

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

---



## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

---

### Comunicaciones Espaciales

(Manual de Prácticas)

---

Práctica:

Diseño de Enlaces para Comunicaciones por Satélite

Curso 2009-2010

#### AUTORES:

Alejandro Alvarez Melcón

Fernando Quesada Pereira

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antenas Utilizadas en Comunicaciones por Satélite</b>	<b>1</b>
<b>3. Ecuaciones del Enlace con un Satélite</b>	<b>2</b>
<b>4. Caracterización del Receptor; Ruido</b>	<b>5</b>
<b>5. Factor de Ruido</b>	<b>9</b>
<b>6. Estudio de Algunos Sistemas por Satélites Reales</b>	<b>11</b>
6.1. Intelsat-4 . . . . .	11
6.2. Satélite Domestico para Estados Unidos . . . . .	12
6.3. Estándar DBS . . . . .	13

## 1. Introducción

Uno de los aspectos más interesantes en la planificación de sistemas de comunicaciones por satélite es el diseño de los enlaces ascendentes y descendentes, para asegurar una recepción correcta de las señales. Para el enlace ascendente la señal está transmitida normalmente por la estación terrena, mientras que el receptor es el satélite. Para el enlace descendente sucede lo contrario. Es decir, el satélite transmite la señal, que será recibida por la estación de tierra. Para conseguir que la recepción de las señales en los dos enlaces ocurra de manera satisfactoria, es necesario dimensionar ciertos parámetros tanto del transmisor como del receptor. Estos parámetros abarcan desde la potencia de los transmisores, y ganancia de las antenas, hasta las sensibilidades de los receptores (capacidad para demodular correctamente señales débiles).

El propósito de esta práctica es utilizar el programa MATLAB para profundizar en los parámetros que usualmente se manejan para caracterizar y dimensionar los enlaces ascendentes y descendentes en sistemas de comunicaciones por satélite.

## 2. Antenas Utilizadas en Comunicaciones por Satélite

Uno de los parámetros que vamos a manejar a la hora de diseñar el enlace con un satélite es la ganancia de las antenas (considerando tanto la antena en el transmisor como la antena en el receptor). Para comunicaciones por satélite, debido a las largas distancias entre las que hay que establecer la comunicación, se han empleado muy popularmente antenas de alta ganancia, como por ejemplo el caso de antenas parabólicas. Este tipo de antenas puede estudiarse utilizando la teoría de antenas de aperturas. La ganancia para este tipo de antenas puede ponerse en función del área efectiva de la apertura equivalente, de la siguiente manera:

$$G_{max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff} \quad (1) \quad \text{Ganancia}$$

A su vez, el área efectiva puede relacionarse con el área física de la apertura de la antena:

$$A_{eff} = \eta A \quad (2) \quad \text{Efectiva}$$

donde  $\eta$  es la eficiencia de la apertura y  $A$  es el área física de la apertura. La eficiencia de la apertura tomará un valor entre cero y uno ( $0 < \eta < 1$ ).

También es útil relacionar la ganancia de la antena con el ancho a 3dB del haz principal ( $\theta_{3db}$ ). Si la dimensión de la apertura a lo largo de una determinada dirección es ( $a$ ), entonces, el ancho del haz principal a lo largo de dicha dirección será:

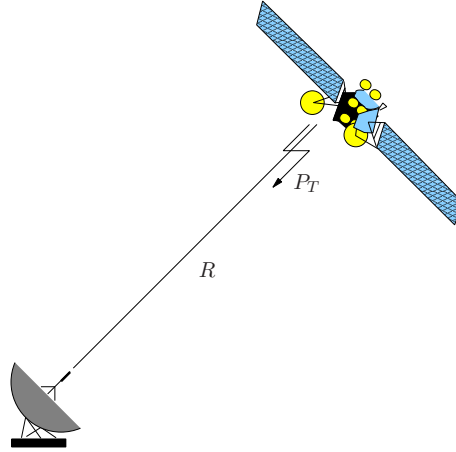
$$\theta_{3dB} = 75 \frac{\lambda}{a} \text{ (grados)} \approx \frac{\lambda}{a} \text{ (radianes)} \quad (3) \quad \text{AnchoHaz}$$

**Ejercicio 1.** Obtener la expresión de la ganancia de una antena parabólica circular de diámetro  $D$  y eficiencia de apertura  $\eta$ .

**Ejercicio 2.** Representar con MATLAB la ganancia en dB que se obtiene para una antena de apertura circular, variando el diámetro desde 0,5m hasta 10m. La frecuencia de operación es 5GHz, y la eficiencia de apertura es  $\eta = 0,6$ . ¿Cuanto debe ser el diámetro de la antena para obtener 30dB de ganancia?.

### 3. Ecuaciones del Enlace con un Satélite

Vamos a establecer las ecuaciones básicas del enlace descendente con un satélite, usando el esquema de la Fig. <sup>Fig1</sup>1. Suponiendo un transmisor de potencia total  $P_T$ , que radia dicha potencia a través de una



**Figura 1:** Enlace descendente entre un satélite y su estación terrena.

**Fig1**

antena isotrópica, podemos calcular la densidad de potencia radiada a una distancia  $R$  de la siguiente manera:

$$S_{iso} = \frac{P_T}{4\pi R^2}; \quad \text{Watt/m}^2 \quad (4)$$

**Densidad1**

Ahora bien, la antena del transmisor no es isotrópica. Si suponemos que en la dirección del satélite, la ganancia de la antena transmisora es  $G_T$ , la densidad de potencia en la dirección del satélite es mayor que la anterior:

$$S_T = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2}; \quad \text{Watt/m}^2 \quad (5)$$

**Densidad2**

Se llama PIRE (potencia isotrópica radiada equivalente), al producto:  $PIRE = P_T G_T$ . Este parámetro caracteriza al sistema transmisor. Cuanto mayor sea este parámetro, mayor alcance podremos lograr en el enlace.

En el receptor, la antena también será de apertura, teniendo un área efectiva:

$$A_R = \frac{G_R}{4\pi} \lambda^2; \quad \text{m}^2 \quad (6)$$

**Afectiva**

siendo  $G_R$  la ganancia de la antena receptora en la dirección del transmisor. La potencia total recibida por la antena del receptor será:

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} A_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_T G_T G_R}{(4\pi R/\lambda)^2}; \quad \text{Watt} \quad (7)$$

**Precibida**

siendo  $R$  la distancia total entre transmisor y receptor. Dentro de esta última expresión, se suele definir el siguiente término como pérdidas de espacio libre:

$$L_{bf} = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (8)$$

**EspacioLi**

Con lo que la expresión de la potencia recibida por el transmisor queda reducida a:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L_{bf}} \quad (9)$$

**Precibida**

Esta expresión, además, es muy útil para incluir las posibles pérdidas que puedan existir por otros factores (atenuación atmosférica, atenuación en las líneas de transmisión, imperfecciones en los conectores, pérdidas por apuntamiento de las antenas, etc.). Si tenemos unas pérdidas totales ( $L_T$ ) en el enlace, calculadas combinando varios factores:

$$L_T = L_{bf} L_A L_B L_C \quad (10) \quad \text{Pérdidas1}$$

Entonces, podemos calcular la potencia recibida en el receptor mediante la ecuación:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L_T} \quad (11) \quad \text{Precibida}$$

Relacionados con la ecuación básica (11), para comunicaciones por satélite, a veces es conveniente definir otros factores intermedios. El primero es el llamado factor de dispersión, definido del siguiente modo:

$$L = 4 \pi R^2; \quad \text{m}^2 \quad (12) \quad \text{FactorDis}$$

Utilizando este nuevo factor de dispersión, a veces es útil definir la densidad de potencia recibida, de la ecuación (11), utilizando la siguiente forma alternativa:

$$S_R = \frac{P_T G_T}{4 \pi R^2} = \frac{PIRE}{L}; \quad \text{Watt/m}^2 \quad (13) \quad \text{Densidad3}$$

Esta densidad de potencia a la entrada del receptor suele limitarse en aplicaciones por satélite, con el fin de evitar interferencias del satélite en otros servicios terrestres.

En sistemas por satélite, las distancias de los enlaces suelen ser muy grandes, de modo que las estaciones terrenas reciben señales muy débiles del satélite, y hay problemas para recuperar la señal frente al ruido.

Vamos a ver la situación que tendríamos en el enlace descendente de la Fig. 11, si el transmisor del satélite emite una potencia total de  $P_T = 2\text{Watt}$ , y la ganancia de la antena del satélite en la dirección de la estación terrena es de  $G_T = 17\text{dBi}$  (dB sobre la isotropa). Además, vamos a suponer que la frecuencia del enlace descendente es  $f = 11\text{GHz}$ . Utilizando MATLAB, realizar los siguientes cálculos:

**Ejercicio 3.** Con estos datos, el equipo transmisor del satélite ha quedado caracterizado. Calcular la *PIRE* del transmisor del satélite en dBW (dB sobre el Wattio).

Vamos a suponer que la antena de la estación receptora tiene un área efectiva de  $10\text{m}^2$ . Además, la distancia entre el satélite y la estación es de  $R = 40,000\text{Km}$ .

**Ejercicio 4.** Calcular la ganancia de la antena de la estación terrena. Calcular las pérdidas de espacio libre y la potencia recibida por la estación terrena en dBW.

La sensibilidad del receptor es el mínimo nivel de señal con que el receptor puede funcionar. Por debajo de ese umbral los circuitos del receptor no son capaces de captar señal alguna.

Vamos a suponer que además de la atenuación por espacio libre, es necesario tener en cuenta la atenuación atmosférica ( $L_A$ ) que sufre la señal.

**Ejercicio 5.** Representar la potencia recibida por la estación terrena en dBW, en función de la atenuación atmosférica que sufre la señal. Suponer que la atenuación atmosférica puede variar entre  $L_A = 1$  y  $L_A = 6$ . Tomar 100 puntos para realizar la gráfica en MATLAB.

**Ejercicio 6.** Si la sensibilidad del receptor es de -140dBW, ¿Con cuanta atenuación atmosférica deja de funcionar el receptor?.

Otro problema importante que se puede plantear es el de los errores de apuntamiento. Esto es debido al uso de antenas con mucha ganancia. Al tener las antenas mucha ganancia, los haces son muy estrechos, de modo que si existe un error en el apuntamiento, la ganancia de las antenas en la dirección entre el satélite y la estación terrena puede disminuir muy rápidamente. El problema será mayor cuanto mayor sea la ganancia de las antenas que empleemos.

Vamos a suponer que el diagrama de radiación de las antenas es de tipo Gaussiano:

$$G(\theta) = G_{max} e^{-2,776 \left( \frac{\theta^2}{\theta_{3dB}^2} \right)} \quad (14) \quad \text{Diagrama 1}$$

Supondremos también que la antena de la estación terrena puede apuntar al satélite de forma muy precisa. Sin embargo, vamos a considerar que problemas de estabilización del satélite en órbita, provocan errores de apuntamiento serios en la antena del satélite.

**Ejercicio 7.** En primer lugar, dibujar el diagrama de radiación de las antenas en función del ángulo de elevación ( $\theta$ ), con respecto del valor de máxima ganancia ( $G/G_{max}$ ). Tomar un barrido para el ángulo de elevación desde  $\theta = -90^\circ$  hasta  $\theta = +90^\circ$ , tomando 100 puntos. Verificar que para  $\theta = \pm\theta_{3dB}/2$  se obtiene la mitad de ganancia (ancho a 3dB del diagrama de radiación).

Notar ahora que el diagrama de radiación puede expresarse en dB de la siguiente forma:

$$G(dBi) = G_{max}(dB) - 2,776 \frac{\theta^2}{\theta_{3dB}^2} 10 \log(e) = G_{max}(dB) - 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (15) \quad \text{Diagrama 2}$$

De la expresión anterior, podemos definir las pérdidas por apuntamiento en dB como:

$$L_B(dB) = 12 \left( \frac{\alpha}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (16) \quad \text{PerdApunt}$$

donde  $\alpha$  es el error de apuntamiento (ángulo que forma la dirección de apuntamiento respecto de la dirección de máxima ganancia; ver Fig. <sup>Fig 2</sup>2).

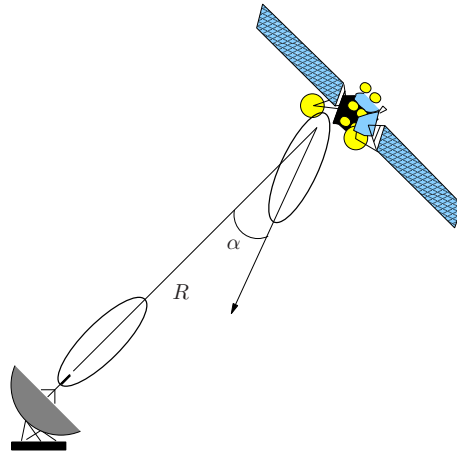
De la ecuación anterior vemos que si el error de apuntamiento es cero ( $\alpha = 0$ ), entonces las pérdidas por apuntamiento también son cero  $L_B = 0$ dB.

**Ejercicio 8.** ¿Cuanto valen estas pérdidas si el error de apuntamiento coincide con el borde de la zona de cobertura a 3dB del haz ( $\alpha = \theta_{3dB}/2$ )?.

Para el resto de cálculos suponer que no hay atenuación atmosférica  $L_A = 1 = 0$ dB.

**Ejercicio 9.** Representar la potencia recibida en dBW en función de las pérdidas por error de apuntamiento ( $L_B$ ) (en unidades naturales). Suponer que el error de apuntamiento puede variar entre  $\alpha = 0$  y  $\alpha = 10^\circ$ .

Notar que si aumentamos la ganancia de la antena del satélite, estaremos aumentando la *PIRE*, con lo que aumentamos la potencia recibida. Sin embargo, las pérdidas por apuntamiento también



**Figura 2:** Error de apuntamiento de la antena del satélite.

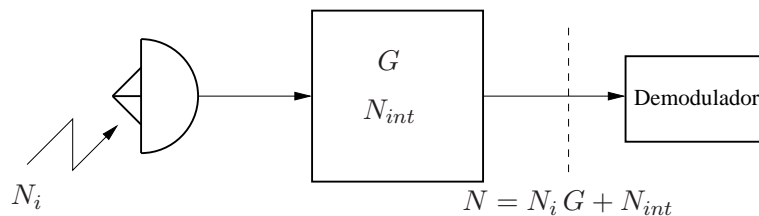
**Fig2**

aumentan, haciéndose más críticas. Esto es así, ya que al aumentar la ganancia, el lóbulo principal se estrecha, de modo que las pérdidas aumentan para un mismo ángulo de error.

**Ejercicio 10.** Representar la potencia recibida en dBW, en función de la ganancia de la antena del transmisor (en dBi). Suponer que la ganancia de la antena varía entre  $G_T = 10\text{dBi}$  y  $G_T = 32\text{dBi}$ , y que el error de apuntamiento se mantiene en  $\alpha = 10^\circ$ . A la vista del resultado obtenido, ¿Cual es la ganancia óptima de la antena transmisora para este sistema?. ¿Cual es la máxima potencia que podría recibir la estación terrena en este sistema?.

### 4. Caracterización del Receptor; Ruido

El funcionamiento del receptor, a la hora de planificar el enlace, está íntimamente ligado al ruido que capta del exterior, y al que genera internamente el propio receptor. Para caracterizar el ruido, en sistemas de comunicaciones por satélite se emplea habitualmente la temperatura equivalente de ruido. En la Fig. **Fig3** tenemos un receptor ruidoso que genera internamente una potencia de ruido ( $N_{int}$ ). Además, el receptor capta del exterior, a la entrada, una potencia de ruido ( $N_i$ ). Si la ganancia total



**Figura 3:** Receptor antes del demodulador y contribuciones de ruido.

**Fig3**

del receptor es ( $G$ ), la potencia de ruido a la entrada se ve amplificada por dicha ganancia. A la salida del receptor, por tanto, tendremos una potencia de ruido total:

$$N = N_i G + N_{int} \tag{17}$$

**RuidoTotal**

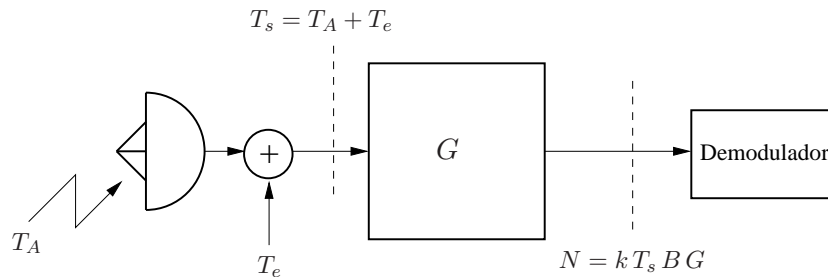
Por otro lado, vamos a considerar que un circuito con ancho de banda  $B$  a una temperatura ambiente  $T_o$ , produce una potencia de ruido igual a:

$$N = k T_o B \tag{18} \text{ RuidoTemp}$$

donde ( $k$ ) es la conocida constante de Boltzman:

$$k = -228,6 \text{ dB}/^\circ\text{K}/\text{Hz}; \quad (\text{dB sobre el grado Kelvin y sobre el Hertz}) \tag{19} \text{ Boltzman1}$$

La temperatura equivalente del receptor se va a definir como la temperatura a la que tendríamos que poner una fuente de ruido, para que la potencia de ruido a la salida del receptor sea la misma que la original, suponiendo que ahora el receptor no genera ruido interno. Esto se ilustra en la Fig. 4. Fig4



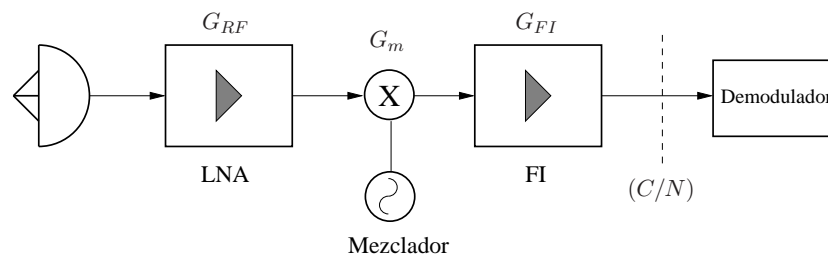
**Figura 4:** Modelo equivalente, sacando la fuente ruidosa a la entrada, y considerando ya el circuito sin ruido. Fig4

Ponemos a la entrada una fuente de ruido a la temperatura  $T_s$ , que produce una potencia de ruido ( $k T_s B$ ). La potencia de ruido a la salida es:

$$N = k T_s B G \tag{20} \text{ RuidoTotal1}$$

Esta potencia de ruido debe coincidir con la potencia de ruido a la salida en el receptor original (Fig. 5). RuidoTotal1

El parámetro importante para asegurar una recepción de calidad, es la llamada relación potencia de portadora a potencia de ruido a la entrada del demodulador ( $C/N$ ) (ver Fig. 5). Fig5 Dependiendo



**Figura 5:** Diagrama de bloques de un receptor antes del demodulador. Fig5

del demodulador que estemos utilizando, tendremos que asegurar un nivel mínimo de ( $C/N$ ). Si el nivel de ( $C/N$ ) está por debajo de este nivel crítico, el demodulador no puede funcionar, y la señal enviada por el satélite no se podrá recuperar a la salida del demodulador. La potencia de portadora ( $C$ ) está relacionada con la potencia recibida por la antena ( $P_R$ ), afectada por la ganancia total del receptor:  $C = P_R G$ . La potencia de ruido en el demodulador viene dada, en función de la temperatura equivalente del receptor, por la ecuación (20). RuidoTotal2 Por tanto, la relación portadora a ruido en la entrada del demodulador será:

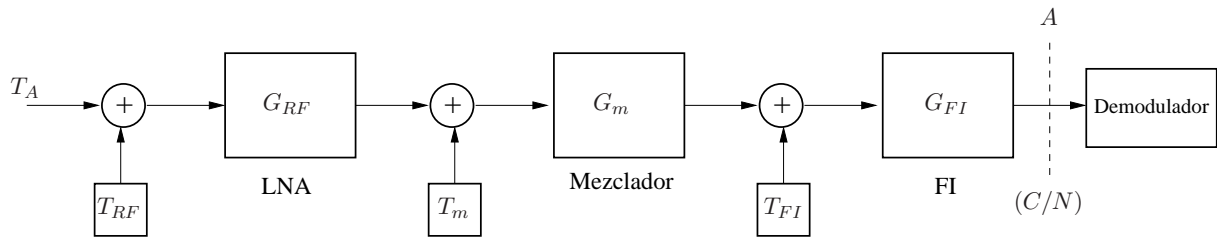
$$C/N = \frac{P_R G}{k T_s B G} = \frac{P_R}{k T_s B} \tag{21} \text{ PortRuido}$$



Como vemos, tanto la potencia de señal como la potencia de ruido se ven afectadas por la ganancia total del receptor. La ecuación anterior indica que la relación  $(C/N)$  puede calcularse también a la entrada del receptor, ya que ambas magnitudes (potencia de señal y de ruido) se ven afectadas por la ganancia del receptor.

La Fig. <sup>Fig5</sup> muestra un diagrama de bloques sencillo de un receptor de estación terrestre para comunicaciones por satélite. La primera etapa suele ser un amplificador de RF de bajo ruido (LNA-Low Noise Amplifier). A continuación está el mezclador para pasar a frecuencia intermedia. Seguidamente suele ir una etapa amplificadora de frecuencia intermedia, para seguidamente atacar el demodulador. A la entrada del demodulador debemos conseguir un nivel  $(C/N)$  adecuado para que pueda funcionar correctamente.

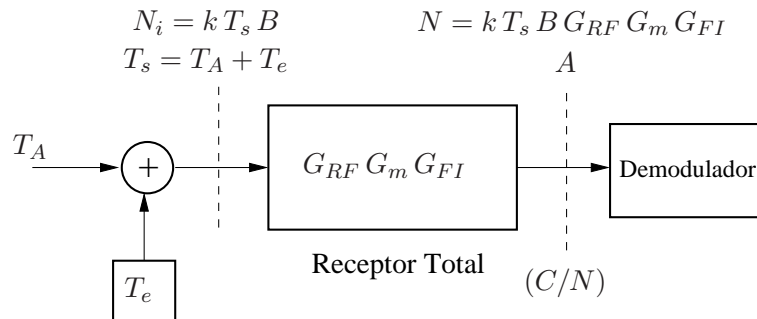
Para estudiar este receptor consideraremos el ruido que puede captar la antena del exterior, mas el ruido que genera internamente el propio receptor. El ruido que capta la antena del exterior la caracterizamos con su temperatura equivalente de ruido ( $T_A$ ). El ruido que genera internamente el receptor se caracteriza por su temperatura equivalente ( $T_e$ ). La temperatura equivalente total del receptor será la suma de ambas:  $T_s = T_A + T_e$ . Para calcular la temperatura de ruido que genera el receptor internamente ( $T_e$ ), podemos cambiar el modelo real, utilizando la temperatura equivalente de cada bloque, y considerando que cada bloque ahora es no ruidoso. El concepto se muestra en la Fig. <sup>Fig6</sup>. Lo que queda por hacer ahora es calcular la temperatura equivalente que genera el receptor



**Figura 6:** Modelo en temperatura equivalente de ruido del receptor de la Fig. <sup>Fig5</sup>.

**Fig6**

internamente ( $T_e$ ), referida a la entrada de dicho receptor (también conocido por punto del pedestal de la antena; es decir, donde se conecta la salida de la antena con la entrada del receptor). Combinando las ganancias de los distintos bloques del receptor obtenemos el diagrama de bloques de la Fig. <sup>Fig7</sup>. En



**Figura 7:** Diagrama de bloques del receptor refiriendo todas las temperaturas equivalentes de ruido al pedestal de la antena.

**Fig7**

este diagrama de bloques es fácil calcular la potencia de ruido a la entrada del demodulador:

$$N = T_s k B G_{RF} G_m G_{FI} \tag{22}$$

**Potencia**

De este ruido total, podemos calcular la contribución debida al ruido generado internamente. Si tomamos  $T_A = 0$ , entonces  $T_s = T_e$ , y la potencia de ruido a la salida será la debida al ruido generado internamente por el receptor:  $N = T_e k B G_{RF} G_m G_{FI}$ .

Esta misma potencia de ruido puede calcularse a la entrada del demodulador en el modelo de la Fig. 6. La fuente ruidosa del amplificador de FI produce un ruido ( $k T_{FI} B$ ). Este ruido se amplifica por ( $G_{FI}$ ) hasta llegar al punto A (entrada del demodulador). La fuente ruidosa del mezclador produce un ruido ( $k T_m B$ ). Este ruido se amplifica por  $G_m$  y  $G_{FI}$  hasta llegar a la entrada del demodulador. Finalmente, la fuente ruidosa del LNA genera un ruido ( $k T_{RF} B$ ). Este ruido se amplifica por  $G_{RF}$ ,  $G_m$  y  $G_{FI}$  hasta llegar a la entrada del demodulador. En la entrada del demodulador tendremos todas las contribuciones del ruido, es decir:

$$\begin{aligned}
 N &= k T_{FI} B G_{FI} + k T_m B G_m G_{FI} + k T_{RF} G_{RF} G_m G_{FI} \\
 &= k B G_{RF} G_m G_{FI} \left[ T_{RF} + \frac{T_m}{G_{RF}} + \frac{T_{FI}}{G_{RF} G_m} \right]
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Identificando esta expresión con la ecuación (22), podemos establecer la temperatura equivalente del receptor:

$$T_e = T_{RF} + \frac{T_m}{G_{RF}} + \frac{T_{FI}}{G_{RF} G_m}
 \tag{24}$$

Esta temperatura equivalente está referida al pedestal de la antena. La temperatura equivalente total será la temperatura equivalente del receptor mas la temperatura equivalente que el receptor capta del exterior por la antena:  $T_s = T_A + T_e$ .

De la última expresión vemos, que para diseñar un buen receptor (con pequeña  $T_e$ ), es preciso diseñar una etapa inicial (LNA) con baja temperatura de ruido ( $T_{RF}$ ) y alta ganancia ( $G_{RF}$ ). Vamos a utilizar estos conceptos para estudiar la temperatura equivalente de ruido del receptor mostrado en la Fig. 8.

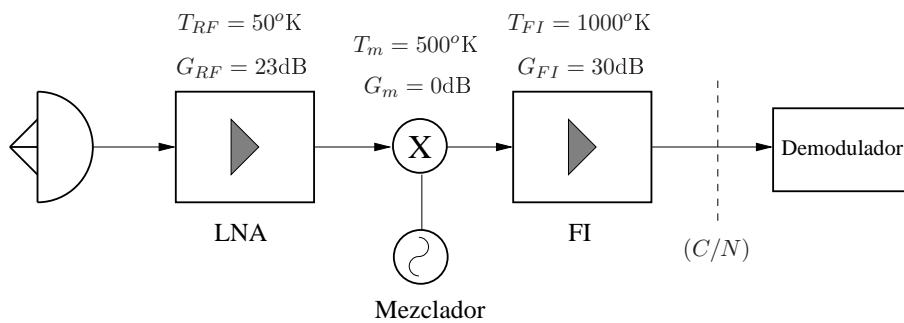


Figura 8: Diagrama de bloques del receptor bajo estudio.

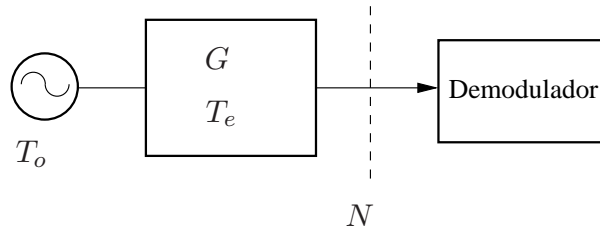
Fig8

**Ejercicio 11.** Representar la temperatura equivalente de ruido del receptor en el pedestal de la antena en grados Kelvin, en función de la ganancia del amplificador LNA en dB. Tomar una ganancia desde  $G_{RF} = 2\text{dB}$  hasta  $G_{RF} = 30\text{dB}$ . ¿Cual es el valor mas pequeño de la temperatura equivalente del receptor que podemos obtener con este receptor?.

**Ejercicio 12.** Teniendo el cuenta que el mezclador y el amplificador de FI son elementos ruidosos, ¿Qué tendría que hacer para disminuir el ruido en el receptor?.

### 5. Factor de Ruido

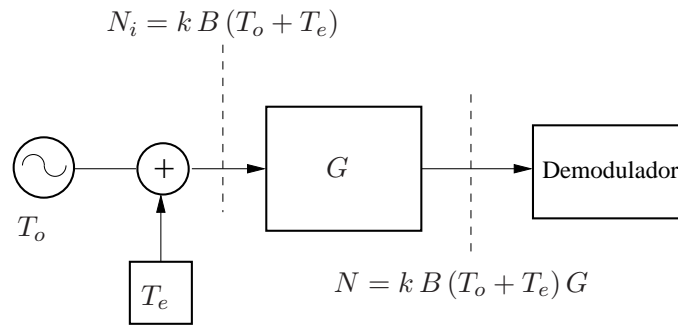
El ruido de los distintos bloques de un receptor también puede especificarse utilizando el llamado factor de ruido. Para definir el factor de ruido tomamos una fuente de ruido a temperatura ambiente ( $T_o = 290^\circ\text{K}$ ), junto con nuestro receptor ruidoso (ver Fig. <sup>Fig9</sup>9). El modelo simplificado utilizando el



**Figura 9:** Modelo de receptor para la definición de factor de ruido.

**Fig9**

concepto de temperatura equivalente de ruido se muestra en la Fig. <sup>Fig10</sup>10. En esta última figura vamos a



**Figura 10:** Modelo simplificado refiriendo la temperatura de ruido a la entrada del circuito.

**Fig10**

definir el factor de ruido como la relación entre el ruido real que hay a la salida, y el ruido a la salida que habría si el circuito no fuera ruidoso ( $T_e = 0$ ):

$$F = \frac{k B (T_o + T_e) G}{k B T_o G} = 1 + \frac{T_e}{T_o} \tag{25}$$

**FactorRui**

Despejando de esta igualdad, también podemos obtener la temperatura equivalente de ruido en función del factor de ruido:

$$T_e = T_o (F - 1) \tag{26}$$

**TempEquiv**

Hay que tener muy presente el caso particular de un atenuador ( $A_t$ ). En este caso el factor de ruido coincide con su atenuación:

$$F = A_t = \frac{1}{G} \tag{27}$$

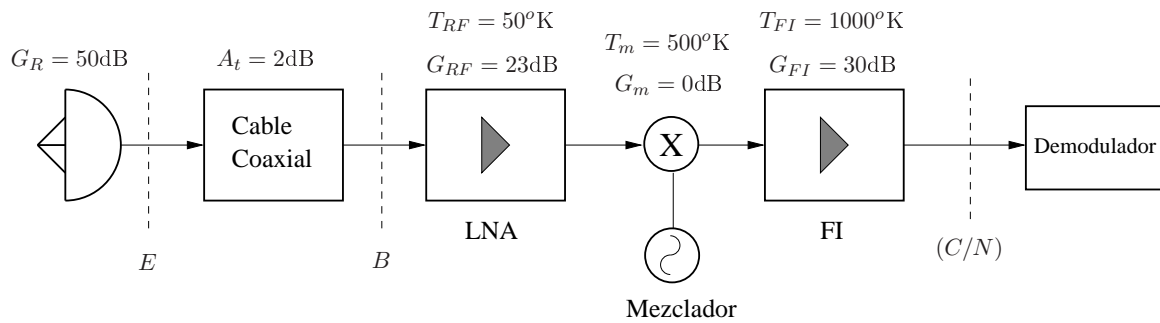
**Atenuador**

Por tanto, la temperatura equivalente de ruido de un atenuador puede también escribirse como:

$$T_e = T_o \left( \frac{1}{G} - 1 \right) = T_o \frac{1 - G}{G} \tag{28}$$

**TempEquiv**

Notar que al tratarse de un atenuador, su atenuación ( $A_t$ ) es mayor de uno, y su ganancia ( $G$ ) es menor de uno. Por tanto, la temperatura equivalente del atenuador calculada con la ecuación <sup>TempEquivalente3</sup>(28) es positiva como debe ser.



**Figura 11:** Modelo de receptor bajo estudio, incluyendo las pérdidas en el cable coaxial que conecta la antena con el LNA.

Fig11

Vamos a ver cómo puede afectar la atenuación entre el cable de la antena y la entrada del receptor, en la calidad de éste. Para ello consideramos el modelo de bloques de la Fig. [Fig11](#), donde se ha incluido el efecto del cable coaxial con un atenuador a la entrada del receptor.

**Ejercicio 13.** Calcular para este nuevo receptor su temperatura equivalente de ruido, referida a la entrada del amplificador LNA (punto B de la Fig. [Fig11](#)).

**Ejercicio 14.** Representar la temperatura equivalente de ruido en el punto B en Kelvins, en función de la atenuación del cable coaxial en dB. Tomar una atenuación desde  $A_t = 1\text{dB}$  hasta  $A_t = 10\text{dB}$ .

**Ejercicio 15.** Calcular y repetir la representación anterior, pero ahora tomando la temperatura equivalente de ruido en el pedestal de la antena (punto E de la Fig. [Fig11](#)). Interpretar los resultados. ¿Qué curva presenta una variación más rápida de la temperatura equivalente de ruido?, ¿porqué?

Del análisis anterior, vemos que la temperatura equivalente de ruido del receptor cambia según el punto donde se mida. Debido a esto, es difícil utilizar este parámetro como medida de la calidad del receptor. Para solventar esta dificultad, se toma otro parámetro para medir la calidad del receptor. Este parámetro es la llamada  $(G/T)$  (relación entre la ganancia de la antena receptora, y la temperatura equivalente de ruido en el pedestal de la antena). Este factor si mide la calidad del receptor, y es constante en cualquier punto del receptor en el que midamos dicho parámetro.

**Ejercicio 16.** Calcular la relación  $(G/T)$  en los puntos B y E de la Fig. [Fig11](#). Demostrar que dicha relación es la misma en los dos puntos.

**Ejercicio 17.** Representar la relación  $(G/T)$  en unidades absolutas, en función de la atenuación del cable coaxial en dB (tomar los mismos valores para la atenuación que antes). Comentar el resultado obtenido.

**Ejercicio 18.** Representar la relación  $(G/T)$  del receptor en unidades absolutas si aumentamos la ganancia del LNA. Suponer una atenuación del cable coaxial de  $A_t = 2\text{dB}$ , y variar la ganancia del LNA desde  $G_{RF} = 5\text{dB}$  hasta  $G_{RF} = 40\text{dB}$ . Comentar los resultados. ¿Cual es el valor mejor de  $(G/T)$  que podría lograr en este sistema?. ¿Cual es la ganancia óptima que debería tomar para este sistema?. ¿porqué?

**Ejercicio 19.** ¿Cual es la única opción que tendría que tomar para mejorar todavía mas la  $(G/T)$  del receptor?.

## 6. Estudio de Algunos Sistemas por Satélites Reales

En esta sección vamos a realizar el estudio de algunos sistemas pioneros de comunicaciones por satélites que operaron en Estados Unidos desde el inicio de las comunicaciones espaciales. Para el estudio de estos sistemas nos centraremos en el enlace descendente, que resulta ser el más crítico debido a los límites de espacio y peso que hay en los satélites. Estos límites hacen que la potencia y la ganancia de las antenas embarcadas en los satélites no pueda aumentarse de forma arbitraria.

### 6.1. Intelsat-4

Eran satélites geoestacionarios, y por tanto situados a una distancia de  $R = 40,000\text{Km}$  con respecto de las estaciones terrenas. La potencia de los transpondedores es de  $P_T = 8\text{dBW}$ . La ganancia de la antena en el satélite es de  $G_T = 19\text{dBi}$  en el centro del haz, aunque el enlace debe planificarse para dar servicio y cobertura en la zona dentro de la iluminación a  $3\text{dB}$  del haz ( $G_T = 16\text{dBi}$  en el límite de la zona de cobertura). El transpondedor transmite varios canales telefónicos, y para evitar intermodulación entre los canales se aplica un back-off al transmisor de  $OBO = 3\text{dB}$ . Los satélites operaban en banda-C, con una frecuencia para el enlace descendente de  $4\text{GHz}$ .

Para la estación terrena se plantearon receptores muy sensibles, con una etapa inicial LNA de muy bajo ruido gracias al enfriamiento de los circuitos con Helio líquido. Gracias a la LNA se conseguía un receptor muy profesional con temperatura equivalente de ruido de  $T_e = 20^\circ\text{K}$ . La temperatura equivalente de ruido que la antena de la estación terrestre capta del ruido celeste se estima en  $T_A = 70^\circ\text{K}$ . Por otro lado, el ancho de banda de FI de cada transpondedor es de  $B = 36\text{MHz}$ . Finalmente, el sistema utiliza modulación de frecuencia FM, con unos demoduladores bastante primitivos, que requieren para funcionar un nivel  $C/N = 11\text{dB}$ .

Vamos a evaluar la antena que necesitaría la estación terrena para asegurar el enlace en el borde de la zona de cobertura.

**Ejercicio 20.** Representar la relación  $(C/N)$  a la entrada del demodulador, en función de la ganancia de la antena receptora. Tomar valores desde  $G_R = 20\text{dBi}$  hasta  $G_R = 90\text{dBi}$ . A la vista del resultado obtenido indicar cual es la ganancia que escogería.

Con el fin de asegurar el enlace en condiciones desfavorables se decide considerar una atenuación adicional  $L_A = 1\text{dB}$  por envejecimiento de los equipos, y otra  $L_B = 3\text{dB}$  para compensar atenuaciones fuertes atmosféricas. También se quiere tener en cuenta el posible efecto que tendría en el enlace, si la temperatura de ruido captada por la antena aumenta hasta  $T_A = 90^\circ\text{K}$ .

**Ejercicio 21.** Representar la relación  $(C/N)$  a la entrada del demodulador, en función de la ganancia de la antena receptora (desde  $G_R = 20\text{dBi}$  hasta  $G_R = 90\text{dBi}$ ), para tres valores distintos  $T_A = 70; 80; 90^\circ\text{K}$ . En vista de los resultados indicar cual será la nueva ganancia que necesita para la antena receptora, e indicar cual sería el diámetro de la antena parabólica necesario.

**Ejercicio 22.** ¿Cuanto vale la  $(G/T)$  de la estación terrena para este servicio en dB sobre el grado Kelvin.

## 6.2. Satélite Doméstico para Estados Unidos

Hemos visto como la estación terrena del servicio anterior es muy profesional, con una ( $G/T$ ) muy alta para asegurar una calidad muy buena del enlace. La llegada de los satélites a servicios domésticos no sería posible manteniendo estos altos requerimientos en los receptores terrestres, ya que su costo sería inabordable para la economía particular. Para hacernos una idea, un servicio DBS (Direct Broadcast Satellite) para acceso directo a los domicilios de televisión por satélite, requiere bajar los requerimiento del receptor de las casas hasta  $G/T = 6\text{dB}/^\circ\text{K}$ .

Ahora vamos a revisar cómo se plateó en Estados Unidos el primer intento para acercar los satélites al uso doméstico. La Potencia transmitida en el satélite era de  $P_T = 10\text{dBW}$ . Se aplicaba un back-off de  $OBO = 3\text{dB}$  para evitar intermodulación entre los distintos canales de televisión. Un cambio sustancial con respecto al sistema profesional visto con anterioridad, es que se pretendía dar una cobertura local solo a los Estados Unidos. Ello permitía cambiar las antenas de cobertura global por otras antenas de tipo pincel, de mayor ganancia. Se deseaba una cobertura elíptica, de modo que los bordes a  $3\text{dB}$  se iluminaran con ángulos de  $\pm 3^\circ$  y  $\pm 1,5^\circ$  respectivamente.

**Ejercicio 23.** Calcular los diámetros mayor y menor de la apertura elíptica para sintetizar este lóbulo de radiación. Calcular el área física de la apertura elíptica que necesitaría para la antena en el satélite. Calcular la ganancia de la antena transmisora en  $\text{dBi}$  ( $G_T$ ), suponiendo una eficiencia de apertura de  $\eta = 52\%$ . ¿Cuanto valdrá la ganancia de la antena del satélite en el borde de la zona de cobertura?.

Los satélites se encontraban en órbita geoestacionaria, a una distancia de  $R = 40,000\text{Km}$ , y operaban en banda-C, con una frecuencia para el enlace descendente de  $4\text{GHz}$ . El sistema emitía canales de televisión con un ancho de banda por transpondedor de  $B = 36\text{MHz}$ . Desde el punto de vista del receptor, el sistema fijaba una temperatura equivalente de ruido de  $T_e = 50^\circ\text{K}$ , que puede lograrse con tecnología barata tipo FET. Se supone que la temperatura de ruido celeste que capta la antena es también  $T_A = 70^\circ\text{K}$ . El sistema utilizaba frecuencia modulada, teniendo un modulador cuyo umbral de funcionamiento era también de  $11\text{dB}$ . Las pérdidas adicionales por propagación y margen de seguridad se tomaron de  $L_A = 7\text{dB}$ .

**Ejercicio 24.** Representar la relación ( $C/N$ ) antes del demodulador en función de la ganancia de la antena receptora. Tomar valores de la ganancia entre  $G_R = 20\text{dBi}$  y  $G_R = 60\text{dBi}$ . A la vista de los resultados indicar la ganancia que tendría que tomar para asegurar el funcionamiento del receptor. Indicar el diámetro de la antena que tendría que colocar en casa para asegurar una correcta recepción. Indicar el valor de calidad del receptor ( $G/T$ ) en  $\text{dB}$  sobre el grado Kelvin.

Como habrá comprobado, todavía el tamaño de la antena para instalar en la casa es demasiado grande. Una reducción en este tamaño se consiguió mejorando los demoduladores de frecuencia, llamados de umbral extendido. Gracias a estos nuevos demoduladores, el umbral de funcionamiento se reduce a  $7\text{dB}$ . También se redujo el margen de seguridad por pérdidas adicionales a  $L_A = 3\text{dB}$ . Finalmente se utilizaron antenas mejoradas con eficiencias de apertura hasta  $\eta = 60\%$ .

**Ejercicio 25.** Realizar de nuevo el cálculo de la relación ( $C/N$ ) para este sistema mejorado, representando su variación con respecto de la ganancia del receptor ( $G_R$ ). Indicar la ganancia que tendría que tomar para asegurar el funcionamiento del sistema. Indicar el diámetro de la antena que tendría que instalar en casa para poder utilizar el sistema.

### 6.3. Estándar DBS

La utilización de la televisión por satélite de forma masiva en los hogares llegó con el Estándar DBS, cuya misión era abaratar todavía más los costes de los receptores terrestres. Este abaratamiento debería llegar tanto a nivel de la electrónica del receptor, como a nivel de reducción todavía mas del tamaño de las antenas a instalar en los domicilios. El objetivo se fijó en utilizar tamaños de antenas de diámetro menor de 1 metro.

El estándar DBS fijó la potencia de transmisión en el satélite a  $P_T = 200\text{Watt}$ , lo que representaba un aumento respecto de los sistemas anteriores. Este aumento de potencia pretendía compensar la calidad inferior de los receptores terrestres. Por otro lado, estos sistemas están pensados para una cobertura local, lo que permite situar en el satélite antenas de ganancia grande. Para el sistema DBS se fijó la ganancia de la antena transmisora en  $G_T = 37\text{dBi}$ . Los satélites están situados en órbita geoestacionaria a una distancia de unos  $R = 38,000\text{Km}$ . En este caso, el satélite operaba en banda Ku, a una frecuencia para el enlace descendente de  $14\text{GHz}$ . Al subir en frecuencia, las pérdidas por espacio libre aumentarán, pero por contra tendremos mas ganancia de las antenas para un tamaño dado de sus aperturas. Sin embargo, otro inconveniente de subir en frecuencia, es que la atmósfera produce una atenuación mayor en la señal. En este caso se tomó un margen de  $L_A = 2\text{dB}$  de atenuación atmosférica, incluso en condiciones climáticas buenas. También se consideraron pérdidas adicionales por apuntamiento de antenas, por cambio de polarización de la onda al atravesar las atmósfera, y por pérdidas en los cables coaxiales del receptor (de baja calidad). Todas estas pérdidas se evaluaron en  $L_B = 5,5\text{dB}$ , y se adoptó un margen de seguridad de  $L_C = 2\text{dB}$ .

Desde el punto de vista del receptor, se pensó en usar electrónica de consumo de peor calidad, y se estableció una temperatura equivalente de ruido de  $T_e = 630^\circ\text{K}$ . También consideraremos que la temperatura de ruido celeste que capta la antena es de  $T_A = 70^\circ\text{K}$ . Con el fin de reducir el ruido en el receptor se decidió limitar el ancho de banda del transpondedor a un solo canal de televisión de  $27\text{MHz}$ . De esta forma, además, no es necesario aplicar back-off al transmisor del satélite, al no haber varias portadoras que puedan producir intermodulación. Finalmente se utilizaron en el receptor demoduladores de umbral ensanchado, con umbral mínimo de  $9\text{dB}$ .

**Ejercicio 26.** Representar para este sistema la relación  $C/N$  en función de la ganancia de la antena receptora. Tomar valores desde  $G_R = 20\text{dBi}$  hasta  $G_R = 60\text{dBi}$ . A la vista de los resultados indicar el valor de ganancia que deberá tomar para que el sistema funcione correctamente. Suponiendo que la eficiencia de apertura de las antenas sea  $\eta 60\%$ , indicar el diámetro de la antena circular que debería instalar en el domicilio.

**Ejercicio 27.** Indicar el valor de calidad del receptor ( $G/T$ ), y compararlo con los receptores de los otros sistemas mas profesionales.