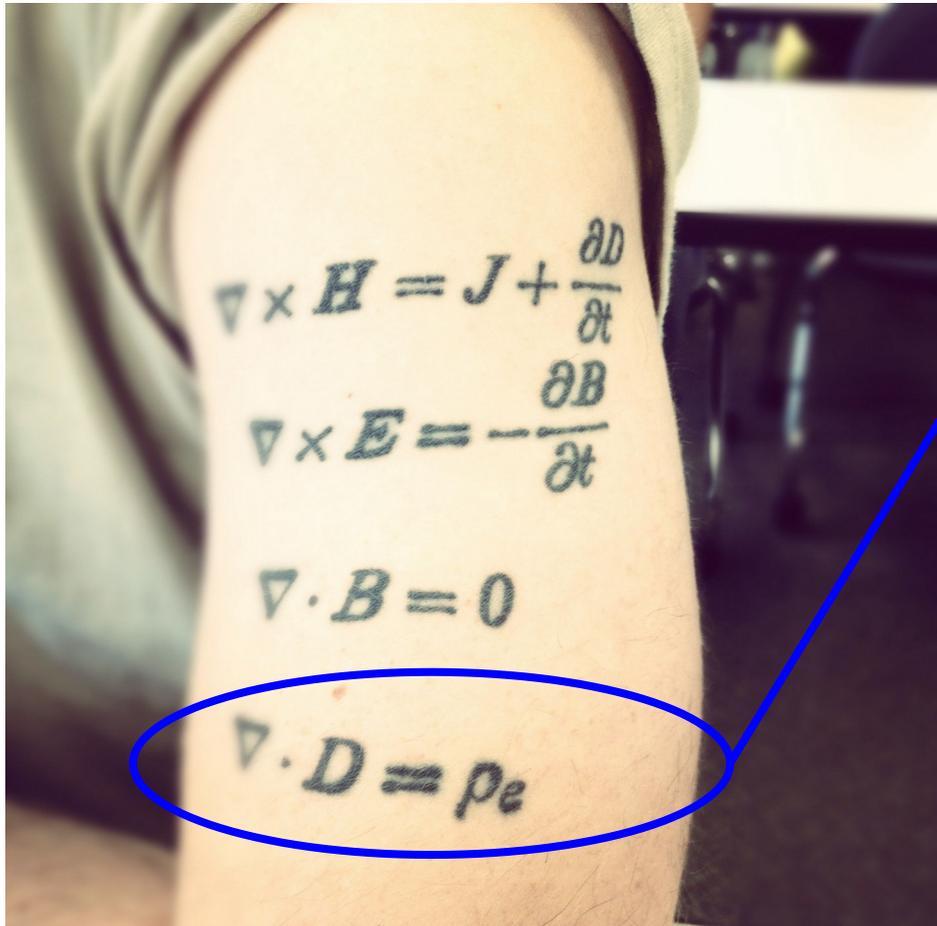
$\rho_e$  = Densidad de carga  
eléctrica  
Carga por unidad de volumen



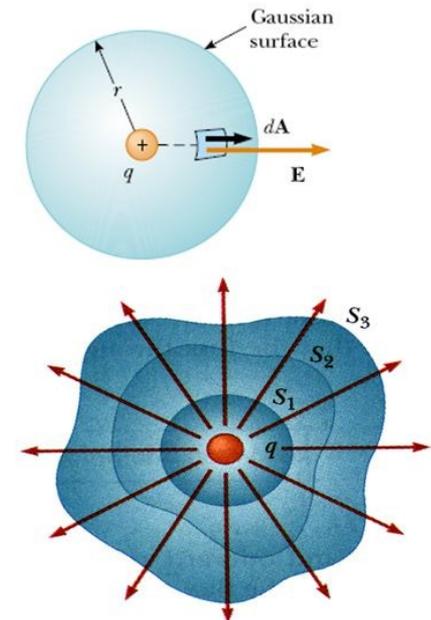
# Propagación - Fundamentos



## ■ Ecuaciones de Maxwell (intuitivo)



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

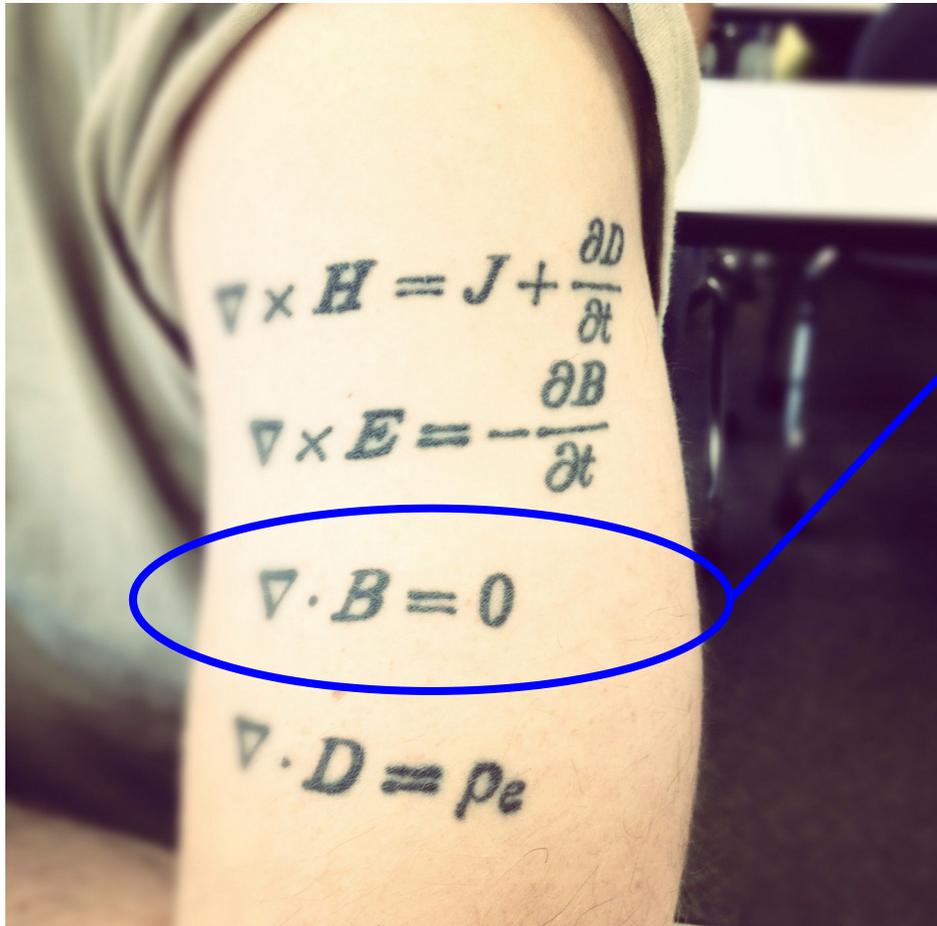




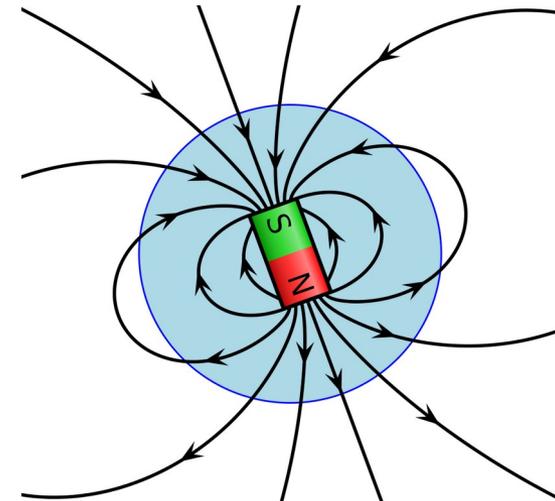
# Propagación - Fundamentos



## ■ Ecuaciones de Maxwell (intuitivo)



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

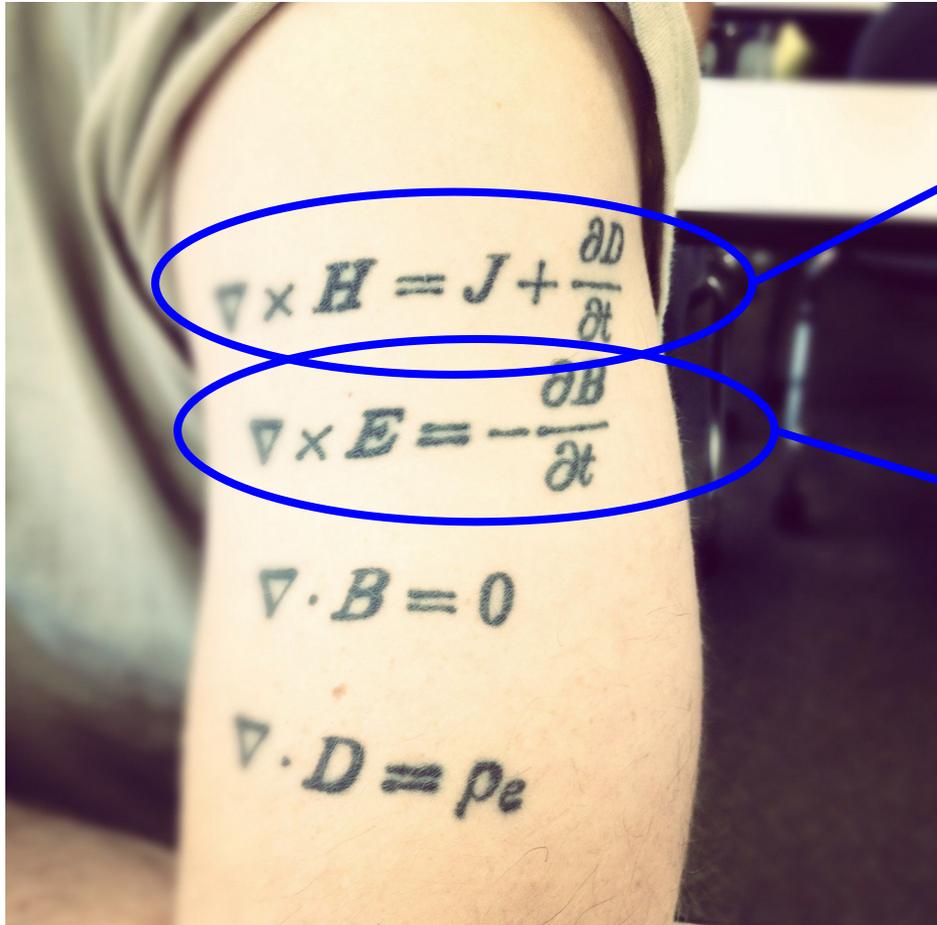




# Propagación - Fundamentos



## ■ Ecuaciones de Maxwell (intuitivo)



**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)



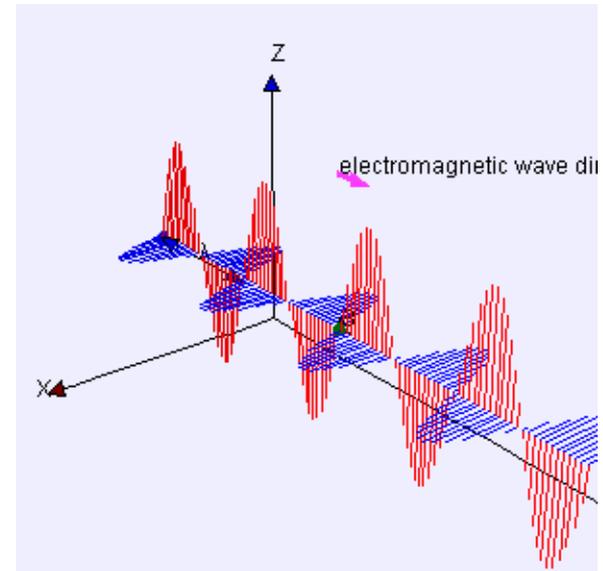
# Propagación - Fundamentos



- 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:  $A \cos(2\pi ft - ky)$



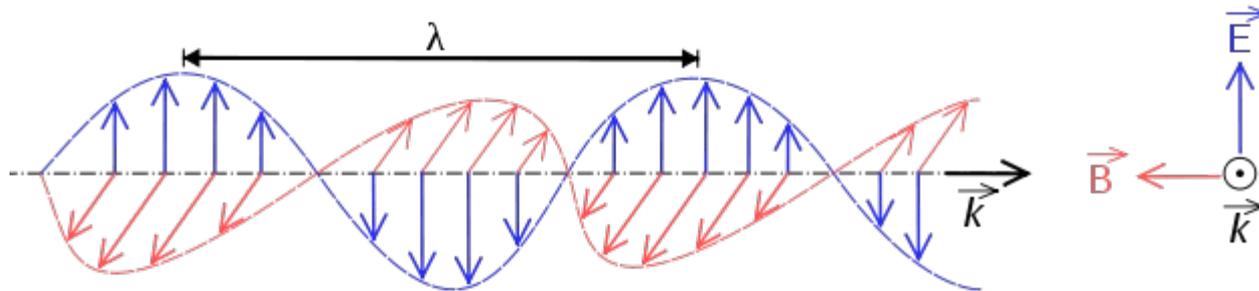


# Propagación - Fundamentos



## ■ 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

#### RADIO SERVICES COLOR LEGEND

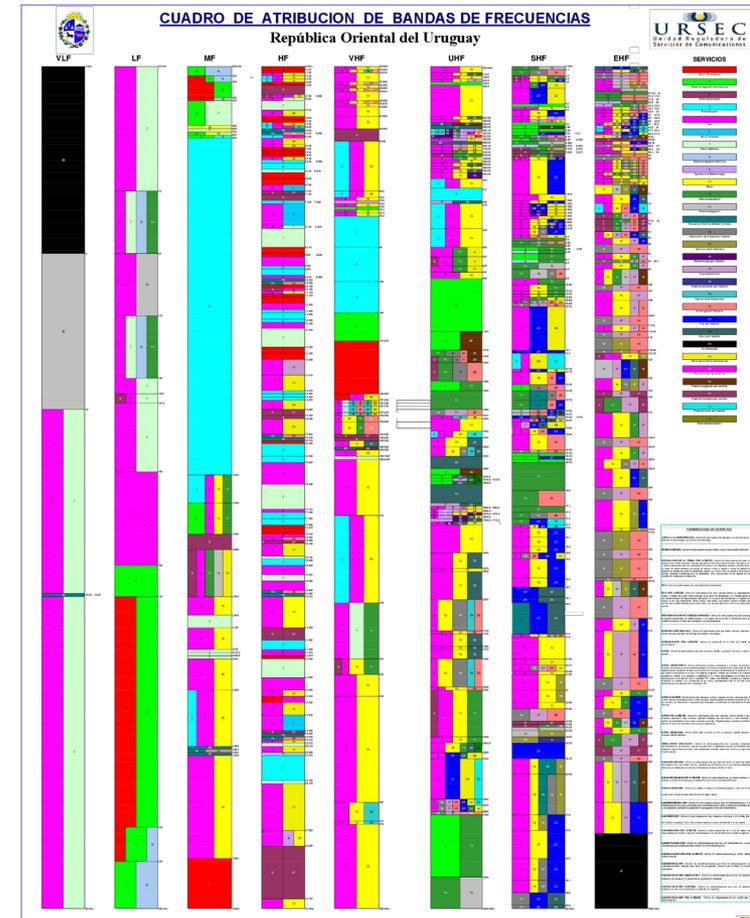



# Espectro radioeléctrico



- 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



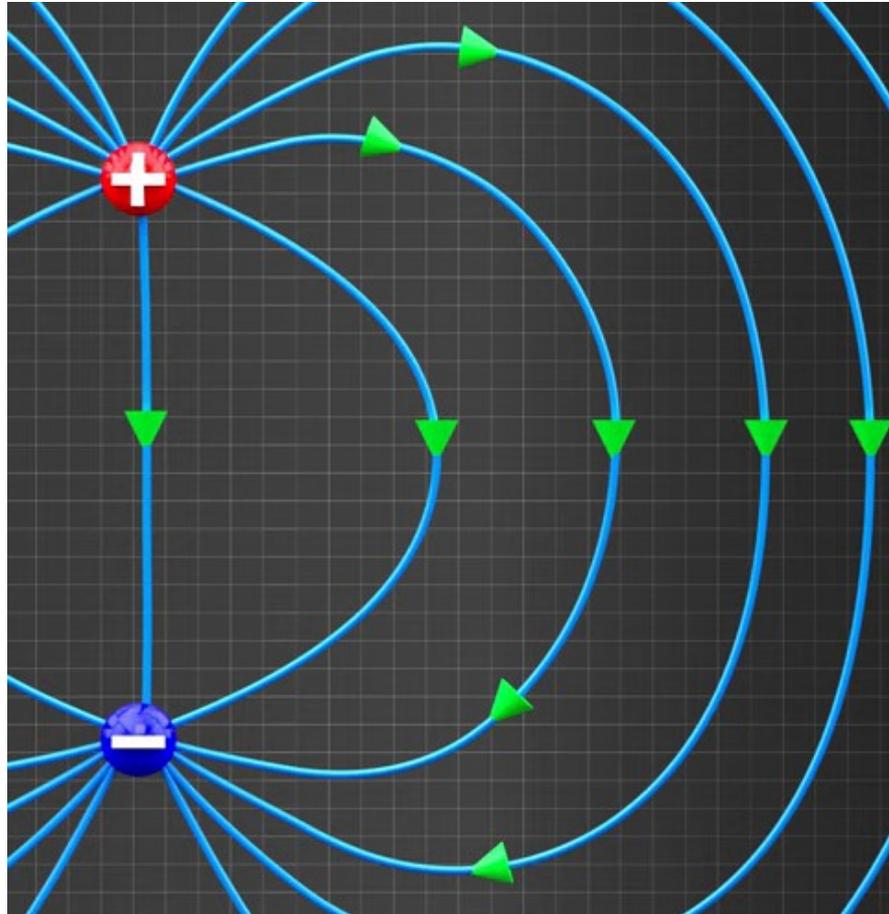
- Es el transductor que convierte las ondas electromagnéticas en corriente eléctrica (y viceversa)
- En resumen: es la interfaz entre el equipo radio y el ambiente
- Es quizá la parte más crítica y menos comprendida del sistema
  - Una antena bien elegida e instalada puede ser la diferencia entre un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



# Antenas



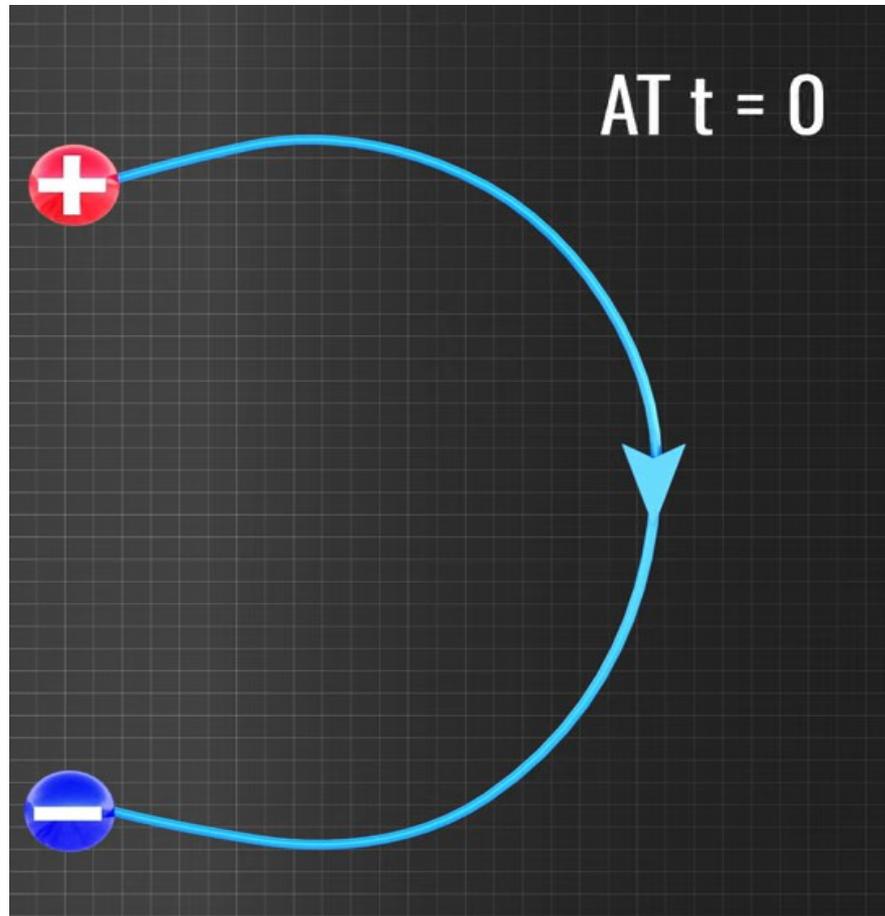
## ■ Funcionamiento básico: emisor





# Antenas

## ■ Funcionamiento básico: emisor

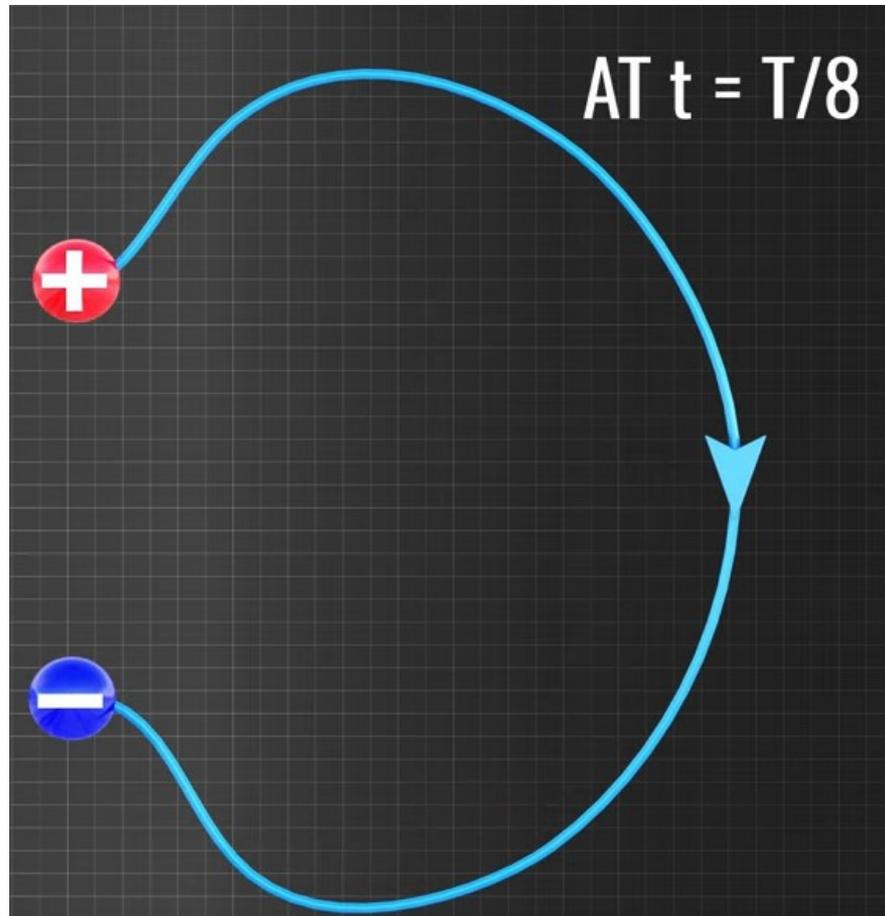




# Antenas



## ■ Funcionamiento básico: emisor

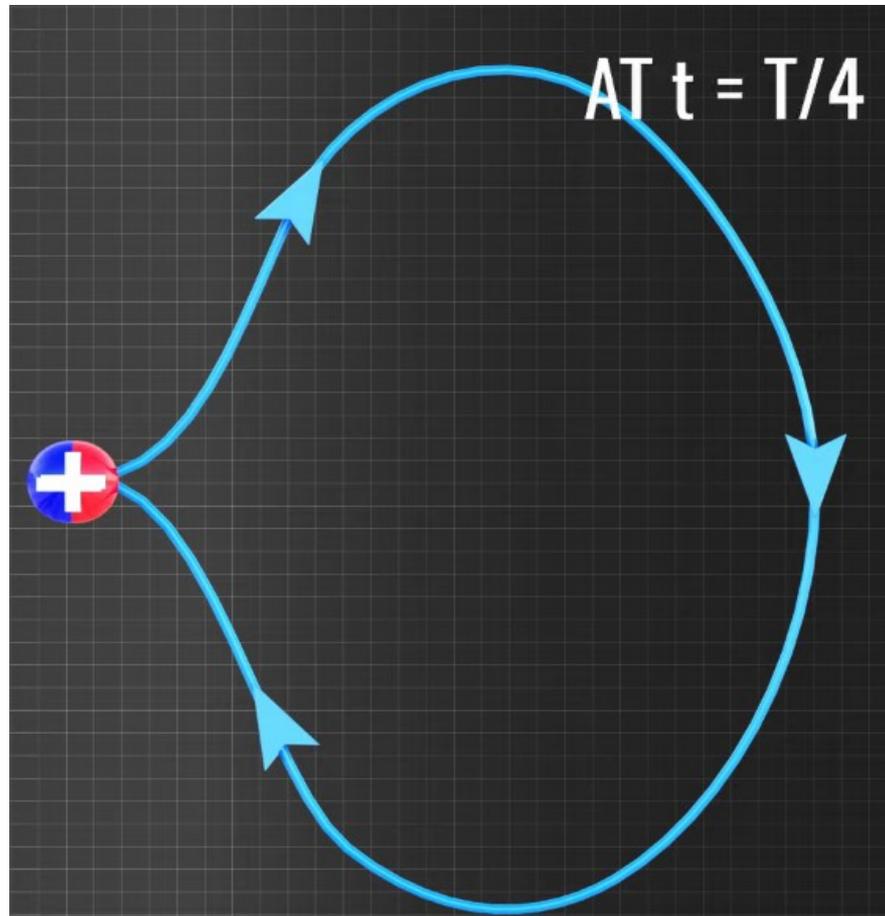




# Antenas



## ■ Funcionamiento básico: emisor

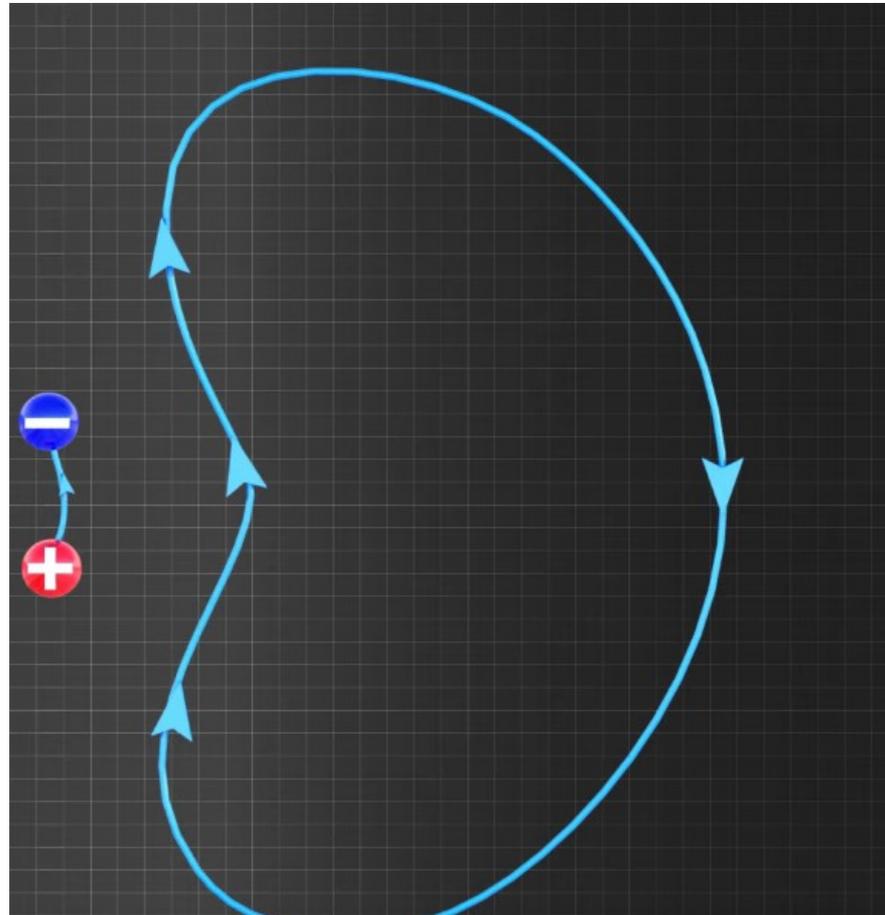




# Antenas



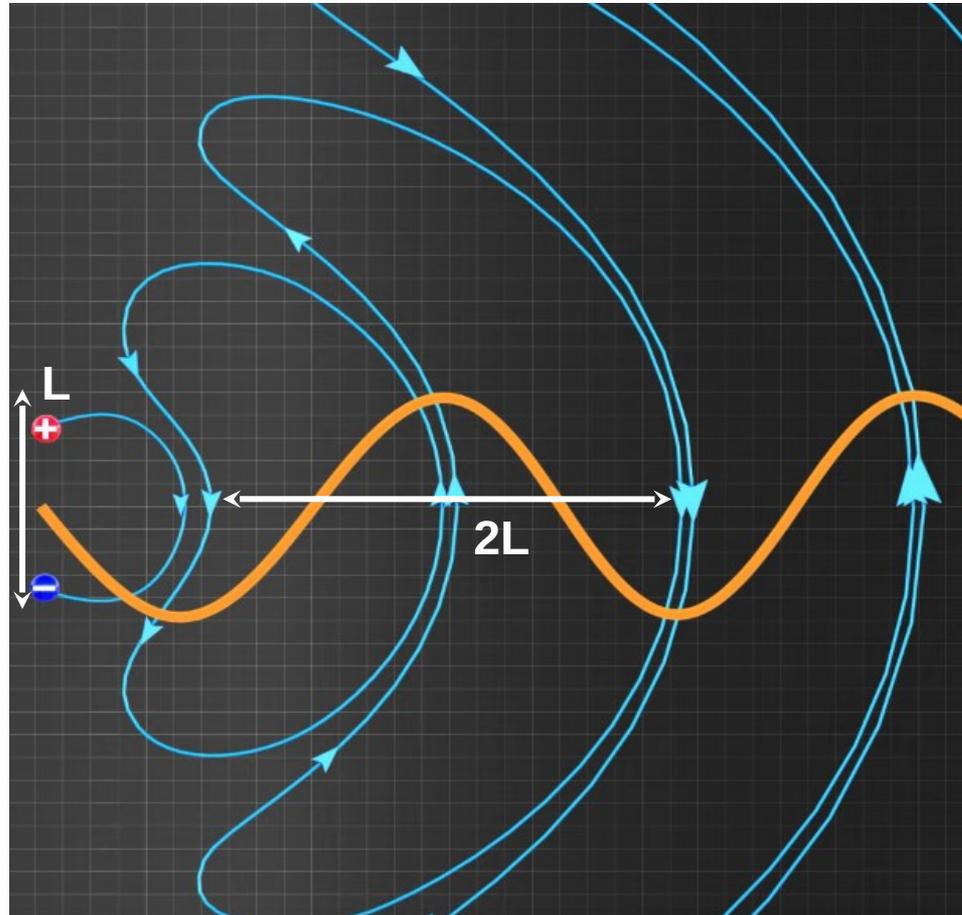
## ■ Funcionamiento básico: emisor





# Antenas

## ■ Funcionamiento básico: emisor

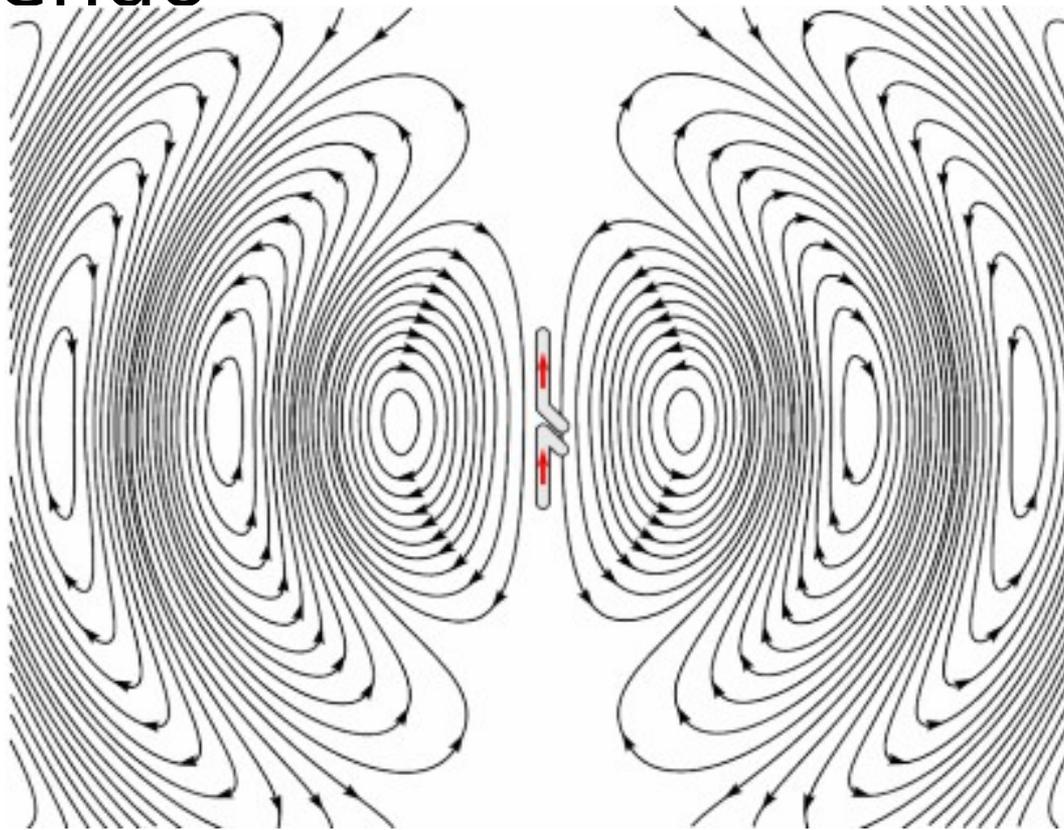




# Antenas



- Funcionamiento básico: dipolo emitiendo

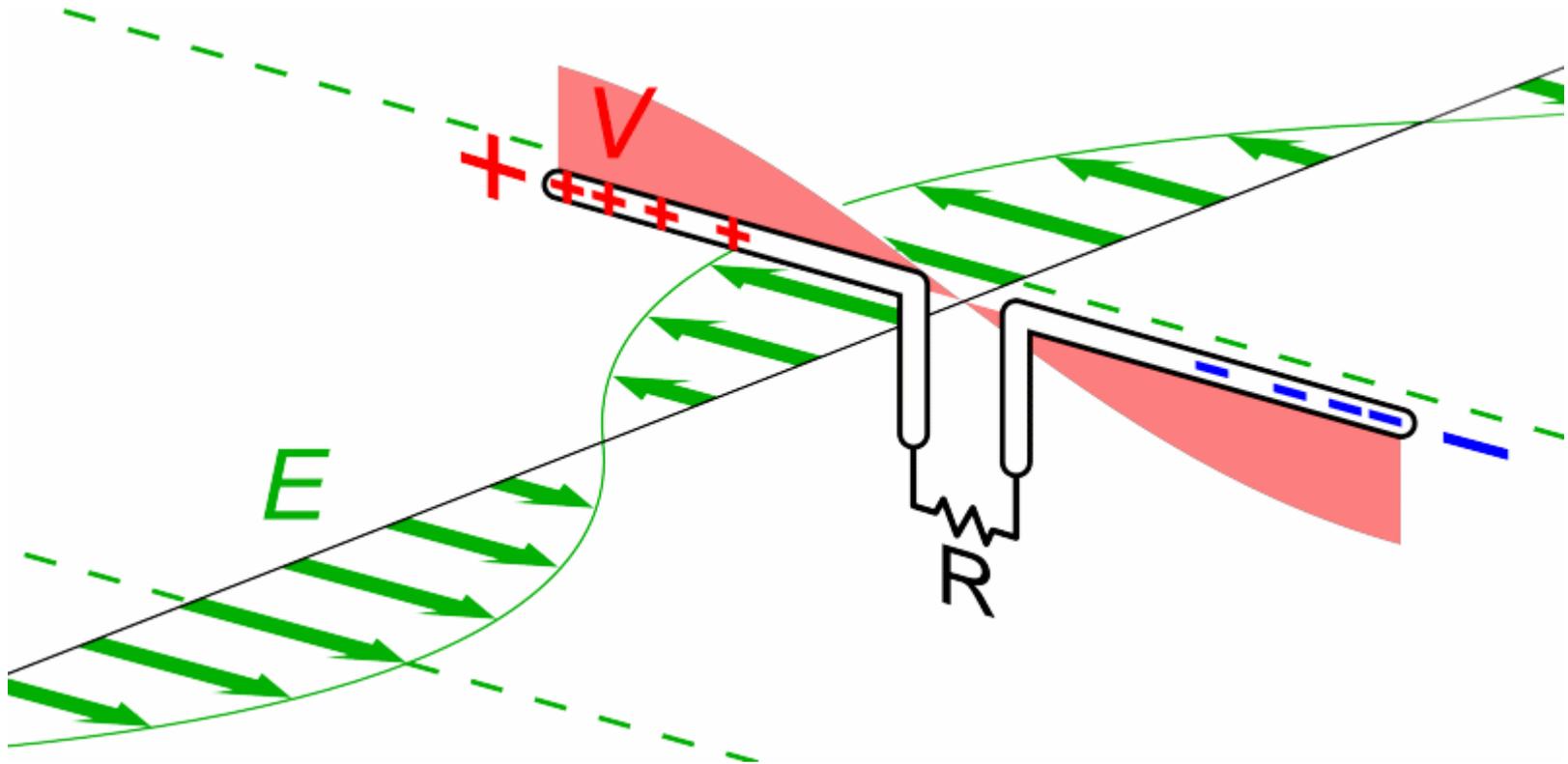




# Antenas



- 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





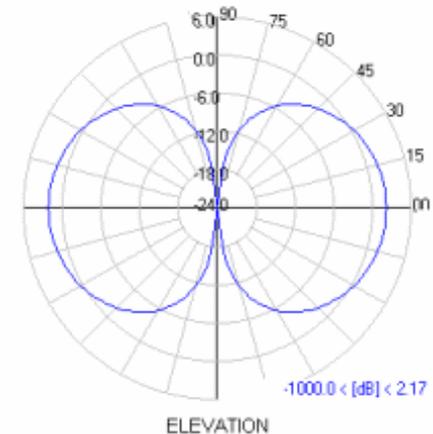
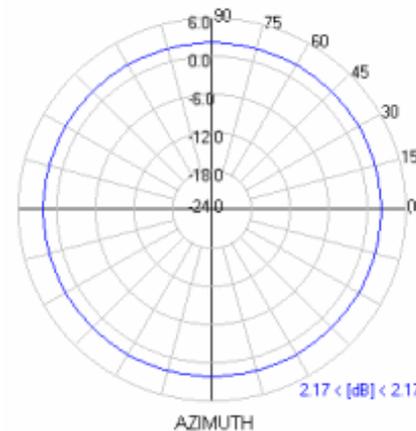
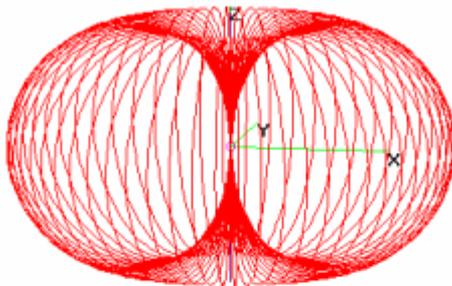
# Antenas - Ganancia



- 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

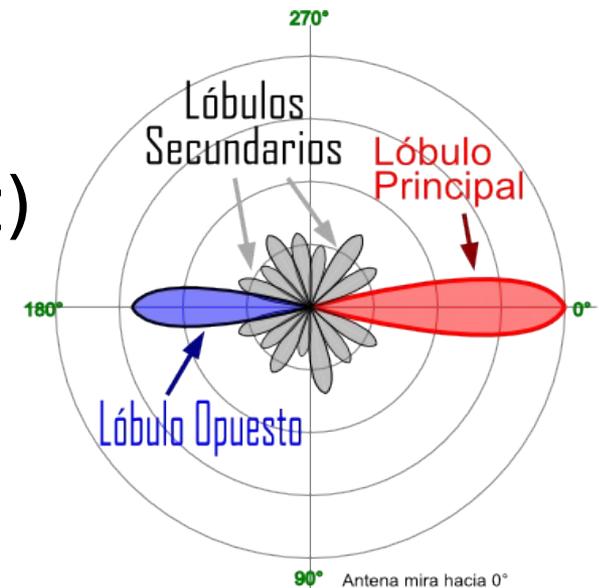




# Antenas - Ganancia



- 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



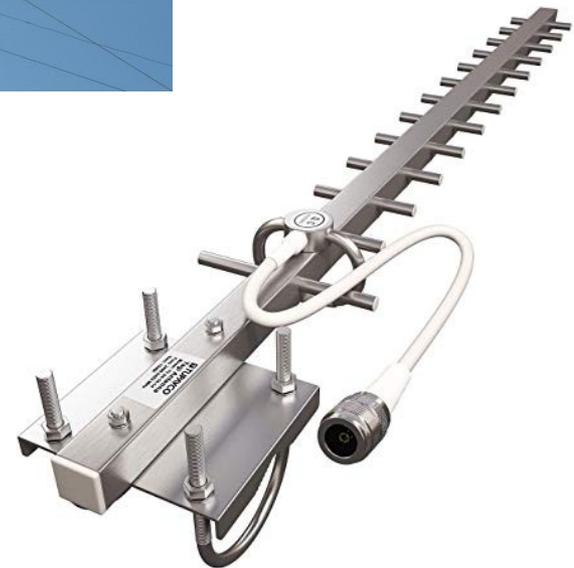
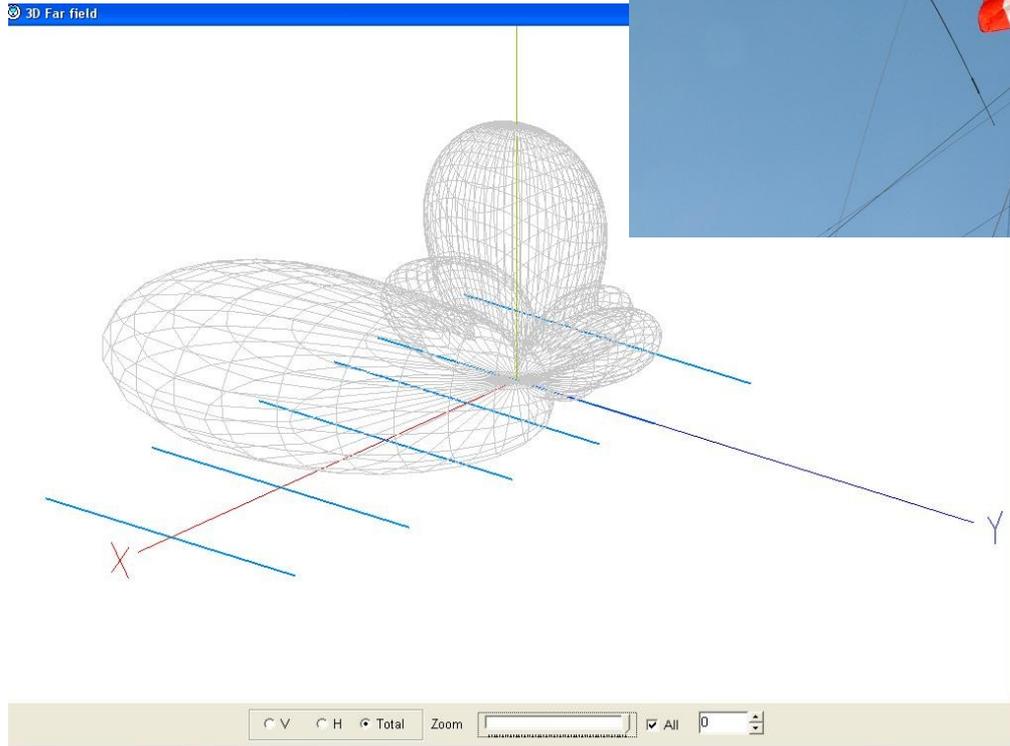


# Ejemplo: dipolo



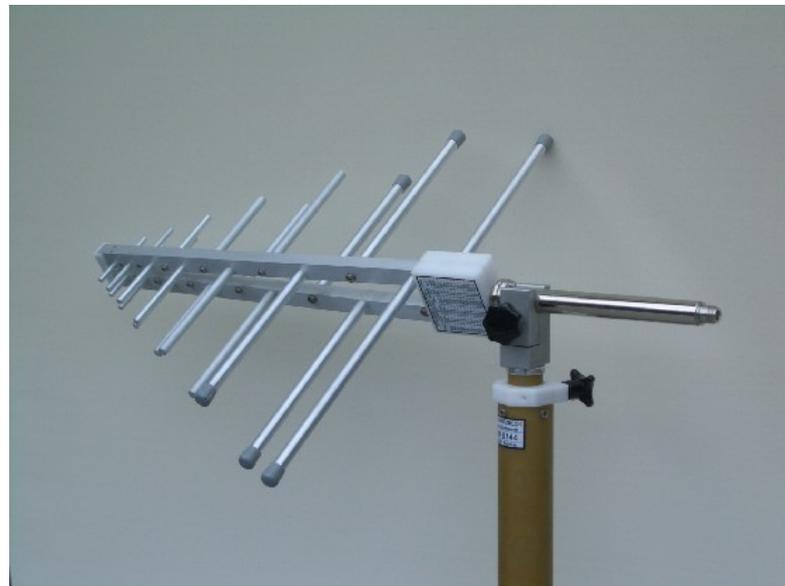


# Ejemplo: Yagi-Uda





# Ejemplo: Log-periódica



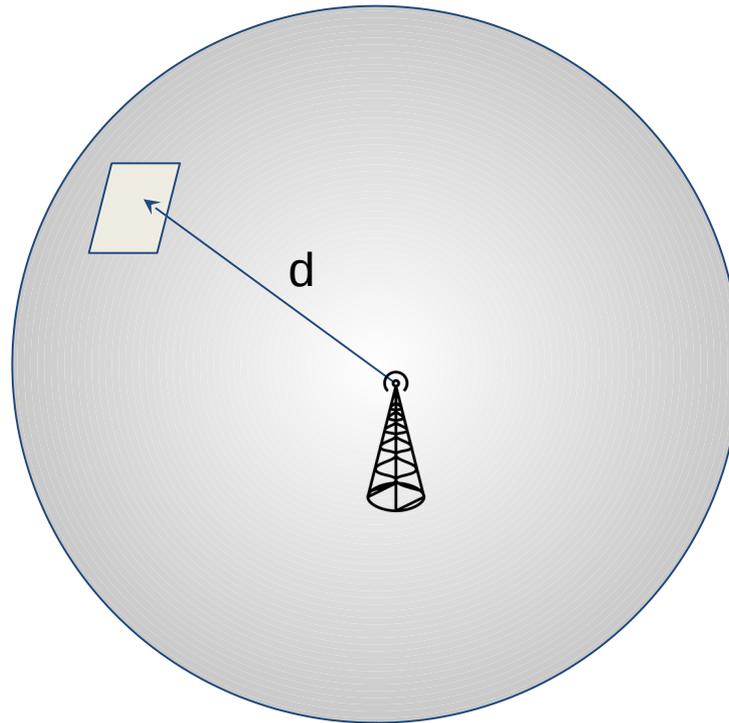


# Agenda



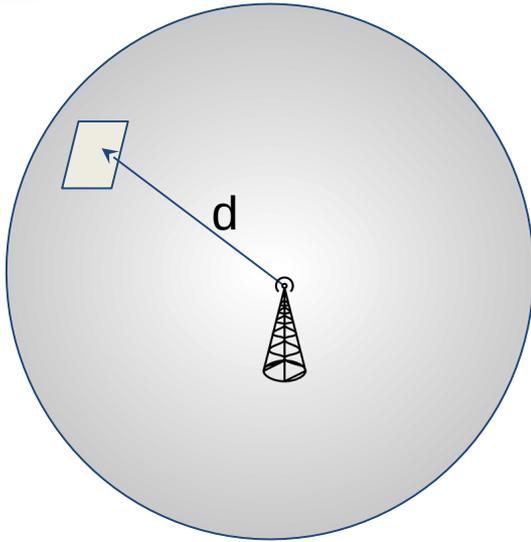
- Propagación
  - Fundamentos
  - Antenas
  - Algunos modelos de propagación
- Modulación digital
  - Modulación lineal y exponencial
  - Canal AWGN
  - Sensibilidad
- Link budget

# 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  $W_t(\theta, \phi, d) A_r^{\text{eff}}$ 
  - $A_r^{\text{eff}}$  es el **área efectiva** de la antena receptora
  - $A_r^{\text{eff}} = \lambda^2 D_r(\theta_r, \phi_r)/4\pi$

# 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:

$$P_r = W_t(\theta_t, \phi_t, d) A_r^{eff} = W_t(\theta_t, \phi_t, d) \lambda^2 D_r(\theta_r, \phi_r) / 4\pi$$
$$\Rightarrow P_r = U_t(\theta_t, \phi_t) \lambda^2 D_r(\theta_r, \phi_r) / 4\pi d^2$$

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



# Propagación en vacío



- Ecuación de Friis como función de la frecuencia

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

- 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

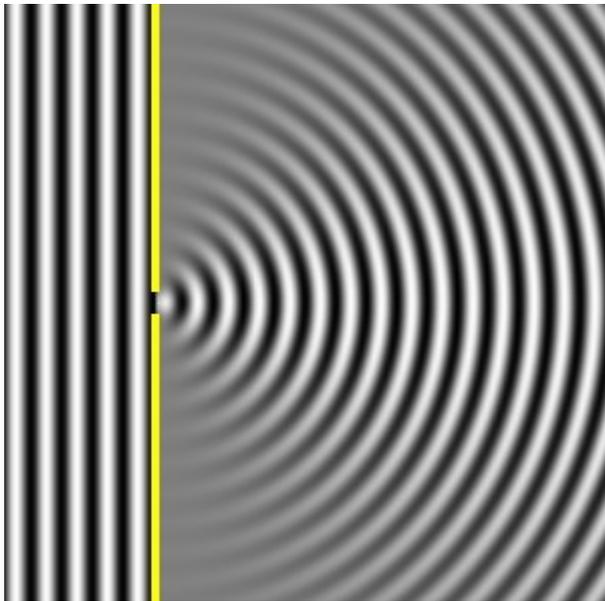




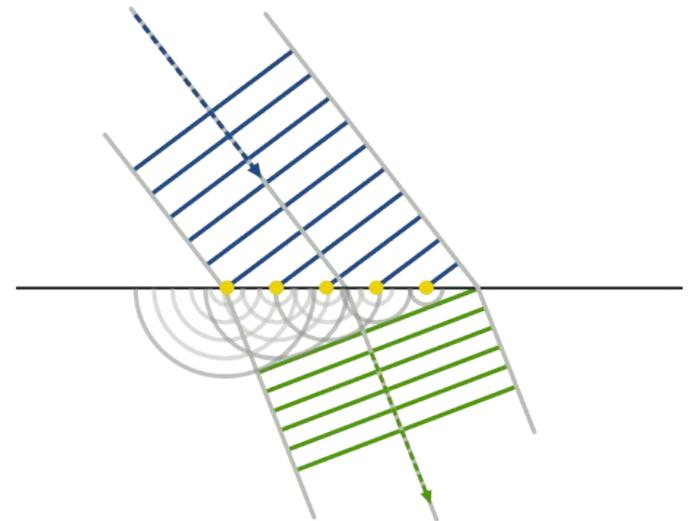
# Condiciones de LOS



- **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”



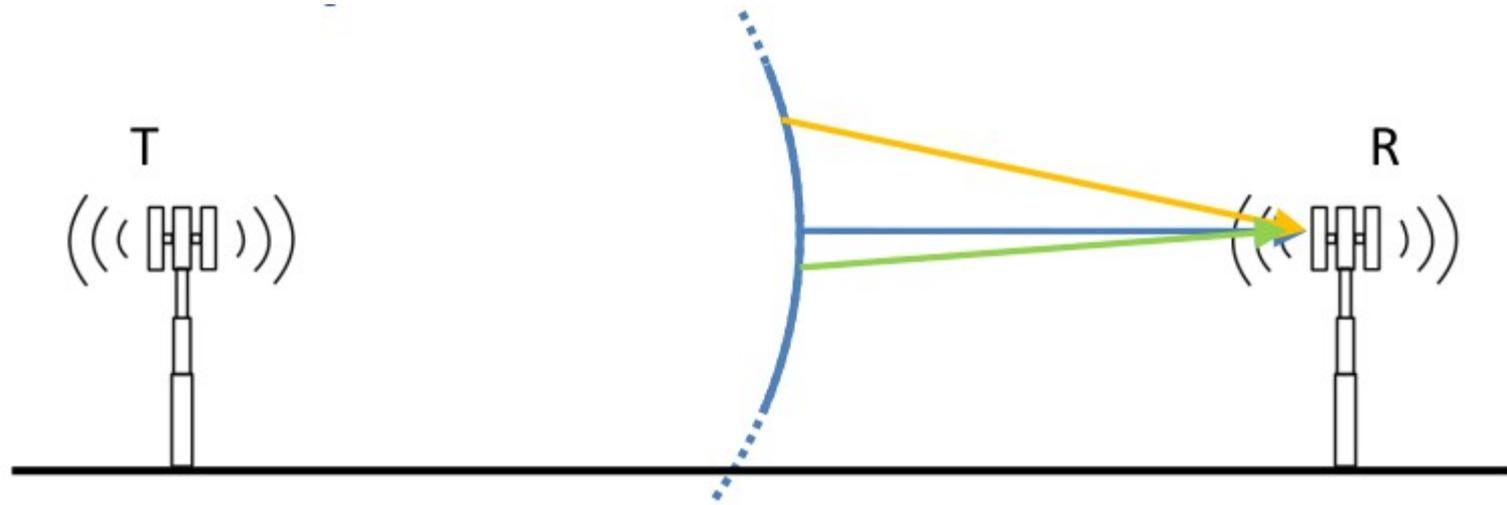
Difracción



Refracción



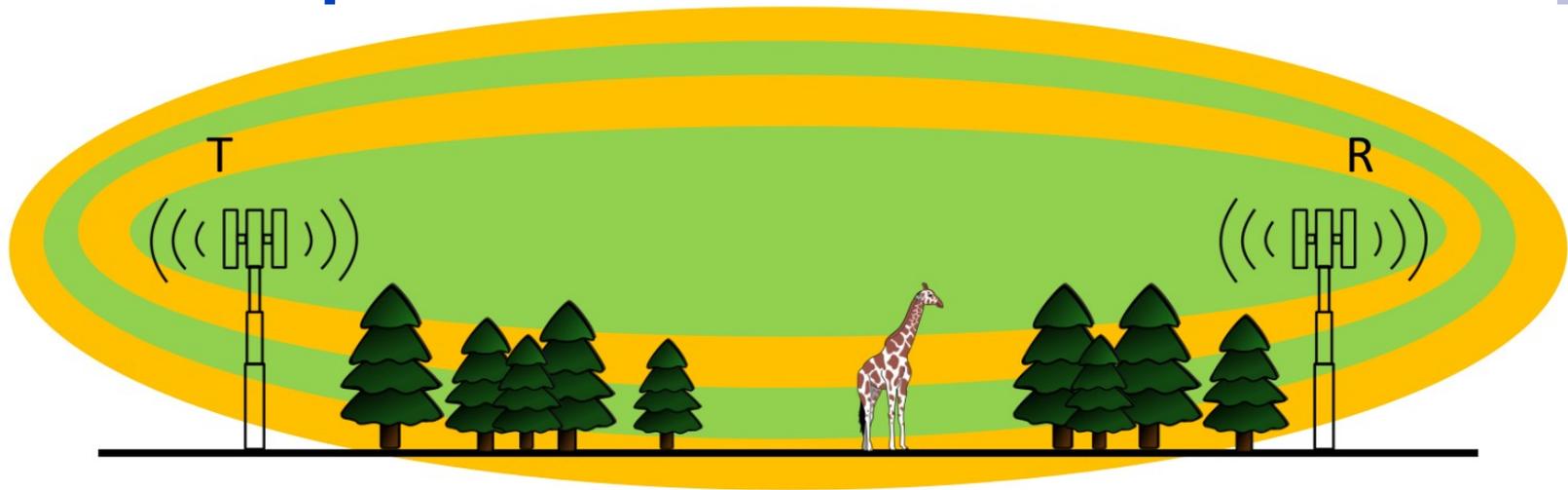
# Elipsoides de Fresnel



- 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 aporte 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:

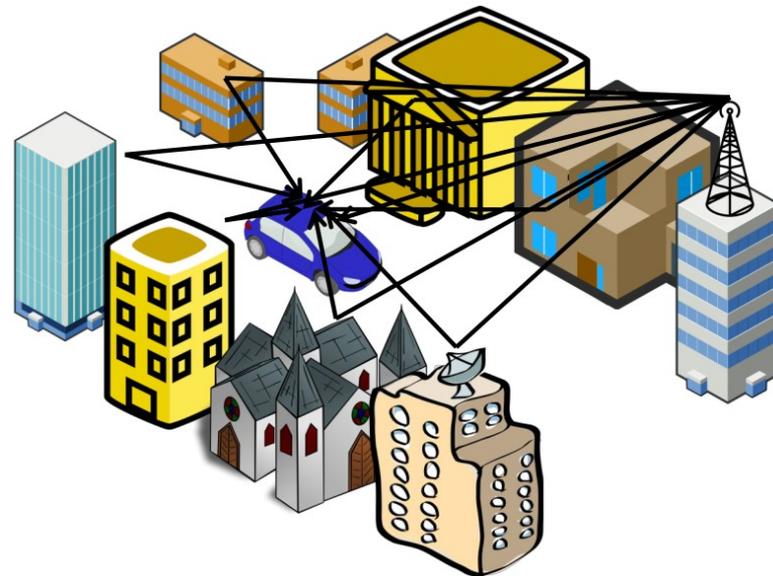
- Radio AM ( $f \sim 1\text{MHz}$ ) y una distancia de 1km:  $F = 274\text{m}$
- Enlace Micro ( $f \sim 1\text{GHz}$ ) y una distancia de 1km:  $F = 9\text{m}$



# 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.



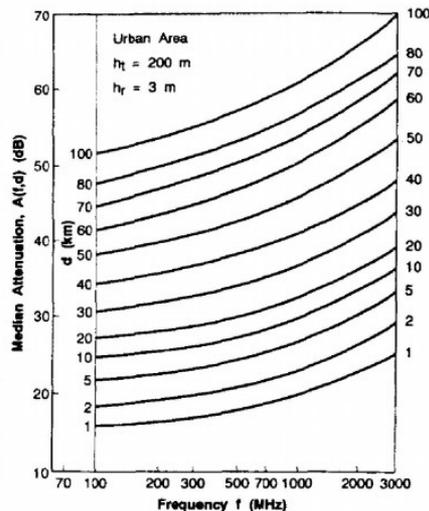


# Modelos NLOS



## ■ 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



### 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).

Figure 3.23  
Median attenuation relative to free space ( $A_{mU}(f,d)$ ), over a quasi-smooth terrain [From [Oku68] © IEEE].





# 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:

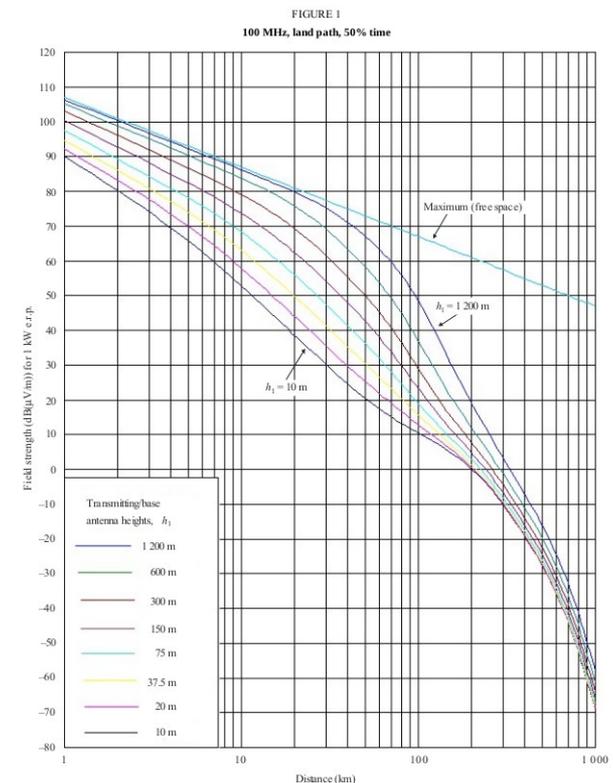
#### 3.1.1 Terrain information not available

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:

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

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

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

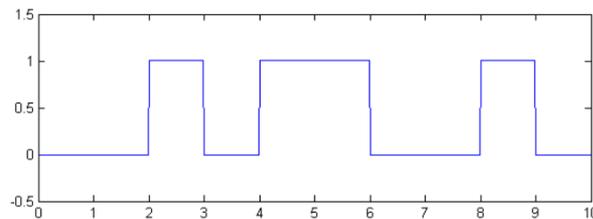


## ■ ¿Qué es?

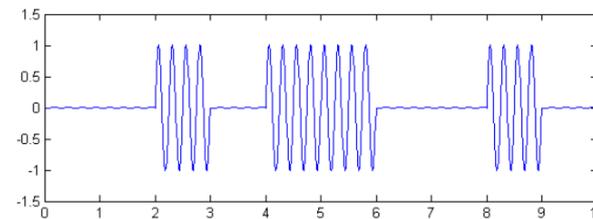
- Es el proceso de transformar la secuencia de 0s y 1s (el mensaje) en una señal analógica que pueda ser transmitida físicamente
- Requerimiento: usar la banda asignada

## ■ 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



Mensaje: 0010110010



Señal modulada



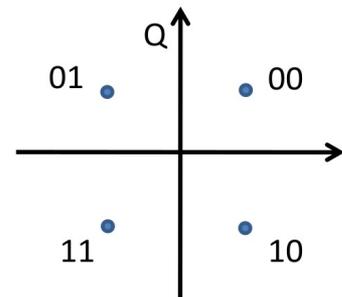
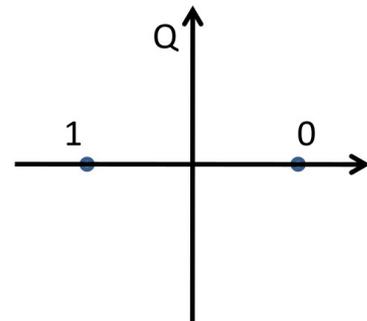


# Modulación Digital Lineal



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

- En OOK
  - '1'  $\leftrightarrow A \times \pi(t/T_b)$
  - '0'  $\leftrightarrow 0 \times \pi(t/T_b)$
- En BPSK
  - '1'  $\leftrightarrow -A \times p(t)$
  - '0'  $\leftrightarrow A \times p(t)$
- En QPSK
  - '00'  $\leftrightarrow (A+jA) \times p(t)$
  - '01'  $\leftrightarrow (-A+jA) \times p(t)$
  - '10'  $\leftrightarrow (A-jA) \times p(t)$
  - '11'  $\leftrightarrow (-A-jA) \times p(t)$

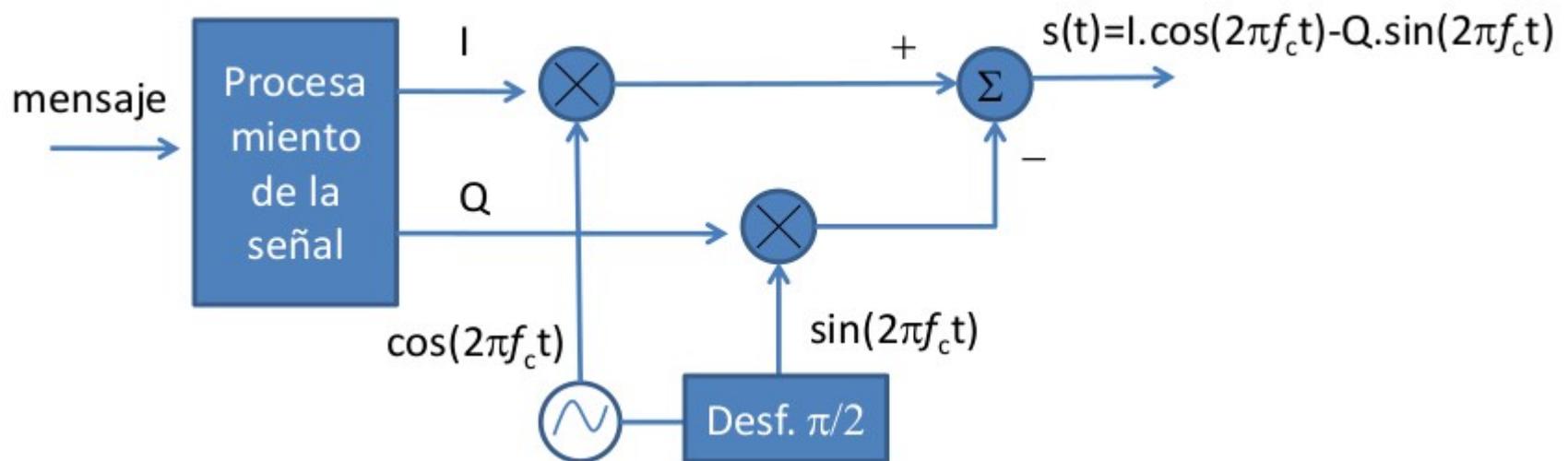




# Modulación



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





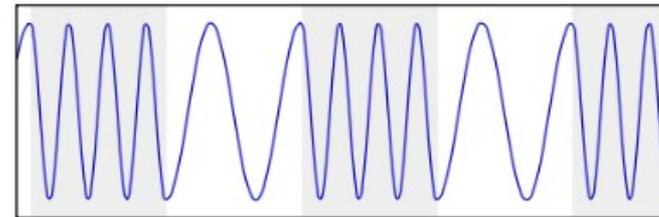
# Modulación Digital Exponencial



- 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)





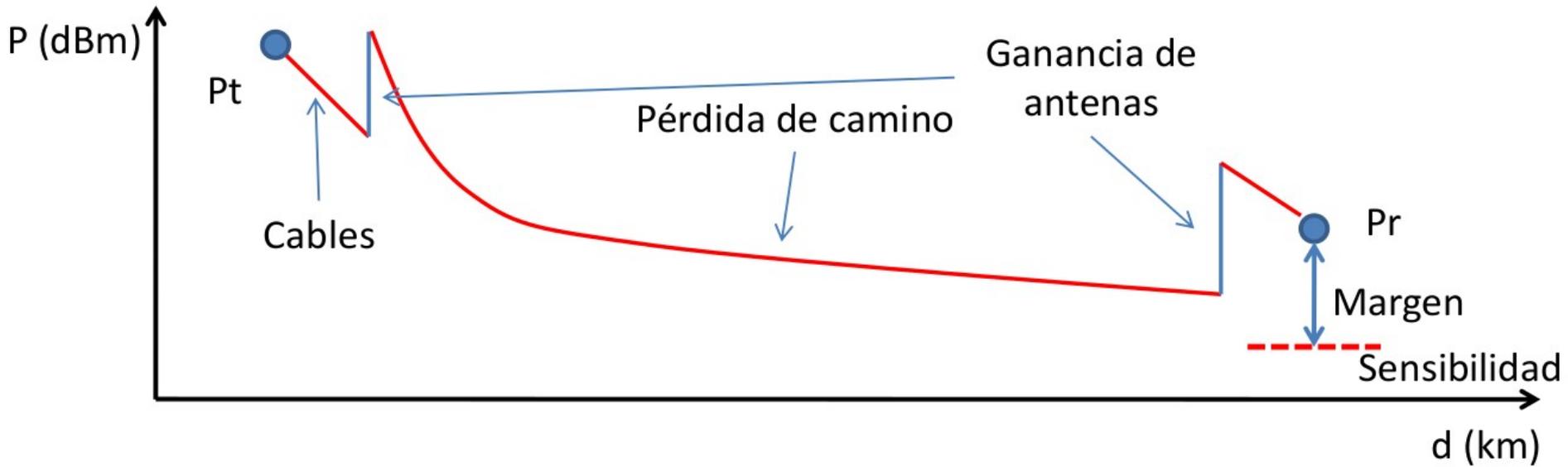
# Agenda



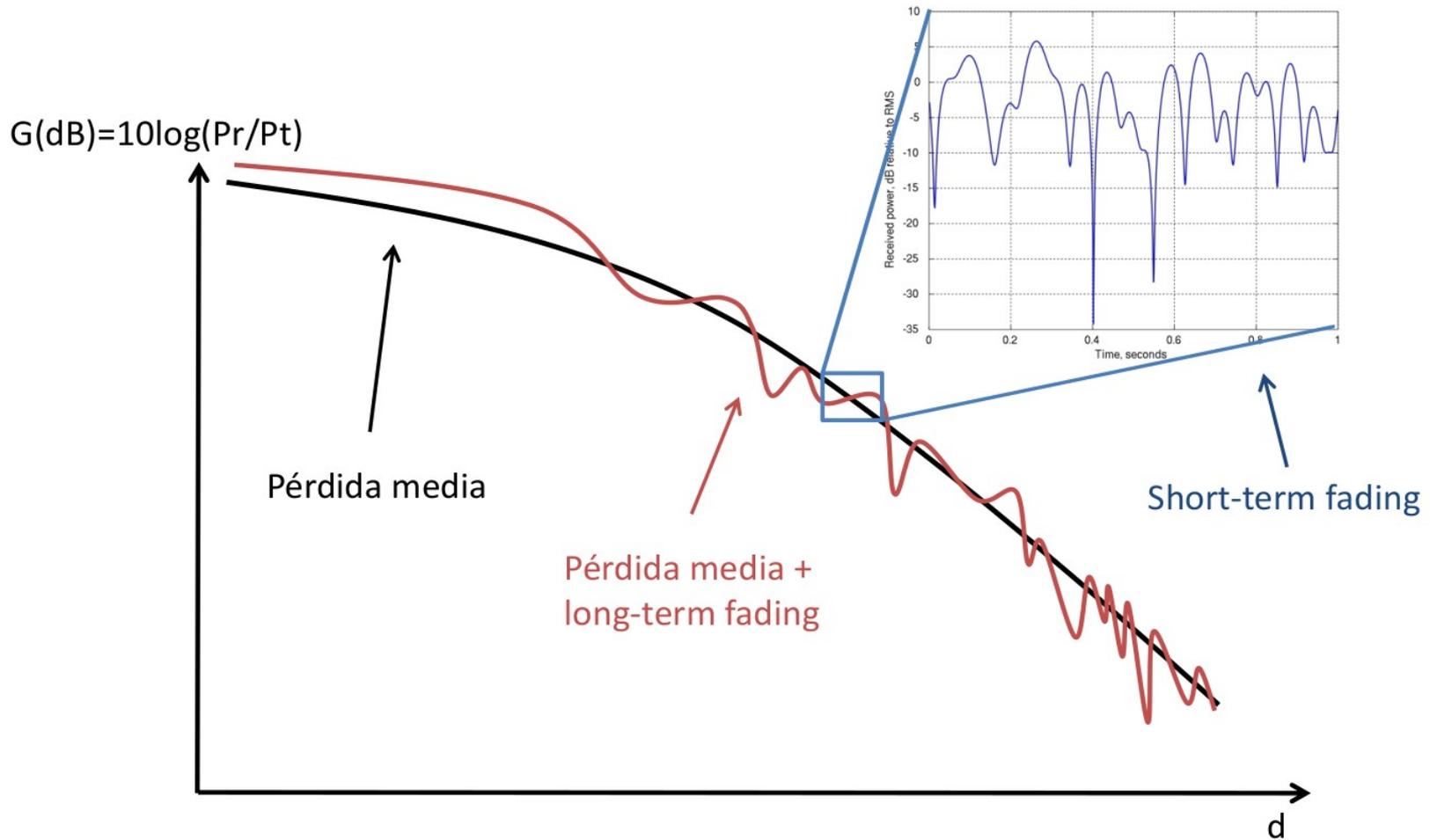
- Propagación
  - Fundamentos
  - Antenas
  - Algunos modelos de propagación
- Modulación digital
  - Modulación lineal y exponencial
  - Canal AWGN
  - Sensibilidad
- Link budget



# Link Budget



# Link Budget - Margen





# Pérdidas



## ■ Pérdidas por cable



Type RC.../U	6	8	11	58	59	62
Part no.	40001	40013	40002	40003	40004	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)



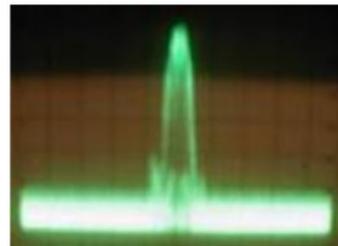


# Ganancias

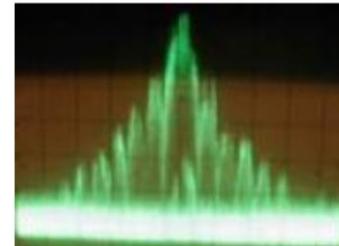
## ■ Amplificador en transmisión (PA)



- 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 ( $SNR_{in}[dB] - SNR_{out}[dB]$ )



# 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!