

# AVIÓNICA MÓDULO 3

## Emisores, Receptores y propagación electromagnética



**TEMA 3.2**

**ANTENAS**

# **TEMA 3.2**

## **ANTENAS**

- 3.2.1. Antenas. Definiciones y propiedades
- 3.2.2. Potencia propagada
- 3.2.3. Ruido en recepción
- 3.2.4. Enlaces de satélite
- 3.2.5. Antenas para radar

## 3.2.1 Antenas. Definición y propiedades

IEEE Std. 145–1983: Una **antena** es la parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas

La misión de la antena es radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas a la aplicación.

- **Radiodifusión o Comunicaciones móviles:** Radiación omnidireccional
- **Radiocomunicaciones fijas:** Radiación direccional

Las antenas pueden ser:

**Alámbricas:** Dos hilos conductores que soportan corrientes y originan campos radiados

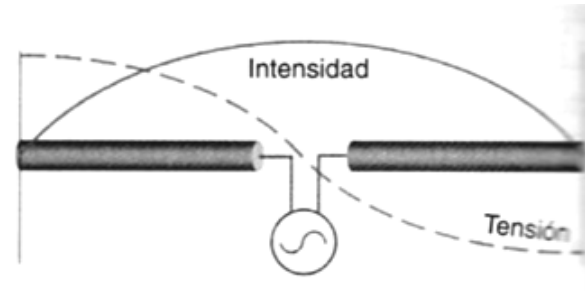
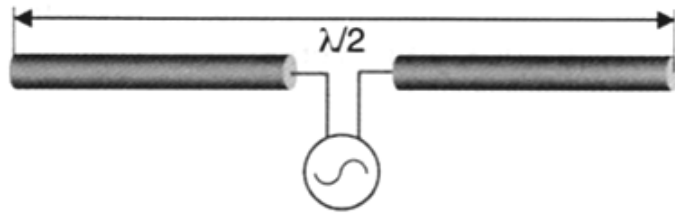
**Aperturas y reflectores:** Excitadas con guías ondas, soportan una distribución de campo que radía al exterior

**Agrupaciones de antenas:** Combinación de antenas de igual o distinto tipo

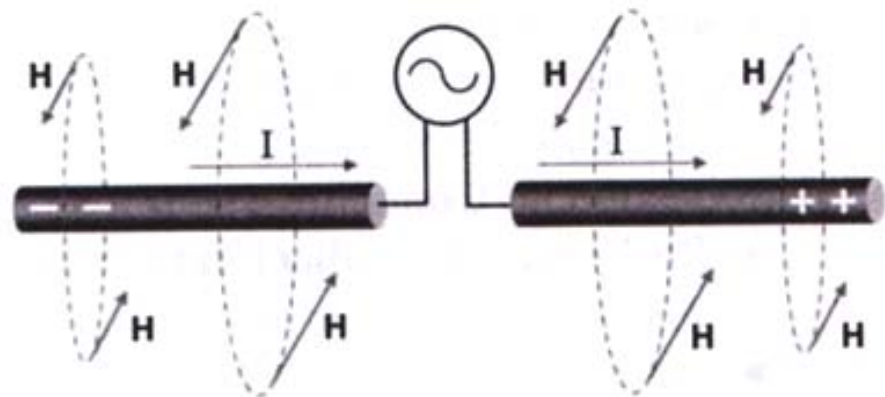
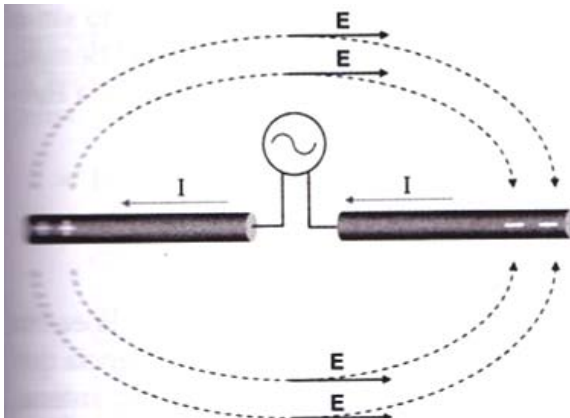
# Formación de la onda electromagnética en un antena

En una antena **alámbrica** la onda se forma de la siguiente manera:

Se conecta un generador de corriente a la antena creándose una distribución de  $I$  y de  $V$ :



El movimiento acelerado de electrones genera dos campos,  $E$  y  $H$ , en torno a la antena



En cada punto del espacio hay dos campos  $E$  y  $H$  perpendiculares entre sí.

**Polarización:** Orientación del vector campo eléctrico

# Rendimiento, polarización y ancho de banda

**Resistencia de radiación ( $R_r$ ):** Representa la potencia electromagnética que radía la antena hacia el espacio. La potencia de radiación es:

$$\overrightarrow{P_{rad}} = \frac{1}{2} \text{Re}(\overrightarrow{E} \times \overrightarrow{H}) \quad (\hat{r}) \qquad P_{rad} = I^2 \cdot R_r$$

**Resistencia de pérdidas:** Representa las pérdidas óhmicas en los cables o en el núcleo de las ferritas de la antena. La potencia de pérdidas vale:

$$P_{perd} = I^2 \cdot R_{\Omega} \qquad P_{entregada} = P_{rad} + P_{perd} \qquad R_a = R_r + R_{\Omega}$$

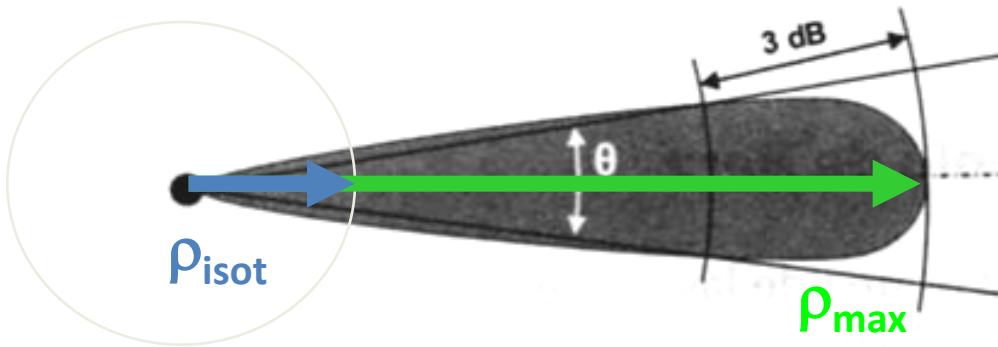
**Rendimiento e eficiencia de antena**

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{entregada}}$$

**Ancho de banda (B):** Margen de frecuencias en el cual la antena trabaja en condiciones óptimas

# Diagrama de radiación, directividad y ganancia

**Diagrama de radiación:** Representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las distintas direcciones del espacio a una distancia fija. Se representa normalmente el campo eléctrico, **E**, o la densidad de potencia,  **$\rho$** .



Ancho de haz a 3 dB  
(potencia mitad)

**Directividad (D):** Relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a una distancia dada, normalmente la de máxima radiación, y la que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa con la misma potencia.

$$D(\theta) = \frac{\rho(\theta)}{\rho_{isot}(\theta)} \quad D = \frac{\rho(\theta_{max})}{\rho_{isot}(\theta_{max})}$$

**Ganancia (G):** Producto de la directividad D por el rendimiento de la antena.

$$G = \eta \cdot D$$

# Area efectiva

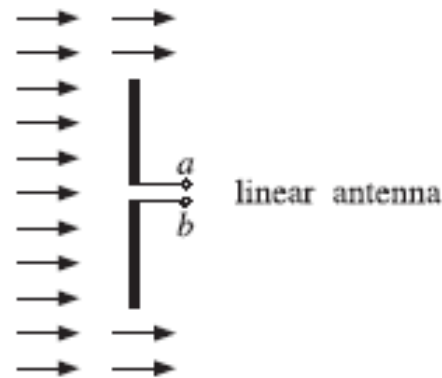
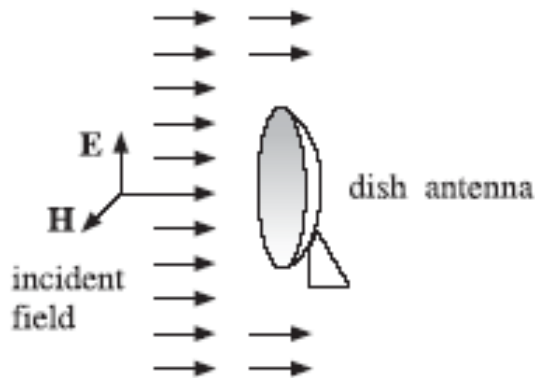
**Area efectiva o superficie equivalente (A):** Relación entre la potencia recibida por la antena y la densidad de potencia. En antenas isotrópicas vale:

$$A = \frac{\text{Potencia recibida (W)}}{\text{Densidad de potencia (W / m}^2\text{)}}$$

$$A = D \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$$

Antenas de  
área fija  
(parabólicas)

Area indep  
de la frec



Antenas de  
ganancia fija  
(lineales)

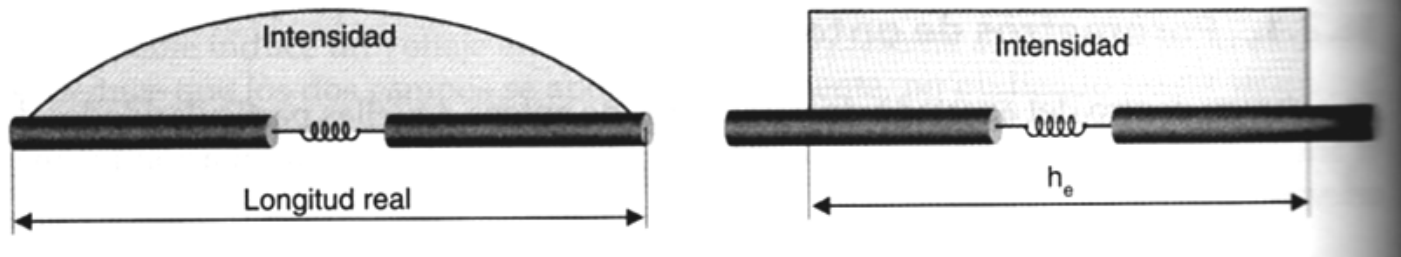
G y D indep  
de la frec

$$D = A \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2}$$

$$A = D \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$$

# Longitud efectiva y temperatura de ruido

**Longitud efectiva o altura equivalente ( $h_e$ ):** Longitud que tendría que tener la antena si la intensidad de corriente fuera constante a lo largo de ella. En caso de distribución de corriente no uniforme (situación real) la longitud efectiva es menor que la real



**Temperatura de ruido (T):** Temperatura a la que se debería calentar la resistencia de radiación de la antena para generar un ruido equivalente al producido en la antena. Cumple la relación de Nyquist:

$$P = k \cdot T \cdot B$$

k: constante de Boltzman  $1,3803 \cdot 10^{-23} \text{ W / Hz K}$

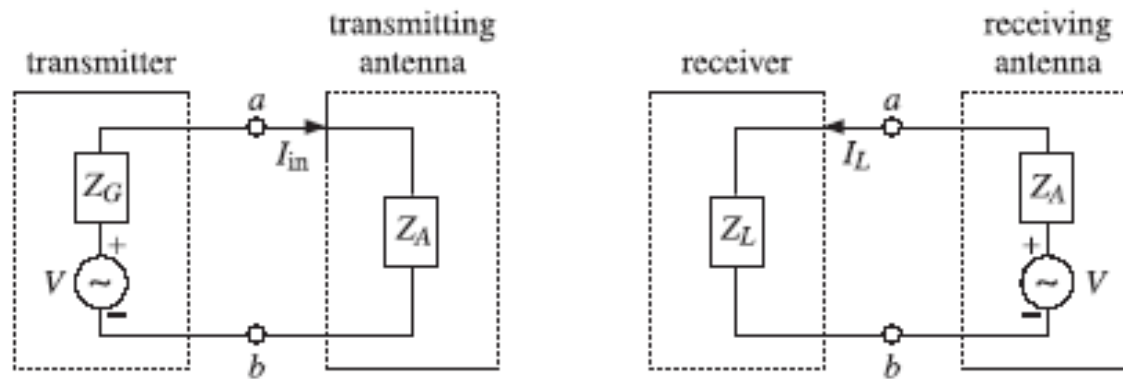
T: Temperatura en K

B: Ancho de Banda en Hz



# Circuitos equivalentes de antenas

**Teorema de reciprocidad:** Una misma antena se puede utilizar para transmisión y para recepción, conservando invariables los parámetros característicos al pasar de transmisión a recepción



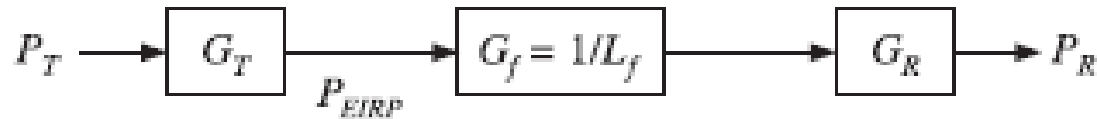
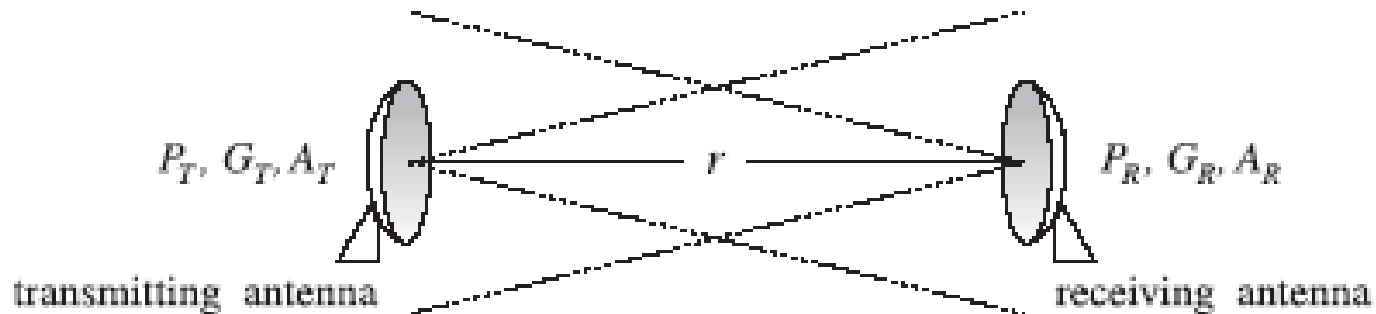
**Impedancia ( $Z_a$ ):** Relación entre la tensión y la corriente en el punto de conexión de la antena al generador.  $Z_a(\omega) = R_a(\omega) + jX_a(\omega)$

**Transferencia de potencia:** Relación entre la potencia entregada por el generador y la radiada finalmente al exterior. Para que sea máxima se debe adaptar la impedancia de entrada de la antena a la impedancia de salida del generador,  $Z_{gen} = Z_a^*$ .

**Adaptación antena receptora:** La antena receptora también debe estar adaptada al receptor, es decir,  $Z_{rec} = Z_a^*$ . Si no, se producen pérdidas de adaptación

## 3.2.2 Potencia propagada

$$\rho_T(r) = \frac{dP_T}{dS} = \frac{P_T \cdot G_T}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{P_{EIRP}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \longrightarrow \quad P_R = A_R \cdot \rho_T(r)$$



$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot r)^2}$$

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_f \cdot G_R$$

$$L_f = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2$$

$$P(dB) = 10 \cdot \log(P)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(G)$$

$$P_R(dB) = P_T(dB) + G_T(dB) - L_f(dB) + G_R(dB)$$

## 3.2.2 Potencia propagada

**Ejemplo:** Un satélite geoestacionario transmite señal de TV a una estación base terrestre a una distancia de 40000 km. Las antenas de satélite y terrestre tienen un diámetro de 0,5 y 5 m, y una eficiencia de apertura del 60%. Si la potencia transmitida por el satélite es de 6 W, y la frecuencia downlink es de 4 GHz, calcula la ganancia de la antena receptora terrestre y la potencia recibida

$$G = A_{real} \cdot e \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \quad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^9} = 0,075m$$

$$G_{SAT} = \pi \cdot \left( \frac{d_{sat}}{2} \right)^2 \cdot e \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} = 0,25^2 \cdot 0,6 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{0,075^2} = 263,2$$

$$G_{SAT}(dB) = 10 \cdot \log(263,2) = 24,2dB$$

$$G_{TER} = \pi \cdot \left( \frac{d_{ter}}{2} \right)^2 \cdot e \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} = 2,5^2 \cdot 0,6 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{0,075^2} = 26320$$

$$G_{TER}(dB) = 10 \cdot \log(26320) = 44,2dB$$

## 3.2.2 Potencia propagada

**Ejemplo:** Un satélite geoestacionario transmite señal de TV a una estación base terrestre a una distancia de 40000 km. Las antenas de satélite y terrestre tienen un diámetro de 0,5 y 5 m, y una eficiencia de apertura del 60%. Si la potencia transmitida por el satélite es de 6 W, y la frecuencia downlink es de 4 GHz, calcula la ganancia de la antena receptora terrestre y la potencia recibida

$$P_{TER} = P_{SAT} \cdot G_{SAT} \cdot G_f \cdot G_{TER} \quad L_f = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^7}{0,075} \right)^2 = 4,49 \cdot 10^{19}$$

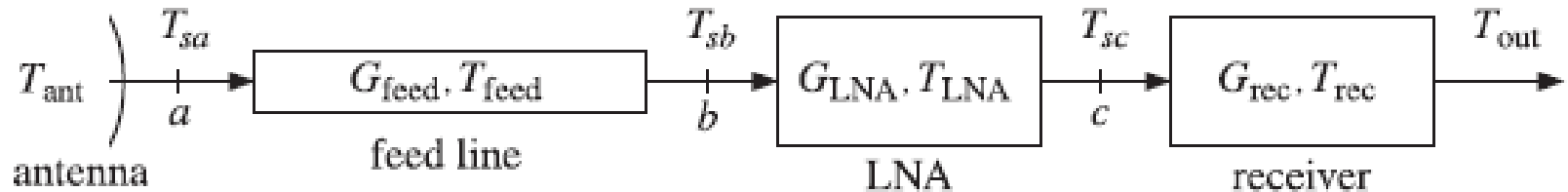
$$P_{SAT}(dB) = 10 \cdot \log(6) = 7,78 dBW \quad L_f(dB) = 10 \cdot \log(4,49 \cdot 10^{19}) = 196,5 dB$$

$$P_{TER}(dB) = P_{SAT}(dB) + G_{SAT}(dB) - L_f(dB) + G_{TER}(dB)$$

$$P_{TER}(dB) = 7,8 dBW + 24,2 dB - 196,5 dB + 44,2 dB = -120,3 dBW$$

$$P_{TER} = 10^{\frac{P_{TER}(dB)}{10}} = 10^{\frac{-120,3}{10}} = 9,93 \cdot 10^{-13} W = 0,993 pW$$

### 3.2.3 Ruido en recepción

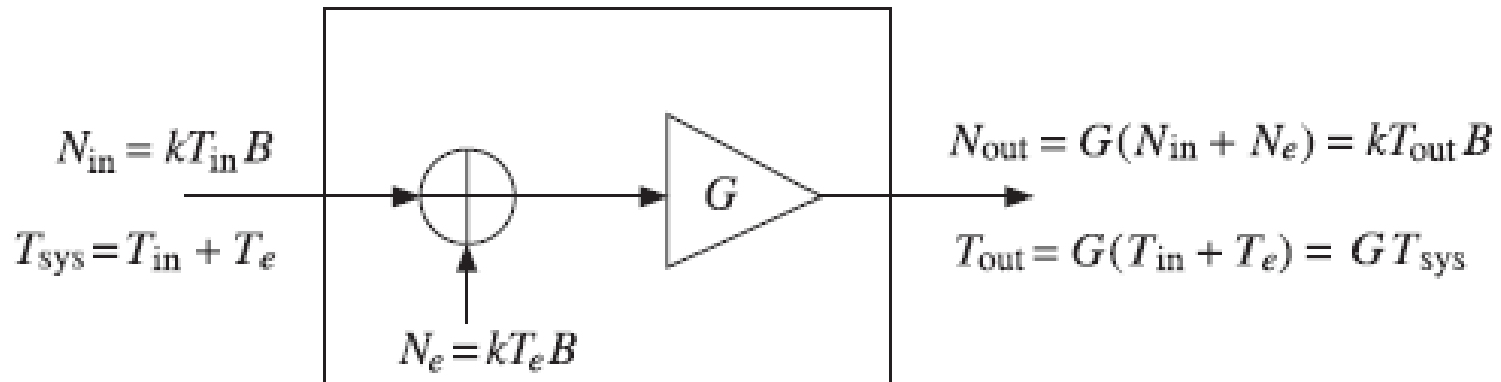


$$N = k \cdot T \cdot B$$

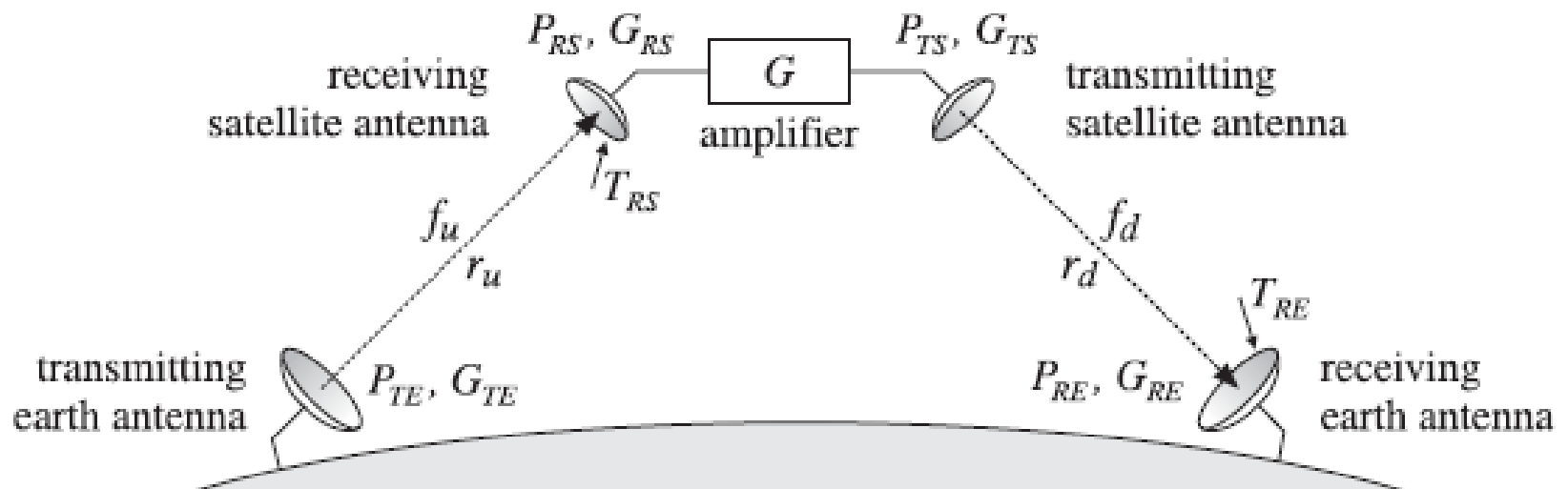
$$N_{ant} = k \cdot T_{ant} \cdot B$$

**Temperatura de antena ( $T_{ant}$ ):** Representa la contribución ponderada del ruido captado por la antena en todas las direcciones. Depende de hacia donde esté orientada.

En un receptor hay ruido de antena más ruido del propio receptor



### 3.2.4 Enlaces de satélite



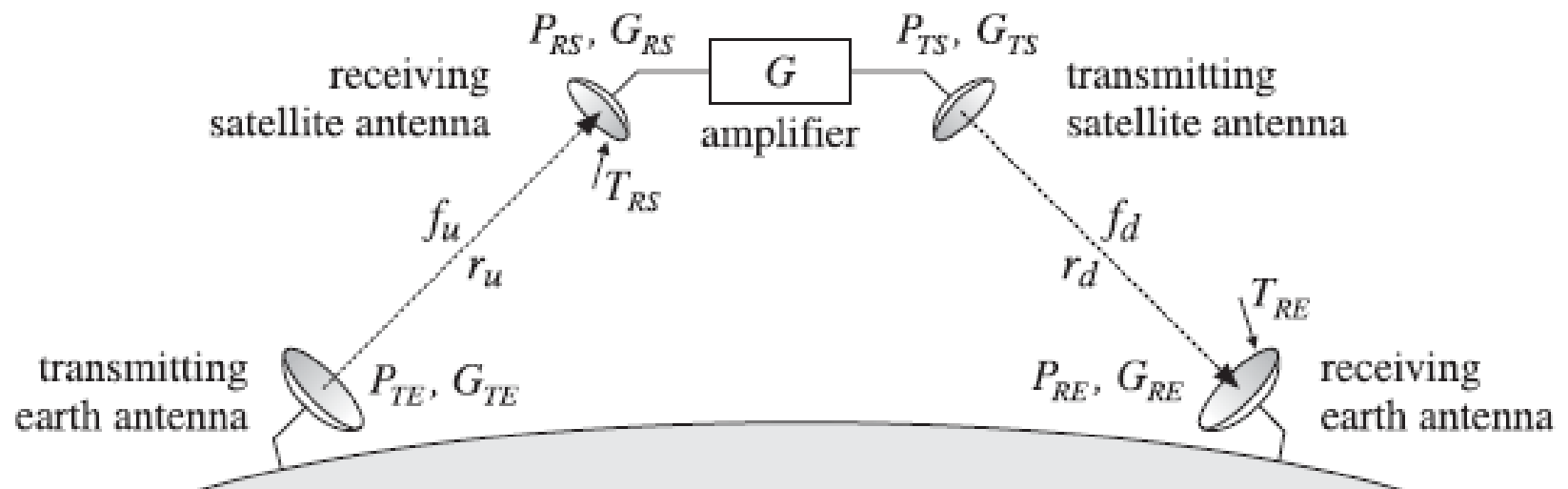
En satélites geoestacionarios  $f_u/f_d$  vale 6/4 GHz o 14/11 GHz

$$G_{fu} = \frac{1}{L_{fu}} = \left( \frac{\lambda_u}{4\pi r_u} \right)^2, \quad G_{fd} = \frac{1}{L_{fd}} = \left( \frac{\lambda_d}{4\pi r_d} \right)^2$$

$$P_{RE} = P_{RS} G G_{TS} G_{fd} G_{RE} = P_{TE} G_{TE} G_{fu} G_{RS} G G_{TS} G_{fd} G_{RE}$$

$$SNR_u = \frac{P_{RS}}{kT_{RS}B}, \quad SNR_d = \frac{P_{RE}}{kT_{RE}B} \quad T_{sys} = T_{RE} + G G_{TS} G_{fd} G_{RE} T_{RS}$$

## 3.2.4 Enlaces de satélite



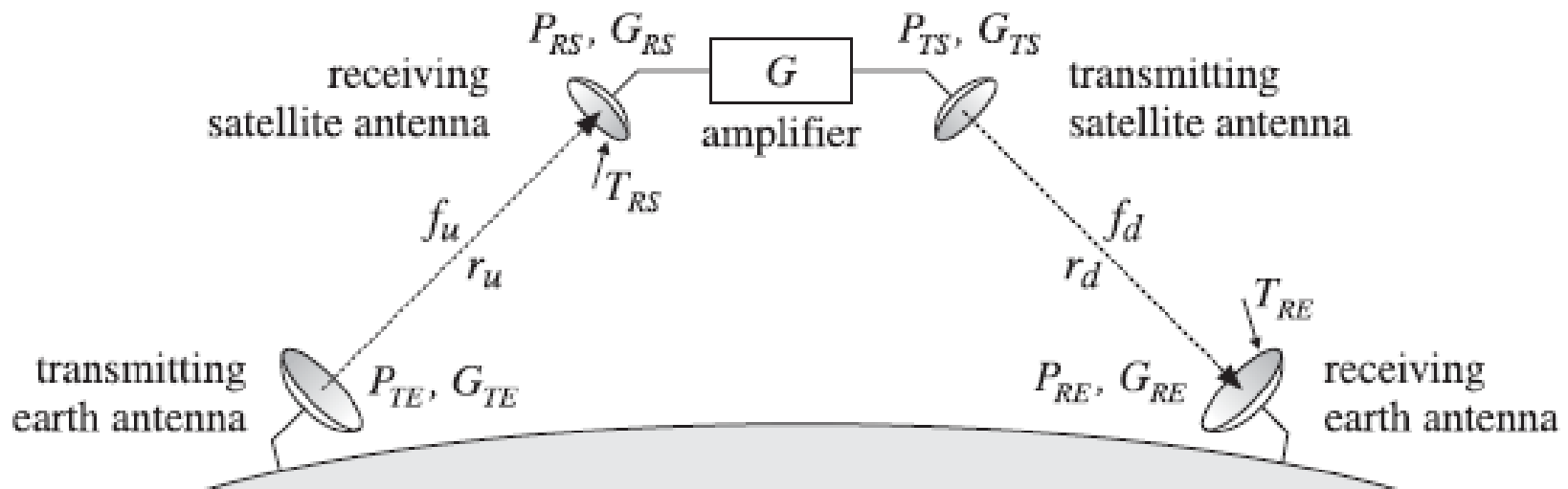
$$\begin{aligned}
 SNR_{\text{tot}}^{-1} &= \frac{k(T_{RE} + G G_{TS} G_{fd} G_{RE} T_{RS}) B}{P_{RE}} = \frac{k T_{RE} B}{P_{RE}} + \frac{k G G_{TS} G_{fd} G_{RE} T_{RS} B}{P_{RE}} \\
 &= \frac{k T_{RE} B}{P_{RE}} + \frac{k G G_{TS} G_{fd} G_{RE} T_{RS} B}{G G_{TS} G_{fd} G_{RE} P_{RS}} = \frac{k T_{RE} B}{P_{RE}} + \frac{k T_{RS} B}{P_{RS}} = SNR_d^{-1} + SNR_u^{-1}
 \end{aligned}$$

$$SNR_{\text{tot}} = \frac{P_{RE}}{k T_{\text{sys}} B}$$

$$SNR_{\text{tot}} = \frac{1}{SNR_u^{-1} + SNR_d^{-1}}$$

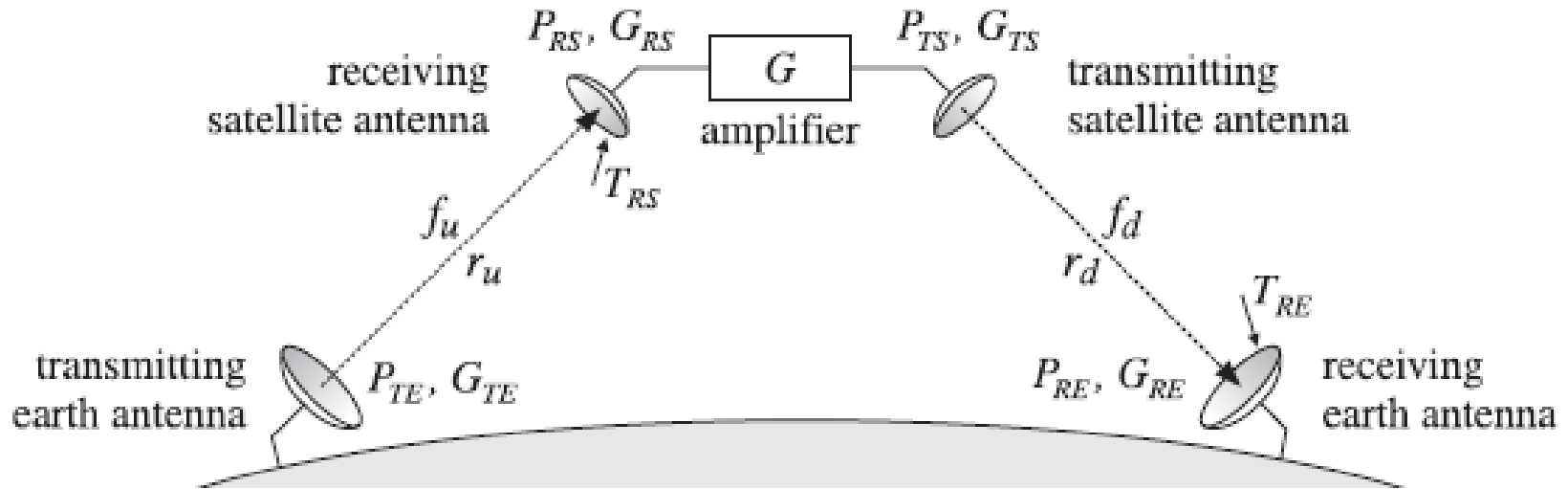
## 3.2.4 Enlaces de satélite

**Ejercicio:** En un enlace satélite, la distancia tierra-satélite es de 36000 km. Las frecuencias uplink / downlink valen 6 / 4 GHz. Los diámetros de las antenas terrestre y de satélite son 15 y 0,5 m. La eficiencia de apertura de ambas antenas es del 60%. La antena terrestre transmite 1 kW y el transpondedor del satélite tiene una ganancia de 90 dB. La temperatura de ruido de la antena receptora del satélite vale 300 K y el receptor satélite tiene una temperatura de ruido efectiva de 2700 K. La antena receptora terrestre tiene una temperatura de ruido de 50 K y el amplificador LNA de alta frecuencia asociado tiene una temperatura de ruido equivalente de 80 K. El ancho de banda es de 30 MHz.





## 3.2.4 Enlaces de satélite



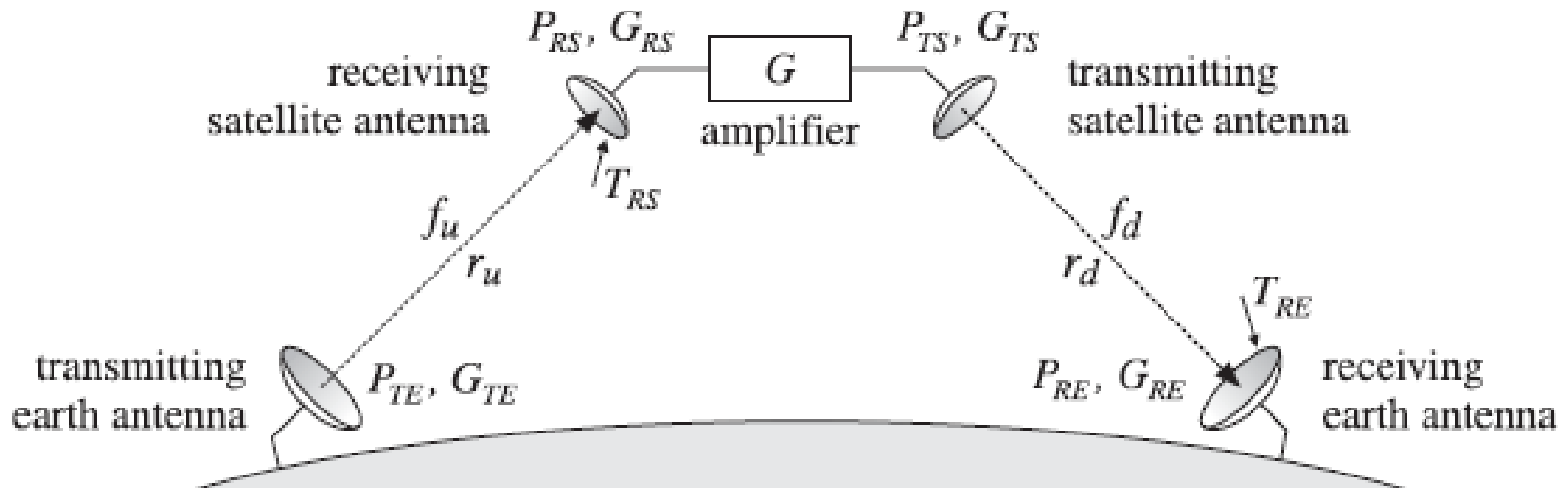
a) Calcular la ganancia de las antenas implicadas

$$G = A_{real} \cdot e \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \quad \lambda_u = \frac{c}{f_u} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9} = 0,05m \quad \lambda_d = \frac{c}{f_d} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^9} = 0,075m$$

$$G_{TE} = \pi \cdot \left( \frac{d_{TE}}{2} \right)^2 \cdot e \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_u^2} = 7,5^2 \cdot 0,6 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{0,05^2} = 5,33 \cdot 10^5 = 57,3dB$$

$$G_{RS} = 0,25^2 \cdot 0,6 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{0,05^2} = 592,18 = 27,7dB$$

## 3.2.4 Enlaces de satélite

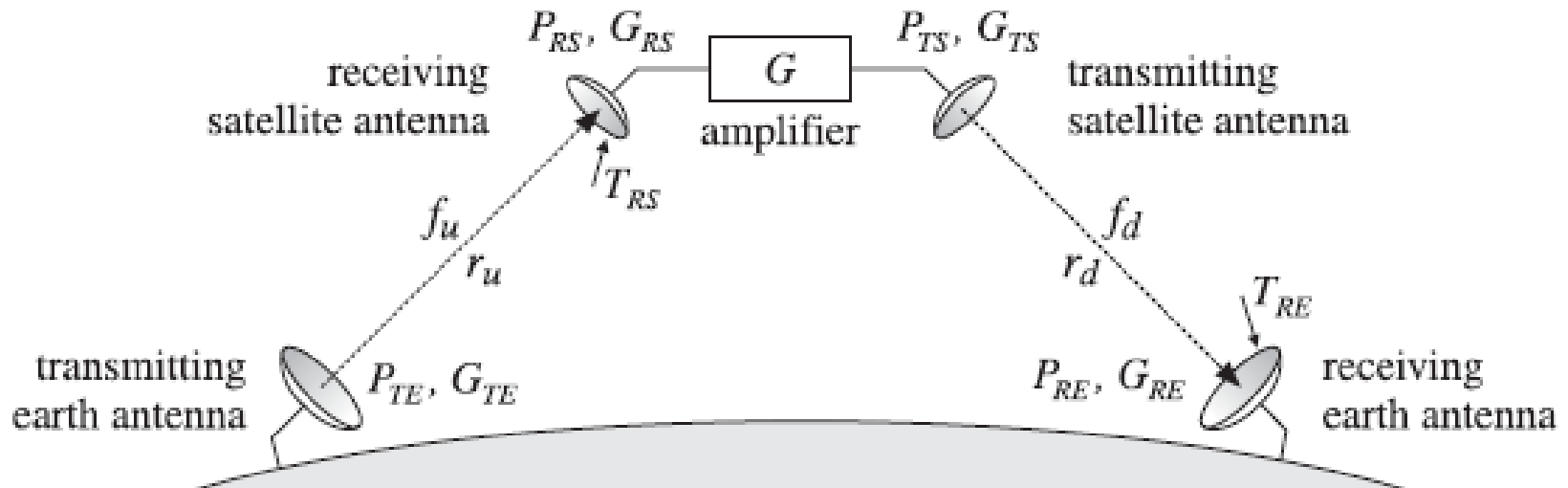


a) Calcular la ganancia de las antenas implicadas

$$G_{TS} = \pi \cdot \left( \frac{d_{TS}}{2} \right)^2 \cdot e \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_d^2} = 0,25^2 \cdot 0,6 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{0,075^2} = 263,19 = 24,2dB$$

$$G_{RE} = 7,5^2 \cdot 0,6 \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{0,075^2} = 2,37 \cdot 10^5 = 53,7dB$$

## 3.2.4 Enlaces de satélite



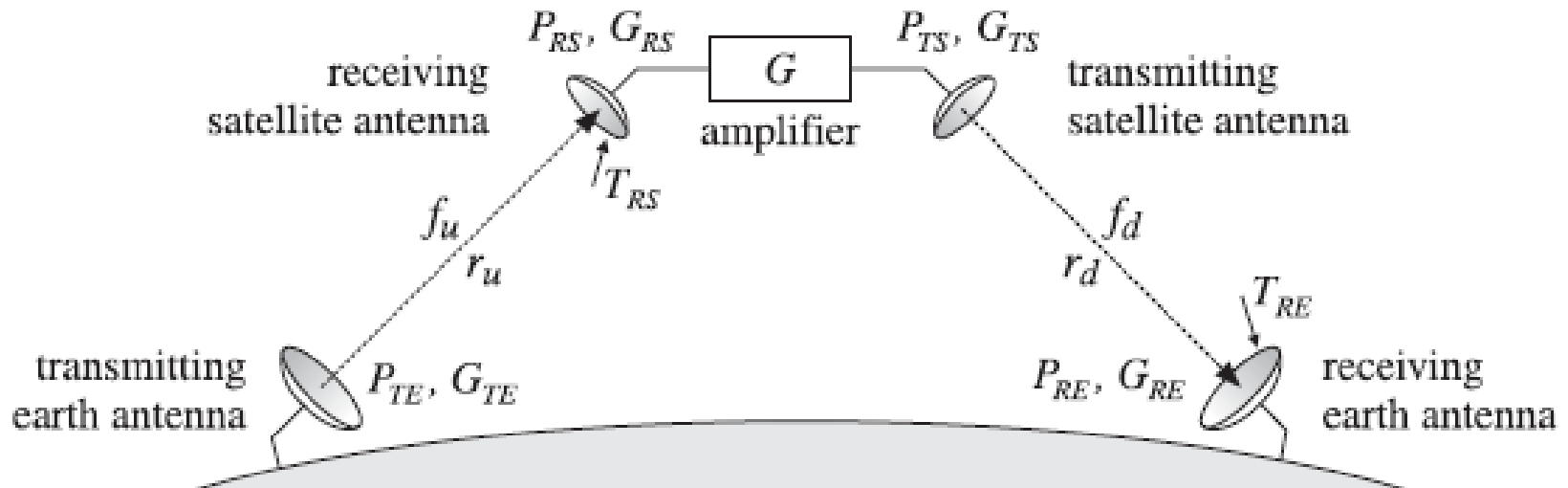
b) Calcular las potencias recibidas en el satélite y en el receptor terrestre

$$P_{TE} (dB) = 10 \cdot \log(10^3) = 30 dBW$$

$$L_{fu} = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda_u} \right)^2 = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot 3,6 \cdot 10^7}{0,05} \right)^2 = 8,19 \cdot 10^{19} = 199,1 dB$$

$$L_{fd} = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda_u} \right)^2 = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot 3,6 \cdot 10^7}{0,075} \right)^2 = 3,64 \cdot 10^{19} = 195,6 dB$$

## 3.2.4 Enlaces de satélite



b) Calcular las potencias recibidas en el satélite y en el receptor terrestre

$$P_{RS} (dB) = P_{TE} (dB) + G_{TE} (dB) - L_{fu} (dB) + G_{RS} (dB)$$

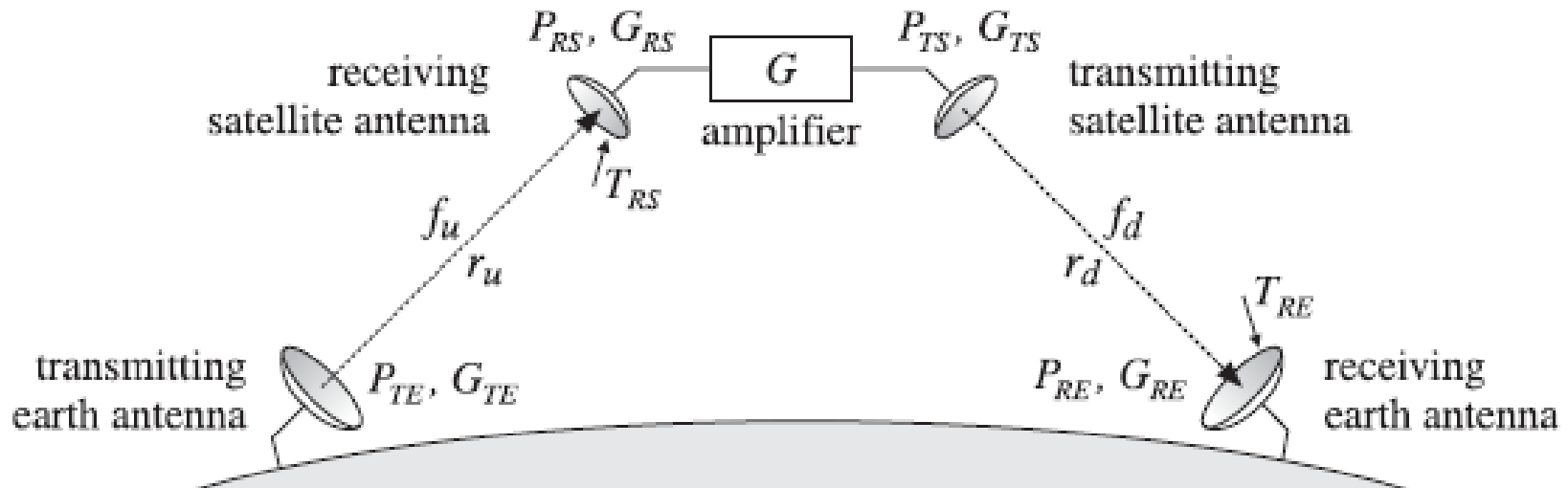
$$P_{RS} (dB) = 30 dBW + 57,3 - 199,1 + 27,7 = -84,1 dBW = 3,89 nW$$

$$P_{TS} (dBW) = P_{RE} (dBW) + G_{SAT} (dB) = -84,1 dBW + 90 = 5,9 dBW = 3,89 W$$

$$P_{RE} (dB) = P_{TS} (dB) + G_{TE} (dB) - L_{fd} (dB) + G_{RE} (dB)$$

$$P_{RE} (dB) = 5,9 dBW + 24,2 - 195,6 + 53,7 = -111,8 dBW = 6,6 pW$$

## 3.2.4 Enlaces de satélite



c) Calcular la relación señal – ruido (SNR) en los enlaces de subida, de bajada, y en el sistema global

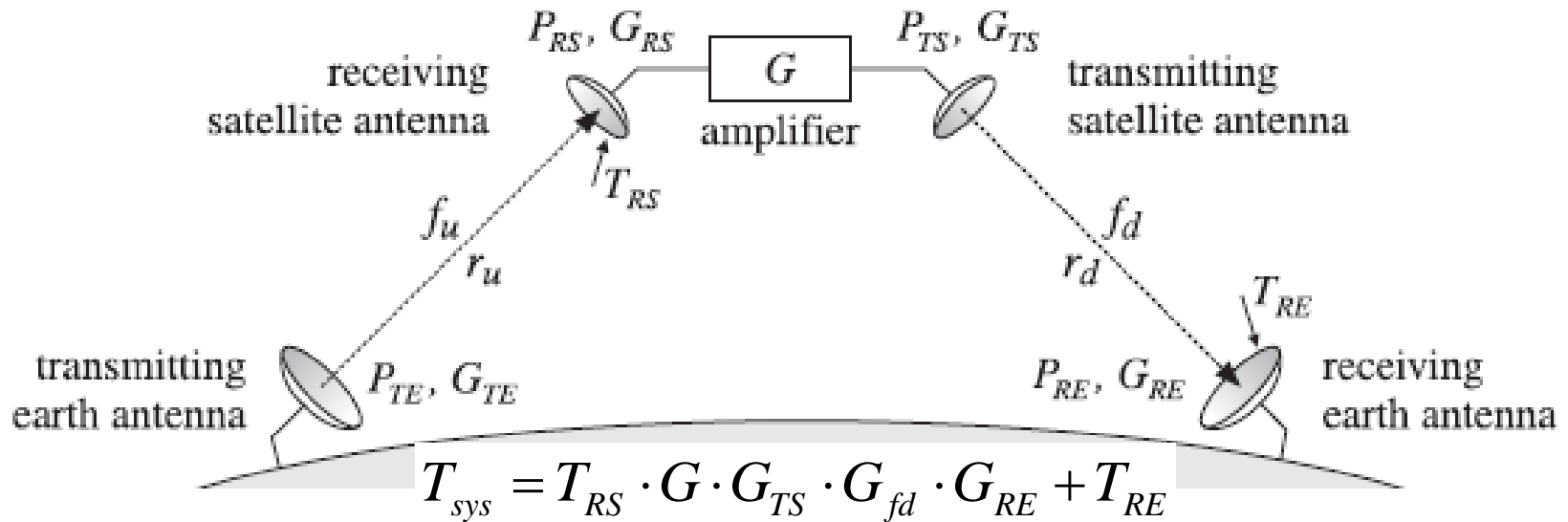
$$T_{RS} = 300K + 2700K = 3000K$$

$$T_{RE} = 50K + 80K = 130K$$

$$N_{RS} = k \cdot T_{RS} \cdot B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{W}{Hz \cdot K} \cdot 3000K \cdot 30 \cdot 10^6 Hz = 1,24 pW = -119 dBW$$

$$N_{RE} = k \cdot T_{RE} \cdot B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{W}{Hz \cdot K} \cdot 130K \cdot 30 \cdot 10^6 Hz = 0,054 pW = -132,7 dBW$$

### 3.2.4 Enlaces de satélite



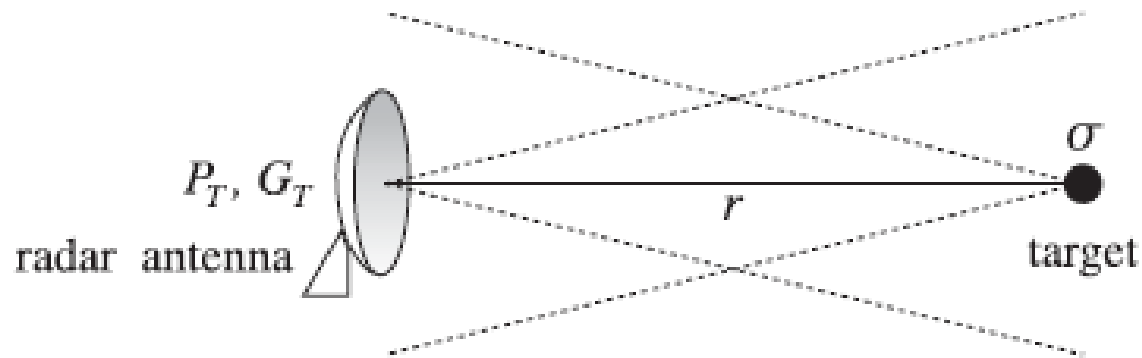
c) Calcular la relación señal – ruido (SNR) en los enlaces de subida, de bajada, y en el sistema global

$$SNR_u = P_{RS} (dBW) - N_{RS} (dBW) = -84,1 + 119 = 34,9 dB = 3090,3$$

$$SNR_d = P_{RE} (dBW) - N_{RE} (dBW) = -111,8 + 132,7 = 20,9 dB = 123$$

$$SNR_{tot} = \frac{1}{SNR_u^{-1} + SNR_f^{-1}} = \frac{1}{3090,3^{-1} + 123^{-1}} = 118,3 = 20,7 dB$$

## 3.2.5 Antenas para Radar



$\sigma$ : Sección blanco radar

$$\mathcal{P}_T = \frac{P_T G_T}{4\pi r^2}$$

$$P_{\text{target}} = \sigma \mathcal{P}_T = \frac{P_T G_T \sigma}{4\pi r^2}$$

El blanco reradía isotrópicamente

$$\mathcal{P}_{\text{target}} = \frac{P_{\text{target}}}{4\pi r^2} = \frac{P_T G_T \sigma}{(4\pi r^2)^2}$$

$$P_R = A_R \mathcal{P}_{\text{target}} = \frac{P_T G_T A_R \sigma}{(4\pi)^2 r^4}$$

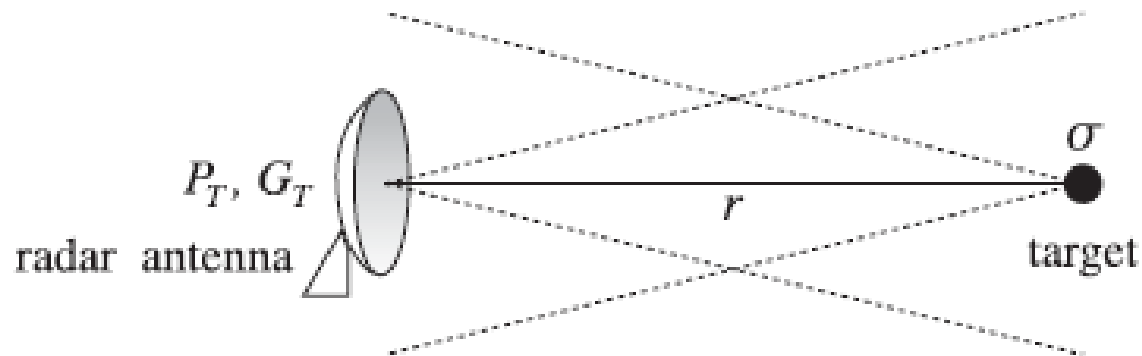
(radar equation)

$$A_R = A_T$$

$$G_T = 4\pi A_T / \lambda^2$$

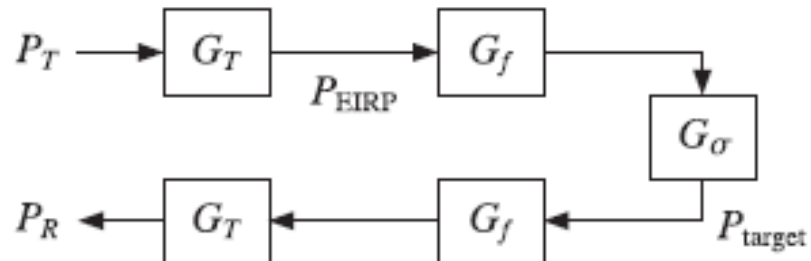
$$P_R = \frac{P_T A_T^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 r^4} = \frac{P_T G_T^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} = P_T G_T^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^4 \left( \frac{4\pi \sigma}{\lambda^2} \right)$$

## 3.2.5 Antenas para Radar



$$G_{\sigma} = 4\pi\sigma / \lambda^2,$$

$$P_R = P_T G_T^2 G_f^2 G_{\sigma}$$



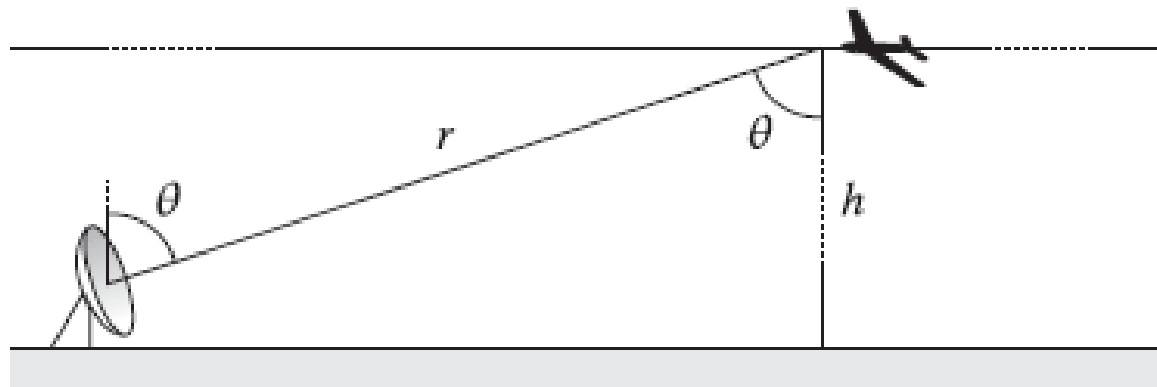
$$P_{R,\min} = \frac{P_T G_T A_R \sigma}{(4\pi)^2 r_{\max}^4}$$

$$r_{\max} = \left[ \frac{P_T G_T A_T \sigma}{(4\pi)^2 P_{R,\min}} \right]^{1/4}$$

Alcance radar



## 3.2.5 Antenas para Radar



$$P_R = \frac{P_T G_T^2 g^2(\theta, \phi) \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad g(\theta, \phi) \quad \text{Ganancia normalizada de la antena}$$

Se puede obtener una potencia recibida  $P_R$  independiente de la distancia  $r$  escogiendo una antena con una ganancia adecuada:

$$g(\theta, \phi) = K / \cos^2 \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_{\max} \quad r_{\max} = h / \cos \theta_{\max}.$$

$$P_R = \frac{P_T G_T^2 g^2(\theta, \phi) \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} = \frac{P_T G_T^2 K^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4 \cos^4 \theta} = \frac{P_T G_T^2 K^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 h^4}$$

## 3.2.5 Antenas para Radar

**Ejercicio:** Un radar de pulsos opera a 10 GHz con una antena de ganancia de 28 dB y una potencia transmitida de 2 kW. Si se desea detectar blancos de hasta 12 m<sup>2</sup> de sección recta, y la potencia mínima detectable es de -90 dBm, ¿Cuál es la máxima distancia radar?

$$G = 10^{\frac{28dB}{10}} = 631 \quad P_{R\min} = 10^{\frac{-90}{10}} mW = 1 pW$$

$$\lambda_u = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{10}} = 0,03m \quad \sigma = 12m^2$$

$$r_{\max} = \left[ \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_T \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot P_{R\min}} \right]^{1/4} = \left[ \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_{R\min}} \right]^{1/4}$$

$$r_{\max} = \left[ \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 631^2 \cdot 0,03^2 \cdot 12}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot 10^{-12}} \right]^{1/4} = 8114m$$