

## Tema 5 – Enlaces satelitales.

### Preguntas...

¿Qué es un enlace satelital? ¿Qué elementos lo conforman?

¿Qué orbitas satelitales existen? ¿para que se utilizan?

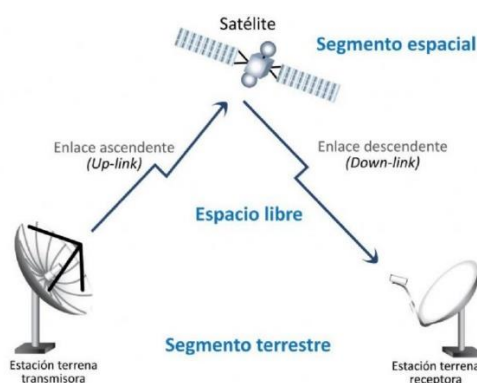
¿Cómo se orienta correctamente una antena?

¿Cómo caracterizamos la calidad de un enlace? ¿Dónde se mide? ¿De qué factores depende?

¿Cómo se trabaja con enlaces satelitales digitales?

### Respuestas...

El proceso de comunicación satelital es básicamente un sistema de telecomunicaciones que emplea uno o más satélites para retransmitir las señales electromagnéticas generadas por una estación emisora con el objeto de enviarlas a otra estación receptora, que por lo general se encuentra muy lejos de la primera (sin alcance visual). Esto es fundamental, porque en un principio, los satélites se desarrollaron para brindar soluciones al inconveniente de las comunicaciones trasatlánticas. Realizar el tendido de un cable submarino y mantener el enlace funcional, era demasiado complicado hace algunos años, por eso, se pensó en un sistema alternativo, el sistema satelital.

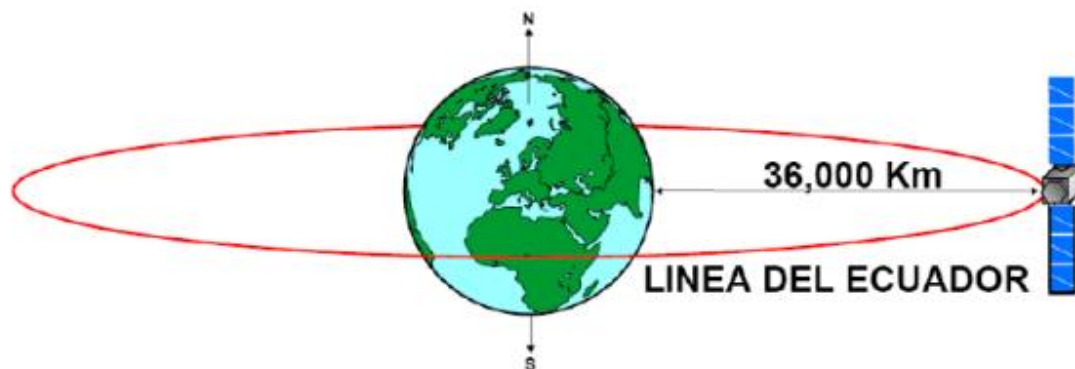


Dentro de las principales ventajas y desventajas que presentan estos sistemas, encontramos:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Gran cobertura con un solo equipo	Menor ancho de banda en comparación con otras tecnologías (Fibra Óptica)
Grandes capacidades para brindar servicio a cualquier usuario alrededor del mundo.	Mucho retardo en servicios que requieren tiempo real.
Posibilidad de configuración para tener mayor potencia en ciertas áreas	
Este sistema no necesita repetidoras o regeneradoras de señal a cortas distancias.	

Como es lógico pensar, un sistema satelital está conformado por **dos estaciones terrenas**, lugar geográfico donde se concentran la mayor cantidad de equipos encargados de la generación o recepción de señales satelitales y **un satélite**, dispositivo encargado de reenviar de un punto al otro, las señales electromagnéticas recibidas. Sin embargo, es interesante analizar la altura a la cual se encuentran los satélites. ¿Por qué? Porque definen el tiempo de disponibilidad que tiene

una estación terrena para transmitir o recibir señales y también define las aplicaciones que pueden emplearse para dicho sistema. Si los satélites se encuentran muy cercanos a la tierra, tienen un movimiento relativo respecto a la misma, por lo tanto, en determinados instantes de tiempo (cantidad de horas o minutos al día), pasaran por la zona donde se encuentra la estación satelital, permitiendo, solo en dicho instante de tiempo, efectuar todas las operaciones necesarias de control, descarga y subida de información. Pese a la escasa disponibilidad, las atenuaciones y el retardo en dichos sistemas son muy pequeños, lo que los convierte en ideales para servicios en tiempo real. Si la altura del satélite se incrementa hasta los 36.000 Km aproximadamente, sobre la línea del ecuador, las atenuaciones se incrementan y los retardos también (llegan a ser del orden de los segundos), haciendo que dicho sistema sea totalmente malo para aplicaciones en tiempo real, pero la disponibilidad de los satélites para las diferentes estaciones terrenas es completa (24 horas al día).



¿Cómo ocurre esto? Resulta que, a esa distancia sobre el ecuador, el movimiento relativo del satélite respecto a la tierra es nulo. El satélite tarda 24 horas en dar una vuelta completa a la tierra, lo mismo que tarda la tierra en girar sobre su propio eje. Este efecto hace que el satélite parezca estancado en una parte del cielo cuando se lo mira desde la tierra.

La altura de los satélites, que de alguna manera permite definir los tiempos de disponibilidad, la necesidad o no de sistemas de traqueo o sistemas de constelaciones y las aplicaciones, en la jerga satelital tienen un nombre. Si bien no son las únicas, en redes de distribución se hace hincapié en las órbitas **LEO, MEO y GEO**.

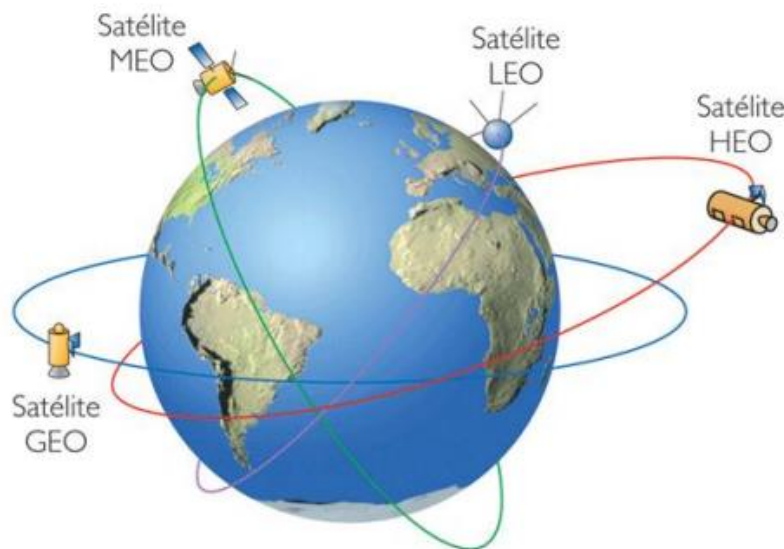
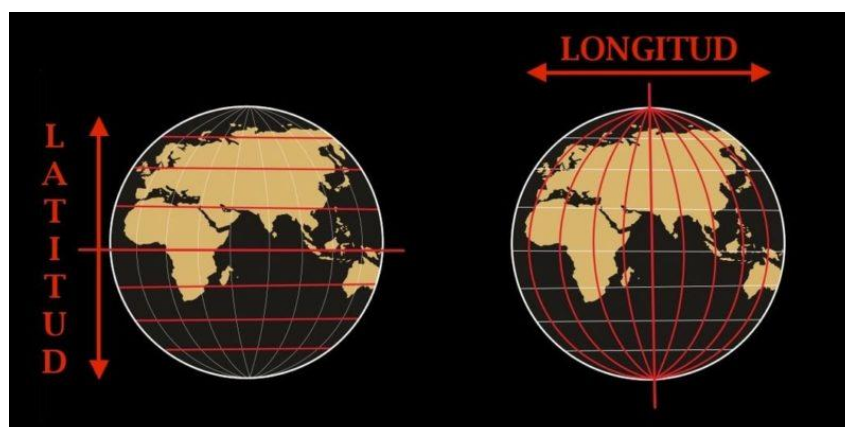


Figura 1-2: Órbitas satelitales

- **Orbitas LEO (Low Earth Orbit)**
  - todas aquellas orbitas con una distancia entre 600 y 1600 km de la tierra.
  - Las aplicaciones más comunes son: servicio de telefonía móvil, transmisión de datos y buscapersonas.
  - Se necesita sistema de seguimiento ya que presentan movimiento relativo entre el satélite y la tierra. También, existe la posibilidad de utilizar constelaciones de satélites.
- **Orbitas MEO (Medium Earth Orbit)**
  - todas aquellas orbitas con una distancia entre 10.000 km y 20.000 km de la tierra aproximadamente.
  - Las aplicaciones más comunes son: Posicionamiento.
  - Se necesita sistema de seguimiento ya que presenta movimiento relativo entre el satélite y la tierra. También, existe la posibilidad de utilizar constelaciones de satélites.
- **Orbitas GEO (Geo-synchronous Earth Orbit)**
  - Una única orbita ubicada a 35.786 km desde la línea del ecuador en la tierra.
  - Aplicaciones comunes: Todas aquellas que no sean de tiempo real son aptas para utilizar un sistema satelital GEO.
  - No se necesita sistema de traqueo o constelaciones de satélites para tener disponibilidad de 24 horas al día.

En las orbitas GEO, se indicó como característica fundamental, que no se necesitaba un sistema de traqueo o sistema de constelaciones de satélites para tener disponibilidad de 24 horas, ya que el satélite permanecía fijo en el cielo si se lo observaba desde la tierra. Sin embargo, como el satélite se encuentra muy lejos, es necesario diseñar una antena muy directiva y con mucha ganancia para hacer frente a las atenuaciones que presenta el enlace satelital y a los costos de potencia transmitida. Para antenas muy directivas es fundamental realizar un buen **apuntamiento de antena**.

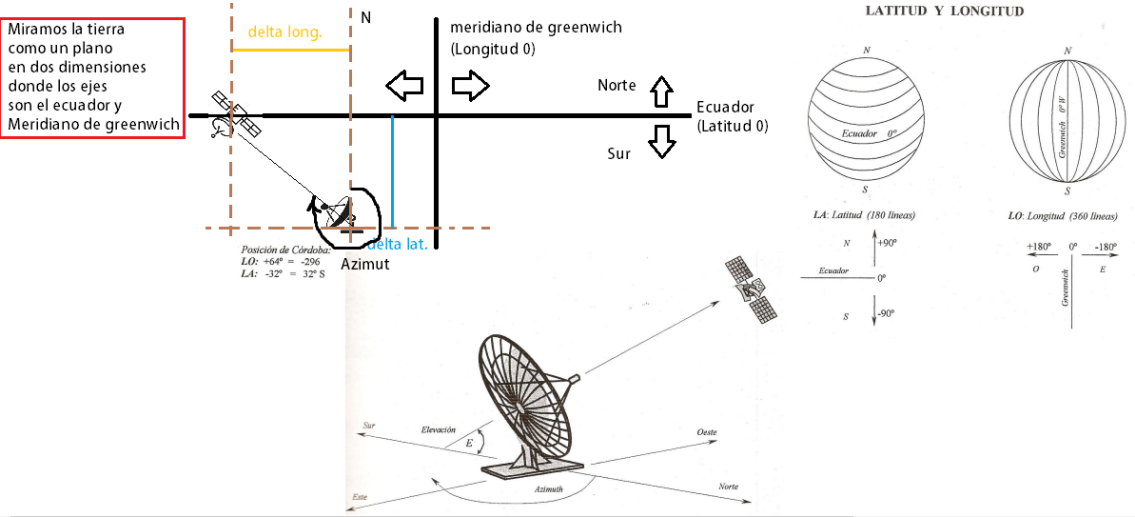
Para que la antena pueda orientarse hacia un satélite geoestacionario hace falta conocer la ubicación de la estación terrena (latitud y longitud) y la ubicación del satélite (longitud del punto sub-satélite y la distancia al satélite).



El punto sub-satélite consiste en asignar las coordenadas latitud y longitud al satélite mediante una proyección sobre la superficie de la tierra. Básicamente, consiste en considerar que el satélite se encuentra en tierra para realizar los cálculos. Este punto es fundamental y tiene algunas particularidades. Siempre la latitud del satélite será 0, porque por definición, al estar en

la órbita GEO se encuentra sobre el ecuador. De satélite a satélite cambiará la longitud, cuanto más al oeste o al este estará.

Con estos conceptos conformamos un mapa en dos dimensiones como el que se presenta a continuación.



Con los datos anteriores, es posible calcular el **ángulo de Azimut (Az)** y **ángulo de elevación (E)**, que permite orientar a una antena.

El azimut es el ángulo, respecto al polo norte, que debe girarse la antena en sentido horario para dar alcance al satélite. Para calcular el azimut, primero se calcula el *azimut relativo*, que siempre resulta en un ángulo menor a 90 grados.

$$AZ_{rel} = tg^{-1} \left( \frac{tg(\Delta long)}{sen(latitud)} \right) \text{ con } \Delta long = \text{diferencia entre satelite y estacion terrena}$$

Luego, se calcula el azimut teniendo en cuenta la ubicación geográfica de la estación terrena (Noroeste “NO”, Noreste “NE”, Sureste “SE”, Suroeste “SO”).

Satélite al SO	$Az = 180 + Az_{rel}$	$Az_{rel}$ :
Satélite al SE	$Az = 180 - Az_{rel}$	$Az_{rel}$ :
Satélite al NO	$Az = 360 - Az_{rel}$	$Az_{rel}$ :
Satélite al NE	$Az = Az_{rel}$	$Az_{rel}$ :

La elevación es el ángulo, respecto a la horizontal local (terreno) que debe levantarse la antena para dar alcance al satélite. Para calcular dicho parámetro, se utiliza la siguiente ecuación:

$$E = tg^{-1} \left( \frac{\cos(\Delta long) . \cos(\Delta latitud) - 0,15126}{\sqrt{1 - \cos(\Delta long)^2 . \cos(\Delta latitud)^2}} \right)$$

Hablar de delta latitud no tiene mucho sentido la mayoría de las veces, porque los satélites tienen una latitud cero ya que siempre están presentes sobre el ecuador. Por eso, la mayoría de las bibliografías se refieren siempre a delta de longitud y latitud sin más detalles.

Para calcular la distancia al satélite necesitamos la siguiente ecuación:

$$R = H \cdot \sqrt{1,42 - (0,42 \cdot \cos(\Delta \text{latitud}) \cdot \cos(\Delta \text{long}))}$$

Donde “H” es la distancia desde el ecuador hacia un satélite geoestacionario. De esta forma se define “H” como 35.786 Km. La única manera que la distancia desde la estación terrena hacia el satélite sea “H”, es que la estación terrena se ubique exactamente por debajo del satélite (longitud del satélite) en el ecuador (latitud 0).

Uno podrá preguntarse, ¿Para qué necesitamos este dato? Un enlace satelital más lejano o cercano no es detalle menor, debido a la precisión con la que debe apuntarse la antena y a las atenuaciones a las que están sometidas las comunicaciones entre estación terrena y el satélite.

Perfecto, tenemos la capacidad de orientar la antena para generar un enlace satelital, ¿qué servicios podemos utilizar?

La ITU es la encargada de asegurar el empleo eficiente y económico de las frecuencias de radio. En la siguiente tabla se ven los 3 principales servicios satelitales definidos (hay más) por la regulación de radio en bandas IEEE:

Banda	Frecuencias	FSS Servicio Fijo	MSS Servicio Móvil	BSS Servicio Broadcasting
L	1 - 2 GHz		✓	
S	2 - 4 GHz			✓
C	4 - 8 GHz	✓		
X	8 - 12 GHz	✓		
Ku	12 - 18 GHz	✓		✓
K	18 - 27 GHz			
Ka	27 - 40 GHz	✓	✓	
V	40 - 75 GHz	✓		

La división realizada establece tres regiones distintas en el mundo:

Región 1: Europa, África, el Oriente Medio y la ex-URSS.

Región 2: Toda América.

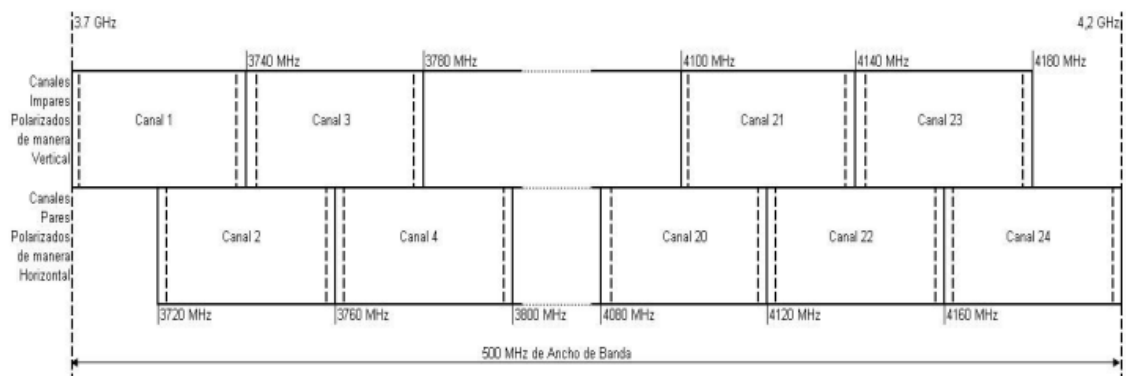
Región 3: Asia y Oceanía (excepto Oriente Medio y la ex-URSS).

Haciendo hincapié en los satélites empleados en América, se puede observar que, la mayoría de ellos son empleados en sistemas de TV satelital. Trabajan retransmitiendo señales de TV en banda C, en un ancho de banda total de 500 MHz donde anteriormente se ubicaban 24 canales **(no son los 6 Mhz de canales analógicos de CATV, no confundir)** de TV analógicos. Actualmente, al utilizar sistemas digitales e implementar TV digital, se puede introducir múltiples señales de alta definición (o más si son de calidad estándar) en el mismo ancho de banda de un solo canal analógico.

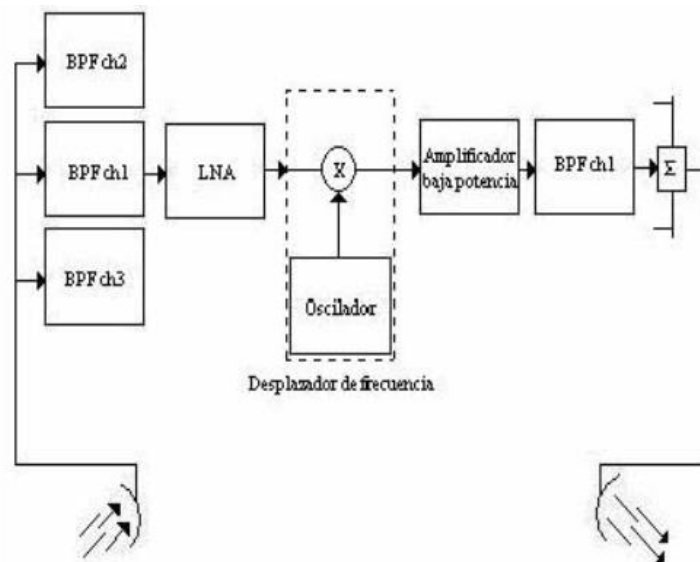
La banda de 500 MHz utilizada por el satélite puede dividirse en dos polaridades, permitiendo la reutilización del ancho de banda total para cada polaridad. En cada polaridad (vertical y horizontal), los 500 MHz se dividen en 12 segmentos de 40 MHz cada uno (anteriormente denominados canales), por lo tanto, como ambas polaridades, es como si tuviéramos a disposición 1000 MHz en total y 24 segmentos o canales de 40 MHz cada uno. En definitiva, debe quedar claro, que en sistemas satelitales se hace referencia a canales cuando se habla de segmentos en frecuencia de un ancho de banda de 40 MHz.

Cada segmento de 40 MHz está asociado a un dispositivo que se denomina transponder satelital (palabra que surge de combinar en inglés *transmitter* – transmisor y *responder* - contestador), que utiliza 36 MHz de los 40 asignado, ya que, 4 MHz son utilizados de banda de guarda (2 MHz para cada extremo) para evitar interferencias.

Respecto a las transmisiones a tierra, todos los canales pares se transmiten con polaridad vertical y todos los canales impares con polaridad horizontal. Además, para evitar interferencias, si bien se deja una banda de guarda total de 4 MHz por cada segmento, se desplaza el centro de canal en 20 MHz entre cada uno de ellos.



¿Cómo está compuesto un transponder? Este dispositivo está compuesto por un filtro pasa bandas (Band Pass Filter - BPF), el cual se encarga de limpiar de ruido la señal adquirida en el enlace ascendente (estación terrena hacia el satélite) y además permite seleccionar un canal particular (40 MHz). Luego tiene un amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplifier - LNA) que permite amplificar mayor cantidad de señal, introduciendo la menor cantidad de ruido y distorsión, mejorando en gran cantidad la relación señal a ruido y un desplazador de frecuencia, cuya función consiste en desplazar en frecuencia las señales recibidas por el enlace uplink en las bandas altas, a otro rango de frecuencias más bajas para el enlace downlink. ¿Por qué el desplazamiento en frecuencia? Porque el satélite tiene que optimizar el uso de energía al transmitir. La razón de utilizar un rango de frecuencias menor, es que la atenuación está en función del cuadrado de la distancia y la frecuencia. Por lo tanto, si utiliza un rango de frecuencias menor, el satélite tiene que amplificar poco las señales transmitidas ya que son más robustas frente a la atenuación proporcionada por propagación en el espacio libre. En definitiva, El satélite no necesita un amplificador de alta potencia como en estación terrena, amplifica, pero no tanto. Por ende, la última etapa, luego del convertidor de frecuencias, está conformada por un amplificador y filtro pasa banda de salida.



¿Cómo está compuesta la estación terrena? La estación terrena como se comentó anteriormente, consiste en un lugar físico donde se concentra todo el equipamiento necesario para realizar la transmisión de información al satélite, así como también la recepción de información por parte del mismo. Es decir, que es esperable la presencia de dos sistemas funcionando en simultaneo dentro de una estación terrena. **Un sistema transmisor y un sistema receptor.** A nivel general, ambos sistemas poseen 4 etapas o segmentos. El primero de ellos, para el caso de la transmisión consiste en modulador de frecuencia intermedia (FM, PSK, QAM, etc.) y para el caso de la recepción consiste en un demodulador de frecuencia intermedia. ¿Qué significa esto de “frecuencia intermedia”? Que las modulaciones y demodulaciones como proceso, van acompañados de convertidores de frecuencia. En el caso de la transmisión, primero se le otorga a la información las características espectrales necesarias de acuerdo al proceso de modulación implementado, pero en una región espectral fácil de procesar (bajas frecuencias). En el caso de la recepción, las señales en frecuencia intermedia que han atravesado todo el proceso de recepción, ya son aptas para ser procesadas fácilmente, por lo tanto, se aplica un demodulador de frecuencia intermedia apropiado.

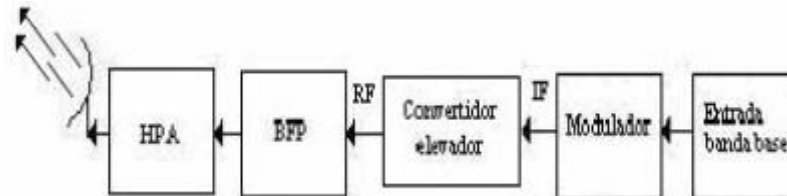
La segunda etapa, consiste en el caso del transmisor, de un convertidor de frecuencias (elevador) cuya finalidad es transformar señales en frecuencias intermedias a la salida del modulador en señales de RF (microondas), de manera tal que a través de un medio de conducción (guía de onda) lleguen a la antena transmisora. En el caso de la recepción, también se aplica un convertidor de frecuencias (decrementador) para transformar las señales de RF (microondas) en señales de frecuencia intermedia fáciles de procesar por el demodulador de la primera etapa.

La tercera etapa, en el caso del transmisor, consiste en un filtro pasa bandas para eliminar las componentes en frecuencia fuera de banda que pueden perjudicar otras comunicaciones, comúnmente definidas como componentes espurias. En el caso de la recepción, en esta etapa se aplica un Amplificador de bajo Ruido (LNA) para levantar los niveles de la señal RF sin introducir mucho ruido y distorsiones. Por último, en la cuarta etapa, el transmisor aplica un amplificador de alta potencia y el receptor aplica un filtro pasa bandas de recepción para captar la señal RF con la menor cantidad de ruido posible.

No queda claro el análisis, pero es porque se piensa tanto a la transmisión como a la recepción, de derecha a izquierda y eso solo ocurre en la transmisión. El orden lógico para pensar la recepción, es de izquierda a derecha, en función de cómo ocurren los eventos, desde que se recibe la señal RF hasta que se la demodula.

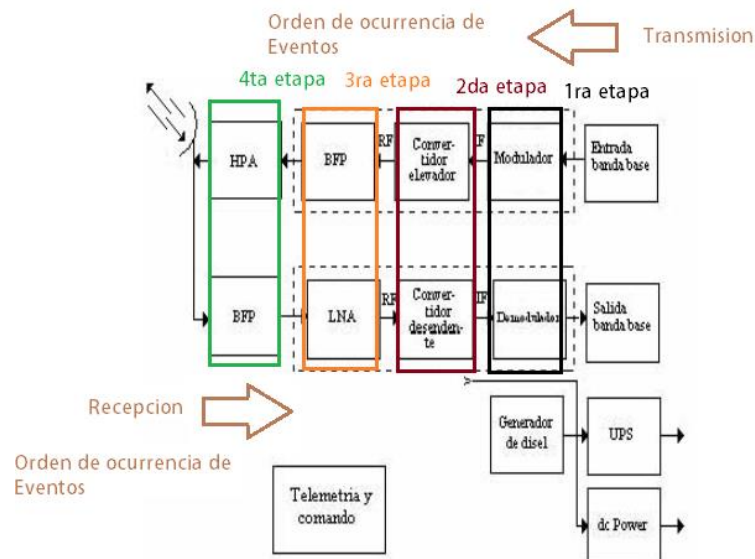
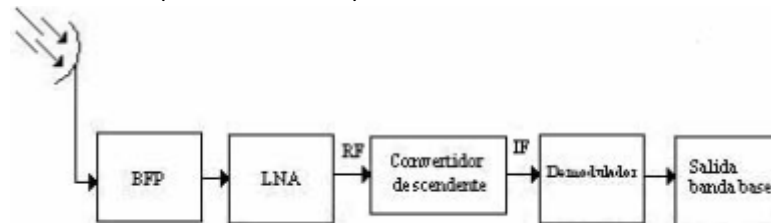
Transmisión en orden lógico:

- Modulador de FI → Convertidor de frecuencias (elevador) → Filtro pasa banda (BPF) → Amplificador de alta potencia (HPA)



Recepción en orden lógico:

- Filtro pasa banda (BPF) → Amplificador de bajo Ruido (LNA) → Convertidor de frecuencia intermedia (decrementador) → Demodulador de FI.





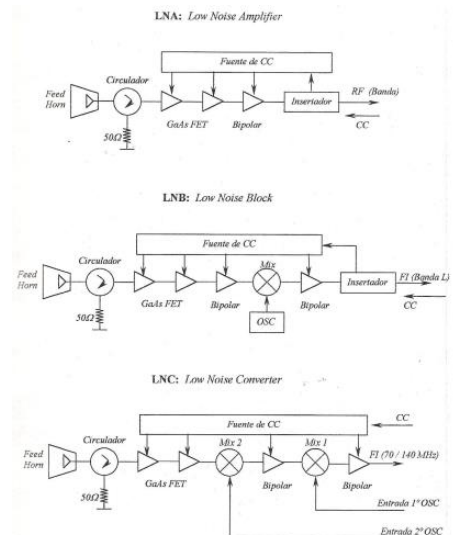
Es importante resaltar que el filtro pasa banda de recepción y el amplificador de bajo ruido (LNA) están directamente implementados en la electrónica del foco.

Existen tres equipos que pueden ser implementados:

- LNA (Low Noise Amplifier)
- LNB (Low Noise Block)
- LNC (Low Noise Converter)

Todos ellos, poseen los siguientes elementos comunes:

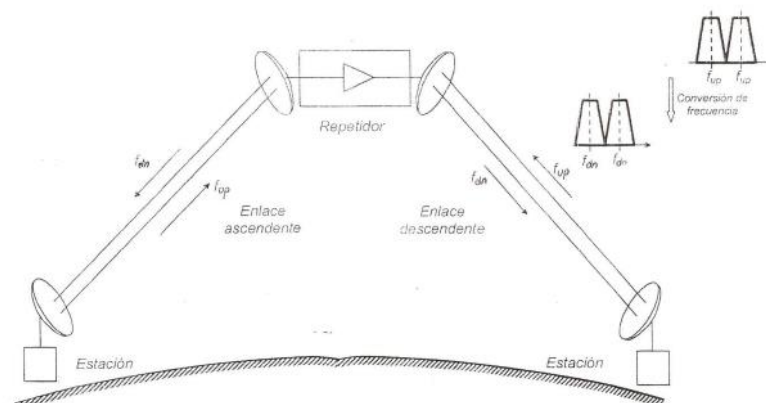
- “circulador de microondas”, Básicamente es un filtro pasa bandas, cuyo objetivo es separar las portadoras con filtros sintonizados en 36 MHz.
- “GaAs FET”, son los amplificadores de bajo ruido (LNA).
- “insertador”, son los equipos que permiten el correcto funcionamiento de la fuente CC que alimenta los amplificadores de bajo ruido (LNA.)



¿Qué diferencia un equipo de otro? ¿Por qué hay tres? **Porque el dispositivo definido solo como LNA, no convierte a otra frecuencia la señal receptada, en cambio, el resto de equipos sí.**

En el caso del LNA, si la señal era captada en la banda de 3,7 a 4,2 GHz (500 MHz de Ancho de Banda), los canales siguen en esas mismas frecuencias, por lo que su utilidad es amplificar la señal (ya de por si baja) para que no baje aún más al recorrer el cable hasta el equipamiento indoor. El LNB además incluye un convertidor de frecuencias (decrementador) fijo que permite llevar todo el contenido espectral a frecuencias intermedias. De esta manera, los medios de conducción utilizados para acceder al equipamiento indoor pueden tener atenuaciones mayores. El LNC incluye dos convertidores de frecuencia (decrementadores) con osciladores variables, en lugar de uno fijo como presentaba el LNB. Los osciladores del LNC pueden ser controlados desde el equipo en Indoor y permite utilizar cable coaxil a su salida.

Al caracterizar como están compuestas las estaciones terrestres y los satélites. Podemos modelar los sistemas satelitales a partir de un **enlace de subida** que ira desde la estación terrena transmisora hasta el satélite, un **enlace de bajada** que ira desde el satélite hasta la estación terrena receptora y una etapa propia en el satélite, definida como **repetidor**, que consiste en amplificar lo mejor posible las señales recibidas y cambiarlas de frecuencias para retransmitirlas en el enlace downlink.



*Detalle: Los enlaces siempre son caracterizados desde las estaciones terrenas.*

Lo que nos interesa a nosotros como ingenieros en telecomunicaciones es caracterizar la calidad de un sistema satelital. Básicamente, para saber si estamos cumpliendo con las exigencias de disponibilidad y calidad requerida por los diversos usuarios. ¿Qué significa esto? Que se debe garantizar que el enlace permanece funcional durante determinada cantidad de tiempo al año y con determinada probabilidad de error de bit. Hay que tener en cuenta que hoy en día, todas las comunicaciones son por lo general digitales. Así que es costumbre escuchar requerimientos de probabilidad de error de bit (BER). Sin embargo, primero se caracteriza al enlace en función de la relación portadora a ruido tanto en el enlace de subida como de bajada para calcular la calidad total del sistema como combinación de estas dos y luego, se aplica una relación para transformarla a energía de bit dada densidad espectral de ruido. Este último dato es útil, ya que permite determinar la probabilidad de error de bit a partir de la curva (Pb vs Eb/No) generada para la técnica de modulación y codificación implementadas.

En definitiva, ¿Qué buscamos obtener?

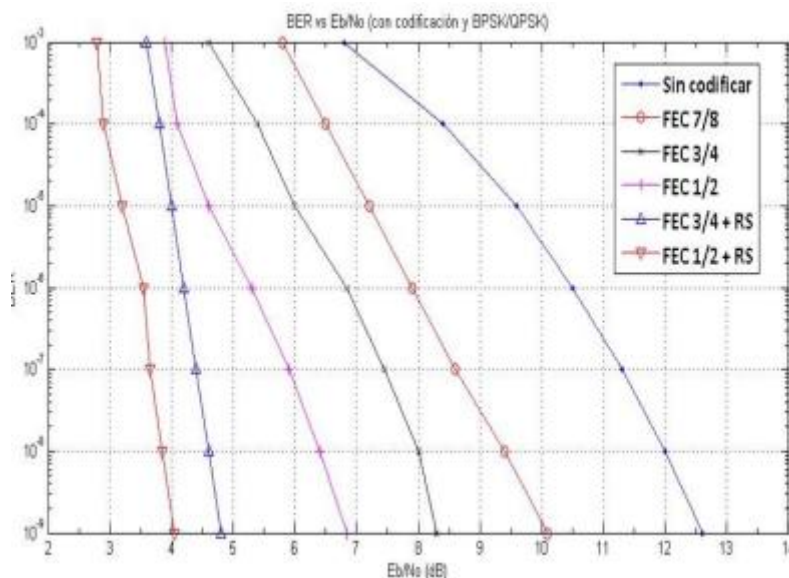
$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{sist.} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N_o}\right)_{up}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_o}\right)_{dn}}}$$

Donde el parámetro “C/No” nos indica la potencia de portadora recibida junto con sus bandas laterales (C), en relación a la densidad espectral de potencia de ruido (No) presente en un ancho de banda de un Hertz.

Para poder traducirlo en:

$$\left(\frac{Eb}{No}\right)_{sist.} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{Eb}{No}\right)_{up}} + \frac{1}{\left(\frac{Eb}{No}\right)_{dn}}}$$

Una vez que obtenemos la energía de bit dada la densidad espectral de potencia de ruido “No”, utilizamos la siguiente tabla para saber la probabilidad de error de bit (BER).



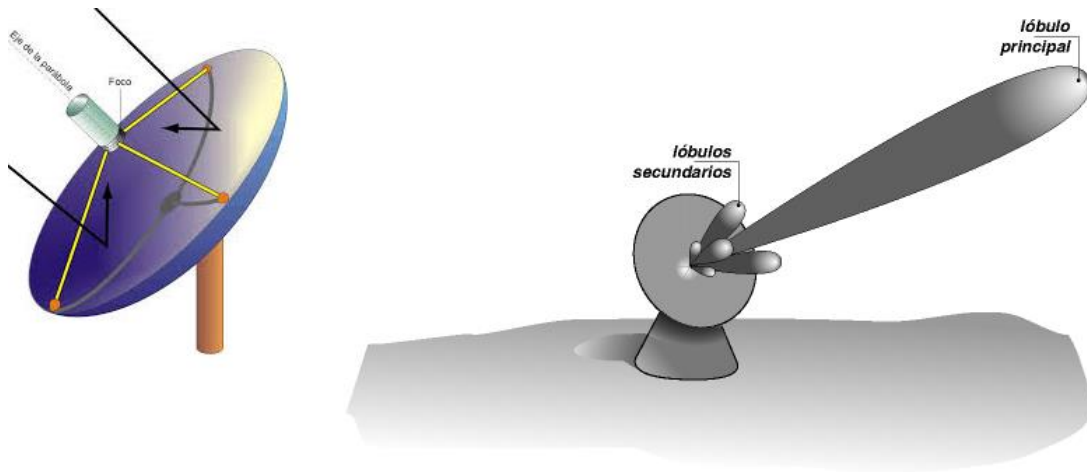
También, podemos establecer BER y calcular  $E_b/N_0$  necesaria, o establecer la  $E_b/N_0$  del sistema y calcular la BER que tiene. En todo caso, podemos querer calcular varias cosas según los datos que se dispongan.

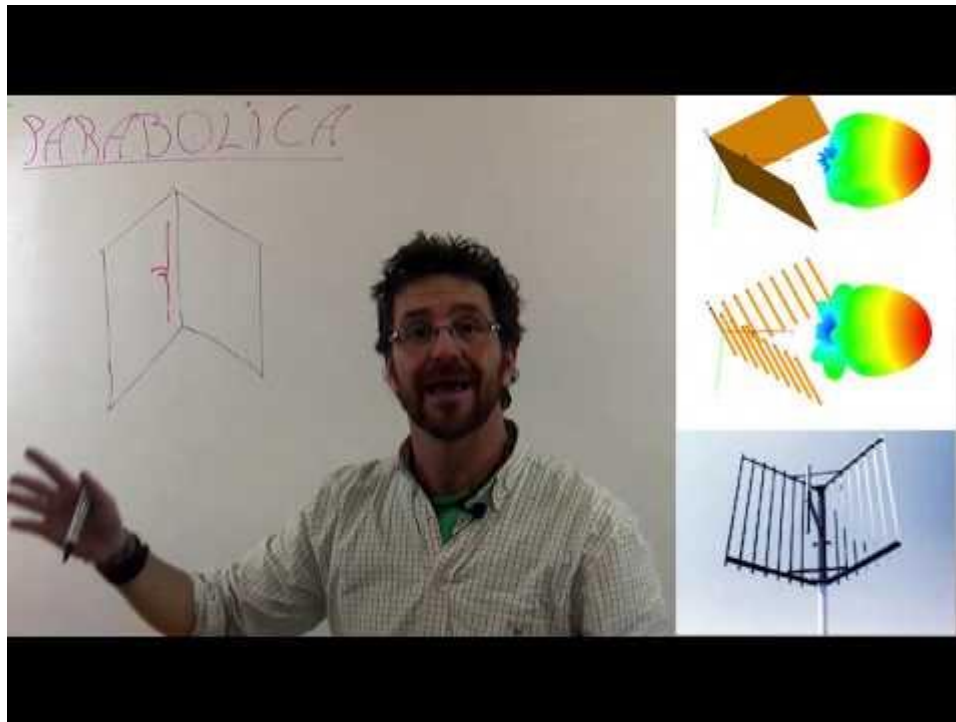
El calcular la relación portadora a ruido del sistema, implica calcular y conocer como es caracterizado el enlace de subida y el enlace de bajada.

Para calcular la relación portadora a ruido que es captada por la antena receptora del satélite en el enlace de subida, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

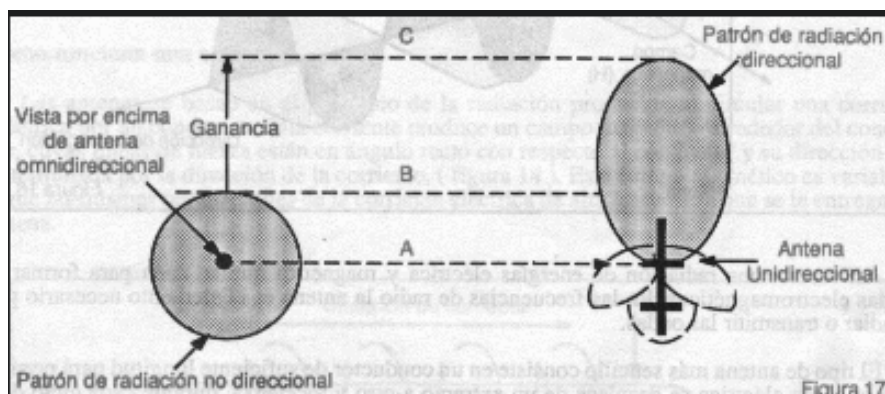
- *Estos parámetros refuerzan el enlace, incrementan los niveles de portadora "C" (potencia recibida). Por lo tanto, son muy importantes para construir un buen enlace.*
  - **Tipo de antena a utilizar en transmisor "ET" (Ganancia, directividad, diagrama de radiación)**
    - Parámetro en ecuación que lo representa:  $G_{Tx}$ .
  - **Potencia utilizada por el transmisor**
    - Parámetro en ecuación que lo representa:  $P_{Tx}$ .
  - **Tipo de antena a utilizar en receptor "Satelite" (Ganancia, directividad, diagrama de radiación)**
    - Parámetro en ecuación que lo representa:  $G_{Rx}$ .

Vemos que básicamente la manera de mejorar el enlace de subida es elegir buenas antenas (muy directiva, mucha ganancia) porque la distancia que debe recorrer la señal RF desde la estación terrena al satélite es muy grande. Además, debe poseer un diagrama de radiación con lóbulo laterales pequeños, para no interferir otros satélites GEO en sectores espaciales adyacentes y un ancho de lóbulo principal lo suficientemente grande para lograr un apuntamiento sencillo pero preciso. De esta manera se eligen preferentemente **antenas parabólicas**.





Estas antenas poseen una ganancia elevada. ¿Qué es la ganancia de una antena? Básicamente es un parámetro que nos compara la potencia radiada de una determinada antena en una dirección en particular, respecto a la potencia radiada por una antena isotrópica en la misma dirección. **Considerando la misma potencia transmitida para ambas.**



Cuando se habla de ganancia indirectamente se habla del concepto de directividad, que nos indica la capacidad de una antena de concentrar la potencia en una dirección específica. La dirección en la cual ocurre la máxima concentración de potencia es utilizada para calcular la ganancia.



$$G_A = \eta \left( \frac{\pi D f}{c} \right)^2$$

Para calcular la ganancia son importantes parámetros como: frecuencia de operación, diámetro de la antena (reflector), eficiencia ¿Qué es la eficiencia de una antena? parámetro que indica la relación entre la cantidad de energía incidente que puede ser captada y la efectivamente concentrada en el foco. Este concepto se asocia a la recepción, pero puede plantearse para la transmisión, como la relación entre la potencia radiada y la entregada a la antena. **Es lo que diferencia una antena de una tostadora cuando se le entrega determinada potencia.**

- *Parámetros que deterioran el enlace, es decir, deterioran la potencia de la señal recibida (atenuaciones) ó aportan ruido, como el LNA y medios de conducción presentes en el satélite. Hay que tener mucho ojo de donde se calcula la relación portadora a ruido en el satélite para entender que atenuaciones y ruidos forman parte del enlace ascendente.*

- **Temperatura equivalente de ruido que aportan los diferentes elementos en la recepción (Antena, amplificadores de bajo ruido, cables y demás).**
  - Parámetro en ecuación que lo representa: "Te"

**La temperatura equivalente de ruido** es una forma de caracterizar el ruido introducido por un determinado dispositivo. No es una variable física como tal, es un concepto teórico "abstracto" que denomina la temperatura equivalente que podría producir la misma cantidad de potencia de ruido como se puede ver. Hay que Tener en cuenta que esta temperatura de ruido equivalente, a menudo designada como TEQ, no indica la temperatura real de un amplificador como si se tratara de medir con un termómetro. ¿Por qué se utiliza? Porque permite simplificar muchas ecuaciones la mayoría de las veces. Es muy utilizado en sistemas de radio, radar y sistemas RF centrados en el espacio que operan a cientos de megahertz (MHz), y decenas de gigahercios (GHz). Este concepto también puede utilizarse para las antenas, ya que estas, además de captar señales útiles, captan ruido (señales indeseadas).

**La temperatura de ruido de la antena es la temperatura de una hipotética resistencia en la entrada de un receptor ideal, libre de ruido que podría generar la misma potencia de ruido de**

salida por unidad de ancho de banda, como el de la salida de antena con una frecuencia especificada.

De esta manera, podemos utilizar dicho parámetro en la relación “potencia de portadora recibida a densidad espectral de potencia de ruido” (C/No) a la salida de la antena receptora.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{ANT} = \frac{C}{KT_{ANT}}$$

A medida que añadimos etapas luego de la antena, hay que irle agregando a la temperatura de ésta,  $T_{ANT}$ , la temperatura equivalente  $T_e$  de la combinación de las etapas.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{out} = \frac{C}{K(T_{ANT} + T_e)} \quad \text{La unidad es veces por Hz}$$

Hay que tener en cuenta que no da lo mismo el orden de dichas etapas. Por ejemplo, acá vemos una situación donde se analiza cómo cambia la “ $T_e$ ” si luego de la antena ponemos un LNA y luego salimos al cable, o si va un cable seguido del LNA. En el segundo caso, el LNA amplificará también el ruido metido por el cable. Vemos que el resultado depende de qué valores de atenuación de cable y figura de ruido LNA se tengan.

Antena → LNA en el foco → cable

$$T_e = T_{AMB}(F_{LNA} - 1) + \frac{T_{AMB}}{G_{LNA}}(L_{CAB} - 1) \quad \left(\frac{C}{N_0}\right)_{out} = \frac{C}{K\left(T_{ANT} + T_{LNA} + \frac{T_{CAB}}{G_{LNA}}\right)}$$

Antena → cable → LNA

$$T_e = T_{AMB}(L_{CAB} - 1) + T_{AMB}(F_{LNA} - 1) \quad \left(\frac{C}{N_0}\right)_{out} = \frac{C}{K(T_{ANT} + T_{CAB} + T_{LNA}L_{CAB})}$$

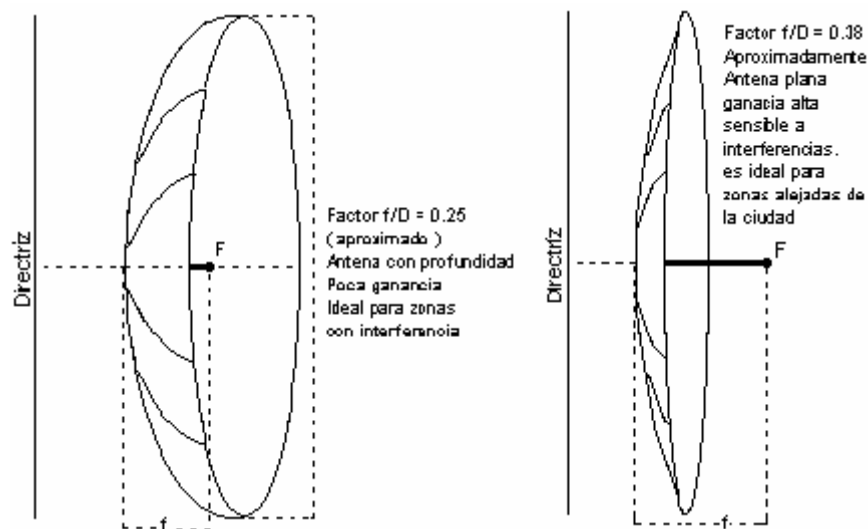
En conclusión, tenemos que considerar todos los dispositivos involucrados en la recepción y obtener la temperatura equivalente de ruido “ $T_e$ ” de la combinación de todos ellos.

Por otro lado, existe una figura de mérito muy útil denominada “relación ganancia a temperatura equivalente de ruido”, que permite demostrar la calidad de una antena receptora. Este parámetro, cuya ecuación se expresa como:

$$\frac{G}{T_e} = \frac{G_{A(Rx)}}{T_{A(Rx)}}$$

está relacionado, entre muchas otras cosas adicionales, con la relación foco/diámetro de la antena receptora. Si la relación f/D es pequeña, significa que el foco está cerca de la parábola en relación con el tamaño de esta. Esto es bueno porque el ruido que se capta por los bordes de la parábola es mínimo. Sin embargo, un iluminador (foco) metido dentro de la parábola debe estar muy bien diseñado para poder emitir con gran apertura y aprovechar toda la superficie del reflector (parábola). Si esto es posible la ganancia está relacionada con el diámetro y la eficiencia es buena. En caso contrario, la eficiencia disminuye y la ganancia también.





Por último, para no aburrir más con este parámetro, podemos mencionar que, para una antena, la temperatura equivalente de ruido está relacionada con el tamaño de la misma y su ángulo de elevación. Si apuntamos a la tierra, la temperatura equivalente de ruido captada será increíblemente alta, en comparación a la que se capta con un ángulo de 90 grados, prácticamente apuntando al cielo.

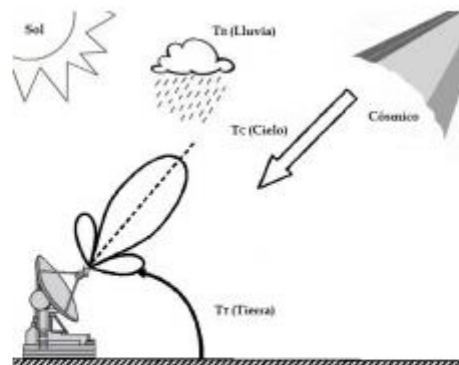
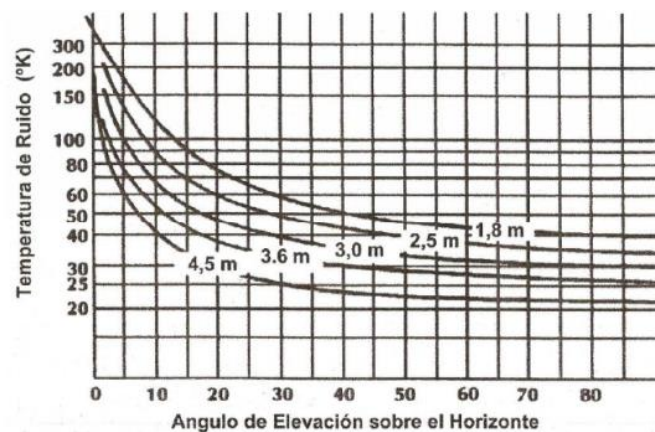


Figura 5.7: Contribuyentes de la temperatura de ruido de la antena en la estación terrena.



Cuando el análisis es en el foco de la antena sin considerar la etapa de LNA se aplica directamente G/T. Si en cambio, el análisis es en la etapa posterior al amplificador de bajo ruido LNA, se debe considerar la ganancia de LNA y temperatura equivalente de ruido “Te” del LNA.

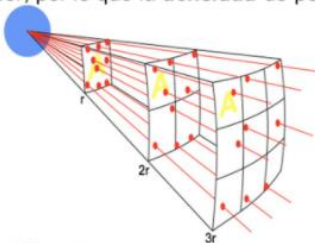
$$\frac{G}{T_e} = \frac{G_{A(Rx)} \cdot G_{LNA}}{T_{A(Rx)} + T_e}$$

○ **Perdidas de propagación en espacio libre**

- Parámetro en ecuación que lo representa: “Lp”

Las Pérdidas por Propagación en el Espacio Libre Lp, se refieren a que la energía se reparte mientras la señal se propaga alejándose de la fuente, por lo que se produce una menor densidad de potencia a mayor distancia para un punto en particular.

- La potencia de la señal se reduce por el ensanchamiento del frente de onda en lo que se conoce como **Pérdida en el Espacio Libre**.
- La potencia de la señal se distribuye sobre un frente de onda de área cada vez mayor a medida que nos alejamos del transmisor, por lo que la **densidad** de potencia disminuye.



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

siendo  $L_p$  = pérdida en trayectoria por el espacio libre (adimensional)  
 $D$  = distancia (kilómetros)  
 $f$  = frecuencia (hertz)  
 $\lambda$  = longitud de onda (metros)  
 $c$  = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 \times 10^8$  metros por segundo)

○ **Perdidas de propagación por condiciones climáticas (Gases)**

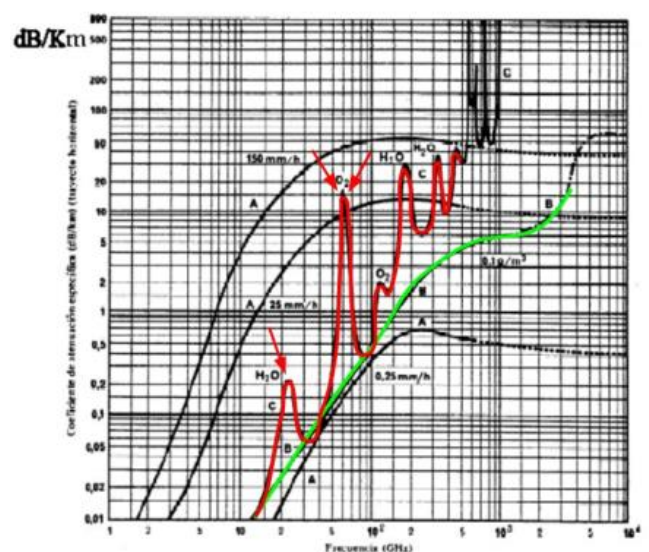
- Parámetro en ecuación que lo representa: “Lg”

La pérdida de propagación por la presencia de gases en la atmosfera hace referencia a los efectos de **absorción de energía** de la onda de radio por efectos de resonancia en moléculas de vapor y oxígenos. Básicamente, las perdidas “Lg”, se obtiene de calcular el índice de atenuación  $\alpha_{gas}$  de la curva C presentada en la siguiente figura, a partir de la frecuencia de operación, para luego multiplicar por la distancia asociada al enlace que se encuentra presente en la atmosfera.

$$L_g(dB) = \alpha_{gas} \cdot d_{atm}$$

$d_{atm}$  se obtiene por trigonometría usando la altura de la atmósfera (10 km sobre el nivel del mar) y el seno del ángulo de elevación (E). Al nivel del mar nos queda:

$$d_{atm} = \frac{10 \text{ km}}{\sin(E)}$$



A - Atenuación Específica de la Lluvia  
 B - Atenuación Específica de la niebla  
 C - Atenuación por componentes gaseosos

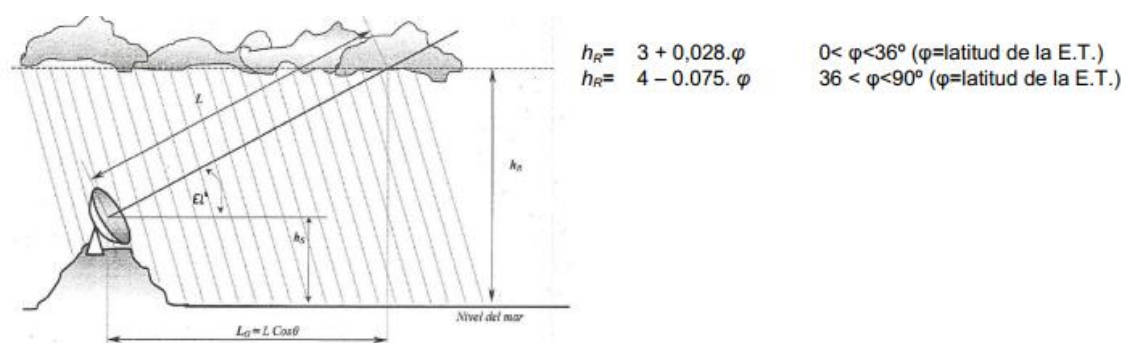




- **Perdidas de propagación por condiciones climáticas (Lluvia – hidrometeoros)**
  - Parámetro en ecuación que lo representa: “La”

Uno podría preguntarse... ¿Cómo es que los diferentes gases, lluvias, granizos, nieve puede afectar a la propagación de la forma de onda? Estos efectos comienzan a tener importancia cuando las frecuencias de operación son mayores a 1 GHz. En esta situación, las longitudes de onda de las señales electromagnéticas son tan pequeñas que pasan a ser en el orden de las diferentes moléculas presentes en la atmosfera. Generando mayores atenuaciones mientras mayores sean las frecuencias de operación. Para el caso de la lluvia, Se le conoce como atenuación por hidrometeoros, “La”, a cualquier disminución de la señal provocada por agua, ya sea lluvia, granizo o nieve. La lluvia empieza a causar disminución de potencia a partir de frecuencias mayores de 3 GHz, esto ocurre debido a efectos de **refracción y dispersión**. Mientras la longitud de onda  $\lambda$  sea cada vez más pequeña y del orden de la gota de lluvia, más atenuación aparecerá.

Dependiendo de la región geográfica donde se encuentre la estación terrena, la atenuación por lluvia puede ser menor o mayor, esto se basa en las estadísticas de intensidad de lluvia, tamaño de gota y presión atmosférica.



Depende de un coeficiente de atenuación específica y la distancia sobre el radioenlace hasta las nubes, pero es más complejo que el caso anterior.

$$La_p(dB) = \gamma_{Rp} \cdot L$$

Donde L es la distancia hasta las nubes sobre el radioenlace, para ángulos de elevación mayores a 10 grados puede ser:

$$L = \frac{h_R - h_s}{\text{sen}(E)}$$

La ecuación general es más compleja:

$$L = \frac{2(h_R - h_s)}{\sqrt{\text{sen}(E)^2 + \frac{(h_R - h_s)}{4250} + \text{sen}(E)}}$$

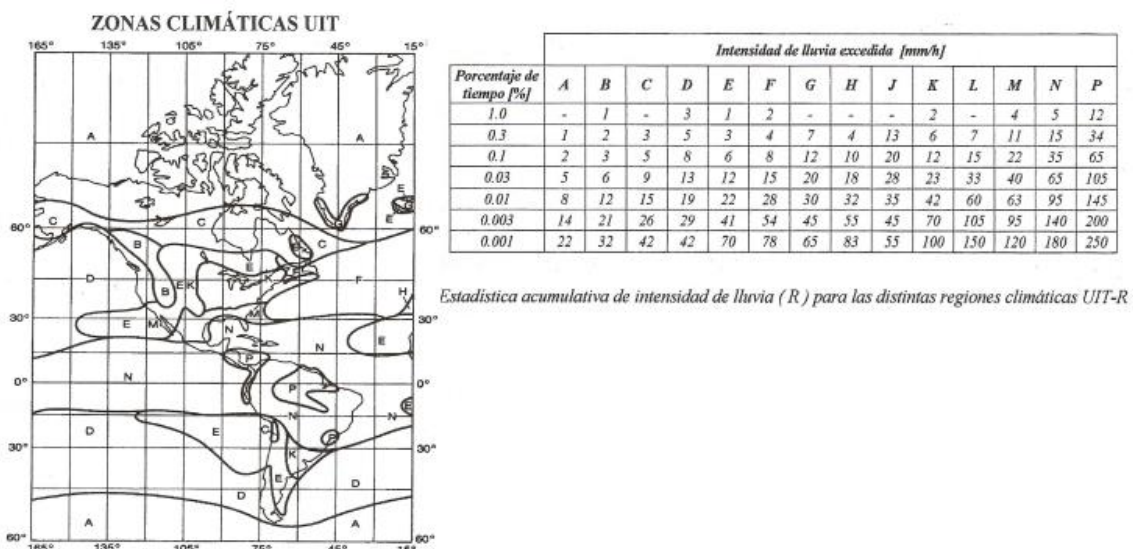
El coeficiente  $\gamma$  debe calcularse conociendo un número que indica la intensidad de precipitaciones que afectará negativamente a nuestro enlace ( $R_p$ ), el cual puede extraerse de una tabla como la de más abajo, y para eso necesitamos saber dos cosas:

- El área geográfica de trabajo
- El porcentaje de tiempo de exceso que deseamos

Esto último es el  $p$  que acompaña a la definición de la atenuación  $La_p$ . Se define como el porcentaje de tiempo durante el cual la intensidad de las precipitaciones excederá la cantidad fijada. Cuando se exceda, se toma como que el radioenlace no estará disponible, por lo que termina siendo un **indicador de disponibilidad**. Suele tomarse un  $p$  de 0.01%, indicando una disponibilidad del 99.9%. Por ejemplo, durante un año el enlace no funcionará durante un total de 53 minutos (repartidos).

Por ejemplo, un  $R_p$  0.01 de 25 mm/hr indica que un 0.01% del tiempo total, las precipitaciones serán mayores a ese número, 25 mm/hr. **Primero elegimos la disponibilidad (0.01 siempre) y luego buscamos los mm/hr.**

Con el mapa y la tabla de estadísticas correspondientes, buscamos nuestra zona (en el apunte elegimos la E), y luego los porcentajes de tiempo de exceso para ella. De esos valores elegimos el que tenga un porcentaje de exceso que resulte en la disponibilidad deseada (pongamos 99.9%, osea 0.01%), y ahí tenemos el  $R_p$ . En nuestro caso de ejemplo,  $R_{0.01} = 22$ .



Si  $R_p$  es un número redondo, quizá podamos encontrar el coeficiente  $\gamma$  en la gráfica de más arriba, sobre la curva A (negra) correspondiente. Ahí vemos que están las curvas para  $R_p$  de 0.25, 25 y 150 mm/hr para las diferentes frecuencias de trabajo. Si no es el caso, se calcula  $\gamma$  con otros dos valores,  $K$  y  $b$ , cuyos valores dependen de la frecuencia de trabajo:

$K = 4,21 \times 10^{-5} \cdot f^{2,42}$	si $2,9 < f < 54 \text{GHz}$	$b = 1,41 \cdot f^{-0,0779}$	si $8,5 < f < 25 \text{GHz}$
$K = 4,09 \times 10^{-2} \cdot f^{0,699}$	si $54 < f < 180 \text{GHz}$	$b = 2,63 \cdot f^{-0,272}$	si $25 < f < 164 \text{GHz}$

Los valores de  $f$  usados deberán estar en GHz.

Y listo, con eso calculamos  $\gamma$  y con  $L$  ya calculado podemos sacar la atenuación. Nótese que  $\gamma$  está en dB/km.

$$\gamma_{R0,01} = K \cdot (R_{0,01})^b$$

La atenuación se calcula entonces como:

$$La_p(\text{dB}) = \gamma_{Rp} \cdot L$$

La atenuación por lluvia variará si se consideran otros porcentajes distintos al 0,01%, ya que el tiempo que la lluvia excede los mm/hr considerados puede ser mayor o menor a los 53 minutos anuales. Esto se ve reflejado en la siguiente ecuación:

$$La_p(\text{dB}) = 0,12 \cdot La_{0,01} \cdot p^{-(0,546 + 0,043 \log(p))}$$

Válida para valores de  $p$  entre 0,001% y 1%. En esta última ecuación  $p$  esta dado directamente en porcentaje, por lo tanto, si es el caso de 1%, utilizar directamente 1.

- **Perdida por reducción (Backoff)**
  - Parámetro en ecuación que lo representa: “IBO” y “OBO”

Como los amplificadores de potencia de los satélites son no lineales, se debe intentar operar en la zona lineal y no alcanzar el punto de saturación. **Para poder reducir la cantidad de distorsión por intermodulación, es necesario reducir la potencia de entrada unos cuantos decibels, desde la saturación, para que el amplificador trabaje en una región más lineal.**

Para esto, quizá la potencia tenga que atenuarse a la entrada, ósea agregar un “Backoff” (echarse para atrás) de entrada, IBO. Esto tendrá un efecto a la salida, el Backoff de salida OBO. Ambas pueden tomarse como pérdida o detrimento del enlace, IBO para uplink, OBO para downlink.

Con esto, cerramos todos los parámetros que afectan a un enlace satelital. En resumen:

- Fortalece el enlace:
  - **PIRE** - combinación entre potencia de transmisión y ganancia de antena transmisora.
    - $\text{PIRE} = P_{tx} \cdot G_{tx}$
  - **Grx** - ganancia de antena receptora)
- Deteriora el enlace:
  - **K** - constante de boltzmann.
  - Ruido del enlace.
    - **290 K** - Temperatura ambiente (290 grados Kelvin)
    - **Te** - Temperatura equivalente de ruido de los equipos
  - **Lp** – Atenuaciones por propagación en espacio libre.
  - **La** – Atenuación por lluvia.
  - **Lg** – Atenuaciones por gases.
  - **L(backoff)** – Atenuaciones del tipo backoff (IBO uplink, OBO downlink)

La ecuación que caracteriza el enlace ascendente, calcula la relación potencia de portadora recibida en función de la densidad espectral de potencia de ruido, en el satélite de la siguiente manera:

### Uplink (ET → Satélite)

$$\left( \frac{C}{No} \right)_{up} = \frac{PIRE_{up} \cdot G_{RXup}}{K \cdot T_{upT+Te} \cdot L_{TOTup}} = \frac{P_{TXup} \cdot G_{TXup} \cdot G_{RXup}}{K \cdot (290^\circ K + Te_K) \cdot Lp_{up} \cdot La_{up} \cdot Lg_{up} \cdot L_{OBO}} \quad (\text{en Hz})$$

La ecuación que caracteriza el enlace descendente, calcula la relación potencia de portadora recibida en función de la densidad espectral de potencia de ruido, en la estación terrena receptora de la siguiente manera:

### Downlink (Satélite → ET)

$$\left( \frac{C}{No} \right)_{dn} = \frac{PIRE_{dn} \cdot G_{RXdn}}{K \cdot T_{dnT+Te} \cdot L_{TOTdn}} = \frac{P_{TXdn} \cdot G_{TXdn} \cdot G_{RXdn}}{K \cdot (T_{RX+K} + Te_K) \cdot Lp_{dn} \cdot La_{dn} \cdot Lg_{dn} \cdot L_{OBO}} \quad (\text{en Hz})$$

Ojo, esto nos indica que en enlace downlink, conceptos como PIRE están asociados a potencia transmitida por el satélite.