

Capítulo 3

Cálculo de enlaces

El cálculo de enlaces es cuantificar el desempeño de un enlace vía satélite. Se requiere saber con cuanta potencia y qué tamaño de antenas se requiere para que sea suficiente y no se desperdicie por excesos con el fin de obtener tasas de información apropiadas.

3.1 Introducción

Las partes del enlace satelital punto a punto son: la estación terrena transmisora, el satélite, la estación terrena receptora (ver Figura 1.2), este esquema sirve de base para una configuración de múltiples receptores. Entre estaciones terrenas y el satélite se forman los enlaces, que son la radiación de energía a través del canal.

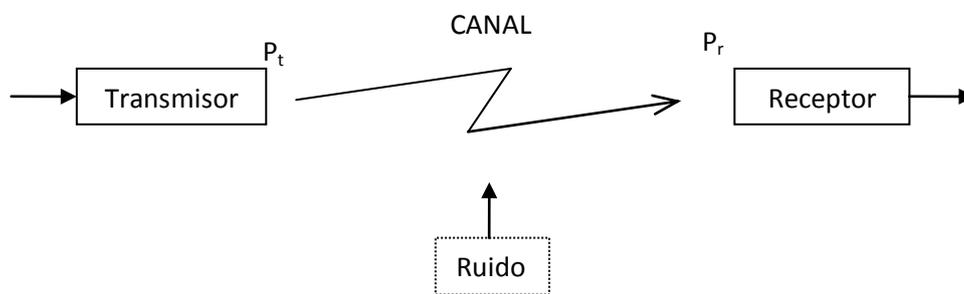


Figura 3.1 Enlace básico de telecomunicaciones.

El transmisor amplifica la señal para ser radiada por la antena, en el canal se tendrá un declive de la potencia y el receptor debe amplificarla sin introducir ruido.

Las variables que limitan un enlace vía satélite, son la potencia y el ruido, descrito por el teorema de la capacidad de canal de *Shannon-Hartley*, que es la máxima tasa de información que podemos transmitir en determinado ancho de banda.

$$R \leq C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde:

R = tasa de transmisión [bits/s]

C = Capacidad de canal [bits/s]

$$W = \text{Ancho de banda [Hz]}$$

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{Potencia de la señal recibida}}{\text{Potencia del ruido}} \right] [\text{dB}]: \text{Relación señal a ruido.}$$

La desigualdad de *Shannon* marca un límite, resultado de la teoría de la información, en la cual indica hasta cuantos bits por segundo por hertzio, [bps/Hz], se pueden transmitir y cuanta probabilidad de error habrá usando determinada potencia con determinado ruido. Esto se define de acuerdo a la modulación ya que es la forma de onda que se propaga adecuadamente por el medio de transmisión. Una vez elegida la modulación, se tienen dos opciones para optimizar el sistema: aumentar la potencia o disminuir el ruido mediante la reducción de la temperatura del sistema.

Para comunicaciones digitales se tiene:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R} \right)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\frac{R}{2W} - 1}{\frac{R}{W}}$$

Donde

$E_b = S \cdot (1/R)$: Energía por bit [J]

$N_0 = N/W$: densidad espectral de la potencia del ruido [W/Hz].

$R/W = \text{Eficiencia espectral [bps /Hz]}$

S : Potencia de la señal [W]

N : potencia del ruido [W]

Para medir la relación señal a ruido, lo que se toma en cuenta es la relación en decibeles de la potencia de la señal portadora y la del ruido. La señal moduladora, se denomina con la letra *C* (*carrier*). Es la cantidad de energía por unidad de tiempo o el área bajo la curva de la función que representa a la señal. El ruido es una señal no deseada de diferentes fuentes, es una variable aleatoria, el ruido térmico es un proceso con función de probabilidad Gaussiana que se suma a la señal transmitida y que su densidad espectral es constante en el ancho de banda, blanco, se conoce también como ruido Gaussiano blanco aditivo (AWGN), se designa con la letra *N* (*noise*).

$$\frac{C}{N} = 10 \log \left[\frac{\text{Potencia de portadora recibida}}{\text{Potencia del ruido}} \right]$$

Lo que se desea de un enlace es que con el mínimo uso de recursos, se obtenga el máximo beneficio, es decir, mínima potencia, óptima tasa de bits.

Tomando en cuenta que el diseño de satélites tiene como consecuencia que la potencia y las antenas que usan son parámetros fijos, el resultado del cálculo de enlaces nos dirá qué elementos se pueden modificar en el segmento terrestre. También las frecuencias son asignadas por lo que los parámetros para ajustar un adecuado enlace se reducen al tamaño de las antenas y potencia de las estaciones terrenas.

Los efectos de propagación son otro factor importante que afecta al enlace, a continuación se describen lo más significativos. Además se describen los parámetros que caracterizan al canal.

3.2 Efectos de propagación

La energía radiada al tener interacción con el medio sufre de efectos que afectan la transmisión de ondas. Una onda se compone por amplitud, frecuencia y fase. Estos tres parámetros pueden ser modificados al propagarse. La atenuación o disminución de la amplitud de la señal son el problema principal. Caracterizar al medio por el cual las ondas se propagan es útil para poder contrarrestar estos efectos. Las pérdidas más significativas se describen a continuación.

- Pérdidas por espacio libre (*Free Space Loss*)

El canal es un medio con pérdidas, entonces la solución de la ecuación de onda da como resultado una disminución exponencial de la amplitud de la onda a través del espacio, además la potencia recibida está relacionada con el área de la antena receptora, como densidad de flujo de potencia, watts por unidad de área. La relación de potencia recibida y transmitida está dada por:

$$p_r = p_t g_t g_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R_s} \right)^2$$

Donde:

p_r : potencia recibida

p_t : potencia transmitida

g_t : ganancia de transmisión

g_r : ganancia de recepción

Entonces se define como pérdidas por espacio libre:

$$l_{FSL} = \left(\frac{4\pi R_s}{\lambda} \right)^2$$

$$L_{FSL} = 20 \log \left(\frac{4\pi R_s}{\lambda} \right) [dB]$$

R_s : Rango espacial, longitud entre la estación terrena y el satélite.

λ : Longitud de onda.

Esta ecuación quiere decir que en un enlace mientras sea más largo o distante, habrá más pérdidas, como también al usar frecuencias muy grandes. El rango espacial, R_s , varía de acuerdo a la latitud de la estación terrena y se relaciona con los ángulos de apuntamiento de la antena terrestre.

- Absorción atmosférica

La absorción es la atenuación debido a la irreversible conversión de energía radioeléctrica a calor. Un segmento del rango espacial ocupa una parte de la tropósfera, 11 [km] de altura, donde las condiciones no son exactamente de vacío y donde se producen fenómenos meteorológicos que afectan el enlace. Las frecuencias utilizadas pueden coincidir con frecuencias de resonancia de algunos gases atmosféricos, la del vapor de agua 22.2 [GHz]¹, y del oxígeno (aire seco) 60 [GHz], esto trae como consecuencia que la energía se convierta en calor, es decir, que sea absorbida, reduciendo la potencia de la onda radioeléctrica.

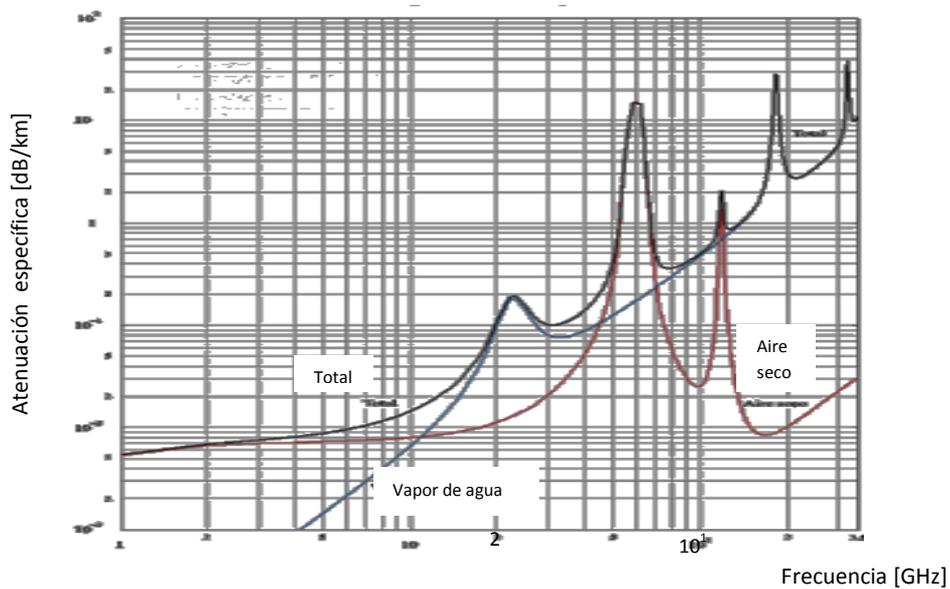


Figura 3.2 Atenuación específica total [UIT-R P.676-6].

- Atenuación por lluvia

El fenómeno meteorológico más significativo en las pérdidas es la lluvia, para banda Ka puede haber pérdidas de hasta 20 [dB]. Se calcula con el producto de atenuación específica y la longitud que abarca la lluvia.

$$\gamma_R = kR^\alpha \text{ [dB/km]}$$

¹ Neri, 2003

k y α : constantes que dependen de la frecuencia y polarización².
 R: intensidad de la lluvia en mm/h.

$$L_r = \gamma_R L [dB]$$

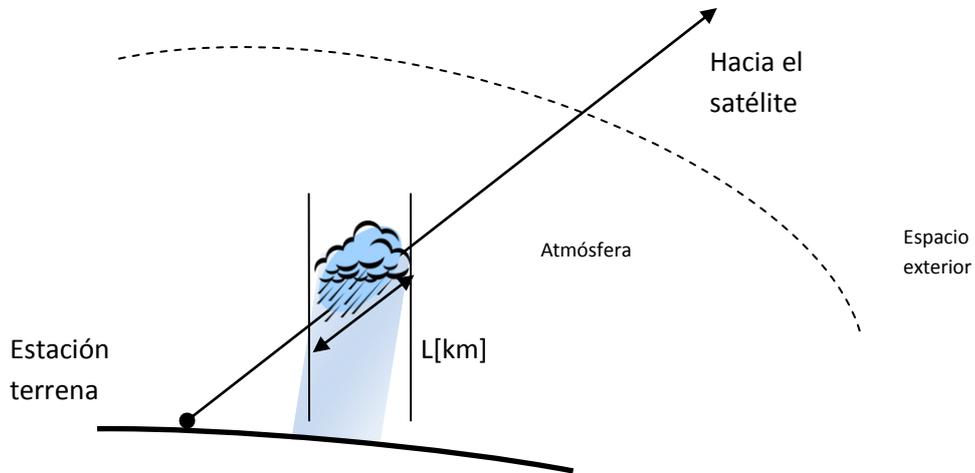


Figura 3.3 Atenuación por lluvia.

Se tienen valores para determinadas zonas del planeta para tomar en cuenta las pérdidas que la lluvia pueda provocar. Así que, la atenuación puede variar de acuerdo a la localización geográfica de la estación terrena, por lo que hay mapas de contornos de intensidad de lluvia. Estos efectos dependen principalmente de la frecuencia, localización y de las condiciones climatológicas. La atenuación por nubes y niebla no es significativa. Hay modelos empíricos que hacen más exactos los cálculos de atenuación, sin embargo, son más complicados, no obstante, sus efectos no son significantes en las bandas de frecuencia usadas, por lo que se pueden incluir en un margen para evitar errores.

- Despolarización

El cambio de polarización puede provocar pérdidas, señal copolarizada, o introducir interferencia, polarización cruzada, debido al efecto de radiación solar en las capas atmosféricas, la lluvia, hielo o por múltiples trayectorias.

Para bandas Ku y Ka no afecta la interacción de partículas ionizadas que causan la rotación de Faraday o giro del campo eléctrico de la señal, su efecto se nota en bandas inferiores, banda C.

Si se cambia la dirección del campo eléctrico con polarización lineal, es decir, el giro del vector eléctrico puede llegar a ser ortogonal a la antena destino y no ser recibida. Para sistemas que reutilizan frecuencias, es un efecto muy

² Más detalles en la Recomendación UIT-R P.838-3

importante ya que depende de polarizaciones ortogonales que no se interfieren mutuamente.

Los parámetros aislamiento y discriminación por polarización, APX y DPX respectivamente, indican que tan grande es la señal comparada con la que se considera ruido. El aislamiento es la comparación de dos señales distintas y la discriminación es la comparación de componentes de campo de la misma señal.

$$APX = 20 \log \frac{E_{11}}{E_{21}}$$

E_1 y E_2 son las señales que se transmiten en polarizaciones ortogonales pero que descomponen al girar por lo que se tendrán componentes, E_{11} y E_{21} , en la misma dirección produciendo interferencia.

Un valor aceptable es $APX = 30$ [dB]³.

$$DPX = 20 \log \frac{E_{cop}}{E_{pol.X}}$$

E_{cop} y $E_{pol.X}$ son componente, copolarizada y polarizada cruzada respectivamente, de la misma señal después de que ha girado.

Valores aceptado son superiores a 20 [dB]

La lluvia o cristales en las nubes también causan despolarización debido a su forma y orientación. Las señales con polarización lineal son las que menos son afectadas por este fenómeno.

- Retardo y latencia

El tiempo que tarda en llegar una señal de la estación transmisora al satélite, o viceversa, se le conoce como retardo. Las ondas viajan a la velocidad de la luz, $C=3 \times 10^8$ [m/s], por lo que el retardo se calcula como:

$$t = \frac{R_S}{C}$$

Para el viaje redondo se denomina latencia, es decir transmisión y recepción. El retardo es una desventaja para la órbita geoestacionaria, ya que es considerable, el tiempo de subida y bajada promedio es de 0.125 [s] ya que depende de las latitudes de las estaciones. Además existen enlaces con doble salto, lo cual incrementa el retardo.

- Otros

³ Neri, 2003.

El cambio de frecuencia debido al movimiento de la fuente de radiación se conoce efecto Doppler. Este efecto no afecta a los enlaces GEO en servicios fijos debido a la propiedad de tener una línea de vista fija para los satélites en la órbita geoestacionaria

Las longitudes de onda utilizadas en enlaces vía satélite son comparables con partículas como la lluvia nieve o granizo por lo que las señales pueden ser refractadas y cambiar la dirección de propagación.

El centelleo troposférico son fluctuaciones rápidas que suceden en los primeros kilómetro de altura causando irregularidades en amplitud y fase de la señal.

3.3 Relación C/N₀

La relación portadora a densidad de ruido, C/N₀, es el parámetro principal para el diseño de enlaces, de su valor requerido se obtendrán los valores de potencia requerida y tamaño de antenas, por consecuencia el costo en las estaciones terrenas. Tomando en cuenta el límite de Shannon para las tasas de velocidades, el ruido en el sistema, pérdidas, potencias, tamaños de las antenas, se tiene la ecuación básica de un enlace de un sistema de comunicaciones digitales⁴:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P G_t G_r}{L_l L_{FSL} L_a k T_s R}$$

Donde:

$\frac{E_b}{N_0}$: relación de energía recibida por bit a densidad de ruido

P : potencia de transmisión [W].

L_l : pérdidas en en la línea de transmisión del transmisor.

G_t : ganancia de la antena transmisora.

L_{FSL} : pérdidas en el espacio libre .

L_a : pérdidas de trayecto.

G_r : ganancia de la antena receptora .

$k = 1.380 \times 10^{-23}$: constante de Boltzmann [J/K].

T_s : temperatura de ruido del sistema [K].

R : tasa de datos [bps].

En decibeles [dB] se tiene

$$E_b/N_0 = P + G_t + G_r - L_l - L_{FSL} - L_a + 228.6 - 10 \log T_s - 10 \log R$$

Además la relación portadora a densidad de ruido en [dBHz]

⁴ Larson, 2005

$$C/N_0 = E_b/N_0 + 10 \log R$$

Y la relación portadora a ruido en [dB]

$$C/N = E_b/N_0 + 10 \log R - 10 \log W \text{ [dB]}$$

W: ancho de banda del ruido en el receptor [Hz].

Se definen dos parámetros importantes, el primero es la potencia isotrópica radiada efectiva, PIRE⁵, es el producto de la potencia del transmisor, P , las pérdidas de las líneas de transmisión hacia la antena, L_l , y la ganancia de la antena transmisora, G_t , en [dBW]:

$$\text{PIRE} = P - L_l + G_t$$

O lo que es lo mismo en [W]:

$$\text{PIRE} = P_T \times G_A$$

P_T : potencia entregada a la antena [W].

G_A : ganancia lineal de la antena.

El segundo es la relación G_r/T_s , o figura de mérito que es la sensibilidad de la estación receptora, donde G_r y T_s están calculados en el mismo punto y en [dB/K] es:

$$G_r/T_s = G_r + 10 \log T_s$$

Este parámetro se debe al patrón de radiación y ganancia de la antena receptora.

Todos los amplificadores de un dispositivo de microondas producen ruido interno. La temperatura de ruido, T , es la temperatura equivalente, T_e , a la que hay que elevar una resistencia a la entrada del amplificador ideal (que no produce ruido) para tener la misma potencia de ruido, P_N , con un amplificador real, la cual es función de la temperatura y del ancho de banda.

La disipación de energía debido al movimiento browniano de los electrones produce corrientes parásitas que introducen ruido a la señal de microondas. Donde:

$$N_0 = kTW$$

⁵ EIRP en inglés, Equivalent Isotropically Radiated Power

Por eso a menores temperaturas, los dispositivos funcionan mejor.

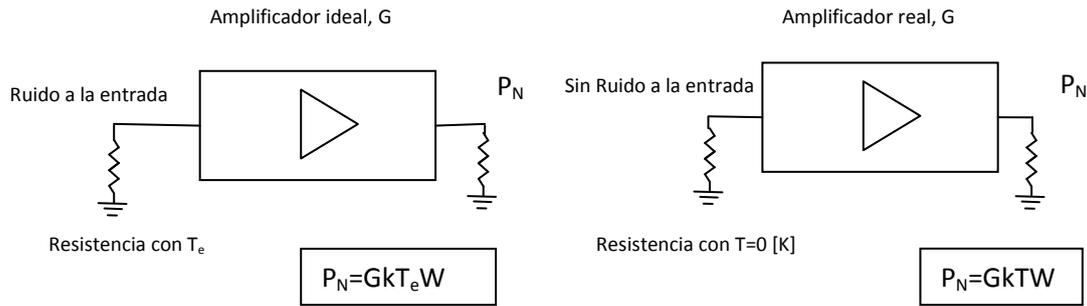


Figura 3.4 Temperatura de ruido.

Entonces a partir de la ecuación de *Shannon*, la ecuación de la relación portadora a densidad de ruido para un canal de comunicaciones, tomando en cuenta el $PIRE_t$ de la estación transmisora, la figura de mérito y las pérdidas es:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = PIRE_t \cdot \left(\frac{1}{L_{FSL}L_a}\right) \cdot \frac{G_r}{T_s} \cdot k$$

En [dBHz] se tiene:

$$C/N_0 = PIRE - L_{FSL} - L_a + G_r/T_s + 228.6$$

Como se puede apreciar en la última ecuación, incluye los parámetros en la transmisión y recepción. Sin embargo, se debe analizar cada enlace, además se puede tomar en cuenta los efectos de interferencia. Por lo que se hará un análisis de este parámetro en el sistema completo: enlace de subida, intermodulación, enlace de bajada y efectos de interferencia.

3.3.1 Ascendente

La señal de información debe pasar por los procesos de digitalización, codificación (compresión y cifrado), modulación (FSK, PSK o QAM)⁶ y amplificación mediante: TWT (*Traveling Wave Tube*), Klystron y SSPA (*Solid State Power Amplifier*). Cuando es radiada por el medio tiene pérdidas en la amplitud y se añade ruido, por lo tanto la sensibilidad del satélite debe ser capaz de recibir la señal.

Los parámetros que intervienen en el enlace ascendente son el $PIRE$ de la estación terrena transmisora, las pérdidas de propagación, y la figura de mérito del satélite.

⁶ FSK: *Frequency Shift Keying*, PSK: *Phase Shift Keying*, QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*

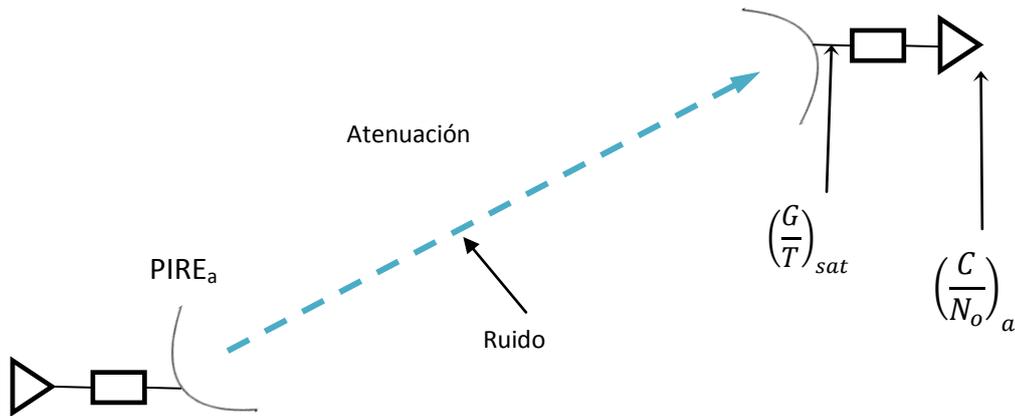


Figura 3.5 Enlace de subida.

Se describe el proceso del enlace ascendente como:

- Se genera una señal de alta potencia y se radia hacia el satélite.
- La señal es atenuada durante el trayecto y se introduce ruido de distintas fuentes.
- El receptor tiene una sensibilidad para recibir señales pequeñas, sin embargo el nivel de la señal contiene ruido agregado, contrarrestando la calidad de la señal.

Como resultado se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_a = P_t \cdot G_{at} \cdot \frac{1}{L_{propagación}} \cdot \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} \cdot \frac{1}{k}$$

G_{at} : ganancia de antena transmisora

Por lo tanto se tiene en decibeles:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_a = PIRE_a - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - 10 \log k$$

Donde:

$\left(\frac{C}{N_0}\right)_a$: relación $\frac{C}{N_0}$ ascendente en [dBHz]

$PIRE_a$: PIRE ascendente de la estación transmisora en [dBW]

$L_{propagación}$: pérdidas en [dB]

$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat}$: figura de mérito del satélite en [dB]

G: ganancia de la antena receptora del satélite y T es la temperatura del ruido introducido

k : constante de Boltzmann

$$L_{propagación} = L_{espacio libre} + L_{absorción} + L_{polarización} + L_{desapuntamiento} + \dots$$

En las pérdidas por propagación se pueden incluir diferentes tipos de pérdidas, sin embargo, las más significativas son las de espacio libre, lluvia y absorción.

Los contornos G/T son zonas donde se tiene el mismo valor de G/T y resumen información de la antena receptora del satélite, amplificador de bajo ruido y otros dispositivos del satélite. EL fabricante debe calcular el valor de este parámetro y proporcionarlo.

Se muestra un ejemplo de contornos aproximados de G/T en la banda C para el satélite Satmex 5, tomado de [Neri, 2003].

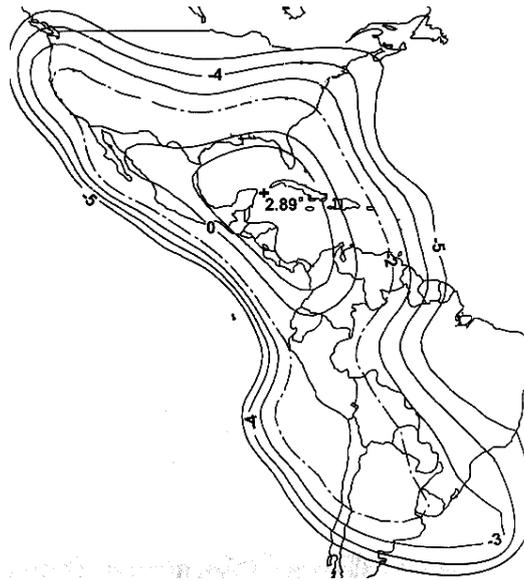


Figura 3.6 Contornos G/T [dB/Hz].

Fenómenos meteorológicos, como la lluvia, no son eventos constantes, entonces conviene usar un margen, para que cuando ocurran estos, no afecte de forma irremediable el enlace. Por esto, se añade un parámetro, m_a , que es el margen para el enlace ascendente.

Para simplificar el cálculo del enlace se define la densidad de flujo de saturación del satélite, proporcionado por los fabricantes del satélite, como:

$$F_s = \frac{PIRE_a}{4\pi R_s} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

O utilizando logaritmos:

$$F_s = PIRE_a - 10 \log (4\pi R_s) [dBW/m^2]$$

El valor de F_s indica con que valor de PIRE, las estaciones terrenas deben transmitir para saturar al transpondedor.

Después de pasos algebraicos como despejes, sustituciones y reducciones, tomando en cuenta cielo despejado (sin lluvia) y despreciando pérdidas por absorción atmosférica, apuntamiento, despolarización, se obtiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_a = F_s - 20 \log f + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - 207.15 - m_a \text{ [dBHz]}$$

f : frecuencia en [GHz]

Esta expresión implica sólo introducir la frecuencia del enlace de subida y el dato de densidad de flujo de saturación, la figura de mérito son dados por el fabricante del satélite y estimar un margen aceptable.

3.3.2 Intermodulación

Una vez que la señal es recibida por el satélite, esta debe ser amplificada, en algunos casos la señal es procesada y cambiar de portadora. En esta etapa se introduce ruido térmico y ruido de los dispositivos no lineales del satélite. A este último ruido se le conoce como ruido de intermodulación, debido al uso de múltiples portadoras moduladas, f_1 y f_2 , y sus respectivas componentes armónicas en la frecuencia o términos de alto grado, que están alrededor de la portadora.

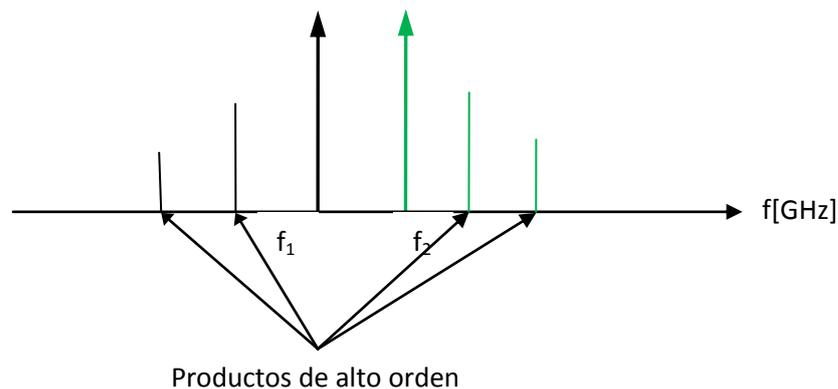


Figura 3.7 Intermodulación.

Las armónicas de la portadora en f_2 son ruido para la portadora en f_1 y viceversa. Mientras más grande sea el orden de las armónicas, menor es su amplitud. Con más portadoras en el transpondedor existe más ruido de intermodulación.

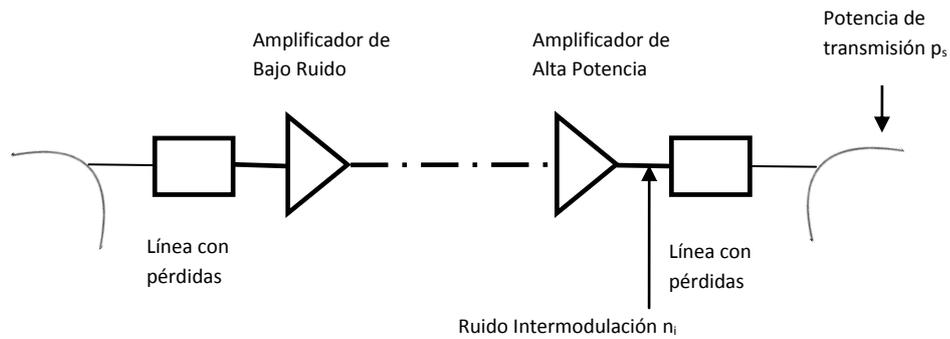


Figura 3.8 Esquema básico de transpondedor.

El valor de relación portadora a ruido, $\left(\frac{C}{N}\right)_i$, en la etapa del satélite es definido como⁷:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_i = \frac{p_s}{n_i}$$

Donde:

p_s : potencia del transmisor del satélite

n_i : ruido de intermodulación generado por el transpondedor.

Nótese que en esta expresión, se trata de la potencia de ruido en Watts, es decir, no se trata de la densidad espectral de potencia. Su cálculo es complicado, pero este es realizado por los fabricantes y proporcionado como dato para el diseñador de enlaces. Sin embargo existen curvas para poder estimarlo de acuerdo al número de portadoras y del *back-off* de entrada.

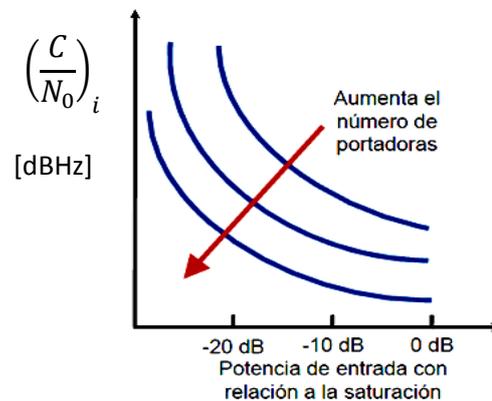


Figura 3.9 Variación de $\left(\frac{C}{N_0}\right)_i$, apuntes del Dr. Landeros.

El uso de anchos de banda estrechos ayuda a evitar problemas de intermodulación. Afecta más al acceso múltiple por frecuencia. Este fenómeno

⁷ Ippolito, 2008

ocurre también en las estaciones terrenas que transmiten o reciben más de una portadora.

Es común introducir un parámetro denominado *back-off*, BO, el cual significa para el caso de la entrada de un sistema, BO_e , una atenuación de la señal al nivel de punto de operación del amplificador, y para el caso de la salida, BO_s , significa disminuir la señal de salida, ya que esta contiene el ruido amplificado. Incluir este parámetro en los cálculos disminuye el efecto del ruido de intermodulación en el enlace, ya que el punto de operación de los amplificadores se encuentra en la zona lineal.

3.3.3 Descendente

La señal después de ser convertida a una portadora con frecuencia menor que la portadora de subida, es transmitida a una estación terrena, la cual puede variar en dimensiones con respecto a la transmisora, además, las condiciones del clima y geográficas serán distintas. El satélite utiliza amplificadores de bajo ruido.

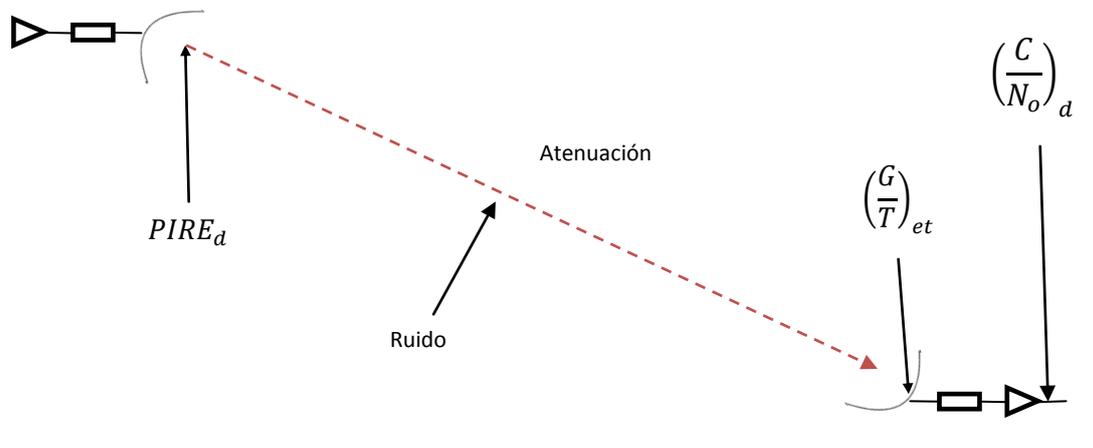


Figura 3.10 Enlace de bajada.

La ecuación general para el enlace descendente, de manera homóloga a la del ascendente en [dBHz]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = PIRE_d - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{et} - 10 \log k$$

Donde:

$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d$: relación portadora a densidad de ruido descendente

$PIRE_d$: PIRE del satélite.

$L_{propagación}$: pérdidas de espacio libre, lluvia, etc, en la estación receptora.

$\left(\frac{G}{T}\right)_{et}$: figura de mérito de la estación terrena receptora

k : Constante de Boltzmann

El valor del $PIRE_d$ descendente es proporcionado por los fabricantes del satélite y define las zonas de cobertura, que como en el caso del enlace ascendente, los contornos $PIRE_d$ o huella del satélite resume información de la antena transmisora del satélite, patrón de radiación, ganancia y ancho de haz. Se muestra un ejemplo de contorno $PIRE_d$ en la banda C del satélite Satmex 6, tomado de <http://www.lyngsat-maps.com/>.

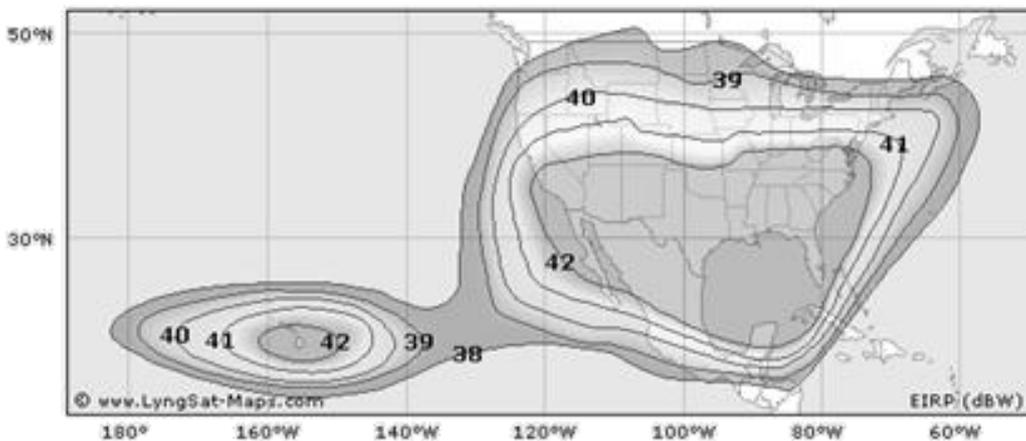


Figura 3.11 Contornos PIRE

De estos contornos se puede interpretar que para zonas alejadas del centro de cobertura se necesitan antenas más grandes, ya que la ganancia de estas compensa el valor menor de $PIRE_d$ en estas zonas.

Para que un sistema se encuentre lo suficiente sobrado para funcionar en las peores condiciones climatológicas, por ejemplo, se debe añadir un margen al los cálculos, m_d . Además, tomando en cuenta el *back-off* de salida, BO_s , del transpondedor se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = PIRE_d - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{et} - 10 \log k - BO_s - m_d$$

3.3.4 Total

Ya se han descrito las principales etapas de un enlace vía satélite, enlace ascendente y descendente y el efecto de la intermodulación en el transpondedor. Para tener un parámetro que tiene implícita información de todo el trayecto de la señal se tiene la relación portadora a densidad de ruido total. Significa que tan grande es la potencia de la señal de información con respecto a la densidad de ruido. Se calcula de la siguiente forma:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_t = 10 \log \left[\frac{1}{\text{alog}\left(\frac{C}{N_0}\right)_a} + \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{C}{N_0}\right)_i} + \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{C}{N_0}\right)_d} \right]^{-1} \text{ [dBHz]}$$

Es igual al recíproco de la suma de los recíprocos de cada relación portadora a densidad de ruido. Esta es una forma aceptada debido a que se hacen estimaciones en los márgenes respecto a cada enlace, sin embargo, estrictamente se deben tomar en cuenta más relaciones e interferencias de diferente índole como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_t = 10 \log \left[\frac{1}{\text{alog}\left(\frac{C}{N_0}\right)_a} + \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{intermodulación}}} + \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{C}{N_0}\right)_d} + \frac{1}{\text{alog}\left(\frac{C}{X}\right)_{\text{interferencias}}} \right]^{-1} \text{ [dBHz]}$$

Esta expresión es útil para sistemas que tengan un disponibilidad muy buena; la disponibilidad es la relación entre el tiempo en determinado intervalo que el sistema se encuentra funcionando entre el total del tiempo del intervalo. Puede haber distintas interferencias: entre satélites, entre estaciones terrenas, un satélite interfiriendo con otra estación terrena. Además la intermodulación ocurre en las estaciones terrenas y en el satélite. Para el caso de satélites GEO, la más significativa es la interferencia entre satélites debido a la saturación de la órbita geoestacionaria.

Con esta ecuación de la relación total portadora a densidad de ruido se obtienen las demás relaciones y los parámetros de cada una. Del valor requerido, se substituye y se calculan los valores. El diseño del satélite arroja parámetros fijos en el diseño del enlace, es decir, el satélite es construido en base a tener su mejor desempeño en cuanto a potencia y costo, y durante el diseño del enlace estos parámetros difícilmente cambian. En algunos casos el patrón de radiación se pueden modificar o la potencia del satélite puede ser controla por telemetría.

El valor requerido se obtiene de la tasa de datos deseada, R , la energía por bit (relacionada con el valor de BER, *Bit Error Rate*) y un margen de implementación, MI :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{requerido} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log R + MI [dBHz]$$

Los parámetros que podemos modificar físicamente, son el tamaño de la antena y el nivel de potencia; las frecuencias así como las ubicaciones de las estaciones terrenas son asignadas, y los efectos de propagación son inherentes a la naturaleza.

3.3.5 Interferencia de satélites

Debido a la saturación de la órbita geoestacionaria, donde se tiene una distancia aproximada de 2° o menos entre satélites, es importante considerar interferencia entre satélites. El radio de la órbita geoestacionaria es 42,164 [km], con un perímetro de:

$$P_{GEO} = 2\pi \times 42,164 [km] = 264,924 [km]$$

Entonces una separación de 2° equivale a una longitud de arco de:

$$S_{2^\circ} = 264,924 \times \frac{2}{360} = 1,472 [km]$$

Esto condiciona a una cantidad máxima de 180 satélites GEO. Sin embargo, esta distancia puede ser menor ya que la distribución de los satélites no es uniforme.

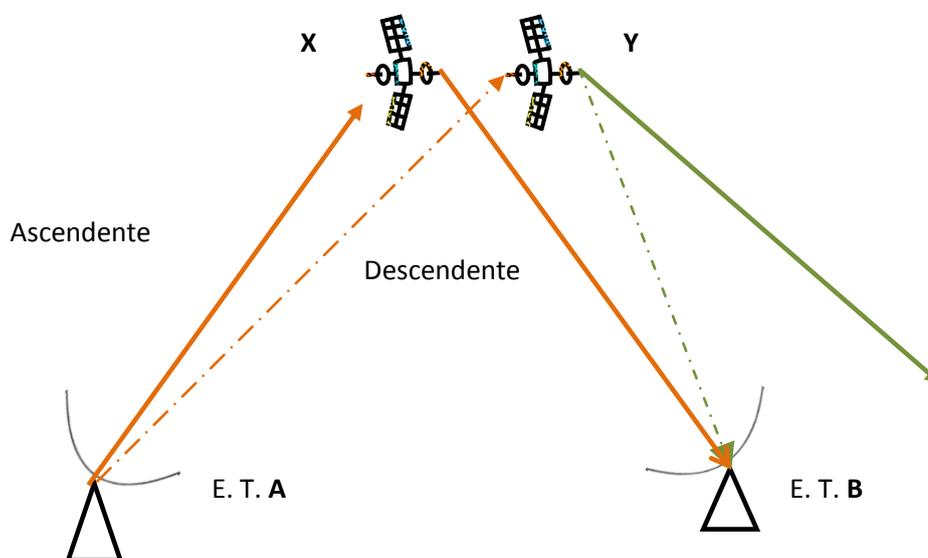


Figura 3.12 Interferencia entre satélites.

El diseño del enlace con un satélite X implica que en el enlace ascendente, generado en la estación terrena A, no se interfiera con un satélite Y (interferencia ascendente adyacente). En el enlace descendente hacia la estación terrena B, la huella del satélite Y se traslapa con la del satélite X, entonces hay que minimizar los efectos del haz descendente de Y en la estación B (interferencia descendente adyacente).

Los lóbulos laterales producidos en las antenas radian hacia direcciones donde pueden introducirse como una señal indeseada en un satélite o estación terrena de otra red.

En el caso del enlace ascendente se introduce una relación de interferencia ascendente adyacente $\left(\frac{C}{X}\right)_a$, la cual se calcula:

$$\left(\frac{C}{X}\right)_a = -INT_{ascady} - BO_e - 10 \log W$$

Donde:

INT_{ascady} : Interferencia ascendente adyacente

BO_e : Back - Off de entrada

W : ancho de banda

Este valor se incluye en el cálculo de la relación portadora a ruido total:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_a = \left(\frac{C}{N_0}\right)_a - 10 \log W$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{atotal} = 10 \log \left[\frac{1}{alog \left(\frac{C}{N}\right)_a} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{X}\right)_a} \right]^{-1} [dB]$$

Además el uso de polarizaciones ortogonales puede provocar interferencia debido a los efectos de despolarización.

Para el caso del enlace descendente se tiene que la relación interferencia por:

$$\left(\frac{C}{X}\right)_d = PIRE_d - (INT_{desady} - G_{RX}) - 10 \log W$$

Donde:

$PIRE_d$: PIRE del satélite

INT_{desady} : Interferencia descendente adyacente

G_{RX} : Ganancia de antena de la estación terrena receptora

W : ancho de banda

De manera similar al enlace ascendente se tiene la relación portadora a ruido total descendente:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{dtotal} = 10 \log \left[\frac{1}{alog \left(\frac{C}{N}\right)_d} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{X}\right)_d} \right]^{-1} [dB]$$

Para la relación total de portadora a ruido:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{total} = 10 \log \left[\frac{1}{alog \left(\frac{C}{N}\right)_{atotal}} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{N}\right)_{dtotal}} \right]^{-1} [dB]$$

Con estas consideraciones se puede diseñar un sistema que funciona en un ambiente de compatibilidad electromagnética.

3.3.6 Ejemplo

Se presenta un ejemplo de cálculo de enlaces a manera de ilustrar los parámetros que intervienen y cómo pueden ser modificados. Tomado de Ippolito, *Satellite Communications Systems Engineering*, 2008 pág. 264.

Obtener relación portadora a densidad de ruido total siendo:

Datos:

Tabla 3.1 Datos.

Parámetros	Enlace ascendente	Enlace descendente
Frecuencia [GHz]	14	12
Ancho de banda del ruido [MHz]	25	25
Potencia del transmisor [W]	100	20
Ganancia de la antena transmisora [dBi]	55	38

Pérdidas por espacio libre [dB]	207	206
Pérdidas totales atmosféricas [dB]	0	15
Temperatura media del trayecto [K]	290	270
Ganancia de la antena receptora [dBi]	37.5	52.5
Temperatura de la antena receptora [K]	290	50
Figura de ruido en el receptor, N [dB]	4	3

Solución

Para el enlace ascendente:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = PIRE_a - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - 10 \log k$$

$$PIRE_a = 10 \log 100 + 55 = 75 [\text{dBW}]$$

$$L_{propagación} = L_{espacio libre} + L_{atmosférica} = 207 + 0 = 207 [\text{dB}]$$

$$T = T_{antena} + T_{trayecto} (a \log (N/10) - 1) [\text{K}]$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat} = G - T = 37.5 - \left[10 \log \left(290 + 290 \left(a \log \frac{4}{10} - 1\right)\right)\right] = 8.88 \left[\frac{\text{dB}}{\text{K}}\right]$$

$$10 \log k = 10 \log (1.380 \times 10^{-23}) = -228.6$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = 75 - 207 + 8.88 - (-228.6) = \mathbf{105.48} [\text{dBHz}]$$

Para el enlace descendente se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = PIRE_d - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{et} - 10 \log k$$

$$PIRE_d = 10 \log 20 + 38 = 51 [\text{dBW}]$$

$$L_{propagación} = 206 + 15 = 221 [\text{dB}]$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{et} = G - T = 52.5 - 10 \log\left(50 + 270\left(\text{alog} \frac{3}{10} - 1\right)\right) = 27.5 \left[\frac{dB}{K}\right]$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = 51 - 221 + 27.5 - (-228.6) = \mathbf{86.1 [dBHz]}$$

Suponiendo:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_i = \mathbf{90 [dBHz]}$$

Ahora la relación total es:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_t = 10 \log \left[\frac{1}{\text{alog} \left(\frac{C}{N_0}\right)_a} + \frac{1}{\text{alog} \left(\frac{C}{N_0}\right)_i} + \frac{1}{\text{alog} \left(\frac{C}{N_0}\right)_d} \right]^{-1} \text{ [dBHz]}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_t = 10 \log \left[\frac{1}{\text{alog} \frac{105.48}{10}} + \frac{1}{\text{alog} \frac{90}{10}} + \frac{1}{\text{alog} \frac{86.1}{10}} \right]^{-1} = \mathbf{84.6 [dBHz]}$$

Con este valor se puede tener un servicio de televisión digital, con una tasa aproximada de 46 [Mbps], usando modulación QPSK y código 3/4 para alcanzar un valor de $E_b/N_0=5,5$ [dB] y un margen de 1.2 [dB]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{requerido} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log(46 \text{Mbps}) + 1.2$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{requerido} = 5.5 + 76.63 + 1.2$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{requerido} = \mathbf{83.3 [dBHz]}$$

Se obtuvo un valor mayor al requerido, lo cual es deseable pero sin exceso.

Se puede apreciar como es necesario bajar la temperatura de ruido en los sistemas de recepción y una antena más grande para compensar, ya que el PIRE del satélite es limitado.