

# TEMA #5

Cálculo de presupuesto de enlace

CUBOZAT v1.0

Impartida por:  
Juan Ramón Solís Escobedo

Febrero 2023

# Instructor: M. en C. Juan Ramón Solís Escobedo

Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones por el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE) en 2016 e Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) en 2014. Actualmente cursando el Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada en la Universidad Autónoma de Zacatecas desde 2020, en donde su principal tema de estudio es el diseño de IP Cores para telecomunicaciones. Entre 2017 y 2018 contribuyó activamente en el desarrollo tecnológico de sistemas de seguridad minera para la empresa LASEC-BECKER, y a finales de 2018 participó como docente en el área de Ingeniería del Instituto Politécnico Nacional (IPN). En 2019 se desempeñó como ingeniero de desarrollo tecnológico en el Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones (CIDTE) de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la UAZ, en donde fue parte activa en el desarrollo de los subsistemas de Comunicaciones y Computadora a Bordo para un satélite tipo CubeSat. Sus intereses de investigación y académicos están centrados en los sistemas satelitales y en el diseño e implementación de sistemas de telecomunicaciones, diseño electrónico y diseño de hardware sobre IP Cores.



# Objetivo

- Conocer los principales factores que afectan un enlace de comunicación satelital.
- Conocer las bases teóricas para calcular un presupuesto de enlace.

# Contenido

1. El decibel
2. Objetivo
3. Limitantes
4. BER
5. Energía de Bit
6. Densidad espectral de ruido
7. Temperatura de ruido del sistema
8. SNR
9. Ejemplo
10. Cálculo de enlace CuboZat V1.0

# El decibel

- El decibel es el valor logarítmico de la relación, la tasa o razón entre dos valores, y se usa como una unidad adimensional (dB).

$$X(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

$P_1$  y  $P_2$  en Watts

$$Y(W) = 10^{\left[ \frac{X(dB)}{10} \right]}$$

$X$  Potencia en dB

# El decibel

Identidades para simplificar el uso del decibel:

- Si  $A * B$ , entonces  $10\log_{10} (A * B) = 10\log_{10}(A) + 10\log_{10}(B)$
- Si  $\frac{A}{B}$ , entonces  $10\log_{10} \left(\frac{A}{B}\right) = 10\log_{10}(A) - 10\log_{10}(B)$
- Si  $A^n$ , entonces  $10\log_{10} (A^n) = n * 10\log_{10}(A)$
- Si  $A^{\frac{1}{n}}$ , entonces  $10\log_{10} \left(A^{\frac{1}{n}}\right) = \frac{1}{n} * 10\log_{10}(A)$

# El decibel

- Ganancia ( $dB$ ) → Valor relativo entre dos valores (sin unidades)
- Potencia ( $dBW$ ,  $dBm$ ) → Valor absoluto (Watts, mWatts)
- Frecuencia ( $dB * Hz$ ) → Valor absoluto (Hertz)
- Temperatura de ruido ( $\frac{dB}{k}$ ) → Valor absoluto (Kelvins)

$$1 \text{ W} \rightarrow 0 \text{ dBW}$$

$$10 \text{ W} \rightarrow 10 \log (10/1 \text{ W}) = 10 \text{ dBW}$$

$$100 \text{ W} \rightarrow 20 \text{ dBW}$$

$$1000 \text{ W} \rightarrow 30 \text{ dBW}$$

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W} \rightarrow 0 \text{ dBm} = -30 \text{ dBW}$$

$$10 \text{ mW} = 10^{-2} \text{ W} \rightarrow 10 \text{ dBm} = -20 \text{ dBW}$$

$$500 \text{ mW} = 0.5 \text{ W} \rightarrow 27 \text{ dBm} = -3 \text{ dBW}$$

$$1000 \text{ mW} = 1 \text{ W} \rightarrow 30 \text{ dBm} = 0 \text{ dBW}$$

# El decibel

- Se debe tener cuidado de no mezclar operaciones aritméticas entre unidades logarítmicas con diferente base numérica.
- Se puede hacer operaciones entre distintas unidades (Potencia, Temperatura, Frecuencia, Fase, etc.), pero siempre se deben hacer con la misma unidad base: Watts sólo con Watts; Hertz con Hertz; Kelvins con Kelvins; etc, o con unidades sin valores.

## Atención !

$$(dB) + / - (dBm) = \text{SI}$$

$$(dB) + / - (dBW) = \text{SI}$$

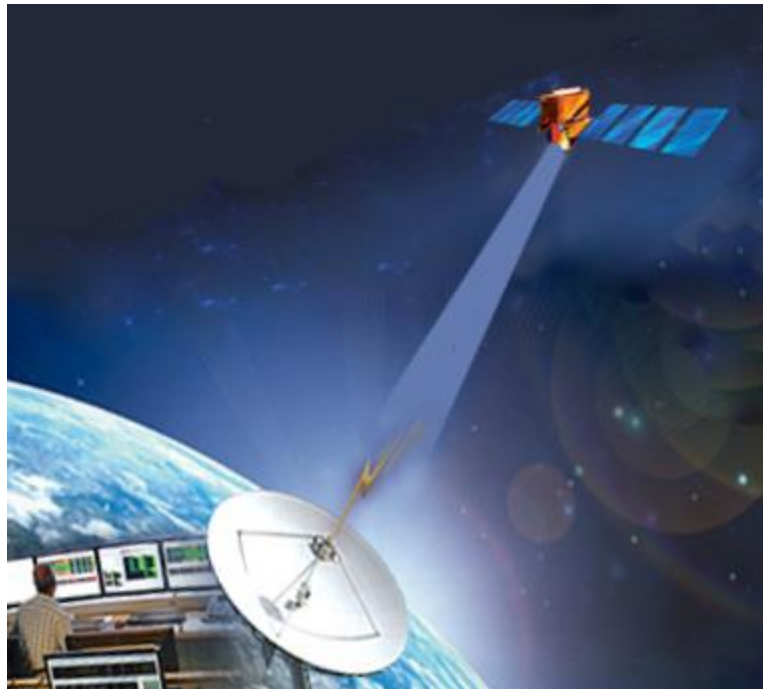
$$(dBm) + / - (dBW) = \text{NO}$$

$$(dB) + / - (dBW) + / - (dBi) + / - (dB-Hz) + / - (dB-K) = \text{SI}$$



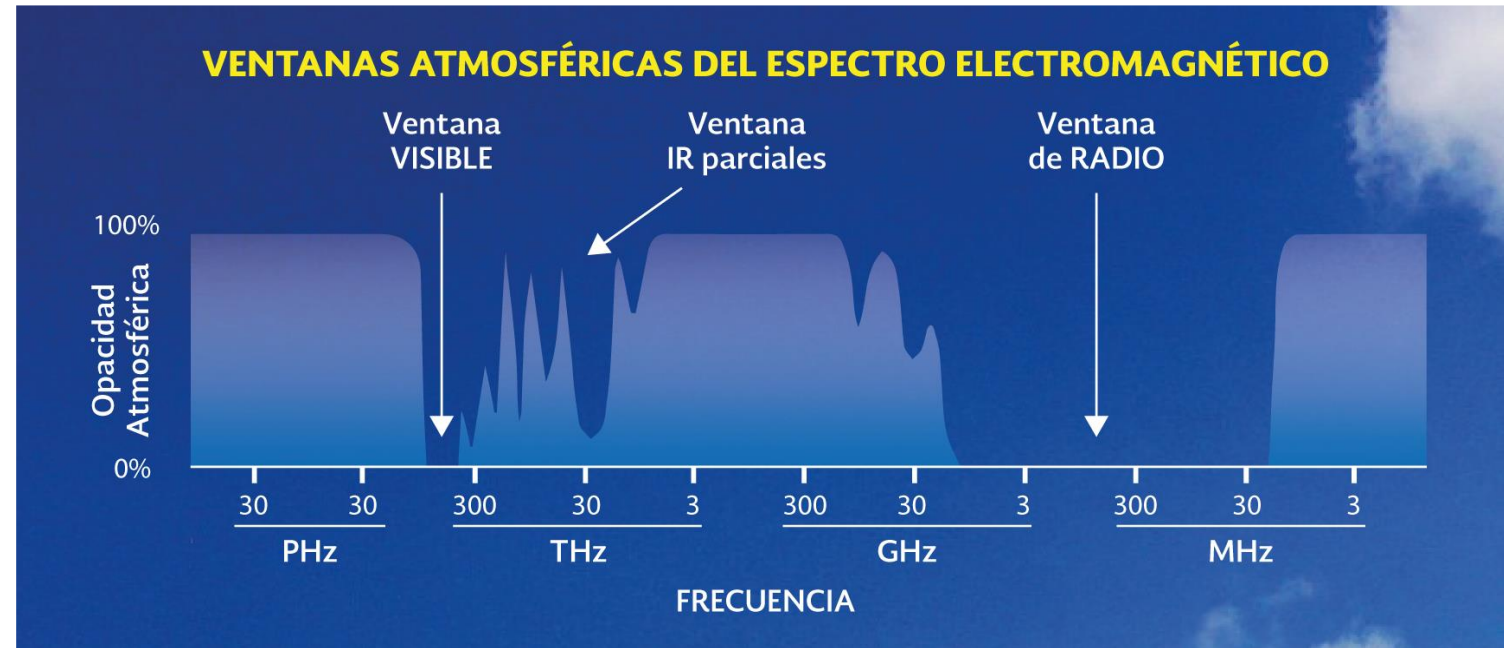
# Objetivo

- El objetivo del presupuesto de enlace, también conocido como diseño de enlace de radio, es garantizar que se pueda establecer un enlace de comunicación confiable entre un transmisor de radio y su receptor asociado.
- El diseño correcto de un enlace de radio, evita el desperdicio de recursos técnicos y económicos, y optimiza la capacidad del satélite y estaciones terrenas.



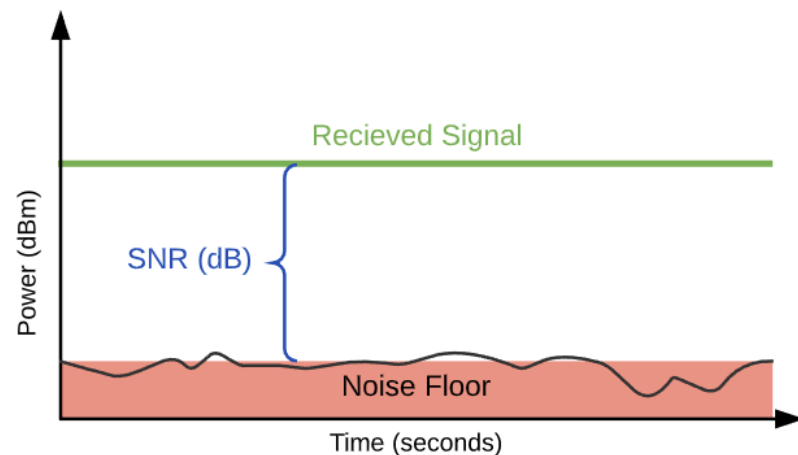
# Limitantes

- El satélite tiene potencia eléctrica limitada por sus celdas.
- La frecuencia debe estar en frecuencias asignadas.
- La antena del satélite tiene dimensiones limitadas.
- La Densidad de Flujo solar (Potencia) en la Tierra es baja.

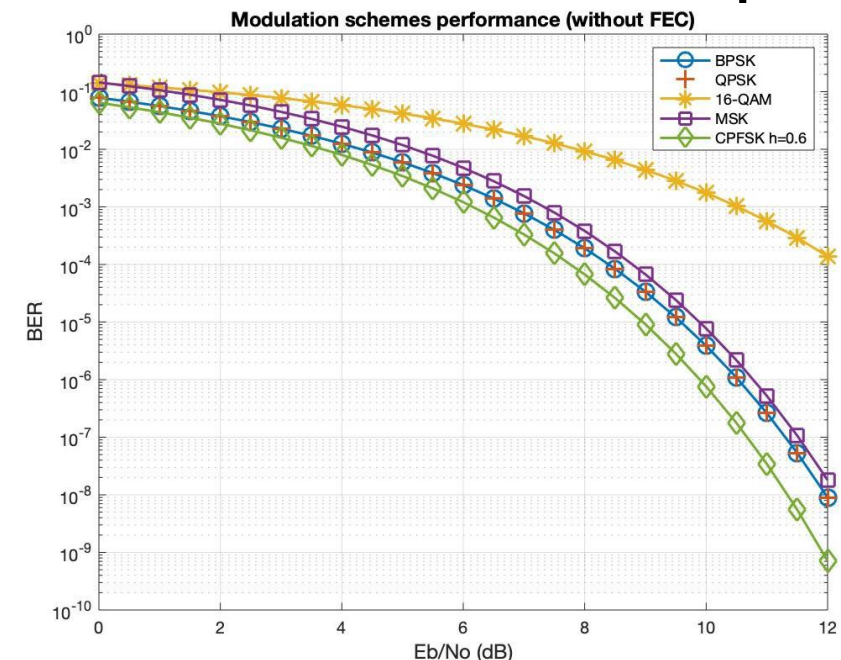


# BER

- En sistemas de comunicación digital, la confiabilidad se evalúa a través de la tasa de error de bit (BER) asociada con el esquema de modulación digital específico que se utiliza para transmitir información, que depende de la relación señal a ruido (SNR) en el receptor de radio.
- El objetivo principal del diseño de enlaces de radio es establecer si hay suficiente potencia disponible en el receptor de radio para cerrar el enlace, es decir, para cumplir con un valor de SNR específico.



Febrero 2023



# Energía de bit

- Para esquemas de modulación digital, la SNR en el receptor está dada por la relación de la energía recibida por bit  $E_b$  respecto a la densidad espectral de ruido  $N_0$ .
- La energía de bit se expresa como:

$$E_b = \frac{P_r}{R}$$

*Donde:*

- $P_r$ , es la potencia recibida en Watts (W).
- $R$ , es la velocidad de transmisión que se espera sea soportada por el enlace de radio en bits por segundo (bps).

# Densidad espectral de ruido

- La densidad espectral de ruido  $N_0$  se expresa en (W/Hz) y en general se asume uniforme, siendo expresada en términos de la temperatura de ruido del sistema  $T_s$  como:

$$N_0 = kT_s$$

Donde:

- $k = 1.38 \times 10^{-23} \left( \frac{J}{K} \right)$  es la constante de Boltzmann

# Temperatura de ruido del sistema

- Se determina sumando la temperatura de ruido de la antena  $T_{ant}$  que incluye fuentes de ruido que son externas al receptor (como la radiación cósmica, el ruido solar, el ruido artificial, etc), y la temperatura de ruido del receptor  $T_r$  ruido entre la antena receptora y demodulador digital (línea de transmisión, cableado, conectores, filtro pasa banda, amplificador de bajo ruido)

$$T_s = T_{ant} + T_r$$

Con:

$$T_r = \frac{T_0}{L_r} (F - L_r)$$

Donde:

- $T_0 = 290\text{ K}$  es la temperatura de referencia (en Tierra, 16.85 °C)
- $L_r$ , pérdidas en la línea y el conector desde la antena hasta el amplificador del receptor
- $F$ , es la figura de ruido del amplificador

# SNR

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P_r / R}{kT_s}$$

Dada la potencia del transmisor del radio  $P_t$ , el valor de potencia en el receptor  $P_r$  se determina utilizando el modelo de propagación en el espacio libre:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_p}$$

Donde:

- $P_r$  y  $P_t$  están expresadas en Watts (W).
- $L_p$ , pérdidas por trayectoria en el espacio libre.
- $G_t$ , es la ganancia de la antena transmisora.
- $G_r$ , es la ganancia de la antena receptora.

# Pérdidas por trayectoria en el espacio libre

$$L_p = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2$$

Donde:

- $d$ , es la distancia entre el transmisor y el receptor (metros).
- $f$ , frecuencia utilizada (Hz).
- $c$ , velocidad de la luz (m/s)



# SNR en dB

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P_t G_t G_r}{k T_s R L_p}$$

$$SNR_{dB} = P_{t,dBW} + G_{t,dBi} + G_{r,dBi} - L_{p,dB} - 10\log_{10}(k) - 10\log_{10}(T_s) - 10\log_{10}(R)$$

Donde:

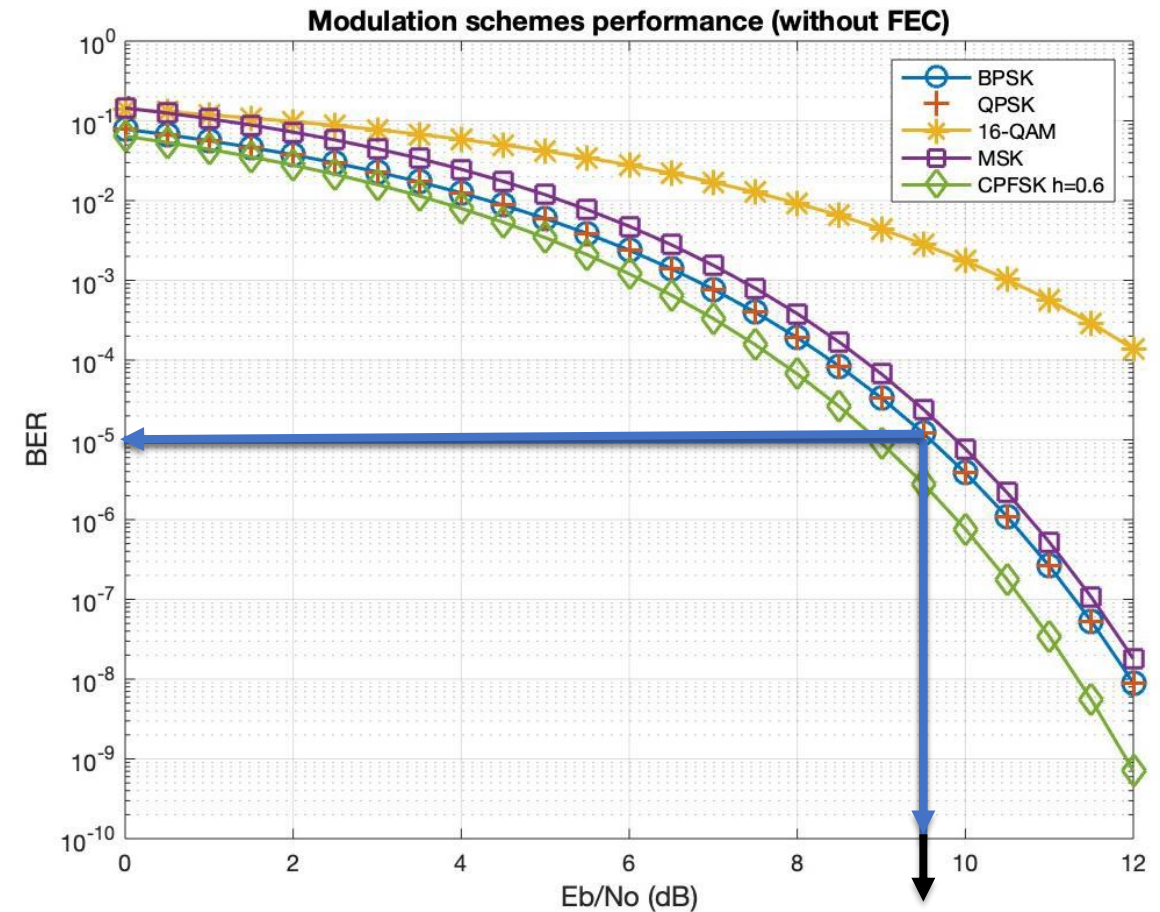
$P_t$ , es la potencia de transmisión.

- $G_t$ , es la ganancia de la antena transmisora.
- $G_r$ , es la ganancia de la antena receptora.
- $k$ , es la constante de Boltzmann.
- $T_s$ , es la temperatura de ruido del sistema.
- $R$ , es la velocidad de transmisión.
- $L_p$ , son las pérdidas por trayectoria en el espacio libre.

# Ejemplo: Cálculo de presupuesto de enlace

Realizar el cálculo de enlace para un sistema de comunicaciones satelitales si se quiere una velocidad de transmisión de 1 kbps y 1 Mbps, con las siguientes características:

- Enlace de bajada
- Potencia de transmisión= 4 W
- Frecuencia= 2.4 GHz
- Ganancia de la antena de transmisión=3 dBi
- Ganancia de la antena de recepción= 10 dBi
- Altitud de la órbita=400 km
- Ángulo de elevación= 40°
- $BER=10^{-5}$
- Modulación BPSK
- Figura de ruido = 3 dB
- Pérdidas en cables y conectores = -3 dB



9.5 dB

# Ejemplo: Cálculo de presupuesto de enlace

$$SNR_{dB} = P_{t,dBW} + G_{t,dBi} + G_{r,dBi} - L_{p,dB} - 10\log_{10}(k) - 10\log_{10}(T_s) - 10\log_{10}(R)$$

$$P_{t,dBW} = 10\log_{10}(4) = 6.02 \text{ dBW}$$

$$G_{t,dBi} = 3 \text{ dBi}$$

$$G_{r,dBi} = 10 \text{ dBi}$$

$$k_{dB} = 10\log_{10}(1.38 \times 10^{-23}) = -228.6 \text{ dB}$$

Para 1 kbps

$$R_{dB} = 10\log_{10}(1 \times 10^3) = 30 \text{ dB}$$

Para 1 Mbps

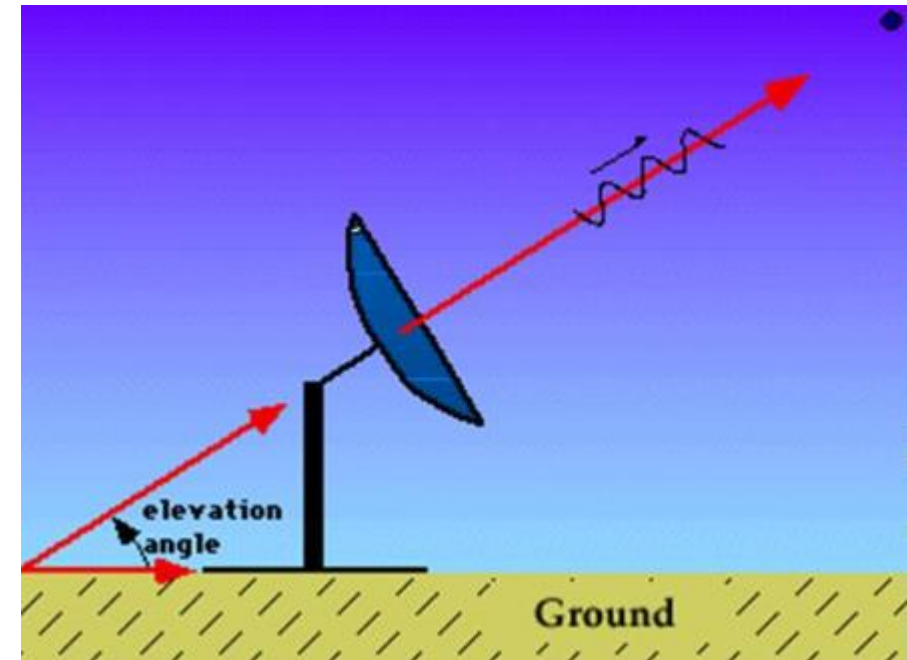
$$R_{dB} = 10\log_{10}(1 \times 10^6) = 60 \text{ dB}$$

# Ejemplo: Cálculo de presupuesto de enlace

$$L_p = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{4\pi df}{c} \right) = 20 \log \left( \frac{4\pi(598 \times 10^3 \text{ m})(2.4 \times 10^9 \text{ Hz})}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \right)$$

$$= 155.58 \text{ dB}$$

Orbit altitude (Km)	Elevation angle	Maximum link distance (Km)	Link time (s)
400	40	598	60
	50	512	43
	60	457	30
600	40	882	90
	50	761	65
	60	683	45
800	40	1159	119
	50	1006	87
	60	907	61



# Ejemplo: Cálculo de presupuesto de enlace

Con:

$$T_s = T_{ant} + T_r$$

$$T_{ant} = 150 \text{ K}$$

$$T_r = \frac{T_0}{L_r} (F - L_r)$$

$$T_0 = 290 \text{ K}$$

$$L_r = 10^{\frac{-3\text{dB}}{10}} = 0.5$$

$$F = 10^{\frac{3\text{dB}}{10}} = 2$$

$$T_r = \frac{T_0}{L_r} (F - L_r) = \frac{290}{0.5} (2 - 0.5) = 870 \text{ K}$$

$$T_s = T_{ant} + T_r = 150 + 870 = 1020 \text{ K}$$

$$T_{s,dB} = 30.086 \text{ dB}$$

# Ejemplo: Cálculo de presupuesto de enlace

- $BER=10^{-5}$
- Modulación BPSK

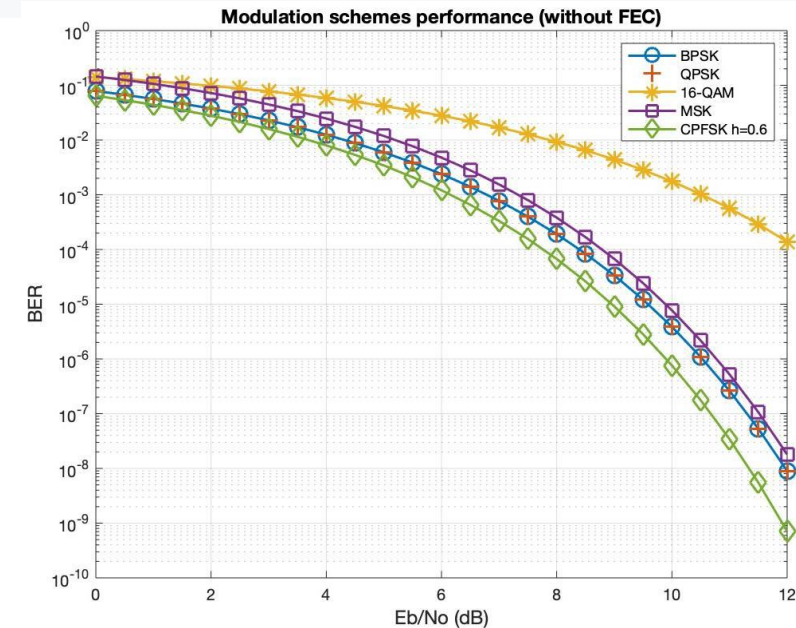
$$SNR_{min} = \frac{E_b}{N_0} = 9.5 \text{ dB}$$

- Para 1 kbps

$$SNR_{dB} = 6.02 + 3 + 10 - 155.58 - (-228.6) - 30.086 - 30 = 31.954 \text{ dB}$$

Margen

$$SNR_{dB} - SNR_{min} = 31.954 - 9.5 = 22.454 \text{ dB}$$



# Ejemplo: Cálculo de presupuesto de enlace

$$SNR_{min} = 9.5 \text{ dB}$$

- Para 1 Mbps

$$SNR_{dB} = 6.02 + 3 + 10 - 155.58 - (-228.6) - 30.086 - 60 = 1.954 \text{ dB}$$

Margen

$$SNR_{dB} - SNR_{min} = 1.954 - 9.5 = -7.546 \text{ dB}$$

# Ejercicio: Cálculo de enlace CuboZat V1.0

$$SNR_{dB} = P_{t,dBW} + G_{t,dBi} + G_{r,dBi} - L_{p,dB} - 10\log_{10}(k) - 10\log_{10}(T_s) - 10\log_{10}(R)$$

*Enlace de bajada*

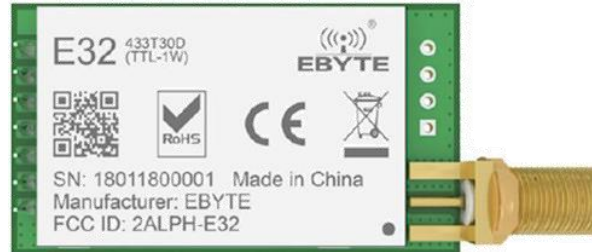
**Radio**

$$P_{t,dBm} = 30 \text{ dBm} = 1 \text{ W}$$

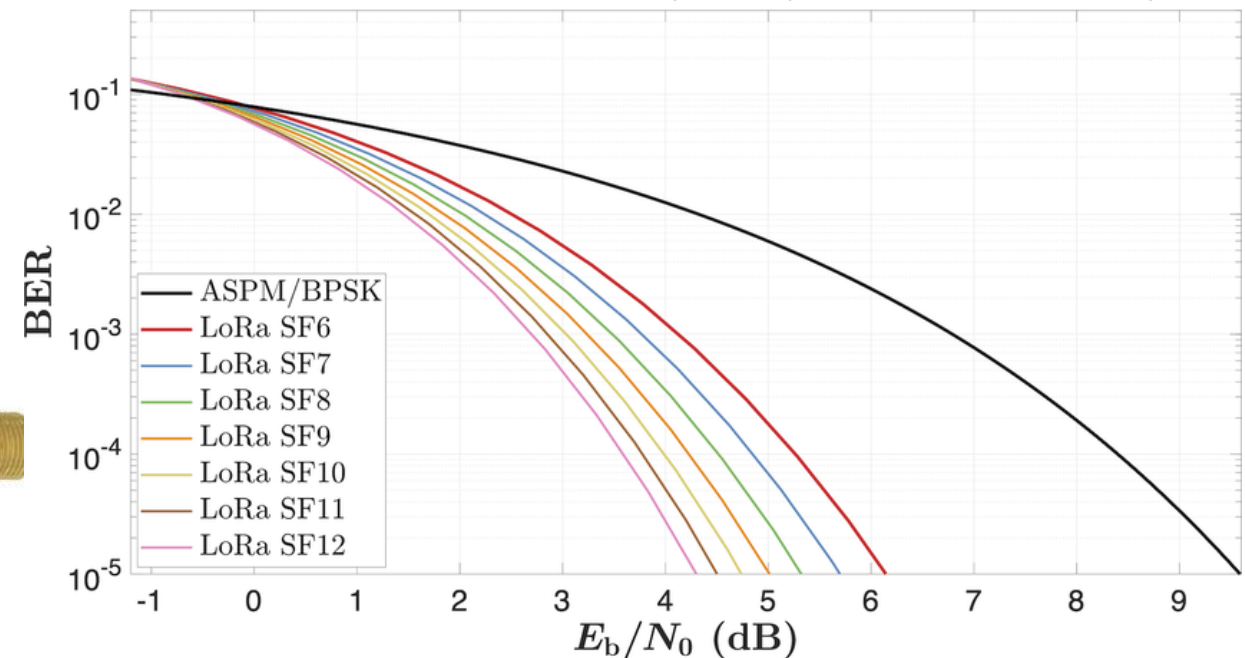
$$R_{max} = 19.2 \text{ kbps}$$

$$f = 433 \text{ MHz}$$

$$SNR_{dB,Requerida} = 6.2 \text{ dB}$$



Uncoded BER vs  $E_b/N_0$  (AWGN channel)

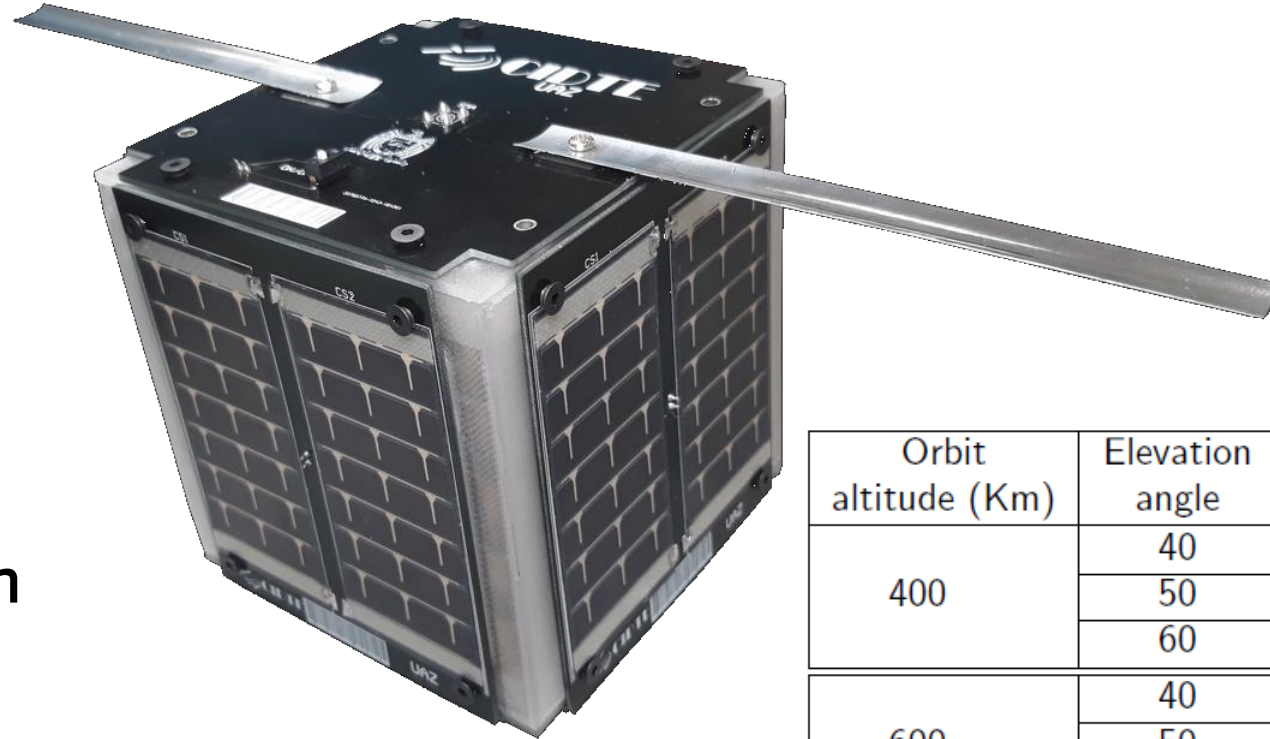




# Ejercicio: Cálculo de enlace CuboZat V1.0

$$SNR_{dB} = P_{t,dBW} + G_{t,dBi} + G_{r,dBi} - L_{p,dB} - 10\log_{10}(k) - 10\log_{10}(T_s) - 10\log_{10}(R)$$

CuboZat



$$T_{ant} = 150\text{ K}$$

$$G_t = 2.15\text{ dBi}$$

Altitud de la órbita= 600 km

Ángulo de elevación= 50°

Orbit altitude (Km)	Elevation angle	Maximum link distance (Km)	Link time (s)
400	40	598	60
	50	512	43
	60	457	30
600	40	882	90
	50	761	65
	60	683	45
800	40	1159	119
	50	1006	87
	60	907	61

# Ejercicio: Cálculo de enlace CuboZat V1.0

$$SNR_{dB} = P_{t,dBW} + G_{t,dBi} + G_{r,dBi} - L_{p,dB} - 10\log_{10}(k) - 10\log_{10}(T_s) - 10\log_{10}(R)$$

Estación terrena

$$L_r = -1.5 \text{ dB}$$

$$F = 5 \text{ dB}$$

$$G_{r,dBi} = 3 \text{ dBi}$$

Center frequency: 433MHz	Size: 195mm
Antenna Band Width: 400-470MHz	Interface : SMA-J
Antenna Gain: 3dBi	Antenna shell material: TPEE
Voltage standing wave ratio: $\leq 1.5$	Feeder length: -
Polarization direction: Omnidirectional	Feeder material: -
Impedance: 50 $\Omega$	Weight: 21g
Power Capacity: 20W	Operating temperature: -40°C~+85°C
Polarization mode: Vertical polarization	Storage temperature: -40°C~+85°C

